

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“Escenarios de Cambio Climático y su aplicación en el cultivo de
trigo en el valle de Mexicali B.C”**

TESIS

**Para obtener el grado de:
Doctor en Ciencias**

PRESENTA

Adriana Camargo Bravo

Director

Dr. O. Rafael García Cueto

Mexicali, B. C., Septiembre del 2012

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
Índice general	i
Lista de tablas	iv
Lista de figuras	vi
Resumen	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 La necesidad de regionalizar para los estudios de adaptación	2
1.2 Justificación	4
1.3 Hipótesis	5
1.4 Objetivos	5
<i>1.4.1. Objetivo General</i>	5
<i>1.4.2. Objetivos Particulares</i>	5
1.5 Estructura de la tesis	7
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	9
2.1 Tendencias del clima global	9
<i>2.1.1 Tendencias de la temperatura</i>	12
<i>2.1.2 Cambios en las precipitaciones</i>	12
<i>2.1.3 Cambios en la capa de nieve y hielo</i>	12
<i>2.1.4 Cambios en el nivel del mar</i>	13
<i>2.1.5 Cambios en la circulación atmosférica y oceánica</i>	14
<i>2.1.6 Fenómenos meteorológicos extremos</i>	14
2.2 Escenarios de cambio climático para el clima global	15
2.3 Impactos del cambio climático en la agricultura	17
2.4 Tendencias del clima en México	18
<i>2.4.1 Temperatura</i>	18
<i>2.4.2 Precipitación</i>	20
2.5 Cambio Climático en México	22
<i>2.5.1 Aspectos de modelación</i>	22
<i>2.5.2 Escenarios de cambio climático</i>	25
2.6 Cambio climático en Baja California	26
2.7 Cambio climático y la agricultura en México	27
	28
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO	
3.1 Del desarrollo económico al cambio climático	28
3.2 Evolución del sistema climático	29
3.3 Componentes del sistema climático	29
3.4 Clima, tiempo atmosférico y variabilidad climática	31
3.5 Balance radiativo de la Tierra	33
3.6 Efecto invernadero natural	35
<i>3.6.1 Gases de efecto invernadero (GEI) y forzamiento radiativo</i>	36
3.7 Calentamiento global y cambio climático	37
3.8 La modelación del sistema climático	40

3.8.1 Jerarquía de los modelos como función de la escala espacial	45
3.8.2 Modelación del cambio climático	45
3.9 Escenarios de cambio climático	49
3.9.1 Escenarios de emisiones SRES	49
3.10 Técnicas de reducción de escala	53
3.10.1 Recomendaciones para la reducción de escala espacial	55
3.10.2 Modelo SDSM	57
3.10.3 Modelo LARS WG	58
3.11 Los SIG y la Interpolación de las variables climáticas	60
3.12 Importancia del cultivo del trigo	61
3.12.1 Panorama mundial y contexto nacional	61
3.12.2 Situación en el Valle de Mexicali	63
3.12.3 Generalidades del trigo en el Valle de Mexicali	65
3.12.4 Fenología del trigo	66
3.12.5 Unidades Calor	69
CAPÍTULO 4. SITIO DE ESTUDIO	71
4.1 Sitio de estudio	71
4.1.1 Localización geográfica del Valle de Mexicali	71
4.1.2 Clima	72
4.1.3 Agua	73
4.1.4 Suelo	75
5. METODOLOGÍA	76
5.1 Información climática	76
5.1.1 Base de datos	76
5.1.2 Análisis de calidad de la información y selección de estaciones	78
5.2 Condiciones históricas de temperatura y precipitación: medias y tendencias	78
5.3 Climatología base	79
5.4 Aplicación de las técnicas estadísticas de reducción de escala	80
5.4.1 Generación de escenarios con el SDSM	80
5.4.2 Generación de escenarios con el LARS WG	86
5.5 Impacto del cambio climático sobre la fenología del cultivo del trigo	88
5.5.1 Modelo agroclimático	88
5.5.2 Fases fenológicas estudiadas	89
5.5.3 Escenario base de UCDS	89
5.5.4 Escenarios de cambio climático de UCDS	90
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	91
6.1 Información climática	91
6.2 Condiciones históricas de temperatura y precipitación: medias y tendencias	93
6.3 Climatología base	107
6.3.1 Climatología base y análisis espacial	107
6.4 Aplicación de los métodos de reducción de escala	112
6.4.1 Generación de escenarios con el SDSM	112
6.4.2 Generación de escenarios con el LARS WG	118
6.4.3 Generación de escenarios de cambio climático	122

<i>6.4.4 Escenario comparativo A2 entre el SDSM y el LARS WG</i>	125
<i>6.4.5 Análisis espacial y escenarios</i>	127
<i>6.4.6 Escenarios y tendencias</i>	135
6.5 Impacto del cambio climático sobre la fenología del cultivo del trigo	137
<i>6.5.1 Escenarios base de UCDS</i>	137
<i>6.5.2 Escenarios de cambio climático A2 Y A1B en las etapas fenológicas del trigo</i>	138
<i>6.5.3 Implicaciones de las UCDS en el impacto del cambio climático</i>	141
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	146
8. REFERENCIAS	150
9. ANEXOS	162

LISTA DE TABLAS

Tabla	Título	Página
Tabla 3.1.	Principales fuentes de los gases de efecto invernadero controlados por acuerdo del Protocolo de Kioto (elaborado por A. Camargo a partir de EPA, 2009)	38
Tabla 3.2.	Conjunto de principios de las leyes físicas de la dinámica atmosférica y oceánica que se resuelven en un modelo climático acoplado	43
Tabla 3.3.	Estimaciones de aumento en temperatura para finales del siglo XXI (°C) (Magaña, 2010)	52
Tabla 3.4.	Ventajas y desventajas de las técnicas de reducción de escala (adaptado por A. Camargo de Amador, 2009; Christensen et al., 2001)	57
Tabla 3.5.	Principales productores de trigo a nivel mundial de acuerdo al ciclo 2009-2011 (FAO, 2012)	62
Tabla 3.6.	Serie histórica de producción de trigo grano en el Valle de Mexicali (Fuente: SAGARPA. Delegación en Baja California, Subdelegación Agropecuaria, Jefatura de Fomento Agropecuario)	63
Tabla 3.7.	Estadísticas 2009 del cultivo de trigo en el Valle de Mexicali (Fuente: SAGARPA. Delegación en Baja California, Subdelegación Agropecuaria, Jefatura de Fomento Agropecuario)	64
Tabla 3.8.	Avance de producción por CADERS de primera cosecha en el Valle de Mexicali (Fuente: SAGARPA. Delegación en Baja California, Subdelegación Agropecuaria, Jefatura de Fomento Agropecuario)	65
Tabla 3.9.	Características agronómicas y uso industrial de las variedades de trigo recomendadas por el INIFAP para el Distrito de Riego 014, Río Colorado.	66
Tabla 3.10.	Del umbral térmico por etapa fenológica del trigo.	67
Tabla 5.1.	Predictores utilizados en el programa SDSM 4.2.	84
Tabla 5.2.	Correspondencia de la escala de Feekes con las etapas fenológicas de trigo seleccionadas (Soto, 2011)	89
Tabla 5.3.	Unidades Calor Después de la Siembra en el desarrollo fenológico del trigo (Soto, 2011).	90
Tabla 6.1.	Estaciones consideradas en el estudio del Valle de Mexicali.	92
Tabla 6.2.	Tendencias históricas medias de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación total de la región del Valle de Mexicali. Las letras en negrita se refieren a los valores máximos y las negritas cursivas a los valores mínimos.	93
Tabla 6.3.	Condiciones medias anuales del periodo base observado 1961-1990 para la temperatura y precipitación en el Valle de Mexicali. Para los valores medios las letras en negrita se refieren a los valores máximos y las negritas cursivas a los valores mínimos.	108
Tabla 6.4.	Ejemplo de matriz de correlación inter-variables y correlación parcial entre la precipitación total diaria observada 1961-1990 de la estación Colonia Juárez y las variables predictoras NCEP	113
Tabla 6.5	Ejemplo de varianza explicada a un nivel de significancia de 0.05, entre los datos de temperatura máxima diaria observada de la estación Bataquez y los predictores elegidos NCEP. Los números resaltados en negrita indican la variable con mayor correlación para el mismo mes	114

LISTA DE TABLAS (CONTINUACIÓN)

Tabla 6.6. Relación de los predictores que se correlacionaron adecuadamente con los predictandos temperatura máxima (+), temperatura mínima (*) y precipitación (X), de las estaciones utilizadas para el Valle de Mexicali en el periodo observado 1961-1990, aplicando el SDSM.	114
Tabla 6.7. Ejemplo de calibración del modelo obtenido entre las variables predictoras y los datos de precipitación total diaria observada de la estación Colonia Juárez y la temperatura mínima de la estación Mexicali y NCEP (1961-1980).	115
Tabla 6.8. Coeficientes de R^2 anuales promedio de la calibración del modelo obtenido entre los datos de precipitación total diaria observada, temperatura máxima y temperatura mínima de los 10 sitios de estudio y las variables predictoras NCEP (1961-1980).	115
Tabla 6.9. Comparación mensual de la temperatura mínima media, desviación estándar (sd) y distribución de los datos observados con los datos sintéticos generados con LARS WG en la estación Presa Morelos. Se muestran también los valores mensuales de probabilidad (p) calculados mediante las pruebas t, F y χ^2 , para las medias mensuales, la desviación estándar y la distribución respectivamente. Un valor p de 0.05 o inferior indica que es significativo al nivel del 5%	119
Tabla 6.10. Número de estaciones que en base a los valores de p calculados no pasan alguna de las tres pruebas estadísticas utilizadas para comparar los datos observados del periodo 1961-1990 con los datos sintéticos generados por LARS WG.	121
Tabla 6.11. Anomalías de temperatura máxima en diferencia absoluta obtenidas bajo cambio climático para la región del Valle de Mexicali, aplicando dos técnicas de reducción a escala.	124
Tabla 6.12. Anomalías de temperatura mínima en diferencia absoluta (°C) obtenidas bajo cambio climático para la región del Valle de Mexicali, aplicando dos técnicas de reducción a escala.	124
Tabla 6.13. Anomalías de precipitación en diferencia porcentual (%) obtenidas bajo cambio climático para la región del Valle de Mexicali, aplicando dos técnicas de reducción a escala.	125
Tabla 6.14. Anomalía de temperatura mínima media mensual en diferencia absoluta (°C). Las letras en <i>negrita cursiva</i> se refieren a los valores máximos.	126
Tabla 6.15. Fecha y días transcurridos de la siembra a madurez fisiológica con respecto a las Unidades Calor Después de la Siembra Acumuladas. En paréntesis se muestran los días de acortamiento que corresponden a la diferencia de días entre el escenario base simulado y el escenario generado.	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cubierta de nieve el hemisferio norte (IPCC, 2007)	9
Figura 2.2. Anomalías de la temperatura global de superficie relativas al promedio de 1951-1980 para a) medias anuales y de medias móviles cada 5 años, y b) medias móviles cada 12 meses usando datos a junio de 2010 (Tomado de Hansen <i>et al.</i> , 2010)	10
Figura 2.3. Anomalías decadales de la temperatura superficial en relación con el período base de 1951-1980 (Hansen <i>et al.</i> , 2010)	11
Figura 2.4. Proyecciones del cambio de la temperatura en superficie para el comienzo y el final del siglo XXI, respecto del período 1980-1999 (IPCC, 2007).	16
Figura 2.5. Cambios porcentuales de la precipitación relativos para el período 2090 - 2099, respecto del período 1980-1999 (IPCC, 2007).	16
Figura 2.6. Proyecciones mundiales de cambios en la producción agrícola (NASA/GISS/CIG)	17
Figura 2.7. Tendencias de la temperatura media anual (°C/100 años) en México de acuerdo con los datos del Climate Research Unit (CRU) (INE, 2009)	19
Figura 2.8. Comportamiento de la temperatura media en el territorio de México: promedio anual durante el período de 1971 a 2008 (SEMARNAT-INE, 2010)	20
Figura 2.9. Comportamiento de la temperatura máxima en el territorio de México: promedio anual durante el período de 1971 a 2008 (SEMARNAT-INE, 2010)	20
Figura 2.10. Comportamiento de la temperatura mínima en el territorio de México: promedio anual durante el período de 1971 a 2008 (SEMARNAT-INE, 2010).	21
Figura 2.11. Tendencias de la precipitación media anual (mm/100 años) en México de acuerdo con los datos del Climate Research Unit (CRU) (INE, 2009)	21
Figura 2.12. Proyecciones de cambio climático respecto al periodo 1971-1999, aplicando el Modelo de Circulación General Acoplado Océano-Atmosfera (MCGOA) HADCM3 para el periodo 2040-2069 bajo el escenario de emisiones A2 (a) cambio de temperatura anual superficial (°C) con el MCGOA, (b) cambio de temperatura anual superficial (°C), aplicando la reducción de escala y la CPT, (c) cambio de precipitación (%) con el MCGOA, y (d) cambio de precipitación (%), aplicando la reducción de escala y la CPT	24
Figura 2.13. Proyecciones de los cambios de la temperatura media anual (°C) para el estado de Baja California con reducción de escala espacial a partir de un Modelo-Multiensable de 6 MCG	26
Figura 2.14. Proyecciones de los cambios del porcentaje de precipitación anual (%) para el estado de Baja California con reducción de escala espacial a partir de un Modelo-Multiensable de 6 MCG	26
Figura 2.15. Superficie potencialmente apta para el cultivo de maíz de temporal. Escenario actual (Gay, 2000).	27

ÍNDICE DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura 2.16. Áreas con cambio en la aptitud para el cultivo de maíz de temporal. Escenario que supone aumentos de temperatura desde 2° C (sur) hasta 4°C (norte) (Gay, 2000).	27
Figura 3.1. El sistema climático de la Tierra y la interacción de sus componentes (Adaptado por A. Camargo, del original de Ruddiman, 2008)	30
Figura 3.2. Balance radiativo de la Tierra (traducido por Aguirre, 2010; tomado de IPCC, 2007)	34
Figura 3.3. Efecto invernadero (Adaptada por A. Camargo del IPCC, 2007)	35
Figura 3.4. Concentraciones de los gases de efecto invernadero de los últimos 2000 años , (Adaptada por N. Santillán, a partir de IPCC, 2007)	36
Figura 3.5. Valores de forzamiento radiativo (FR) del año 2005 relativos a las condiciones del periodo preindustrial definidas en 1750 y se expresan en Watts por metro cuadrado (W/m ²) (IPCC, 2007)	39
Figura 3.6. Constituyentes del clima y su interacción, como factores que motivan el cambio climático (Adaptada por A. Camargo del IPCC, 2007)	39
Figura 3.7. Calentamiento global y su influencia en los patrones de cambio climático (elaborado por A. Camargo a partir de las lecturas del IPCC, 2007 y Seoáñez, 2001)	41
Figura 3.8. Ilustración de la malla rectangular atmosférica de un modelo climático y de los intercambios entre celdillas (adaptada por M. de Castro de McGuffie y Henderson-Sellers, 2005).	44
Figura 3.9. Evolución de los Modelos Climáticos Globales respecto a sus componentes (Solomon <i>et al.</i> , 2007)	46
Figura 3.10. Evolución de los Modelos Climáticos Globales respecto a su resolución (Solomon <i>et al.</i> , 2007)	46
Figura 3.11. Evoluciones de temperaturas medias anuales observadas (líneas rojas) y simuladas por un MCG (líneas negras) considerando: a) Sólo los forzamientos naturales (arriba), b) sólo los forzamientos antropogénicos (en medio) y c) todos los forzamientos (abajo) (IPCC (2001).	48
Figura 3.12 Esquema de las familias evolutivas de los escenarios SRES (Nakicenovic <i>et al.</i> , 2000)	51
Figura 3.13. Calentamiento global en superficie derivado de seis proyecciones utilizadas por el IPCC para el cuarto informe de evaluación sobre el cambio climático (IPCC, 2007).	52
Figura 3.14. Visualización del método de reducción de escala (Department of Environment Transport and the Regions, 1995, tomado de Bernal <i>et al.</i> , 2000).	54
Figura 3.15. Esquema general del escalamiento espacial (INE, 2010)	56
Figura 3.16. Localización de los Centros de Apoyo al Desarrollo Rural para el trigo.	65
Figura 3.17. Ejemplo del trigo característico del Valle de Mexicali (INIFAP, 2009)	66
Figura 3.18. Dinámica de los umbrales térmicos durante las etapas fenológicas del trigo.	67
Figura 4.1. Vista satelital de la región del Valle de Mexicali (tomada de Google Earth)	71
Figura 4.2 Disponibilidad de agua en el estado de Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora (tomado de Ramírez, 2006)	74

ÍNDICE DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura 5.1. Diagrama de flujo general para generar escenarios de cambio climático mediante dos técnicas de reducción de escala y su aplicación al cultivo del trigo	76
Figura 5.2. Diagrama de flujo de recopilación de la información climática y su análisis de calidad.	77
Figura 5.3. Celda de la rejilla del MCG HadCM3 asociado al área de estudio.	81
Figura 5.4. Diagrama de flujo general para generar escenarios de cambio climático mediante el SDSM	82
Figura 5.5. Celda de la rejilla de los escenarios regionales de cambio climático generados para México, asociados a área de estudio	86
Figura 5.6. Diagrama de flujo general para generar escenarios de cambio climático mediante el LARS WG	87
Figura 6.1. Ubicación de la región del Valle de Mexicali y las estaciones climatológicas seleccionadas.	91
Figura 6.2. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Bataquez.	96
Figura 6.3. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Colonia Juárez.	96
Figura 6.4. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Delta	97
Figura 6.5. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Mexicali.	97
Figura 6.6. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación CAE.	98
Figura 6.7. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Presa Morelos.	98
Figura 6.8. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Ríito	99
Figura 6.9. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación San Luis.	99
Figura 6.10. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Imperial.	100
Figura 6.11. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Yuma.	100
Figura 6.12. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Bataquez.	101
Figura 6.13. Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Bataquez.	101
Figura 6.14. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Colonia Juárez.	102
Figura 6.15. Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Colonia Juárez.	102
Figura 6.16. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Delta.	102
Figura 6.17. Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Delta	102

ÍNDICE DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura 6.18. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Mexicali.	103
Figura 6.19. Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Mexicali	103
Figura 6.20. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación CAE.	103
Figura 6.21. Diagrama de cajas temporal de la temperatura maxima diaria estación CAE.	103
Figura 6.22. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Presa Morelos.	104
Figura 6.23. Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Presa Morelos	104
Figura 6.24. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Riíto	104
Figura 6.25. Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Riíto.	104
Figura 6.26. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación San Luis.	105
Figura 6.27. Diagrama de cajas temporal de la temperatura maxima diaria estación San Luis.	105
Figura 6.28. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Imperial	105
Figura 6.29. Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Imperial	105
Figura 6.30. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Yuma.	106
Figura 6.31. Diagrama de cajas temporal de la temperatura maxima diaria estación Yuma.	106
Figura 6.32. Climatología base anual 1961-1990 para la región del Valle de Mexicali.	110
Figura 6.33. Climatología base mensual 1961-1990 para la región del Valle de Mexicali.	111
Figura 6.34. Gráfica de dispersión de los valores de precipitación diaria total (1961-1980) de la estación Colonia Juarez modelados con las variables predictoras presión media a nivel del mar (mslp), velocidad zonal superficial (p_u) y humedad especifica superficial (shum) vs los residuales.	114
Figura 6.35. Simulación de temperatura máxima media mensual del periodo 1961-1990 con observaciones de la estación Presa Morelos usando el modelo SDSM.	116
Figura 6.36. Simulación de la varianza de la temperatura mínima media mensual del periodo 1961-1990 con observaciones de la estación Bataquez usando el modelo SDSM	117
Figura 6.37. Relación lineal entre la varianza de la temperatura mínima observada de la estación Bataquez y la varianza modelada con los datos NCEP, del periodo 1961-1990.	117
Figura 6.38. Simulación de la precipitación total mensual del periodo 1961-1990 con observaciones de la estación Bataquez usando el modelo SDSM	118
Figura 6.39. Anomalías de temperatura máxima obtenidas con el escenario A2.	129

ÍNDICE DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura 6.40. Anomalías de temperatura mínima obtenidas con el escenario A2	130
Figura 6.41. Anomalías de temperatura máxima obtenidas con el escenario B2 y A1B.	131
Figura 6.42. Anomalías de temperatura mínima obtenidas con el escenario B2 y A1B.	132
Figura 6.43. Anomalías de precipitación obtenidas con el escenario A2.	133
Figura 6.44. Anomalías de precipitación obtenidas con el escenario B2 y A1B.	134
Figura 6.45. Comparación de la temperatura mínima y máxima bajo cambio climático y la dinámica de los umbrales térmicos durante las etapas fenológicas del trigo para la estación Bataquez.	140
Figura 6.46. Unidades Calor Después de la Siembra de noviembre a enero, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A2, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C	143
Figura 6.47. Unidades Calor Después de la Siembra de enero a marzo, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A2, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C	144
Figura 6.48. Unidades Calor Después de la Siembra de marzo a mayo, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A2, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C	145

RESUMEN

El estudio del cambio climático, la evaluación de sus impactos en los sistemas naturales, humanos y económicos, así como la implementación de las medidas de adaptación a corto, mediano y largo plazo, representan el mayor reto ambiental a resolver en el presente siglo. Desde hace aproximadamente dos décadas la sociedad científica ha generado información concluyente de que el sistema climático se está calentando produciendo afectaciones perceptibles en varios sistemas físicos y biológicos. Los Modelos Climáticos Globales (MCG), la mejor herramienta de que se dispone actualmente para estudiar el clima planetario, permiten concluir que el aumento de las concentraciones atmosféricas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), están causando incrementos de temperatura y cambios en los patrones de lluvia. Sin embargo, la información generada con los MCG se refiere a escenarios con una resolución espacial y temporal que no puede usarse directamente en los modelos de evaluación de impacto en un sitio particular, por lo que es necesario recurrir a técnicas de reducción de escala para lograr una mayor resolución espacial y temporal. Con el fin de subsanar esa limitación se propuso este trabajo que consistió en evaluar el impacto del cambio climático en el Valle de Mexicali, B.C., México, mediante la generación y comparación de escenarios locales de temperatura y precipitación bajo cambio climático, con dos herramientas de escalamiento espacial, y en base a los cambios proyectados analizar su posible impacto en el cultivo del trigo.

Previo a la generación de escenarios de cambio climático a nivel local, y para un total de 10 estaciones climáticas, con información histórica de 1950 a 2009, se realizó un estudio de tendencias temporales, y un análisis de cajas y ejes, para las variables de temperatura y lluvia. Se encontró que la temperatura tiene una tendencia positiva, mientras que para la precipitación no es clara ningún tipo de tendencia. Con el segundo análisis se encontró que para la temperatura existe un cambio de tendencia, de negativo a positivo en el periodo 1970-1979, más acentuado para las temperaturas mínimas que para las temperaturas máximas.

Se construyó para el valle de Mexicali la climatología de 1961-1990, utilizada como período de referencia para la generación de escenarios de cambio climático. Se analizó la distribución espacial de isotermas e isoyetas mediante la realización de mapas utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) y el interpolador Inverso de las Distancias Ponderadas (IDW).

Las dos técnicas de reducción de escala para generar escenarios locales de cambio climático fueron un Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico, el LARS WG, y un método dinámico-estocástico, el SDSM. Cada técnica se evaluó por su habilidad para reproducir algunas características estadísticas del clima observado 1961-1990. Los escenarios de cambio climático de temperatura y precipitación para los horizontes temporales 2020 y 2050, con los escenarios de emisiones A1B, A2 y B2, fueron escalados a partir del modelo HadCM3 y un Modelo Multiensamble generado para México. El LARS WG y el SDSM fueron técnicas sencillas que mostraron diferente habilidad en la simulación de momentos estadísticos del clima observado, siendo ambos más eficientes para simular la temperatura que la precipitación. El escenario comparado entre ambas técnicas fue el A2, encontrando diferencias de 0.1°C y 0.2°C para temperatura mínima y temperatura máxima, respectivamente; y del 36.7% al 67.3% para precipitación.

Finalmente se generaron escenarios de cambio climático de Unidades Calor Después de la Siembra (UCDS) bajo los escenarios de emisiones A2 y A1B para la climatología 2020, aplicando el método de la curva seno, en función de las etapas fenológicas del cultivo del trigo con umbrales de temperatura máxima y mínima de 30 °C y 5 °C respectivamente. Se estimó que los posibles impactos en el cultivo del trigo se darán en las etapas fenológicas de plántula y amacollo, particularmente condicionantes en el rendimiento de este grano. Los mapas elaborados de UCDS son una herramienta útil tanto para el agricultor como para los tomadores de decisiones y especialistas en políticas públicas para establecer la mejor estrategia a seguir en el sector agrícola en el corto plazo.

Palabras clave: Reducción de escala, Cambio Climático, Valle de Mexicali, LARS-WG, SDSM.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El sistema climático se encuentra en evolución constante de manera natural y relativamente lenta en el tiempo (Amador *et al.*, 2009; Casas *et al.*, 1999), sin embargo, el **cambio climático** que se está presenciando, exhibe cambios acelerados, intensos y sostenidos de las variables climáticas principalmente asociados con aumentos de temperatura y modificación en los patrones de lluvia. Los impactos del cambio climático sobre el acceso al agua, los alimentos, la salud, el uso de la Tierra y del medio ambiente (Stern, 2007), lo ubican como el problema ambiental más trascendente del presente siglo, ya que representa un peligro sin precedentes para la existencia de la humanidad, ante el cual no hay una analogía histórica (Gillen, 2008; Magaña, 2008).

El cambio climático en un sistema como el de la Tierra puede deberse a factores externos tales como cambios en las emisiones de radiación solar o cambios en los parámetros orbitales; así como a procesos internos del sistema climático o a factores de tipo antropogénico (Amador, 2009). Desde hace aproximadamente dos décadas la sociedad científica, particularmente el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), ha generado información concluyente con un alto grado de confianza de que el sistema climático se está calentando y continuará haciéndolo a causa de la acumulación en la atmósfera de los denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI) y que dicho **calentamiento** producirá cambios en el clima global (IPCC, 2007). Según Guillen (2008) la emisión acelerada e incremento de los GEI tiene su origen en gran medida en el desequilibrio entre los sistemas naturales, los sociales y de producción, debido a una tasa creciente de población de los últimos cincuenta años y a las actividades humanas de los dos últimos siglos basadas en un modelo económico industrializado (a partir de 1750) y explotador de los recursos naturales; lo que deriva en un rápido consumo de energía fósil y el uso intensivo y extensivo de la tierra (la agricultura, la deforestación y cambio de uso del suelo).

Los Modelos Globales del Clima (MGC) conocidos también como Modelos de Circulación General acoplados Océano-Atmósfera (MCGOA), representan el intento más sofisticado de simulación del sistema climático global incluyendo la atmósfera, los océanos, la biósfera, la criósfera, la superficie

terrestre y la química atmosférica; usan ecuaciones matemáticas para representar los principales procesos físicos a gran escala que ocurren dentro de los componentes del sistema climático planetario, los que posteriormente se enlazan para simular el sistema completo; han demostrado que reproducen moderadamente bien las características observadas del clima reciente (Randall *et al.*, 2007; Hegerl *et al.*, 2007) y los cambios climáticos pasados (Jansen *et al.*, 2007). La respuesta futura del clima a perturbaciones inducidas por actividades humanas puede ser simulada por los MCG a escalas globales y continentales, con mayor confianza para temperatura que para precipitación; al utilizar diferentes concentraciones de GEI y aerosoles para perturbar el sistema climático y generar estimaciones cuantitativas creíbles, llamadas escenarios de cambio climático (IPCC, 2007; Magaña, 2010). Los diferentes escenarios de emisión de GEI utilizados por el IPCC se presentan en el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés, Nakicenovic *et al.*, 2000), y corresponden a una variedad de hipótesis socioeconómicas del estado y crecimiento de la población y la economía (Tol, 1998) y son consideradas como las fuerzas impulsoras en la producción de las emisiones de GEI para los próximos 100 años.

1.1 La necesidad de regionalizar para los estudios de adaptación

Experimentos numéricos con MCG permiten concluir que el aumento en las concentraciones de GEI tendrá impactos significativos en el clima global y regional, sin embargo, es menos claro en qué medida las condiciones climáticas en sitios particulares se modificarán (Magaña, 2010), debido a que las salidas de los escenarios climáticos derivadas de los MCG que se presentan en el Cuarto Informe de Evaluación sobre Cambio Climático (CIECC) se centran en proyecciones de temperatura y precipitación (Solomon *et al.*, 2007) con una resolución temporal típica en términos de medias mensuales de las variables climáticas, que no pueden usarse directamente en los modelos de evaluación de impacto de cambio climático en un sitio particular (Semenov, 2007), ya que estos se basan en procesos y análisis que requieren la entrada de datos climáticos a escala diaria. La resolución espacial de los MCG exhibe un tamaño de rejilla de aproximadamente 50,000 km², y en el mejor de los casos de 110 x 110 km² en el Ecuador, lo que no permite considerar factores del

clima local como topografía y uso de suelo en sus salidas a escalas locales, involucrando una gran incertidumbre y un error significativo relacionado al hecho de que los procesos a escala pequeña no pueden ser representados explícitamente en los modelos de gran escala, y deben ser aproximados (Semenov *et al.*, 2010). Con tal resolución espacial y temporal es difícil pasar al desarrollo de planes de adaptación para un sitio, un sector, una cuenca o un ecosistema en particular, y por tanto al diseño de políticas públicas y la evaluación de los costos del cambio climático a nivel local y regional (Christensen *et al.*, 2007). Por esta razón, las salidas de los MCG requieren la aplicación de distintas técnicas de reducción de escala (*downscaling*) (Barrow *et al.*, 1996; Bardossy, 1997; Wilby *et al.*, 1998; Mearns *et al.*, 1999; Murphy, 1999; Salon *et al.*, 2008); las cuales se han desarrollado como puentes entre la información que la comunidad de modelación climática puede proveer y lo requerido por la comunidad de investigación de impactos (Wilby y Wigley, 1997). El interés de obtener datos con alta resolución se debe a la necesidad de proveer resultados de simulación en una escala operacional importante para la toma de decisiones (Wilby y Dawson 2004).

Existen dos tipos de aproximaciones de las técnicas de reducción de escala: *la dinámica y la estadística* (Amador, 2009). Las técnicas estadísticas tienen la ventaja de ser económicas en términos computacionales y además pueden aplicarse rápidamente. También proveen información puntual, lo cual es importante para los estudios de impacto del cambio climático. Cada caso o región es diferente y por ello se requiere investigar qué estrategia de reducción de escala es más adecuada, debido a que los resultados dependen en el caso de las técnicas estadísticas, de la variable a ser escalada, pues entre más discontinuidades exhiba, mayor será la dificultad para escalarla, como en el caso de la precipitación. Las técnicas de reducción de escala del tipo estadístico permiten crear escenarios sobre la condición climática más probable y en general, la calidad de la técnica se determina a través de su habilidad para simular algunas características estadísticas del clima observado.

1.2 Justificación

La vulnerabilidad es el grado al que un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a efectos adversos de este fenómeno, incluidas la variabilidad y los extremos del clima (IPCC, 2001). El Instituto Nacional de Ecología (INE, 2006) señala que la vulnerabilidad es función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático y de la variación a la que un sistema está expuesto, de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación. Por ello, la capacidad de adaptación, definida como la habilidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y sus extremos) para moderar daños posibles, aprovecharse de oportunidades o enfrentarse a las consecuencias, será el mecanismo para reducir la vulnerabilidad. Uno de los campos en los que el cambio climático impacta de manera directa a la actividad humana es la agricultura; por ejemplo, modificaciones en la variabilidad climática interanual o en escalas temporales menores afectan aspectos estacionales de los cultivos, por lo que son necesarios estudios que determinen las consecuencias de este cambio y las posibles acciones para contrarrestar su efecto. Investigaciones conjuntas en los campos de las ciencias sociales y físicas han demostrado que el sector agrícola en México es particularmente sensible a cambios en la disponibilidad del agua y a los patrones climáticos (Magaña y Conde, 2000; Conde *et al.*, 1997; Mendoza *et al.*, 1997; Liverman *et al.*, 1994). Bajo este contexto, el presente trabajo surge a partir de la siguiente interrogante; ¿Cómo puede afectar el cambio climático global en escalas temporales y espaciales menores, como es el caso de la región del Valle de Mexicali y más aún al sector agrícola, particularmente al cultivo del trigo? La importancia de responder a dicho planteamiento, radica en que el conocimiento detallado de las condiciones climáticas actuales y la estimación de las proyecciones climáticas futuras en la región, son elementos imprescindibles para el diseño y aplicación de estrategias de adaptación. En este sentido, los objetivos de esta tesis consisten en generar escenarios locales de temperatura y precipitación bajo cambio climático para el Valle de Mexicali y en base a los cambios proyectados analizar su posible impacto en el cultivo del trigo. Para la generación de escenarios locales de cambio climático las técnicas de reducción de escala han sido aplicadas escasamente en México, de

aquí que resulta una aportación importante a nivel regional, aplicar y comparar dos herramientas de escalamiento espacial y temporal del tipo estadístico estructuralmente diferentes, el LARS-WG y el SDSM; previamente se evalúa el desempeño de cada técnica por su habilidad para reproducir algunas características estadísticas del clima observado 1961-1990, pues de los resultados obtenidos depende la confiabilidad o incertidumbre (grado de dispersión) en los cambios proyectados y por lo tanto de la dirección que se tome en las estrategias de adaptación.

1.3 Hipótesis

1. La aplicación de técnicas de reducción de escala a las proyecciones futuras derivadas de los Modelos Climáticos Globales, aumenta por un lado, su resolución espacial al generar escenarios para un sitio en particular a partir de escenarios regionales que se refieren a grandes extensiones; y por otro lado, aumenta su resolución temporal al generar series de datos diarios a partir de escenarios de cambios en las medias mensuales de las variables climáticas. Dicha resolución espacial y temporal a una escala útil permitiría la evaluación del impacto del cambio climático en un sector económicamente importante como lo es el agrícola.
2. La validación y comparación de dos técnicas estadísticas de reducción de escala proporciona información sobre la confiabilidad de los escenarios climáticos lo que puede contribuir a una mejor orientación en la toma de decisiones para la propuesta de las estrategias de adaptación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Generar escenarios de temperatura y precipitación bajo cambio climático en el Valle de Mexicali, B. C., México, mediante dos técnicas estadísticas de reducción de escala, así como su aplicación en la planeación agrícola local del cultivo del trigo en el mediano plazo.

1.4.2 Objetivos particulares

1. Identificar fuentes y bases de datos climáticas confiables para la región del Valle de Mexicali.
2. Determinar las tendencias de las series históricas de temperatura y precipitación mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal.
3. Elaborar la climatología base 1961-1990 mediante un Sistema de Información Geográfica.
4. Generación y comparación de escenarios de cambio climático para temperatura y precipitación mediante la aplicación de dos técnicas estadísticas de reducción de escala: el SDSM y el LARS-WG.
5. Generar escenarios de cambio climático de unidades calor después de la siembra (UCDS) en función de la fenología del cultivo del trigo.

1.5 Estructura de la tesis

Los conceptos técnicos y científicos utilizados en este trabajo siguen las definiciones básicas del IPCC y del Glosario de Meteorología de la Sociedad Meteorológica Americana (American Meteorological Society). De acuerdo a los objetivos planteados, esta tesis está estructurada del modo siguiente:

- ✓ En el capítulo 1 Introducción, se ofrece una panorámica de la importancia del cambio climático como problema ambiental planetario y se justifica la necesidad de aplicar las técnicas de reducción de escala a los escenarios de cambio climático generados por los MCG, en este caso particular para la región del Valle de Mexicali y su utilidad como herramienta para determinar el impacto del cambio climático en la fenología del cultivo del trigo. Con fundamento en lo anterior, se plantean los objetivos y la estructura de la tesis.
- ✓ En el capítulo 2 Antecedentes, se realiza una revisión de los estudios realizados en la generación de escenarios de cambio climático tanto a nivel global como en México, así como las tendencias del clima actual.
- ✓ En el capítulo 3 Marco teórico, se presentan las bases científicas para comprender el funcionamiento del sistema climático así como el origen físico del cambio climático global y su simulación a nivel local a través de la combinación de los modelos climáticos globales, los escenarios de emisiones y las técnicas de reducción de escala. Se presenta la utilidad de los métodos de interpolación para visualizar los escenarios climáticos en forma espacial y se expone las generalidades del trigo.
- ✓ En el capítulo 4 Sitio de estudio y bases de datos, refiere el área de estudio en términos de las características geográficas y climáticas del Valle de Mexicali, así como su localización y recopilación de la información climática de las variables temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación total, de cada una de las estaciones seleccionadas.
- ✓ El capítulo 5 Materiales y Métodos, describe con detalle las metodologías aplicadas para llevar a cabo este trabajo en sus diversas etapas, primeramente la propuesta de un modelo de

regresión lineal así como la construcción de gráficas de caja y ejes para determinar las tendencias de las series climáticas observadas, posteriormente la elaboración de la climatología base mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfica, consecutivamente generar para el Valle de Mexicali escenarios de cambio climático de temperatura y precipitación mediante la aplicación de dos métodos estadísticos de reducción de escala estructuralmente diferentes, el SDSM y el LARS WG y finalmente la aplicación para generar los escenarios de cambio climático de Unidades Calor Después de la Siembra (UCDS) para evaluar su impacto en la fenología del cultivo del trigo.

- ✓ El capítulo 6 Resultados y Discusión, presenta los principales resultados obtenidos:
 - El apartado 6.1 muestra las tendencias obtenidas aplicando un modelo de regresión lineal y las gráficas de cajas, destacando su utilidad como ejercicio de detección de señales de cambio climático.
 - El apartado 6.2 muestra las características estadísticas básicas del clima observado 1961-1990, así como su análisis espacial a través de los mapas construidos.
 - El apartado 6.3 expone los resultados obtenidos por cada método de reducción de escala, referentes a su validación, es decir su habilidad de reproducir la climatología observada.
 - En el apartado 6.4 se presentan los escenarios de cambio climático obtenidos por dos técnicas de reducción de escala el SDSM y el LARS WG, para el Valle de Mexicali y se hace un análisis espacial en los mapas generados.
 - En el apartado 6.5 se analizan los cambios futuros proyectados de la Acumulación de Unidades Calor Después de la Siembra sobre la fenología del cultivo del trigo.
- ✓ El capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones, integra los hallazgos más importantes del trabajo de tesis además de que define y resalta este estudio como una herramienta para la adquisición de capacidades en el sector agrícola para enfrentar los impactos del cambio climático en el cultivo de trigo en el Valle de Mexicali. Así mismo se dan algunas recomendaciones y propuestas para próximos trabajos.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Tendencias del clima global

“El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como lo evidencian ahora las observaciones de los incrementos en las temperaturas medias del aire y del océano, el derretimiento generalizado del hielo y de la nieve, y la elevación del nivel medio del mar en el mundo” así lo afirma el IPCC (2007) en su CIECC. Dichos cambios observados en el sistema climático se ilustran en la figura 2.1 y se resumen en los siguientes puntos.

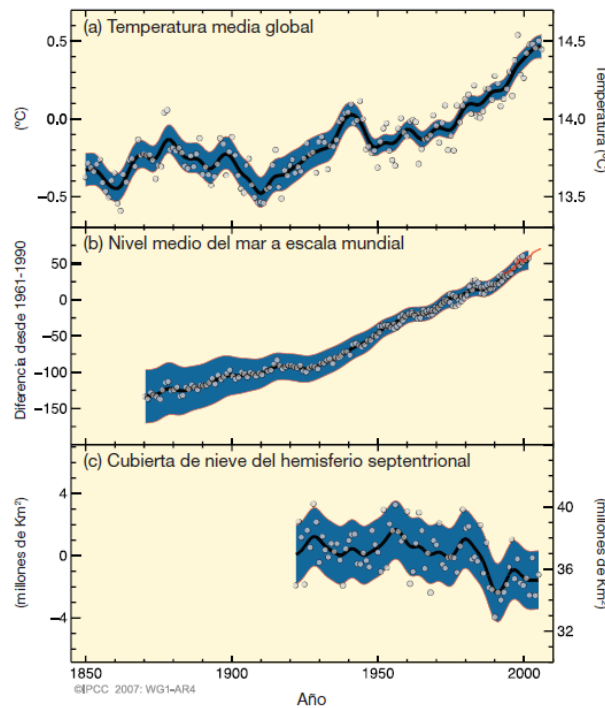


Figura 2.1. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cubierta de nieve el hemisferio norte (IPCC, 2007)

2.1.1 Tendencias de la temperatura

Actualmente, existe acuerdo en que ha ocurrido un aumento significativo en la temperatura del aire en la mayoría de las regiones del mundo durante décadas recientes (IPCC, 2007). No obstante este incremento ha marcado diferencias temporales y espaciales. Por citar un ejemplo, las tendencias de la temperatura media en el hemisferio sur (Jones, 1994), y particularmente en Australia (IPCC, 2007), parecen haber sido consistentemente positivas desde los 1950's. La preocupación por el fenómeno del calentamiento global se intensificó a principios de 1980, fundamentalmente porque

desde que se tienen registros exactos de temperatura, es en ese periodo el más caluroso que se había registrado, e incluyó varios años con records de calentamiento (Gillen, 2008) y los años noventa del mismo siglo XX continuaron la tendencia al calentamiento. Todos los meses en 1998, salvo octubre (sólo por aproximadamente 0.1°C), establecieron records mensuales de alta temperatura y 1998 fue el año más caluroso como también lo fue el de 1999. En febrero y marzo de 2002 una gran masa de hielo se separó de la península Antártica a consecuencia de un calentamiento de la región de aproximadamente 2.5°C (Manahan, 2007). El IPCC (2007) asegura que de los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce años más cálidos de los registros instrumentales de la temperatura mundial en superficie (desde 1850). La tendencia lineal del periodo 1906-2005, que es de 0.74°C (entre 0.56 y 0.92°C), es más acentuada que la indicada para el periodo de 1901-2000, que fue de 0.6°C (entre 0.4 y 0.8°C) (Figura 2.2).

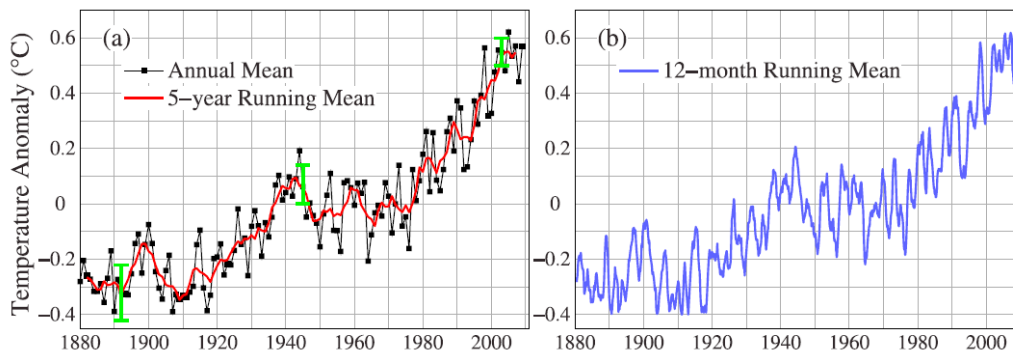


Figura 2.2. Anomalías de la temperatura global de superficie relativas al promedio de 1951-1980 para a) medias anuales y de medias móviles cada 5 años, y b) medias móviles cada 12 meses usando datos a junio de 2010 (Tomado de Hansen *et al.*, 2010)

Entre 1956 y 2005, el calentamiento lineal de 0.13°C (entre 0.10 y 0.16°C por decenio) ha sido casi el doble del experimentado en los cien años transcurridos desde 1906 hasta 2005. En un estudio reciente publicado por Hansen *et al.*, (2010), aseguran que 2010 es ya el año más cálido desde que hay registros, afirmando que los primeros seis meses de 2010 ha batido el record a nivel global del año más cálido del que se tiene constancia, que era el de 1998.

En la figura 2.3 se muestran las anomalías de la temperatura mundial de superficie de las últimas 4 décadas, en relación con el período base 1951-1980. En promedio, se ha calentado 0.17°C por década. El calentamiento de la década de 1990 (0.13°C en relación con la de 1980) se redujo por el

efecto temporal de la erupción volcánica del Monte Pinatubo en 1991 (El Chichón, en la previa década, produjo un promedio global de la profundidad óptica de aerosoles sólo la mitad del tamaño de Pinatubo).

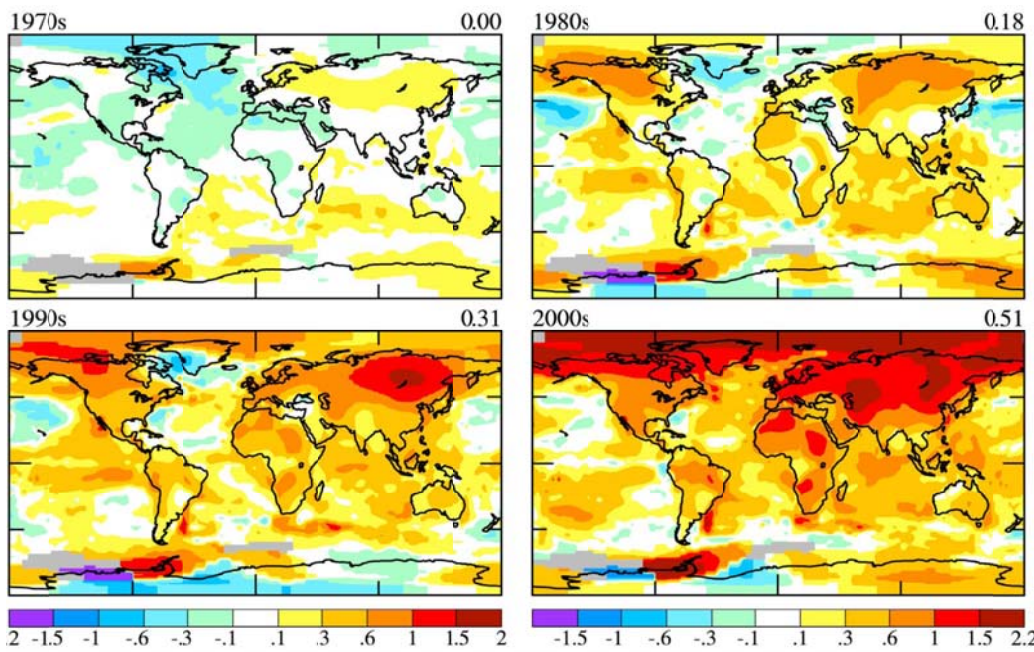


Figura 2.3. Anomalías decadales de la temperatura superficial en relación con el período base de 1951-1980 (Hansen *et al.*, 2010)

El aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta, y es mayor en latitudes septentrionales altas. En promedio, las temperaturas del Hemisferio Norte durante la segunda mitad del siglo XX fueron muy probablemente superiores a las de cualquier otro período de cincuenta años de los últimos 500 años, y probablemente las más altas de los últimos 1.300 años. En la región ártica, el promedio de las temperaturas ha aumentado a un ritmo que duplica casi el promedio mundial de los últimos cien años y en las últimas décadas el calentamiento es más grande en las regiones terrestres pues se han calentado más aprisa que los océanos, como se espera de un cambio climático (Hansen *et al.*, 2007; IPCC, 2007; Sutton *et al.*, 2007), forzado en parte porque el océano responde más lentamente que la tierra debido a la gran inercia térmica del océano. En la región ártica, el promedio de las temperaturas ha aumentado a un ritmo que duplica casi el promedio mundial de los últimos cien años y las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos. Las observaciones efectuadas desde 1961 indican que, en promedio, la temperatura del

océano mundial ha aumentado hasta en profundidades de 3000 m como mínimo, habiendo absorbido los océanos más del 80% del calor incorporado al sistema climático. El calentamiento de la superficie del océano ha sido más grande sobre el Océano Ártico, en segundo lugar sobre los Océanos Índico y el Pacífico Occidental, y en tercero en la mayor parte del Océano Atlántico. Los cambios de temperatura han sido pequeños y variables en su tendencia, más notables al norte del Océano Pacífico, el Océano Austral, y las regiones de surgencia de la costa oeste de Sudamérica.

2.1.2 Cambios en las precipitaciones

Numerosas investigaciones han confirmado incrementos o decrementos en el régimen de lluvia en diversos lugares del mundo en las últimas décadas, algunos de los resultados más destacados permitieron identificar que aproximadamente 30 regiones del mundo han presentado extendidos y abruptos cambios en sus patrones de precipitación en el transcurso del siglo XX (Dore, 2005; Zhang *et al.*, 2007). Los cambios en los patrones de precipitación han sido asociados al calentamiento global (Bradley *et al.*, 1987; Diaz *et al.*, 1989; Hulme *et al.*, 1998) y estudios de décadas pasadas indican que la precipitación se ha incrementado a nivel global, aproximadamente 2% desde inicios del siglo XX (Jones y Hulme 1996; Hulme *et al.*, 1998), siendo más notable en el Hemisferio Norte y áreas continentales. Las tendencias de precipitación han sido analizadas por Bradley *et al.* (1987) en el Hemisferio Norte; Hurrell (1995) en el Atlántico Norte; Brunetti *et al.* (2000) en Italia; Haylock y Nicholls (2000) en Australia; Xu *et al.* (2005) en Asia, y Kruger (2006) en Sudáfrica. Independientemente de la ubicación geográfica, los resultados evidencian la presencia de cambios significativos en las tendencias de lluvia; entre 1900 y 2005 aumentaron considerablemente en algunas partes orientales de América del Norte y del Sur, en el norte de Europa y en el Asia septentrional y central, mientras que disminuyó en el Sahel, en el Mediterráneo, en el sur de África y en partes del sur del Asia (IPCC, 2007).

2.1.3 Cambios en la capa de nieve y hielo

El derretimiento de las zonas polares, se evidencia sobre todo en el Ártico, donde los glaciares europeos han perdido la mitad de su volumen desde 1850 y la extensión de hielo marino llegó a su

mínimo histórico en 2007; de continuar con esta tendencia en el año 2040 podría desaparecer (Hassan *et al.*, 2005; Cornwall, 2008). La disminución observada de la extensión de nieves y hielos concuerda también con el calentamiento (Figura 1.1). Los datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que, en promedio anual, la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 2.7% (entre 2.1 y 3.3%) por decenio, y en mayor medida en los veranos, en que aumento en 7.4% (entre 5.0 y 9.8%) por decenio. En promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han disminuido en ambos hemisferios. Desde 1900, la extensión máxima de suelo estacionalmente congelado se ha reducido en torno a un 7% en el Hemisferio Norte, con disminuciones de hasta un 15% durante la primavera. En términos generales, las temperaturas de la capa superior de ¹permafrost han aumentado en la región ártica, desde los años 1980's, en hasta 3°C (IPCC, 2007).

2.1.4 Cambios en el nivel del mar

Los aumentos del nivel del mar concuerdan con el calentamiento (Figura 1.1). El promedio mundial del nivel del mar aumentó, en promedio, a una tasa de 1.8 mm (entre 1.3 y 2.3 mm) anuales entre 1961 y 2003, y de 3.1 (entre 2.4 y 3.8 mm) anuales entre 1993 y 2003. No se sabe con certeza si la mayor rapidez de este último período refleja una variación decenal o un aumento de la tendencia a más largo plazo. Desde 1993, la dilatación térmica de los océanos ha representado aproximadamente un 57% de la suma de las aportaciones estimadas al aumento de nivel del mar, mientras que la disminución de los glaciares y de los casquetes de hielo contribuyó en aproximadamente un 28%, y las pérdidas de los mantos de hielo polares aportaron el resto. Entre 1993 y 2003 la suma de estas contribuciones ha sido, dentro del margen de incertidumbre, coherente con el aumento total del nivel del mar observado directamente (IPCC, 2007). En conclusión el incremento del mar ha sido de 18 a 88 cm, como consecuencia del descongelamiento de los polos, aumento de la precipitación pluvial y la expansión térmica por el aumento de la temperatura del agua, que en el océano puede llegar hasta los 3 km de profundidad (Bourne, 2008).

¹Permafrost: Terreno (suelo o roca, junto con el hielo y la materia orgánica que contienen) que permanece a un máximo de °C durante al menos dos años consecutivos (IPCC, 2007).

2.1.5 Cambios en la circulación atmosférica y oceánica

El fenómeno de El Niño se ha vuelto relativamente más frecuente, persistente e intenso que el fenómeno de La Niña, lo cual incide en las precipitaciones y temperaturas de las zonas tropicales y subtropicales del planeta. Otro factor de circulación importante, que afecta el clima en grandes regiones del planeta, es la Oscilación Atlántico Norte (OAN), que se vincula con la intensidad de los vientos del oeste sobre el Atlántico y en Eurasia extratropical. Este fenómeno ha experimentado algunas variaciones, que se piensa han influido en los cambios en el hielo marino en el Ártico (IPCC, 2007).

2.1.6 Fenómenos meteorológicos extremos

En años recientes se ha indicado la posibilidad de un incremento en los eventos extremos del clima asociado al calentamiento global (WMO, 2003). El IPCC (2007) ha señalado que algunos fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, frentes fríos, precipitaciones intensas, sequías y ondas de calor han cambiado de frecuencia y/o intensidad en los últimos cincuenta años.

Las observaciones evidencian un aumento de la actividad ciclónica tropical intensa en el Atlántico Norte desde aproximadamente 1970, consistente con el incremento de la temperatura superficial de los océanos tropicales; adicionalmente a estas observaciones los días fríos, noches frías y heladas, son menos frecuentes; y días cálidos, noches cálidas y olas de calor, son mas frecuentes.

En particular, Alexander *et al.*, (2006), Trenberth *et al.*, (2007) y Peterson *et al.*, (2008), han estudiado la detección de cambios en los eventos extremos a escala global; para la región de Norteamérica (Canadá, Estados Unidos y norte de México) han encontrado evidencia de cambios consistentes desde 1960 con el aumento de la temperatura del planeta: incremento en la lluvia intensa, aumento en los eventos de temperaturas altas y disminución de eventos de temperaturas bajas (Peterson *et al.*, 2008). Según lo documentado por la Organización Meteorológica Mundial para el año de 2003, en junio se registró un récord de altas temperaturas en el sur de Francia, con temperaturas máximas superiores a 40 °C; en Suiza fue el más caluroso al menos en los últimos 250 años, mientras que en Ginebra junio fue también el mes más caluroso registrado. En la parte

oriental y el sureste de los Estados Unidos, las condiciones húmedas y frías prevalecieron durante más de un mes para este mismo año 2003, con temperaturas negativas de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, y adicionalmente se registraron precipitaciones intensas desde 50 mm hasta 350 mm en un período de más de 12 semanas a partir de marzo de 2003. En la India, este mismo año se experimentó una onda de calor con temperaturas máximas de entre $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ (WMO, 2003).

2.2 Escenarios de cambio climático para el clima global

La Tierra se ha calentado 0.7°C desde 1900 y, sólo en virtud de las emisiones pasadas y sin tener en cuenta las actuales y las venideras. De mantenerse las tendencias actuales, las temperaturas globales medias podrían incrementarse de $2\text{-}3^{\circ}\text{C}$ en los próximos cincuenta años, aproximadamente, y en aún más grados a finales de siglo si no dejan de incrementarse. Adicional a estas estimaciones, los hallazgos científicos más recientes sugieren que la temperatura media de la Tierra aumentará en más de 5 o 6°C si se producen retroalimentaciones que amplifiquen el efecto del calentamiento procedentes de los GEI, por ejemplo, a través de la liberación de bióxido de carbono retenido en la superficie terrestre o el metano del permafrost (Stern, 2007). Las proyecciones del IPCC (2007) para los dos decenios próximos indican un calentamiento de aproximadamente 0.2°C . Aunque se mantuvieran constantes las concentraciones de todos los GEI y aerosoles en los niveles del año 2000, cabría esperar un calentamiento adicional de aproximadamente 0.1°C por decenio y se espera un calentamiento máximo sobre tierra firme y en la mayoría de las latitudes septentrionales altas, y mínimo sobre el Océano Austral (cerca de la región antártica) y sobre el norte del Atlántico Norte, en continuidad con las tendencias recientes observadas (figura 2.4).

Stern (2007) señala que el cambio climático afectará a la vida de las personas, pues amenaza a los elementos básicos tales como el acceso al agua, los alimentos, la salud, el uso de la Tierra y el medio ambiente. Ninguna región del planeta quedará intacta a cambios de esa magnitud, pero los países en vías de desarrollo se verán afectados de manera especialmente adversa. Un incremento de

temperatura global de solo 1-2°C (por encima de los niveles preindustriales) podría condenar a la extinción al 15-40% de las especies.

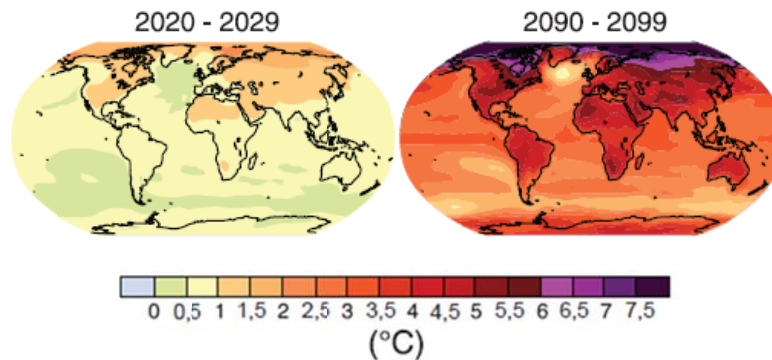


Figura 2. 4. Proyecciones del cambio de la temperatura en superficie para el comienzo y el final del siglo XXI, respecto del período 1980-1999 (IPCC, 2007).

Otros efectos indeseables del cambio climático antropogénico son los fenómenos meteorológicos extremos, tales como sequías que reducen la producción de alimentos o lluvias torrenciales que provocan peligrosas inundaciones; caída de la productividad de las actividades agropecuarias; mayor frecuencia de incendios forestales; daños severos a las infraestructuras costeras, como puertos y bahías, a causa de una elevación inusitada del nivel del mar; afectaciones más o menos graves al intercambio comercial y al turismo y, perturbaciones graves a la salud debidas, por ejemplo, a los llamados “golpes de calor” así como a la transmisión de enfermedades por vectores (SEMARNAT, 2009). Las proyecciones de precipitación de la figura 2.5 indican que es muy probable que aumente cuantitativamente en latitudes altas, disminuyendo probablemente en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales (20% aproximadamente), como continuación de las pautas observadas en las tendencias recientes.

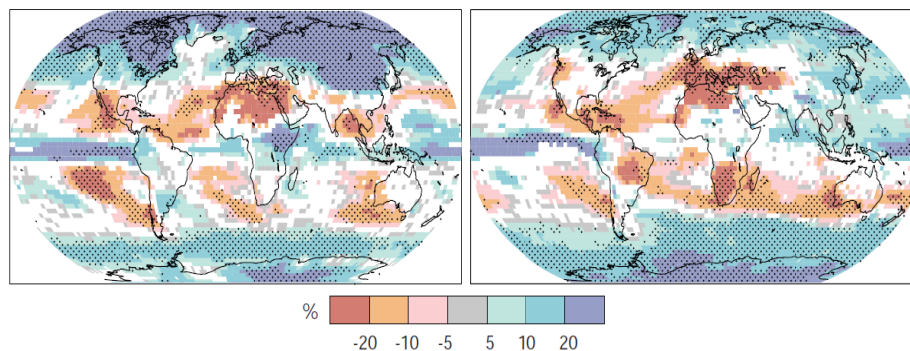


Figura 2.5. Cambios porcentuales de la precipitación relativos para el período 2090 -2099, respecto del período 1980-1999 (IPCC, 2007).

2.3 Impactos del cambio climático en la agricultura

La agricultura representa un 24% de la producción mundial total y ocupa a un 22% de la población global y un 40% del territorio. El 75% de la población más pobre del mundo vive en zonas rurales y depende de la agricultura para su sustento (Bruinsma, 2003). La producción de alimentos será particularmente sensible al cambio climático, ya que la productividad de los cultivos depende en gran parte de las condiciones climáticas de *temperatura y precipitación* (Stern, 2007).

De acuerdo a la figura 2.6, a nivel mundial se proyecta ligero incremento en la productividad de los cultivos en las latitudes medias y altas (Estados Unidos, Europa, Australia, Siberia y algunas zonas de China), para incrementos promedios regionales de temperatura entre 1 y 3 °C, dependiendo del tipo de cultivo. Para temperaturas mayores, habrá reducciones en algunas regiones. En las latitudes menores, especialmente en regiones tropicales y con sequía estacional, se proyecta una reducción en la productividad de los cultivos con aumentos de 1-2°C. Globalmente, a partir de los incrementos en las temperaturas medias regionales de entre 1 y 3 °C, se proyecta un aumento en el potencial para la producción agrícola, pero este se reduce para incrementos mayores (Rosenzweig, 2004). Los efectos se dejarán sentir con más fuerza en toda África y el occidente de Asia (incluido Oriente Medio), donde la productividad de los cultivos puede caer en un 25-35%.

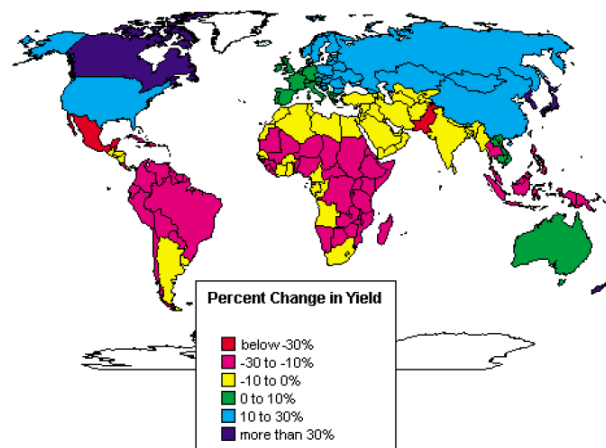


Figura 2.6. Proyecciones mundiales de cambios en la producción agrícola (NASA/GISS/CIG)

Lobell y Schlenker (2011) demostraron que durante los últimos 30 años, la producción global del trigo ha disminuido un 5% debido al cambio climático. Este descenso podría ser responsable del

alza de los precios de los alimentos en un 6% desde 1980. Si el aumento constante de la demanda de trigo y maíz en todo el mundo no va acompañado de una adaptación que haga frente al cambio climático, es probable que se incurra en grandes costos económicos y sanitarios.

2.4 Tendencias del clima en México

2.4.1 Temperatura

En Norte América se documentan tendencias consistentemente positivas desde los 1950's (IPCC, 2007), y particularmente sobre México (Englehart y Douglas, 2004), se ha presentado un cambio en la tendencia, así como en el rango diurno de temperatura, de signo negativo en el periodo de 1940's a los 1970's a positivo en el periodo de 1970's a 2000's (Englehart y Douglas, 2005). Para el caso de México, la afirmación de que el país se ha calentado en las últimas décadas (o por lo menos desde 1971) parece ser justificado; sin embargo, Pavía (2008) sigue cuestionando la tendencia de este calentamiento: ¿Hay lugares en México con tendencias negativas (en vez de positivas) durante este periodo? , ¿Son esas tendencias de temperatura estadísticamente significativas?, porque se cree que ocultas con las tendencias positivas (-negativa-) regionales promedio, hay regiones clave donde las estaciones climatológicas pueden exhibir tendencias las cuales son cero o estadísticamente significativas diferentes que cero pero negativas (positivas) (Englehart y Douglas, 2005). La importancia de estas interrogantes radica principalmente porque el calentamiento global podría significar condiciones más secas para México (Liverman y O'Brien, 1991), sobre todo por que la temperatura juega un papel muy importante en las condiciones del clima al afectar la evaporación, transpiración, ciclo hidrológico y radiación absorbida por la superficie de la tierra (Flower *et al*, 2007); por ejemplo, incrementos sustanciales en la temperatura implican un incremento potencial en la evapotranspiración y una substancial reducción en el agua disponible, afectando a los distritos de riego en el noroeste de México (Magaña, 2012). De esta forma, cambios de magnitud y de la tasa de cambio de la temperatura pueden tener efectos importantes en las condiciones de clima, los ecosistemas y, en consecuencia, en las actividades socioeconómicas (Stern, 2007; IPCC, 2007). Según Magaña (INE, 2009) las tendencias de la temperatura en los

últimos cien años, de acuerdo con el análisis de temperatura de superficie, indican que en la mayor parte de México han ocurrido aumentos que varían de región en región (figura 2.7). Los cambios observados en temperatura media anual varían de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, en ciertas partes del noreste, a cerca de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el noroeste. Las tendencias en la temperatura en gran parte del país podrían estar influenciadas por el efecto de la urbanización de las estaciones con las que se construye el campo de datos. Aunque se ha pensado que dicho efecto sólo es perceptible en el Valle de México, otros estudios como el de García-Cueto et al., (2009) han demostrado que el proceso de urbanización está afectando al comportamiento de la temperatura en Mexicali y su valle.

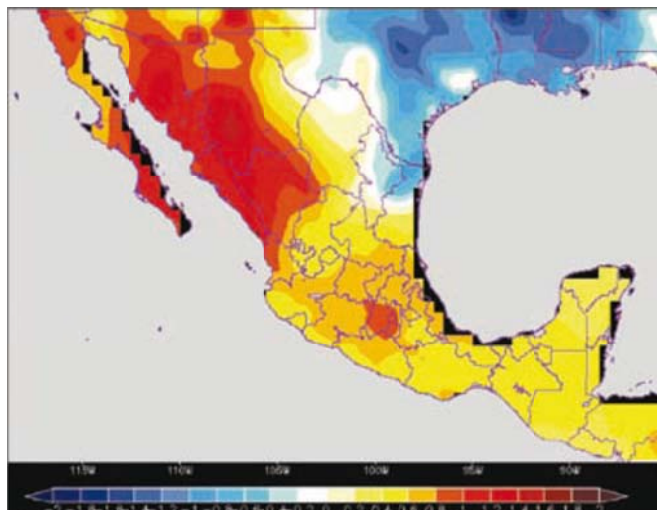


Figura 2.7. Tendencias de la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}/100$ años) en México de acuerdo con los datos del Climate Research Unit (CRU) (INE, 2009)

Según lo reportado en la Cuarta Comunicación Nacional en México (SEMARNAT-INE, 2010) las observaciones instrumentales de los últimos 38 años (1971-2008), muestran que la temperatura media anual se ha incrementado $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio para el territorio mexicano. La media histórica del período se ubica en $20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la figura 2.8 muestra que las observaciones están por arriba de la media histórica después de 1990; en los últimos 10 años la tendencia indica un calentamiento acelerado de $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entre 1997 y 1998 se presentó en México un incremento de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura media anual, debido a la ocurrencia de El Niño 1997-1998 seguido de un enfriamiento de $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ asociado a la fase de La Niña y un posterior calentamiento rápido de $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. El patrón de temperaturas medias anuales muestra calentamientos y enfriamientos modulados por El Niño y La

Niña (Magaña *et al.* 1999); sin embargo, El Niño o La Niña no explican toda la variabilidad anual del clima como las variaciones de temperatura de 1984 a 1993.

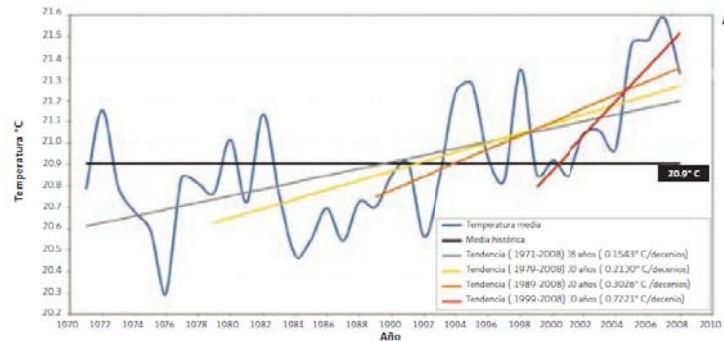


Figura 2.8 Comportamiento de la temperatura media en el territorio de México: promedio anual durante el período de 1971 a 2008 (SEMARNAT-INE, 2010).

Respecto a la media anual de las temperaturas máximas, en la figura 2.9, a partir de 1990, se ha rebasado la media histórica de 28.4°C, observándose que los años con mayor incremento en promedio para el territorio nacional son 1995, 1998 y 2007. De acuerdo a la figura 2.10 la media anual de las temperaturas mínimas para el territorio nacional indica una tendencia hacia condiciones menos frías en promedio; a partir de 1990, se rebasó la media histórica de 13.2°C.

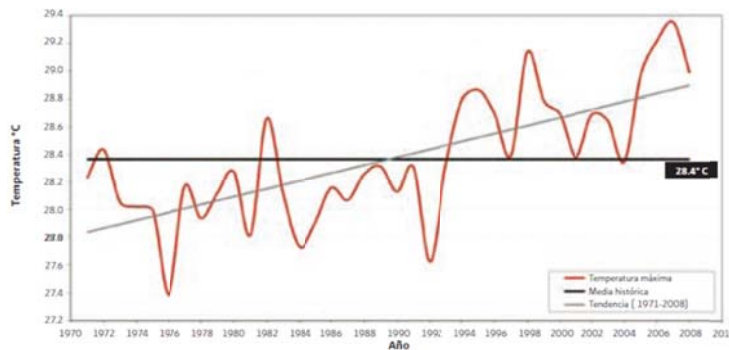


Figura 2.9 Comportamiento de la temperatura máxima en el territorio de México: promedio anual durante el período de 1971 a 2008 (SEMARNAT-INE, 2010).

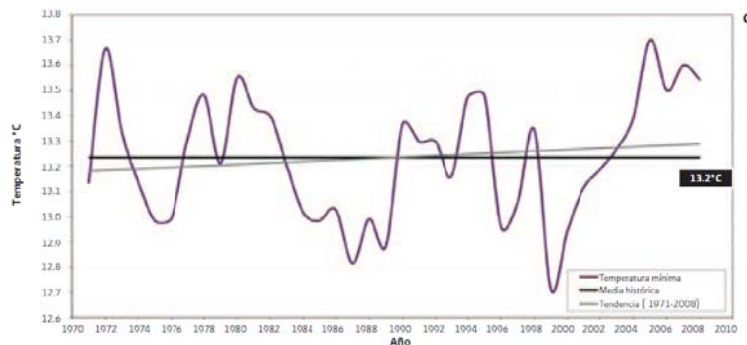


Figura 2.10 Comportamiento de la temperatura mínima en el territorio de México: promedio anual durante el período de 1971 a 2008 (SEMARNAT-INE, 2010).

2.4.2 Precipitación

De acuerdo con los datos de la Unidad de Investigación Climática (CRU, por sus siglas en inglés), las tendencias de la precipitación de los últimos cien años sugieren una especie de dipolo (figura 2.11): incremento en el sur y disminución en el norte, sin embargo, al comparar las tendencias de los últimos cien años con las de los últimos cincuenta años, se encuentra que la precipitación en la región del Golfo de México parece disminuir. Aún no es claro si se trata sólo de una forma de variabilidad de la precipitación de muy baja frecuencia.

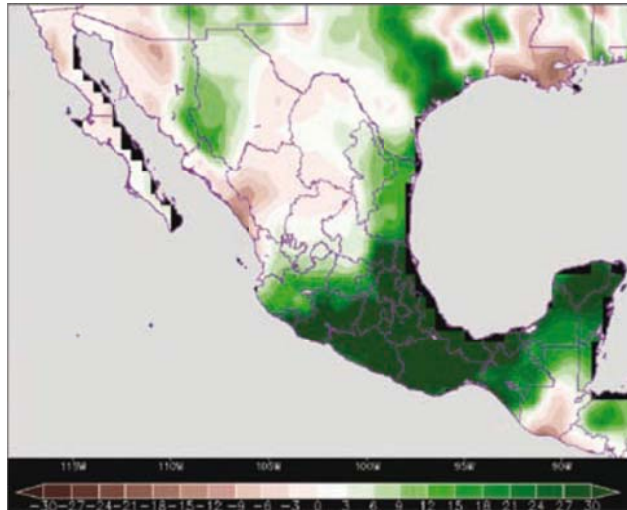


Figura 2.11. Tendencias de la precipitación media anual (mm/100 años) en México de acuerdo con los datos del Climate Research Unit (CRU) (INE, 2009)

En otro análisis realizado por Terán (2010) con datos del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) en el periodo de 1941 a 2008, la precipitación promedio anual en México fue de alrededor de 776.4mm. La región sur y la sureste del país registraron valores de más de 1,500 mm anuales; la región centro entre 500 y 1,500 mm anuales y la región noroeste de 250 mm anuales. En la mayor parte de México la distribución mensual de la precipitación acentúa la desigualdad en la disponibilidad del recurso, ya que el 80% de la precipitación acumulada mensual se presenta entre mayo y octubre, siendo el resto del año relativamente seco. En el mes de julio de 2009 se registró una lluvia mensual promedio de 99.1 mm en todo el país, por lo que se ubica como el segundo mes más seco de todos los meses de julio registrados en el periodo 1941-2009, y sólo superó por 2.2 mm a las lluvias del mes más seco registrado, el cual ocurrió en 2000. Hasta el mes de julio de

2009, se presentó un déficit de 18% en precipitación, por lo que sectores económicos del país, como la agricultura de temporal, pero principalmente el suministro de agua potable a la población, se vio afectada. Las entidades federativas más afectadas por la ausencia de precipitaciones fueron Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Baja California, Baja California Sur, Colima, Chiapas y Yucatán, así como la zona del Altiplano Central.

2.5 Cambio Climático en México

2.5.1 Aspectos de modelación

Aunque propiamente en México no se han realizado estudios con modelos dinámicos, existen dos fuentes de información de escenarios de cambio climático generados con modelos dinámicos de clima regionales. Uno de ellos es el Modelo Japonés desarrollado por el Instituto de Investigación Meteorológica (MRI, por sus siglas en inglés), con el cual se han generado proyecciones de cambio de clima con escalas espaciales de 22 x 22 km. Por otro lado se dispone también de una salida construida con el modelo PRECIS para la región de México, Centroamérica y el Caribe, desarrollada con información del modelo británico del Centro Hadley (INE, 2009).

De los estudios generados en México se tiene que el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA-UNAM) ha desarrollado escenarios de cambio climático para las Comunicaciones Nacionales de México en la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Estos escenarios se han utilizado en estudios de impacto potencial de diferentes sectores y regiones en México de la Primera Comunicación Nacional (Conde *et al.*, 1994; Gay, 2000) a la Cuarta Comunicación Nacional (Conde *et al.*, 2011.). Para la Primera Comunicación Nacional (Gay, 2000), se generaron escenarios de cambio climático utilizando las salidas de dos MCG: GFDLR30 (Laboratorio de Geofísica de Dinámica de Fluidos) y el CCC (Centro Canadiense del Clima) con una duplicación de las concentraciones atmosféricas de bióxido de carbono. Estos modelos tienen una resolución muy baja (2,22 ° x 3,75 ° y 3,75 ° x 3,75 °, respectivamente), y el modelado de los océanos incluidos en ellas es bastante simple. Con el uso de estos dos modelos y el escenario base de 1951-1980, se obtuvieron escenarios mensuales de

precipitación, temperatura y radiación solar en la superficie para las 18 regiones de clima en México, definida por A. Douglas (Magaña *et al.*, 1997).

En la Tercera Comunicación Nacional de México (TCNM) (SEMARNAT-INE, 2006), se generaron escenarios de cambio climático para los ecosistemas agrícolas y forestales con el software MAGICC/SCENGEN 4.1, que consiste en dos módulos. El primero es un modelo climático simple denominado Modelo de Evaluación de Cambio Climático inducido por Gases de Efecto Invernadero (MAGICC, por sus siglas en inglés; Hulme *et al.*, 2000; Wigley, 2003). El MAGICC es un programa amigable que toma los escenarios de emisiones de los gases de efecto invernadero, gases reactivos y de dióxido de azufre como entrada y produce como salida la temperatura media global y el aumento del nivel del mar; permite además la estimación de los cambios de la temperatura global para diferentes horizontes temporales (desde 2000 hasta 2100); para el caso de México se obtuvieron para la climatología 2020 y 2050, que corresponden a promedios de 30 años, de los periodos 2010-2039 y 2040-2069 respectivamente. El segundo módulo (SCENGEN) es un algoritmo de regionalización que usa el método de escalamiento de patrones (Santer *et al.* 1990), que se combina con la salida de los MCG con el fin de ser capaz de mostrar la información, principalmente la temperatura y precipitación, en un mapa reticular con una rejilla de 5° de latitud por 5° de longitud. Otros modelos utilizados para esta misma comunicación fueron el HADLEY3TR00, ECHAM4TR98 y GFDLTR90 los cuales se seleccionaron de acuerdo a su desempeño en la reproducción de clima observado de la región, y al hecho de que estos modelos fueron utilizados por otros países de la misma región geográfica que México. Los escenarios de emisiones seleccionados fueron A2, B2 (Conde, 2003) y los horizontes de tiempo proyectados fueron la climatología 2020 y la 2050.

Para la Cuarta Comunicación Nacional de México (CCNM) (SEMARNAT-INE, 2009) los escenarios de cambio climático fueron generados para la República Mexicana utilizando las salidas de los MCG ECHAM5, HADGEM1 y GFDL CM2.0, para la temperatura y precipitación mensuales, para los horizontes 2030 y 2050, y para los escenarios de emisiones A1B, A2, B2 y B1.

Estos escenarios fueron generados utilizando dos resoluciones espaciales: baja ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$), y alta ($5' \times 5'$). Las bases de datos y los mapas correspondientes se encuentran disponibles en la página: www.atmosfera.unam.mx (Conde, 2011). En otro estudio sobresaliente (Magaña *et al.*, 2012; SEMARNAT-INE, 2010) se generaron escenarios regionales de cambio climático para México (figura 2.12), con resolución espacial de 50 km x 50 km y datos mensuales en el periodo 2010-2099 respecto al periodo 1971-1999, para algunos escenarios de emisiones GEI, a partir de la reducción de escala de los resultados de los MCG utilizados en el CIECC.

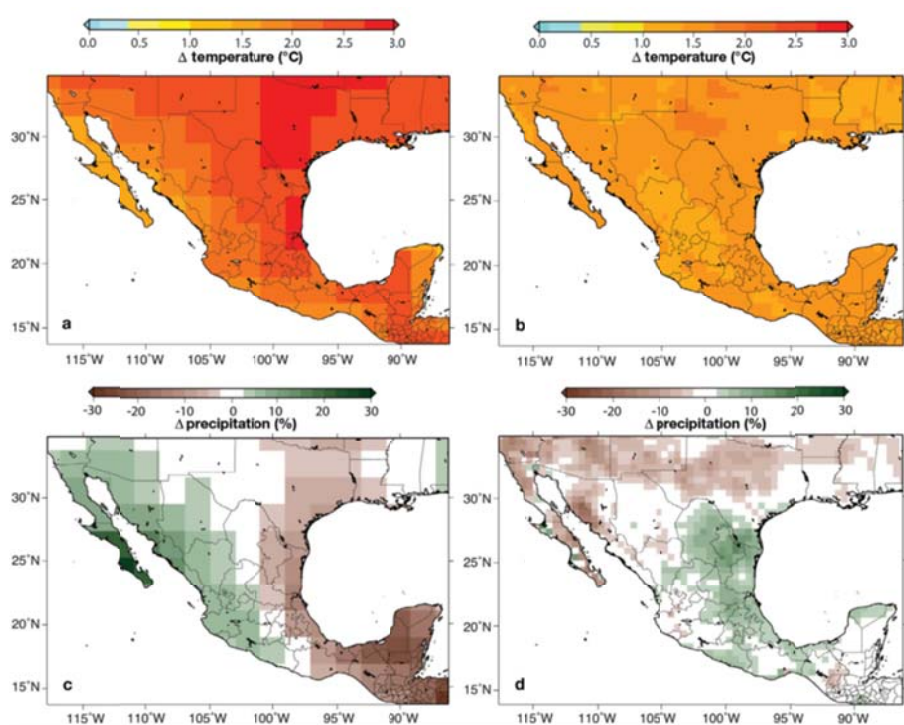


Figura 2.12 Proyecciones de cambio climático respecto al periodo 1971-1999, aplicando el Modelo de Circulación General Acoplado Océano-Atmosfera (MCGOA) HADCM3 para el periodo 2040-2069 bajo el escenario de emisiones A2 (a) cambio de temperatura anual superficial ($^\circ\text{C}$) con el MCGOA, (b) cambio de temperatura anual superficial ($^\circ\text{C}$), aplicando la reducción de escala y la CPT, (c) cambio de precipitación (%) con el MCGOA, y (d) cambio de precipitación (%), aplicando la reducción de escala y la CPT

En dicha regionalización se aplicó un método estadístico, mediante la Herramienta de Predicibilidad del Clima (CPT, por sus siglas en inglés) del Instituto Internacional para la Investigación del Clima y la Sociedad (IRI, por sus siglas en inglés), de Estados Unidos. La disponibilidad de más de 20 MCG usados por el IPCC (2007), con una o más realizaciones cada uno, y con la aplicación del método estadístico, permite que se tengan entre 50 y 90 experimentos

de regionalización de escenarios de cambio climático para México, considerando los diferentes escenarios de emisiones de GEI, con lo cual se ha podido estimar el rango de cambios en temperatura y precipitación, de la misma forma como lo presentó el IPCC (2007) en el CIECC. En el mismo estudio se encontró que los escenarios obtenidos para México son comparables en magnitud con el modelo regional de clima, "Simulador de la Tierra" de Japón, con resolución de 22 km x 22 km; y en estructura espacial con el sistema "Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS, por sus siglas en inglés)" del Reino Unido, con resolución de 50 km x 50 km. A partir de los escenarios regionalizados de cambio climático (temperatura y precipitación) se integraron las proyecciones considerando períodos de 30 años, con lo cual se obtuvieron tres climatologías, la de los: a) 2020s (representa el periodo 2010-2039); b) 2050s (representa el periodo 2040-2069), y c) 2080s (representa el periodo 2070-2099).

2.5.2 Escenarios de cambio climático

Como país en desarrollo, México tiende a ser más vulnerable al cambio climático. Las proyecciones del IPCC y otros grupos de científicos dedicados al análisis de los impactos del cambio climático sugieren que aún con aumentos pequeños de la temperatura, el cambio climático podría traducirse en impactos negativos serios sobre diversos sectores, principalmente aquellos relacionados con el recurso agua (INE, 2009); como ejemplo de ello en la TCNM ante la Convención Marco de las Naciones Unidas (SEMARNAT-INE, 2006) los escenarios de cambio climático estiman para México un clima más cálido, entre 1.5 y 2.5°C alrededor del 2020 respecto al periodo base 1961-1990, la reducción anual de aproximadamente 10% en la disponibilidad natural de agua con respecto al 2000, aumento en la demanda de agua del 10% en el sector agrícola, disminución en el escurrimiento del orden del 10 al 20% a nivel nacional y mayor al 40% en los humedales costeros del Golfo; así mismo advierten que alrededor del año 2050 el clima será aún más cálido, las temperaturas aumentarán entre 2 y 4°C respecto al clima base (1961-1990); en cuanto a la precipitación se espera que disminuya hasta un máximo del 20% en la primera mitad del año y que al inicio del verano se reduzca, para aumentar hasta un 5% entre octubre y diciembre.

2.6 Cambio climático en Baja California

Dentro de los estudios de cambio climático a nivel regional, se encuentra el desarrollado por Cavazos y Arriaga-Ramírez (2012), que se refiere a la generación de los escenarios de cambio climático (figura 2.13 y 2.14) para Baja California y cercanías (sur de California, Estados Unidos y la región del Monzón de Norte América) como parte del Programa de Acción Ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC), el cual tiene sus inicios en mayo de 2008 por parte de la Secretaría de Protección Ambiental del gobierno de Baja California. En este estudio se aplicó una técnica estadística de reducción de escala a un Modelo-Multiensable de 6 MCG con los escenarios de emisiones A2 (emisiones altas) y B1 (emisiones bajas). El resultado fueron escenarios de cambio mensuales con una mayor resolución espacial de aproximadamente 12 km. Para el escenario más extremo A2 se estimaron con respecto al periodo observado 1961-1990, aumentos de 1.5 °C para el periodo 2040 y de un decremento de la precipitación de aproximadamente 30%.

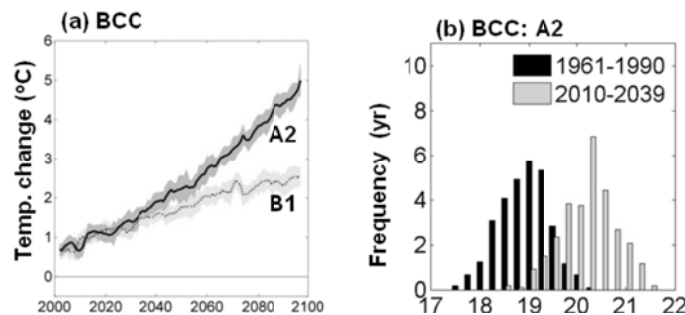


Figura 2.13 Proyecciones de los cambios de la temperatura media anual (°C) para el estado de Baja California con reducción de escala espacial a partir de un Modelo-Multiensable de 6 MCG (Cavazos y Arriaga-Ramírez, 2012)

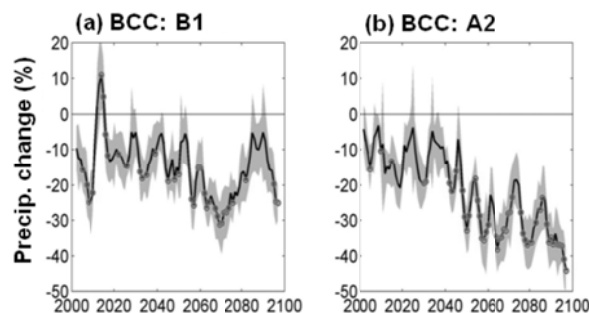


Figura 2.14 Proyecciones de los cambios del porcentaje de precipitación anual (%) para el estado de Baja California con reducción de escala espacial a partir de un Modelo-Multiensable de 6 MCG (Cavazos y Arriaga-Ramírez, 2012)

2.7 Cambio climático y la agricultura en México

Las investigaciones de Liverman *et al.*, (1994) y el Estudio de País: México, significó uno de los primeros análisis de vulnerabilidad al cambio climático mostrando que uno de los sectores más vulnerables es la agricultura, particularmente a las variaciones climáticas extremas, como son las sequías, las inundaciones y las heladas, debido principalmente a que se desarrolla fundamentalmente bajo condiciones de temporal (Conde *et al.*, 1997; Gay, 2000). Los estudios de vulnerabilidad de la producción de maíz basados en escenarios de aptitud y rendimiento, mostraron respecto a un escenario base 1950-1980 (figura 2.15) que la superficie no apta (figura 2.16) pasará de 60 a 75% del territorio nacional, la superficie medianamente apta para este cultivo se reducirá del 33 a entre 8 y 22% de la superficie del país (Gay, 2000).

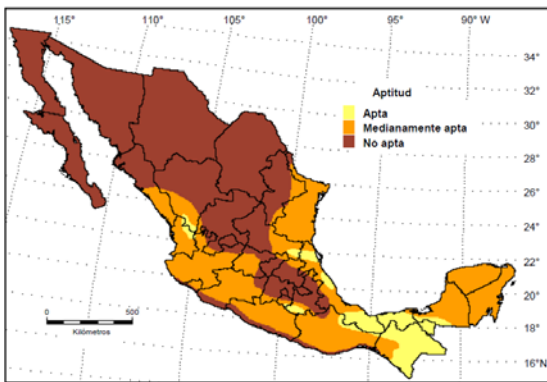


Figura 2.15 Superficie potencialmente apta para el cultivo de maíz de temporal. Escenario actual (Gay, 2000).

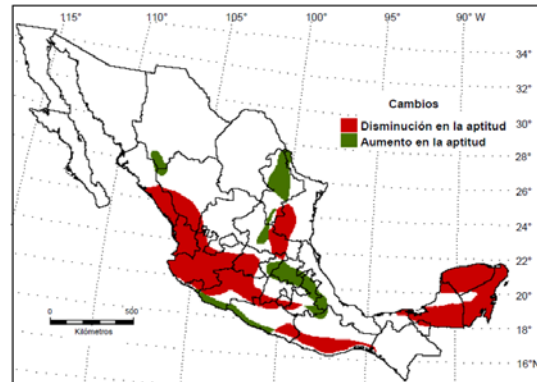


Figura 2.16 Áreas con cambio en la aptitud para el cultivo de maíz de temporal. Escenario que supone aumentos de temperatura desde 2° C (sur) hasta 4°C (norte) (Gay, 2000).

En la agricultura a nivel nacional las regiones más sensibles son el norte y el centro del país; se proyecta una disminución de la producción para numerosos cultivos, aún con la implementación de medidas tecnológicas y de adaptación a tal cambio. Se espera que un incremento en la temperatura reduzca el ciclo productivo de los cultivos (INE, 2008). De manera más local se han desarrollado trabajos para evaluar los impactos del cambio climático en el sector agrícola. Se pueden mencionar los casos de estudio de Tlaxcala (Conde y Eakin, 2003), el del café en Veracruz (Gay, 2006) y la investigación de Ojeda (2006) en que se determina que un aumento de temperatura de 2°C puede resultar en una reducción significativa en el rendimiento de maíz.

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Del desarrollo económico al cambio climático

A lo largo de la historia del planeta han ocurrido cambios climáticos (Seoáñez, 2001), sin embargo, el cambio climático del presente siglo es el primero que se está presentado a una velocidad significativamente mayor por efecto de la acción humana al modificar la composición de la atmósfera y su concentración, así como la superficie terrestre por el cambio de uso del suelo (INE, 2009; IPCC, 2007; Stern, 2007). El desarrollo de la agricultura en la Mesopotamia, y la Revolución industrial inglesa a mediados del siglo XVIII representaron dos importantes avances en la historia que permitieron grandes aumentos de la población y de las fuerzas productivas (Schoijet, 2008). Así mismo, aunque tardíamente, durante la mayor parte del siglo XX y hasta la actualidad, los países latinoamericanos han seguido un patrón de desarrollo similar basado esencialmente en la explotación de los recursos naturales en actividades tales como la minería, la agricultura y el uso de bosques (León, 2008). El último siglo se ha caracterizado por un impresionante desarrollo tecnológico que ha traído consigo elevados costos ambientales como la deforestación, la extinción de especies, el aumento en la desertificación, la contaminación del aire y del agua; y otros que no son perceptibles hasta después de determinado tiempo, como es el caso del cambio climático global (INE, 2004). La escala mundial del cambio climático significa que actualmente se está alterando los sistemas biofísicos y ecológicos de la Tierra a escala planetaria, como se evidencia por el agotamiento del ozono estratosférico, la reducción acelerada de la biodiversidad, las presiones sobre los sistemas terrestres y marinos productores de alimentos, el agotamiento de las reservas de agua dulce y la diseminación mundial de contaminantes orgánicos persistentes; por lo tanto, el cambio climático es un indicativo del desequilibrio existente entre los sistemas naturales, los sociales y de producción (Gillen, 2008), al depositar a un ritmo acelerado enormes cantidades de GEI que atrapan el calor en la atmósfera de la Tierra, y que de acuerdo a la historia climática y escenarios proyectados de temperatura se experimenta un evento sin precedentes por la velocidad con que se está dando tal cambio (Stern, 2007; OMS, 2003).

3.2 Evolución del sistema climático

El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a cambios en los factores externos que afectan al clima (llamados forzantes). El clima está constituido por aquellos rasgos o elementos básicos del sistema climático que tienen una variación relativamente lenta en el tiempo (Peixoto, 1992). Existe amplia evidencia a través de diferentes técnicas indirectas (*proxy*) como son el análisis de fósiles, la cuantificación de la densidad del polen, el estudio de las alteraciones del suelo y de los casquetes polares (núcleos de hielo), que confirman que ha existido una alternancia entre épocas más cálidas y más frías, con periodos de centenares de miles de años; son los periodos glaciales. En una escala temporal más pequeña, el estudio de la velocidad del crecimiento de los anillos de los árboles, como también el análisis de medidas con carbono 14, sedimentos en lagos, espeleotemas, depósitos de coral y otros métodos han puesto de manifiesto que el clima en la Tierra se ha mantenido estable en los últimos dos mil años, pero con fluctuaciones grandes, de un centenar de años de duración. Ejemplos de estas fluctuaciones son el enfriamiento de Europa Occidental durante la *pequeña edad de hielo* en los siglos XVII y XVIII; posteriormente hubo un calentamiento en el siglo XIX que se ha ido acentuando a partir del comienzo de la industrialización; en el continente americano, en la región sudoccidental, el siglo XIII fue muy seco, a diferencia del siglo XIV que fue muy húmedo (Casas, *et al.*, 1999). En conclusión todos los estudios se orientan a que los cambios en el clima de la Tierra en tiempos pasados han requerido desde siglos hasta varios millones de años (Ruddiman, 2008). El periodo actual es el Holoceno, fase interglacial que se inició hace un poco más de diez mil años al finalizar la más reciente de las glaciaciones y que continua hasta hoy pero que tarde o temprano dará paso a un nuevo periodo frío (IPCC, 2007).

3.3 Componentes del sistema climático

No se puede hablar de cambio climático sin detenerse a pensar que es el clima. Actualmente se prefiere hablar del sistema climático, formado por subsistemas que interaccionan entre ellos intercambiando masa, energía y cantidad de movimiento y que se ve afectado por los forzantes

externos dando lugar a respuestas internas (figura 3.1). Estos subsistemas son la atmósfera (envoltura gaseosa que envuelve a la tierra), litósfera (superficie terrestre), criósfera (hielo y nieve), hidrósfera (océanos, ríos, aguas subterráneas, mares interiores y lagos) y biósfera (fauna y flora de continentes y océanos). Los forzantes externos incluyen fenómenos naturales tales como: erupciones volcánicas, cambios en la tectónica de placas, cambios en la órbita terrestre (inclinación de su eje, excentricidad y posición relativa de los solsticios y equinoccios), cambios en la actividad solar; así como al forzamiento antropogénico (cambios inducidos por humanos en la composición atmosférica y superficie del suelo). Las respuestas internas incluyen cambios en la atmósfera, hielo y nieve, vegetación, océano y superficie del suelo (Ruddiman, 2008)

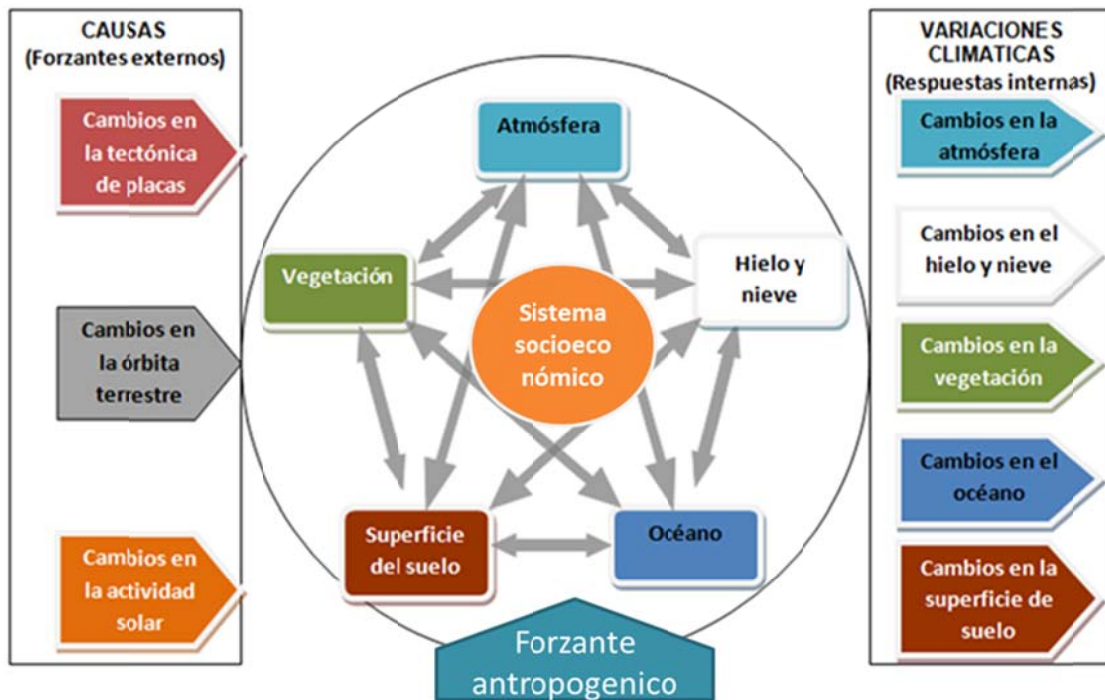


Figura 3.1. El sistema climático de la Tierra y la interacción de sus componentes (Adaptado por A. Camargo, del original de Ruddiman, 2008)

Los tiempos de respuesta de los diferentes componentes del sistema climático son muy distintos. Se entiende por tiempo de respuesta el tiempo que necesita un sistema, cuando ha sido perturbado,

para volver nuevamente a una situación de equilibrio. En la atmósfera, para la capa límite (los primeros mil metros, aproximadamente, en contacto con la superficie terrestre) el tiempo de respuesta va de minutos a horas; para la atmósfera libre, de semanas a meses; en el océano para la capa de mezcla (capa más externa, en contacto con la atmósfera), de semanas a años, y para las capas más profundas, de décadas a milenios; para los mares helados, de semanas a décadas; para lagos y la vegetación, de meses a siglos; para los glaciales, el orden de siglos; para la cobertura de hielo, milenios; y para los fenómenos tectónicos, decenas de millones de años. Esta gran diferencia de las escalas de tiempo acentúa la complejidad de las interacciones, de manera que no todos los subsistemas están siempre en equilibrio con los demás, ni tampoco internamente (Ruddiman, 2008; Casas *et al.*, 1999).

3.4 Clima, tiempo atmosférico y variabilidad climática

Puigcerver (1991) (tomado de Casas *et al.*, 1999) define al clima así: “El clima es la respuesta del sistema Tierra-atmósfera al estímulo exterior de la radiación solar incidente, es decir, el resultado del balance energético entre la radiación solar absorbida por el sistema y la manera como esta energía se distribuye entre los continentes, océanos y atmósfera”. Por otro lado, Peixoto (1992) ofrece una definición más precisa: “El clima es el estado del sistema, caracterizado por valores medios, extremos, medidas de dispersión y otras cantidades que caracterizan la estructura y el comportamiento de la atmósfera, la hidrosfera y la criosfera sobre un periodo de tiempo”.

Debido a lo complejo del sistema climático más que una definición es más sencillo identificar elementos que lo describan; adicionalmente a esta dificultad, en el lenguaje común, el clima es un término que se usa equivocadamente para referirse al tiempo; aunque ambas entidades se describen en función de las variables meteorológicas, son distintas y la diferencia es a menudo mal aplicada en expresiones tales como “el clima fue horrible ayer”, “el clima está excelente hoy” o “mañana va haber buen clima”. Bajo este contexto, ¿existe realmente una buena definición que marque la distinción entre tiempo y clima?

El “estado del tiempo atmosférico” o del tiempo meteorológico se refiere según la Academia Nacional de Ciencias (2008) (NAS, por sus siglas en inglés) a “...las condiciones atmosféricas en un plazo de uno a dos días. Se caracteriza con información de temperatura, lluvia, presión atmosférica, vientos, nubosidad o humedad en un lugar y momento determinados...”, mientras que clima se refiere a “... las condiciones promedio del tiempo meteorológico en un periodo de varios años...”; según la Organización Meteorológica Mundial, se requiere por lo menos de 30 años de datos para caracterizar al clima. Las variables básicas que se analizan son temperatura y precipitación, pero también puede incluir, por ejemplo, la frecuencia de tormentas o sequías. Para describir el clima se necesita además de los valores medios, las fluctuaciones estacionales y los valores máximos y mínimos de las variables del lugar (Peixoto, 2009).

Las definiciones anteriores se pueden integrar en un lenguaje coloquial; según Edward Lorenz (mencionado por Magaña, 2010): “tiempo es lo que se tiene; mientras que clima es lo que se espera”. De acuerdo con la afirmación anterior se dice que el tiempo es determinista y el clima es probabilista.

Cuando el sistema climático evoluciona en el tiempo cronológico bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a fenómenos naturales, se le denomina “variabilidad climática natural”, que se refiere a las variaciones del estado medio y otras características estadísticas del clima en todas las escalas temporales y espaciales (desviaciones temporales o espaciales de las variables con respecto a los promedios considerados). A los cambios o alteraciones observados en el clima inducido por las actividades humanas se denomina “variabilidad climática antropogénica” (IPCC, 2007). En la escala temporal y más allá del orden de la escala sinóptica (varios días) se puede hablar, por ejemplo, de variabilidad intra-estacional, estacional, del ciclo anual o inter-anual, para caracterizar las señales o elementos que distinguen las condiciones de un área o región con respecto a sus promedios sobre el periodo elegido. En el aspecto espacial, el ejemplo más utilizado de esta variabilidad es la clasificación climática por zonas, cada una de ellas relativamente homogénea en espacio y tiempo con respecto a las variables consideradas, durante periodos de tiempo previamente

establecidos (Oliver 2005). Para algunas aplicaciones según Amador (2009), en especial cuando se trata de cambios en el clima, el periodo de tiempo sobre el cual se promedia es del orden de varias décadas o más (promedios a largo plazo).

3.5 Balance radiativo de la Tierra

Nuestro planeta y su atmósfera se calientan por el calor que recibe del Sol. La radiación solar que llega a la Tierra se transfiere entre los diversos subsistemas climáticos, se transforma en otras formas de energía, se utiliza en diversos procesos químicos y biológicos y también parcialmente se disipa. Debido a la forma esférica de la Tierra, al movimiento orbital y al eje de inclinación del eje de rotación de la Tierra, no llega por igual a todos los puntos de la superficie terrestre y además va variando con el tiempo (Peixoto, 2009).

El sistema irradia la misma cantidad de calor recibida, nuevamente hacia el espacio, de manera que en conjunto, se mantiene en equilibrio y la temperatura global no cambia. La región ecuatorial recibe más calor del que desprende o pierde, mientras que las áreas polares irradian al espacio más calor del que reciben. Los vientos en la latitud medio-oeste son sistemas meteorológicos de gran escala que actúan para transportar el calor del ecuador hacia los polos, este intercambio de calor se lleva a cabo por medio de los movimientos atmosféricos a escala planetaria y se denominan la *circulación general* (Jauregui, 2003). Estos sistemas meteorológicos son migraciones de sistemas de baja y alta presión y sus frentes fríos y calientes asociados. Debido a contrastes de temperatura tierra-océano y obstáculos tales como las cordilleras y capas de hielo, la circulación de las ondas atmosféricas a escala de sistema planetario tiende a ser geográficamente capturadas en continentes y montañas aunque su amplitud puede cambiar con el tiempo (IPCC 2007 y Seoáñez 2008).

Hay tres aspectos fundamentales sobre el cambio del balance de radiación de la Tierra: 1) por los cambios en la radiación solar entrante (por cambios en la órbita de la tierra o en la órbita del sol), 2) por cambios en la fracción de la radiación solar que es reflejada llamada albedo (por cambios en la nubosidad, partículas atmosféricas o vegetación) y 3) por alteración de la radiación de onda larga de regreso hacia el espacio (por cambio en las concentraciones de gases invernadero). El clima a su

vez responde directamente a tales cambios, así como indirectamente, a través de una variedad de mecanismos de retroalimentación (IPCC, 2007).

La figura 3.2 muestra que la cantidad de energía que llega al tope de la atmósfera de la tierra cada segundo sobre un área superficial de frente al sol durante el día es de alrededor de 1370 Watts, y la cantidad de energía por metro cuadrado por segundo promediado sobre el planeta entero es de un cuarto de este. Alrededor del 30% de la luz solar que alcanza la cima de la atmósfera es reflejada al espacio y aproximadamente dos tercios de esta reflectividad es debido a nubes y pequeñas partículas presentes en la atmósfera conocidas como aerosoles. Áreas de tonalidades claras de la superficie de la tierra (principalmente hielo, nieve y desierto) reflejan el remanente de un tercio de la luz solar. El mayor cambio en la reflectividad producido por aerosoles ocurre cuando grandes erupciones volcánicas expulsan material violentamente dentro de la atmósfera. La lluvia típicamente limpia los aerosoles de la atmósfera en una o dos semanas, pero cuando el material procede de una erupción volcánica violenta el material puede ascender hasta la estratosfera, estos aerosoles típicamente influyen un año o dos, antes de su caída dentro de la troposfera y ser acarreados a la superficie por la precipitación.

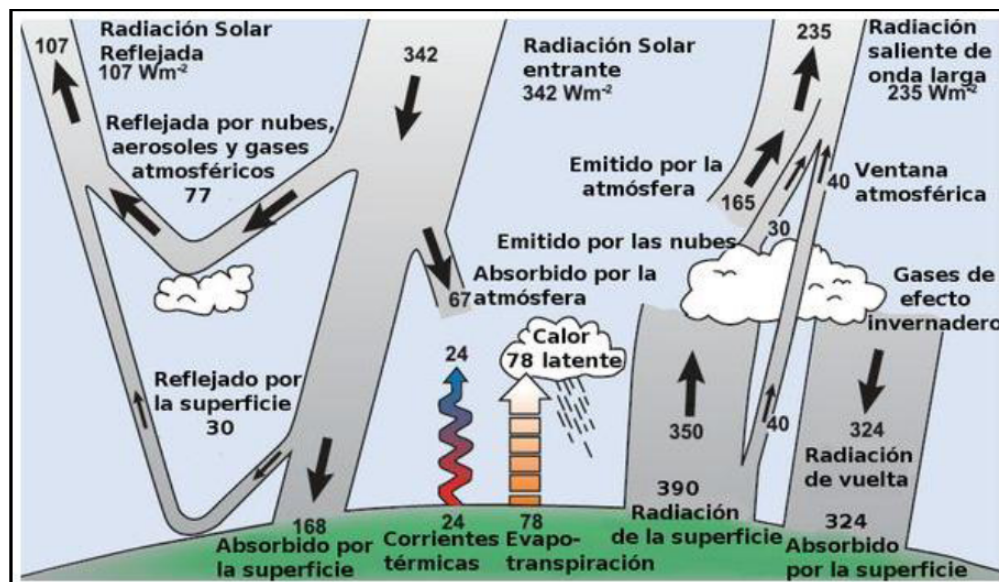


Figura 3.2. Balance radiativo de la Tierra (traducido por Aguirre, 2010; tomado de IPCC, 2007)

3.6 Efecto invernadero natural

Cualquier cuerpo emite radiación y la longitud de onda de esta radiación está inversamente relacionada a la temperatura del cuerpo. La Tierra mantiene su temperatura en equilibrio mediante una delicada relación entre la energía solar entrante (radiación de onda corta de 0.2-4 μm) que absorbe y la energía infrarroja saliente (radiación de onda larga de 4-100 μm) que emite, parte de la cual escapa al espacio. La luz y la radiación ultravioleta del sol pueden penetrar en la atmósfera y llegar a la superficie de continentes y océanos que la absorben, entonces la superficie se calienta y emite radiación terrestre en forma de radiación infrarroja (UNEP, 2002).

De acuerdo a la figura 3.3 las nubes, el vapor de agua y algunos gases atmosféricos, denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI) y presentes de forma natural (dióxido de carbono, óxido nitroso y ozono); dejan pasar la radiación solar a través de la atmósfera de la Tierra casi sin obstáculo, pero absorben la radiación infrarroja de la superficie de la Tierra e irradian parte de la misma nuevamente hacia la Tierra. A este fenómeno se le denomina “efecto de invernadero natural” y mantiene la temperatura de la superficie de la Tierra aproximadamente 33 grados centígrados más caliente de lo que sería sin él, es decir, que la composición química de la atmósfera terrestre siendo distinta a la de los planetas vecinos condiciona la temperatura media de la Tierra en aproximadamente 15°C, una temperatura apropiada para la vida (Cline, 1992).



Figura 3.3. Efecto invernadero (Adaptada por A. Camargo del IPCC, 2007)

3.6.1 Gases de efecto invernadero (GEI) y forzamiento radiativo

Los GEI que existen de manera natural son vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el ozono (O_3) y óxido nitroso (N_2O); se mantienen con cierto equilibrio dentro de la atmósfera debido a las complejas interacciones entre los reservorios del planeta a través de los ciclos biogeoquímicos del agua, carbono, oxígeno, nitrógeno y azufre principalmente (Magaña, 2004; IPCC, 2007). Actualmente existe consenso de que las variaciones en la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático, por lo que es posible concluir que el cambio climático inducido por el hombre está causado por las emisiones de GEI que se han acumulado en la atmósfera (figura 3.4), por lo que se denomina “efecto invernadero antropogénico” al efecto causado por emisiones de GEI provenientes de actividades humanas (IPCC, 2007).

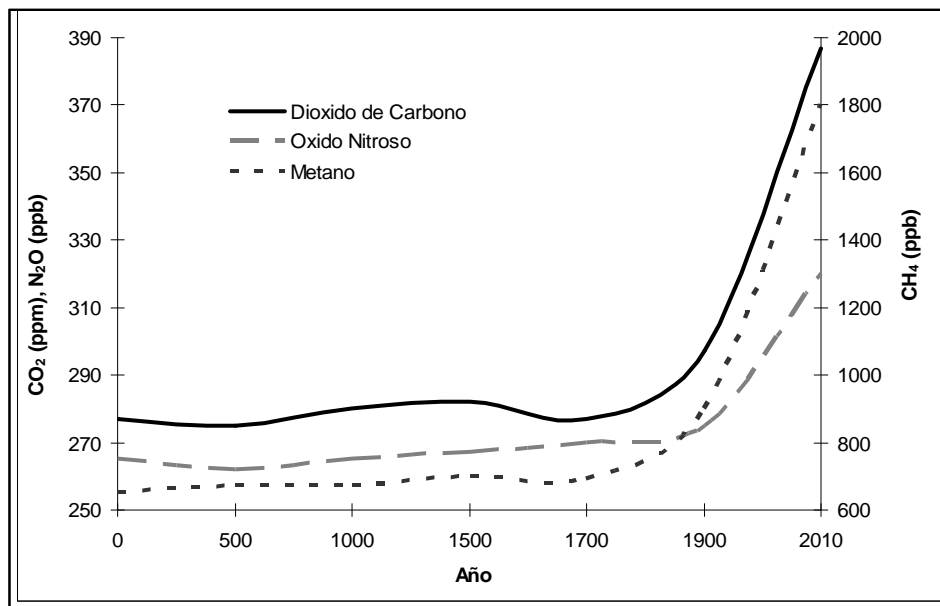


Figura 3.4. Concentraciones de los gases de efecto invernadero de los últimos 2000 años (Adaptada por N. Santillán, a partir de IPCC, 2007)

En los últimos cien años, según lo fundamenta el IPCC (2007) y la NOAA (2010), las concentraciones atmosféricas globales de dióxido de carbono (CO_2 -387 ppm), metano (CH_4 -1800 ppb) y óxido nitroso (N_2O -323 ppb), se han incrementado marcadamente como resultado de actividades humanas desde 1750 y han excedido por mucho los valores preindustriales de los

últimos 650,000 años. El dióxido de carbono (CO_2) es el GEI antropogénico más importante, sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004, sin embargo el metano es un significativo gas traza atmosférico porque controla numerosos procesos químicos en la troposfera y en la estratosfera, por lo que el metano es un gas invernadero con importantes efectos ambientales adversos; adicionalmente una molécula de metano es 20 veces más potente su efecto invernadero que una molécula de dióxido de carbono (Badr, 1991).

Por acuerdo internacional mediante el Protocolo de Kioto, se determinó que es indispensable controlar las emisiones de estos gases. Estos seis gases, una vez emitidos a la atmósfera permanecen desde décadas hasta siglos (tabla 3.1); por lo tanto, estos se encuentran bien mezclados globalmente en esta. Las concentraciones de los GEI se acumulan cuando las emisiones superan la velocidad a la que los procesos naturales los pueden eliminar de la atmósfera y el efecto de calentamiento adicional causado por la acumulación, es muy probablemente la causa de la mayor parte del calentamiento global observado en los últimos 50 años (IPCC, 2007 y EPA, 2009).

Los GEI son componentes que influyen en el balance de energía del sistema climático. El forzamiento radiativo es la medida de la influencia que un factor ejerce en el cambio del balance de la energía entrante y saliente en el sistema atmosférico terrestre y es un índice de la importancia del factor como mecanismo potencial del cambio climático (IPCC, 2007). El forzamiento radiativo, que se emplea para comparar cómo una variedad de factores humanos y naturales influyen en el calentamiento (forzamiento radiativo positivo) o enfriamiento (forzamiento radiativo negativo) del clima (figura 3.5).

3.7 Calentamiento global y cambio climático

El sistema climático se encuentra en evolución constante, con partes del sistema que cambian primero y otras que lo hacen con más retraso. Los cambios climáticos pueden venir presentados por variaciones a largo plazo en los valores medios de una determinada variable climática. A este valor medio vienen superpuestas las fluctuaciones estacionales y anuales, que también pueden resultar influidas por el cambio en el valor de la media. En la escala de tiempo humana, los cambios en los

valores son tan lentos que resultan prácticamente imperceptibles y estos cambios se producen, básicamente, por causas naturales (Amador, 2009).

Tabla 3.1 Principales fuentes de los gases de efecto invernadero controlados por acuerdo del Protocolo de Kioto (elaborado por A. Camargo a partir de EPA, 2009)

GEI/tiempo de vida media	Fuente
Bióxido de carbono (CO ₂) 50-200 años	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de combustibles fósiles: industria y transporte. • Descomposición de materia orgánica por deforestación. • Quema de biomasa.
Metano (CH ₄) 10 años	<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura: cultivo de arroz. • Ganadería: estiércol ganadero. • Gas natural. • Rellenos sanitarios. • Tiraderos a cielo abierto. • Tratamiento biológico de aguas negras. • Emisiones naturales en las zonas húmedas.
Óxido nitroso (N ₂ O) 114 años.	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes naturales: acción microbiana en los procesos biológicos del suelo y el agua. • Fuentes antropogénicas: industrial (síntesis de ácido nítrico, adípico y fertilizantes), agricultura (uso de fertilizantes), ganadería (estiércol), tratamiento de aguas residuales, incineración de residuos y quema de combustibles en el sector transporte (fuentes móviles).
Hidrofluorocarbonos (HFC's) 14 años (HFC-13a).	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes móviles (transporte). • Equipos refrigeradores y de aire acondicionado. • Propelentes en artículos como espumas o latas de aerosol.
Perfluorocarbonos (PFC's) 10,000-50,000 años	<ul style="list-style-type: none"> • Industria en la producción de aluminio. • Sustitutos de las Sustancias Agotadoras de la capa de Ozono (SAO)
Hexafluoruro de azufre (SF ₆) 3000 años	<ul style="list-style-type: none"> • Procesos industriales: desgasificación del aluminio, fusión de magnesio y aleaciones, y procesos de plasma en la industria electrónica. • Dieléctrico en circuitos eléctricos. Solvente en algunas industrias.

La variación de las concentraciones de GEI y de aerosoles en la atmósfera, y las variaciones en la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático (IPCC, 2007). Estos cambios pueden ocurrir a través de mecanismos de retroalimentación (figura 3.6) en que, una vez que se pasa cierto umbral el cambio se alimenta asimismo y procede rápido e irreversiblemente (Manahan, 2007).

El balance energético es alterado una vez que varían las concentraciones de GEI, ya que éstos, al actuar como una barrera, reducen la eficiencia mediante la cual la Tierra emite más energía. Por tanto, si las concentraciones de GEI ascienden, la temperatura superficial del planeta sigue la misma tendencia (Magaña, 2004).

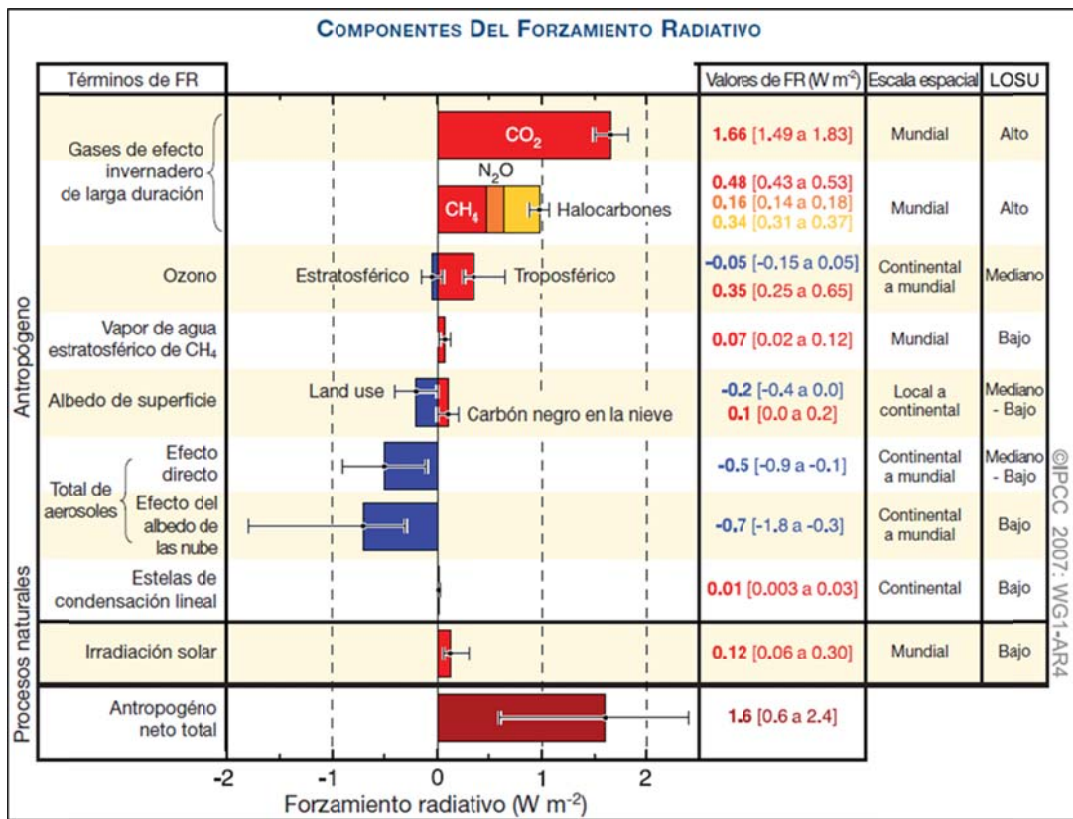


Figura 3.5. Valores de forzamiento radiativo (FR) del año 2005 relativos a las condiciones del periodo preindustrial definidas en 1750 y se expresan en Watts por metro cuadrado (W/m^2) (IPCC, 2007)

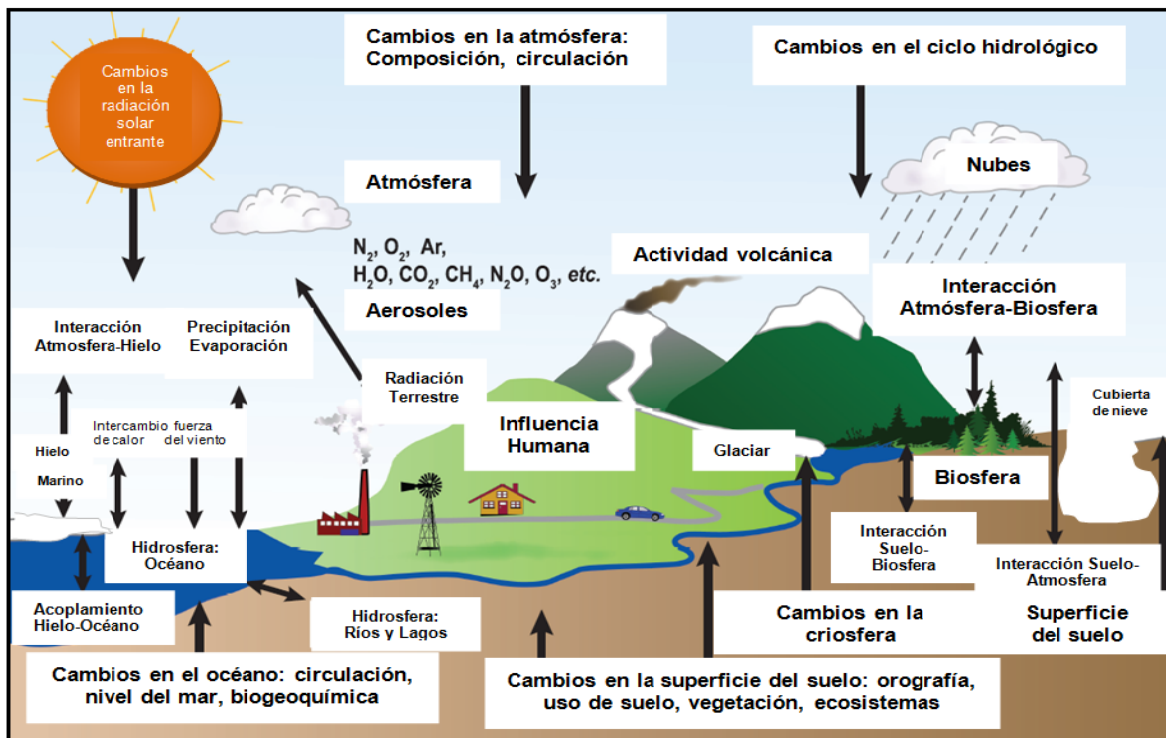


Figura 3.6. Constituyentes del clima y su interacción, como factores que motivan el cambio climático (Adaptada por A. Camargo del IPCC, 2007)

En base al razonamiento anterior resulta sencillo entender por qué la EPA (2009) define al “*calentamiento global*” como un incremento promedio en la temperatura de la atmósfera cercana a la superficie terrestre y de la troposfera; tiene su origen en una gran variedad de causas, tanto naturales como inducidas por el hombre, y generalmente el término se refiere al calentamiento que resulta del incremento en emisiones de GEI proveniente de las actividades humanas. Mientras que el IPCC (2007) define el cambio climático como “una variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un periodo prolongado (generalmente durante decenios o por más tiempo)”. El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo, a cambios duraderos en la composición de la atmósfera o modificaciones en el uso del suelo, resultado de las actividades humanas (figura 3.7). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. La CMNUCC hace pues una distinción entre “cambio climático”, atribuible a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera, y “variabilidad del clima”, atribuible a causas naturales. El término “*cambio climático global*” se usa algunas veces para incluir este y otros cambios ambientales como la deforestación, agotamiento de la capa de ozono y la acidificación de los océanos debido a los niveles ascendentes de bióxido de carbono.

3.8 La modelación del sistema climático

Un modelo es la representación simplificada de un sistema, y aunque existen muchos tipos, normalmente cuando se trata de estudiar procesos naturales se utilizan modelos matemáticos (Sarria, 2004). En el caso del sistema climático, es dinámico y extremadamente complejo; con el fin de entender, estudiar y predecir su comportamiento, Magaña (2010) señala que necesariamente tenemos que usar simplificaciones matemáticas que tengan en cuenta las propiedades más

importantes y básicas del sistema. A estas representaciones de la realidad se denominan modelos climáticos (IPCC, 2001) y son una descripción aproximada de los fenómenos del mundo real.

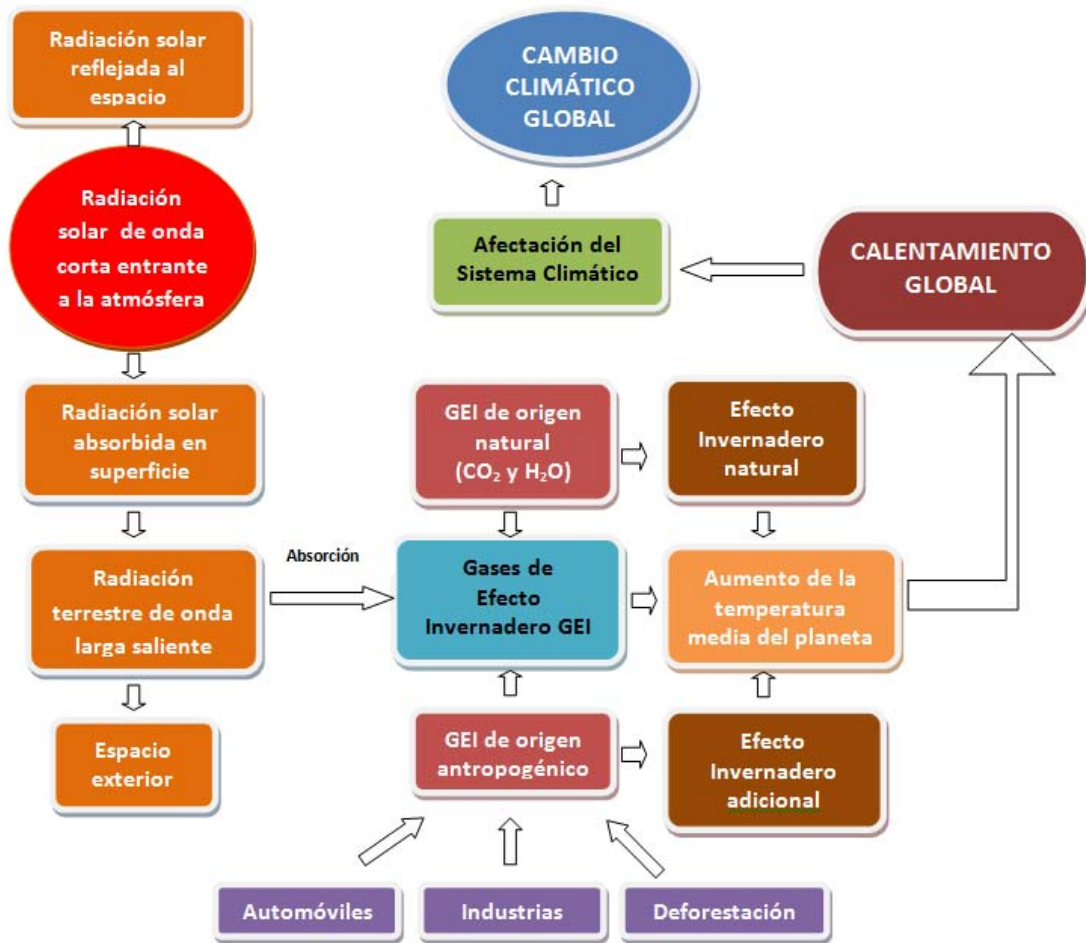


Figura 3.7. Calentamiento global y su influencia en los patrones de cambio climático (elaborado por A. Camargo a partir de las lecturas del IPCC, 2007 y Seoáñez, 2001)

Describir la mecánica compleja del sistema climático en términos matemáticos es tarea difícil. Las ecuaciones contienen variables como la temperatura, la densidad, la presión, el contenido de humedad y el movimiento del aire en tres dimensiones (Rudiman, 2008). Los elementos de los modelos que por su importancia y complejidad en el sistema climático requieren consideración especial son el vapor de agua, las nubes, el océano, la estratosfera, la criósfera, los continentes y en años recientes el ciclo del carbono (Magaña, 2004) y la química atmosférica (IPCC, 2007). Según Casas *et al.*, (1999) los principales componentes que deben ser considerados en la construcción de un modelo del sistema climático son:

Radiación: la fuente inicial de energía es la radiación solar. Se determina la manera en como entra y se absorbe la radiación solar en la superficie de la Tierra, y la emisión, por parte de esta, en radiación infrarroja.

Dinámica: se incorporan los movimientos horizontales meridianos, que transportan energía de las latitudes bajas a las altas, y los movimientos verticales debidos al calentamiento de la superficie y del aire en contacto con ésta.

Interacciones atmósfera-superficie: se trata de incluir mediante técnicas de parametrización, los procesos superficiales que tienen lugar entre la atmósfera y los diferentes tipos de suelo (tierra, océano y hielo) en referente al intercambio de materia, de energía y de cantidad de movimiento. Las interacciones aire-mar son especialmente importantes, ya que los océanos cubren las dos terceras partes de la superficie terrestre. Estas interacciones afectan al clima a medio y corto plazo.

Resolución en el tiempo y en el espacio: el intervalo de tiempo del modelo y las escalas horizontales y verticales determinadas.

Hay diversos tipos de modelos, desde los más sencillos que permiten comprender el efecto global de diversos forzamientos individuales, hasta los más complejos que son capaces de reproducir aceptablemente los principales procesos que tienen lugar en el sistema y que determinan el clima terrestre (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005). Se pueden agrupar en cuatro grandes bloques:

1. Modelos del balance de energía que predicen la variación de la temperatura con la latitud.
2. Modelos radiativos convectivos, que calculan el perfil vertical de la temperatura.
3. Modelos dinámico-estadísticos, que tratan explícitamente los procesos de la superficie y la dinámica zonal.
4. Modelos de circulación general, que reproducen la temperatura en función de la latitud/longitud/altura.

El modelo de balance de energía es el más sencillo y calcula la temperatura media global en la superficie del planeta en un instante determinado, a partir del balance energético entre la radiación solar que absorbe el sistema y la radiación terrestre que emite, teniendo en cuenta la reflectividad

media de la Tierra y el efecto invernadero medio de la atmósfera. Se denomina modelo de balance de energía de dimensión cero, ya que no tiene coordenadas, sino que proporciona un valor único: la temperatura media.

Dentro de los modelos de circulación general se encuentran los Modelos de Circulación General Atmosférica (MCGA) y los Modelos de Circulación General del Océano (MCGO). Un MCGA y un MCGO se pueden acoplar entre sí para integrar un sistema completo denominado Modelo Climático Global (MCG), llamado también Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGOA) (Hardy, 2003), que involucran el conjunto de principios de las leyes físicas que rigen la dinámica de la atmósfera y de los océanos (tabla 3.2).

Tabla 3.2 Conjunto de principios de las leyes físicas de la dinámica atmosférica y oceánica que se resuelven en un modelo climático acoplado.

Ecuaciones atmosféricas	Ecuaciones oceánicas
Conservación de la energía (primera ley de la termodinámica)	
Conservación del momento (segunda ley de Newton)	
Conservación de la masa (ecuación de la continuidad)	
Conservación de estado (ley de los gases ideales)	
Conservación del agua	Conservación de la salinidad

Este complejo sistema no-lineal no se puede resolver para todos los puntos del planeta y para todos los instantes de tiempo. Se han de discretizar, es decir, se ha de escoger una serie de puntos en el espacio y un conjunto de instantes de tiempo para los cuales obtener soluciones. Eso requiere dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdillas tridimensionales formando una red. En cada una de ellas se asignan valores de las variables que caracterizan su estado (temperatura, velocidad, densidad etc.) a partir de observaciones directas o indirectas en un determinado instante inicial. Comenzando con estos valores, se resuelven las ecuaciones para derivar las evoluciones temporales de dichas variables de estado en cada celdilla de la malla del modelo. Esto se hace calculando iterativamente los valores previstos de tales variables en intervalos

temporales discretos (paso temporal), es decir, avanzando en el tiempo hasta llegar al final del periodo de simulación que se desee. La duración de estos intervalos debe estar en concordancia con el tamaño de las celdillas: Cuanto menor sea su tamaño, más corto ha de ser el paso temporal y, por tanto, mayor número de iteraciones serían necesarias para completar el periodo de simulación. La resolución espacial de la parte atmosférica de los MCGC actuales varía entre 2° y 5° de latitud-longitud en la horizontal, y en la vertical se consideran de 10 a 30 capas entre la superficie y el tope superior de la atmósfera, cada una con espesor variable (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005). En la figura 3.8 se ilustra la disposición de las celdillas en la malla atmosférica de un modelo climático.

Hay fenómenos que tienen una escala más pequeña que las dimensiones de las celdas de la red, por ejemplo la turbulencia en la capa límite o la formación de nubes. Estos no pueden obtenerse explícitamente a partir de las ecuaciones, pero si se han de tener en cuenta por que tienen una influencia muy importante. Entonces estos procesos son tratados estadísticamente y se obtienen relaciones con una base física y experimental y no exclusivamente matemática, entre estos y las variables que si se obtienen directamente de las ecuaciones. Posteriormente sus efectos se introducen en el modelo, incluidos en estas variables de escala mayor. Este tratamiento de fenómenos de escala más pequeña que la malla se denomina parametrización.

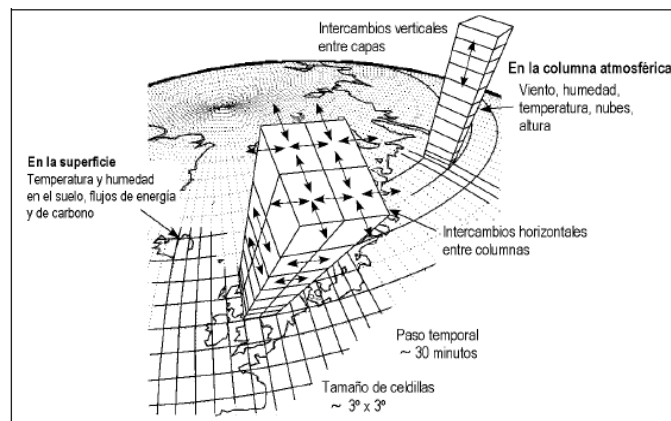


Figura 3.8 Ilustración de la malla rectangular atmosférica de un modelo climático y de los intercambios entre celdillas (adaptada por M. de Castro de McGuffie y Henderson-Sellers, 2005).

Los MCGOA han evolucionado de forma importante a partir del uso de las computadoras de alta velocidad (figura 3.9); representan el intento más sofisticado de simulación del sistema climático

global incluyendo la atmósfera, los océanos, la biósfera, la criósfera, la superficie terrestre y la química atmosférica; usan ecuaciones matemáticas para representar los principales procesos físicos a gran escala que ocurren dentro de los componentes del sistema climático planetario, los que posteriormente se enlazan para simular el sistema completo (Solomon, 2007). Los MCGOA son los más completos y predicen la evolución temporal de diferentes variables climáticas como temperatura, humedad, viento, etc.

3.8.1 Jerarquía de los modelos como función de la escala espacial

Un factor clave en la jerarquía de los modelos es la escala espacial. Para el IPCC, la escala regional para los estudios de cambio climático está definida como aquella que describe el clima en un rango de 10^4 a 10^7 km² (Giorgi y Hewitson, 2001). El límite superior de este rango es llamado escala subcontinental, y su alcance está limitado por las inhomogeneidades climáticas que ocurren a esa escala. Las condiciones que ocurren a escalas mayores a 10^7 km² se denominan de escala planetaria, y están dominadas por los procesos de circulación general y sus interacciones. El límite inferior (10^4) es representativo de las escalas que utilizan los modelos regionales.

La contribución del Grupo de Trabajo I (GPI) del IPCC, para el CIECC describe 23 modelos que se utilizan en los estudios en curso sobre el cambio climático. Estos modelos, basados en las leyes fundamentales de la física, simulan una gran variedad de procesos que ocurren en una amplia gama de escalas espaciales y temporales, así como en diversos subsistemas climáticos. Como se muestra en la figura 3.10 estos modelos tienen diferentes resoluciones espaciales que se han incrementado en los últimos años (resoluciones actuales del rango de hasta $1^\circ \times 1^\circ$), lo que permite su uso a escala regional.

3.8.2 Modelación del cambio climático

Actualmente los MCG son las principales herramientas disponibles para simular el cambio climático. El IPCC (2007) sugiere considerar diversos modelos para calcular una medida de la dispersión entre proyecciones (incertidumbre), que permita estimar el rango de los aumentos de temperatura o de cambios en la precipitación, y así mismo mostrar escenarios del clima en términos

de probabilidades, con base en simulaciones de un grupo de modelos en paralelo llamados *ensambles*.

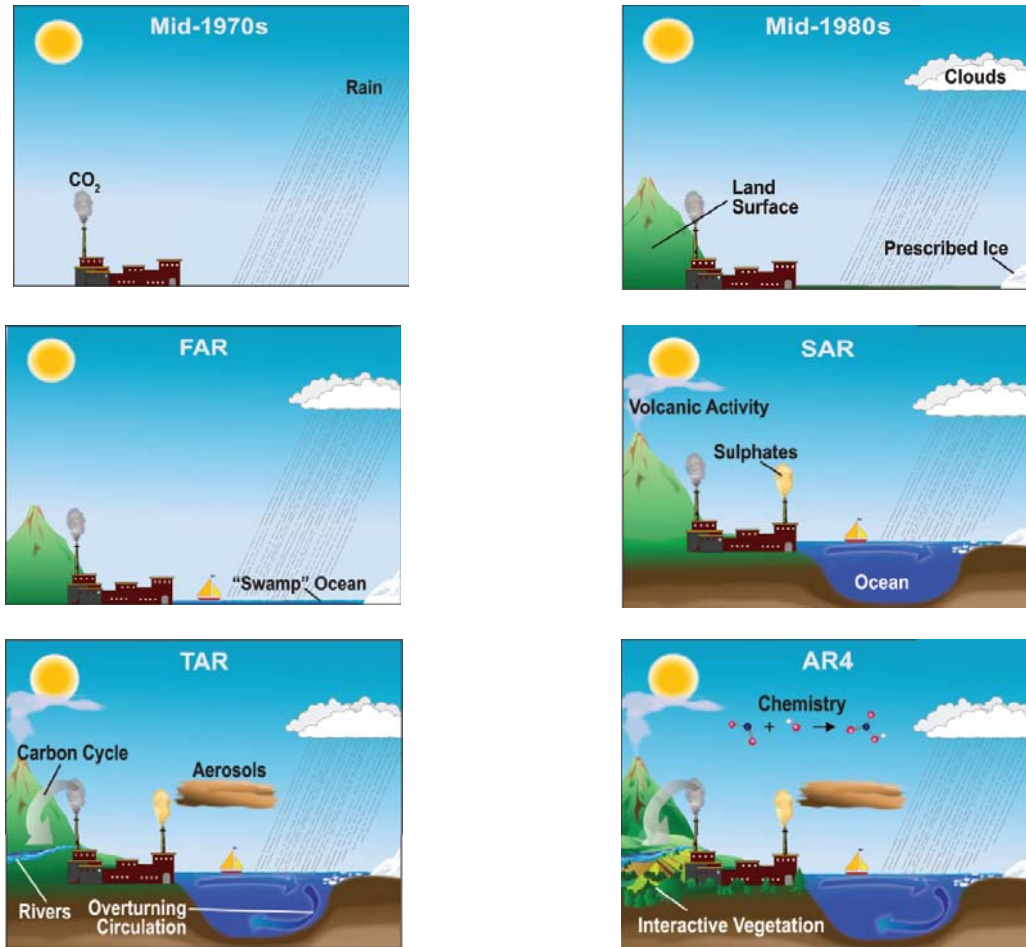


Figura 3.9. Evolución de los Modelos Climáticos Globales respecto a sus componentes (Solomon *et al.*, 2007)

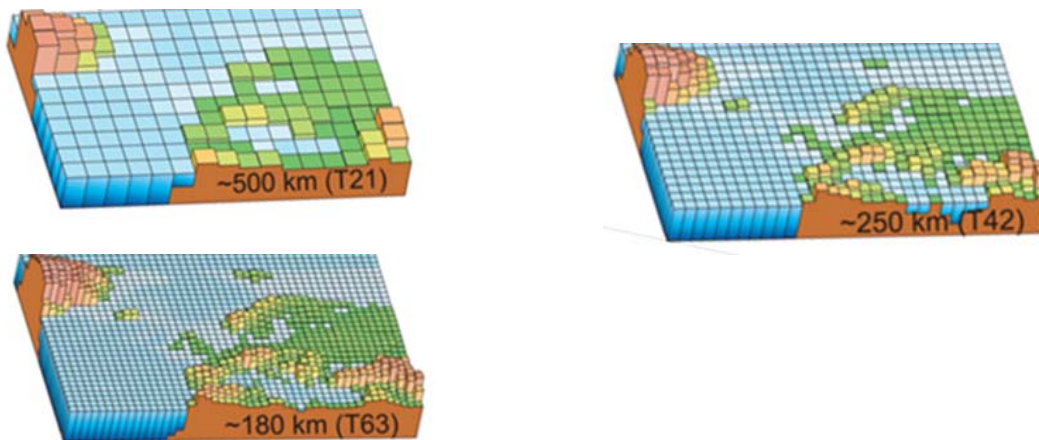


Figura 3.10 Evolución de los Modelos Climáticos Globales respecto a su resolución (Solomon *et al.*, 2007)

Los MCG se usan para simular la evolución del clima partiendo de unas condiciones iniciales que correspondan con un estado de equilibrio realista entre todos los componentes del sistema climático. Como no se tiene un conocimiento completo del estado actual del sistema, es decir del valor de las variables que simula el modelo en todas las celdillas de la malla, lo que se hace es deducir esos valores interpolando las observaciones puntuales disponibles. A partir de ese estado inicial, se ejecuta el modelo con forzamientos externos constantes hasta que se consiga llegar a un estado casi estacionario. El tiempo necesario para ello depende de los tiempos de respuesta de cada componente del sistema. La atmósfera, el hielo marino y las capas superficiales del suelo y del océano son las que evolucionan más rápidamente, alcanzando su ajuste al cabo de pocas décadas de simulación. Sin embargo, las capas oceánicas profundas requieren periodos de tiempo de siglos a milenios. Los MCG simulan la evolución de las condiciones climáticas observadas a lo largo de los últimos 150 años, teniendo en cuenta la variación observada de la concentración atmosférica de GEI y de aerosoles. Los resultados obtenidos se comparan con los registros climáticos disponibles para evaluar la calidad de los MCG y han demostrado que reproducen las características observadas del clima reciente (Randall *et al.*, 2007; Hegerl *et al.*, 2007) y los cambios climáticos pasados (Jansen *et al.*, 2007).

Uno de los aspectos claves del cambio climático actual y futuro de la influencia de las actividades humanas en el calentamiento global observado, según el IPCC (2001) se fundamenta en tres hechos: 1) la temperatura media global del aire cerca de la superficie terrestre ha aumentado cerca de 0.8°C desde 1860, 2) en los últimos 150 años la concentración media global de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado en torno a un 30%, fundamentalmente a causa de actividades humanas y 3) el CO₂ es un gas que contribuye al efecto invernadero, el mayor responsable de la ganancia global media de calor por la superficie terrestre. Para abordar adecuadamente este problema clave se utilizan los MCG más completos. El método consiste en realizar simulaciones de la evolución del clima terrestre entre 1860 y 2000, considerando tres supuestos: a) Que en ese periodo sólo hubieran actuado los forzamientos naturales observados (variaciones de la radiación

solar y ocurrencia de erupciones volcánicas), b) que sólo se hubieran producido forzamientos antropogénicos observados (concentraciones crecientes de GEI y aerosoles en la atmósfera) y c) la situación real, es decir que ambos forzamientos hubieran actuado conjuntamente. En la figura 3.11 se muestran los resultados de la evolución de la temperatura global media anual para cada uno de los tres supuestos obtenidos por un conjunto de simulaciones con un MCG, comparándolos con valores observados. Las variaciones anuales proyectadas por el conjunto de simulaciones en cada supuesto quedan representadas por las líneas de color negro, cuya dispersión indica el grado de incertidumbre del modelo en el cálculo de las temperaturas globales promedio de cada año. Esta figura ilustra con claridad que las simulaciones del supuesto (c) reproducen de manera muy aceptable la evolución experimentada por la temperatura media global a lo largo de los últimos 150 años, mientras que las del supuesto (a) no muestran el calentamiento observado en las últimas tres décadas.

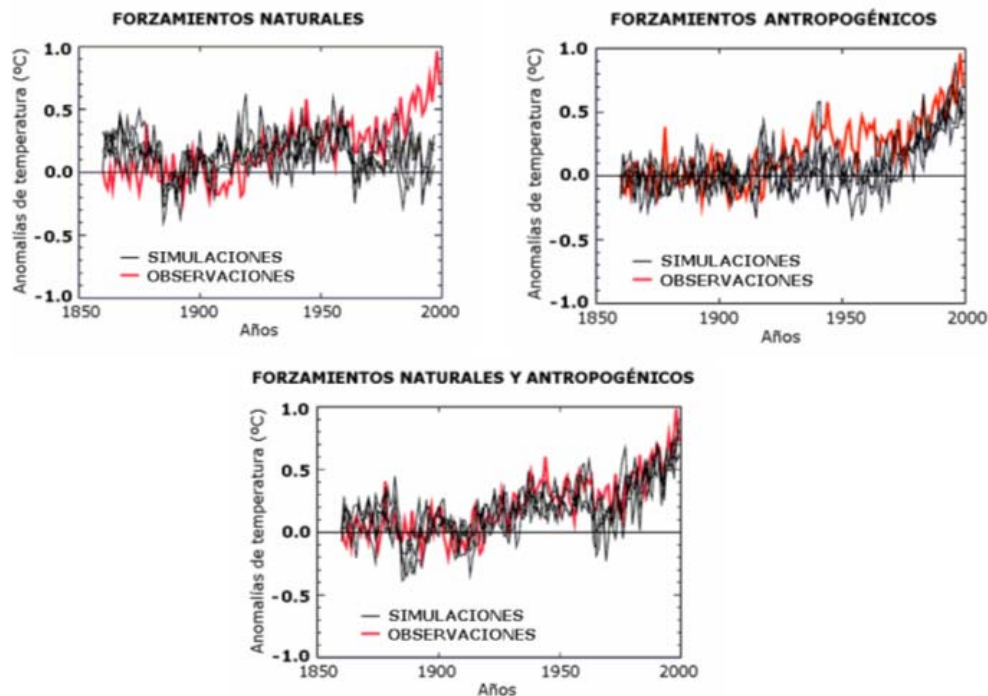


Figura 3.11 Evoluciones de temperaturas medias anuales observadas (líneas rojas) y simuladas por un MCG (líneas negras) considerando: a) Sólo los forzamientos naturales (arriba), b) sólo los forzamientos antropogénicos (en medio) y c) todos los forzamientos (abajo) (IPCC (2001).

Así pues, estos ensayos permiten discriminar la contribución de las actividades humanas en el calentamiento global observado con un grado de confianza aceptable. En función de estos

resultados, el tercer informe del IPCC (2001) concluye señalando que “ ... la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a actividades humanas”.

3.9 Escenarios de cambio climático

Actualmente existe gran confianza en que el incremento de las concentraciones atmosféricas de GEI, está produciendo cambios en el clima global, particularmente incrementos en la temperatura y modificación en los patrones de lluvia. Sin embargo, es incierta la estimación de como se reflejarán estos cambios globales en cambios a nivel regional, por tal razón se tiene que pensar, más que en pronósticos del clima futuro, en elaborar escenarios de cambio climático (IPCC, 2007; Magaña, 2010). De acuerdo a lo que menciona Amador (2009), un escenario de cambio climático se puede entender de forma simple como la diferencia entre un escenario climático y un escenario base (clima actual o de una línea o estado base). Magaña (2010) expone una definición más completa:

“Un escenario es una descripción de un estado futuro del mundo, coherente, internamente consistente y plausible, es una forma de pensar el futuro a través de varias hipótesis de comportamiento futuro, no es un pronóstico”

3.9.1 Escenarios de emisiones SRES

Uno de los mayores retos frente al cambio climático es cuantificar la respuesta futura del clima a perturbaciones inducidas por actividades humanas; por ejemplo, como van a presentarse los incrementos de temperatura si se siguen quemando combustibles fósiles como hasta ahora, qué pasaría si se va emigrando al uso de tecnologías limpias, o bien si se cambia drásticamente a una economía de “no carbono” (Stern, 2007).

Los escenarios de cambio climático pueden ser generados por diferentes métodos (IPCC, 2001), pero con el fin de disminuir la incertidumbre de cómo van a presentarse los cambios en el clima global y de homogeneizar estos escenarios para realizar comparaciones de los diferentes estudios realizados bajo el contexto de cambio climático, el IPCC generó una colección de Escenarios de Emisiones (EE) de GEI, presentados en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones

(Special Report on Emission Scenarios (SRES, por sus siglas en inglés), (Nakicenovic et al., 2000)). Para entender estos escenarios, primero se debe conocer la terminología:

- Línea evolutiva (Storyline): Descripción narrativa de un escenario (o familia de escenarios) que resalta sus principales características, las relaciones entre las fuerzas determinantes fundamentales y la dinámica de su evolución.
- Escenario: proyecciones de un futuro potencial, con base en una lógica clara y una línea evolutiva cuantificada.
- Familia de escenarios: escenarios que tienen una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico.

Esta colección de escenarios corresponden a una variedad de hipótesis socioeconómicas del estado y crecimiento de la población y la economía (Tol, 1998). Los EE parten de cuatro diferentes historias de desarrollo socioeconómico global, denominadas familias A1, A2, B1 y B2; cada línea evolutiva es una interpretación cuantitativa y cualitativa específica que describe consistentemente las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que son consideradas como las impulsoras en la producción de las emisiones de GEI para los próximos 100 años. Se pueden observar de manera general cuatro escenarios de emisiones: altas (A1B), medias altas (A2), medias bajas (B2) y bajas (B1). Las dos familias “A”, por ejemplo, sitúan un alto crecimiento económico, mientras que las dos familias “B” exploran las consecuencias de un crecimiento económico más bajo. Las familias “A1” y “B1” están orientadas hacia la convergencia global, mientras que las familias “A2” y “B2” se enfocan en las estructuras regionales (IPCC, 2007). En términos simples, las cuatro líneas evolutivas combinan dos series de tendencias divergentes (figura 3.12): una serie desarrolla las variaciones entre valores económicos y ambientales; la otra serie explora las variaciones entre mayor globalización y regionalización. Estas líneas evolutivas pueden definirse más detalladamente de la siguiente forma:

- Línea evolutiva y familia de escenarios A1 (700 ppm CO₂): presenta un mundo futuro con crecimiento económico muy rápido; la población mundial llega a su punto máximo a

mediados del siglo y decrece desde entonces. Se asume una rápida introducción de tecnología nueva y más eficiente.

- Línea evolutiva y familia de escenarios A2 (850 ppm CO₂): supone un mundo muy heterogéneo, con la población global en constante aumento y el crecimiento económico orientado regionalmente; éste es más lento y fragmentado que en las otras líneas evolutivas.
- Línea evolutiva y familia de escenarios B1 (540 ppm CO₂): muestra un mundo convergente con los mismos patrones de población que la familia A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información. Esto supone una reducción en la intensidad del uso de materiales, y la introducción de tecnologías limpias y eficientes en el uso de recursos.
- Línea evolutiva y familia de escenarios B2 (550 ppm): plantea un mundo en donde el énfasis se concentra en soluciones locales para la sustentabilidad económica, social y ambiental. Asume una población en continuo crecimiento (menor al de la familia A2) y un nivel de desarrollo económico intermedio.

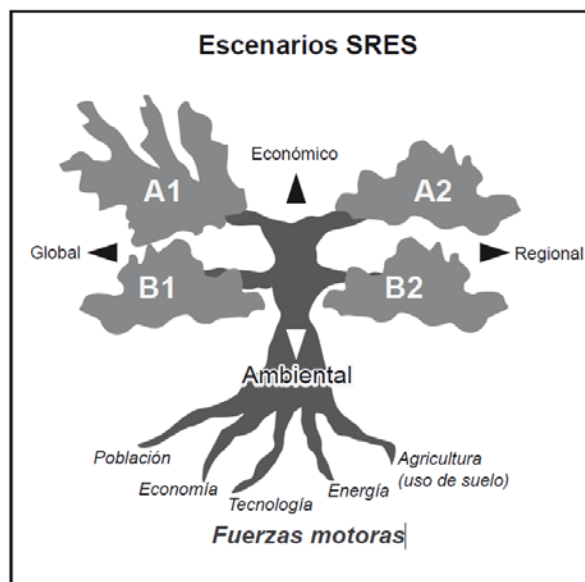


Figura 3.12 Esquema de las familias evolutivas de los escenarios SRES (Nakicenovic *et al.*, 2000)

A partir de estas líneas evolutivas se desarrollaron cuarenta escenarios que caben dentro de cada una de las cuatro familias. Es importante recalcar que todos los escenarios se consideran como

válidos y no tienen asignada una probabilidad de ocurrencia. De las cuatro familias se tomaron seis grupos de escenarios (figura 3.13 y tabla 3.3) para generar las proyecciones de clima del CIECC del IPCC (2007): uno para cada una de las familias A2, B1 y B2, y tres para la familia A1. Estos últimos caracterizan los desarrollos alternativos de tecnologías energéticas: A1F1 (uso intensivo de recursos fósiles), A1T (uso predominante de recursos alternativos a los fósiles) y A1B (asume un balance de las fuentes energéticas).

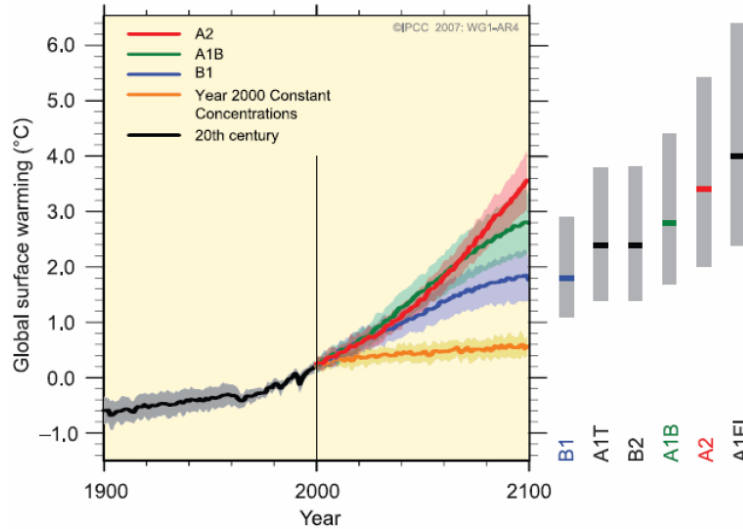


Figura 3.13 Calentamiento global en superficie derivado de seis proyecciones utilizadas por el IPCC para el cuarto informe de evaluación sobre el cambio climático (IPCC, 2007).

Tabla 3.3. Estimaciones de aumento en temperatura para finales del siglo XXI (°C) (Magaña, 2010)

Escenario	Mejor estimación de aumento	Mínimo aumento probable	Máximo aumento probable
B1	1.8	1.1	2.9
A1T	2.4	1.4	3.8
B2	2.4	1.4	3.8
A1B	2.8	1.7	4.4
A2	3.4	2.0	5.4
A1F1	4.0	2.4	6.4

Como ya se mencionó anteriormente estos escenarios parten de un conjunto de suposiciones acerca de la evolución de los forzantes (población, tecnología, economía, uso del suelo, agricultura y energía) tanto en el ámbito global como regional. Entre las suposiciones inherentes a los escenarios mencionados, se estima que las reservas petroleras y de carbono serán la fuente principal de energía por lo menos para los próximos cien años.

3.10 Técnicas de reducción de escala

El cambio climático puede producir efectos a escala local, regional y continental. Los modelos climáticos globales (MCG) representan la herramienta más potente disponible en la actualidad para modelar el clima y los posibles cambios futuros a escala global, pero esta bondad no es muy útil para el estudio de impactos locales en sistemas naturales y humanos debido a que la resolución espacial de esos modelos (cientos de kilómetros, 150-300 km) está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar (sólo unos cuantos kilómetros, 50 km o menos) (Magaña *et al.*, 2012; Cavazos y Arriaga-Ramírez, 2012; Christensen *et al.*, 2007, Semenov *et al.*, 2010; Wilby *et al.*, 1998).

“Las técnicas de reducción de escala (downscaling) se han desarrollado como herramientas que conectan los resultados obtenidos con los MCG de baja resolución espacial y aquellos que analizan los potenciales impactos del cambio climático a nivel local (Magaña, 2010)”.

El método de reducción de escala (figura 3.14) consiste en establecer relaciones entre las variables utilizadas para predecir (predictores de gran escala), simuladas por el MCG; y los valores históricos de las variables climáticas a predecir (predictandos locales), como temperatura y precipitación principalmente, de las estaciones meteorológicas en superficie (Bernal, 2000). Estas relaciones pueden construirse, según Estrada (2010) mediante dos tipos de enfoque de las técnicas de reducción de escala:

Enfoque dinámico, en el que la regionalización más fina se produce a través del uso de modelos físicos de clima regionales o de área limitada. La aplicación de este método requiere considerable conocimiento del clima y la variabilidad climática regional, buena experiencia en modelado climático y en general tiene requerimientos altos de uso computacional, en algunos casos, como los necesarios para correr los MCG (Amador, 2009).

Enfoque estadístico, en el que la regionalización se produce mediante regresión lineal, correlación canónica y redes neuronales (Cavazos, 1997) entre otras.

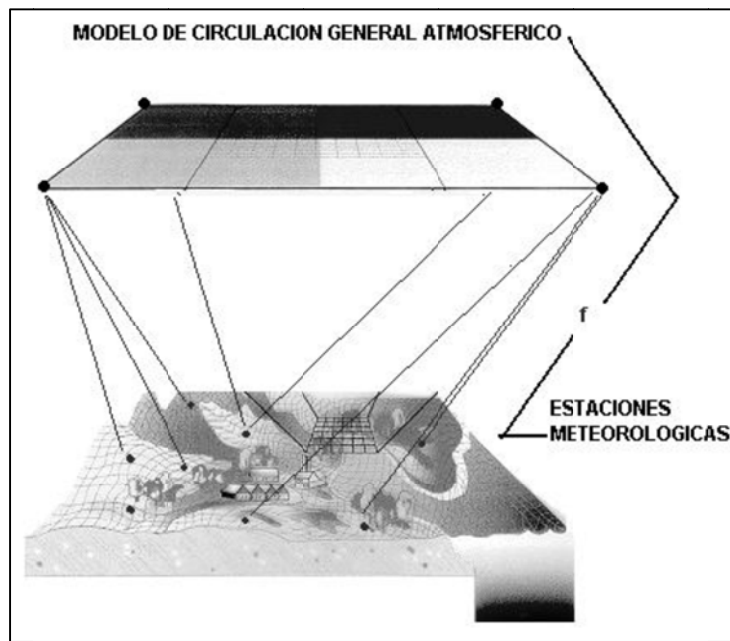


Figura 3.14 Visualización del método de reducción de escala (Department of Environment Transport and the Regions, 1995, tomado de Bernal *et al.*, 2000).

Las técnicas de ajuste de escala estadístico usan las salidas de los MCG y permiten la construcción de escenarios climáticos para sitios individuales o regiones con una resolución a diferentes escalas temporales como la diaria, la mensual y la estacional, utilizando para ello información estadística o de relación derivada de series de tiempo históricas. De forma general se pueden clasificar tres categorías descritas por Wilby *et al.* (2007):

a) Generación Climática en base a datos observados. Esta técnica se basa principalmente en la sensible relación entre el clima a grandes escalas y el clima a nivel local, implica el agrupamiento, a nivel local, de datos meteorológicos, en relación con patrones prevalecientes de circulación atmosférica. Los escenarios de cambio climático son construidos por un re-muestreo de la distribución de datos observados (condicionados por los patrones de circulación generados por un MCG), o mediante la generación de secuencias sintéticas de patrones climáticos, para luego realizar un remuestreo de los datos observados.

b) Generación Climática Estocástica. Los escenarios de cambio climático son generados estocásticamente usando parámetros escalonados de acuerdo a las salidas del MCG utilizado. La

principal ventaja de esta técnica, es que puede reproducir exactamente varias estadísticas meteorológicas observadas, y ha sido utilizada ampliamente, especialmente en la determinación de impactos climáticos en la agricultura. Los generadores climáticos estocásticos permiten la generación de escenarios de series de tiempo diaria necesaria para el análisis de riesgos.

c) Funciones de Transferencia. El escalamiento basado en funciones de transferencia, se basa en las relaciones empíricas entre los predictandos (variables a predecir) a nivel local y los predictores (variables utilizadas para predecir) a nivel regional. La principal virtud del escalamiento basado en funciones de transferencia, es su relativamente fácil aplicación. Su principal debilidad es que, los modelos usualmente son capaces de reproducir sólo una parte de la variabilidad climática.

Las técnicas de reducción de escala del tipo estadístico permiten crear escenarios sobre la condición climática más probable y en general, la calidad de la técnica se determina a través de su habilidad para simular algunas características estadísticas del clima observado.

3.10.1 Recomendaciones para la reducción de escala espacial

Muchos estudios han evaluado tanto las técnicas estadísticas como dinámicas para reducir el error de los MCG a escala regional. Estos estudios están de acuerdo que 1) la reducción de escala estadística un método relativamente rápido y económico para generar información útil para la toma de decisiones y las evaluaciones integradas, pero depende de la confiabilidad del manejo de los predictores de a gran escala, la estación del año, y la topografía (Cavazos y Hewitson, 2005), y no logra captar aspectos del clima dinámicos y estacionarios (Fowler *et al.*, 2007); Por ejemplo, barreras orográficas o contrastes de uso de suelo no distinguibles en el MCG pueden tener efectos sobre los patrones de temperatura o precipitación a escala local (figura 3.15) (Wilby y Dawson 2004). 2) las técnicas de reducción de escala dinámica tiene en cuenta la física y la no estacionalidad del clima, pero es computacionalmente cara y fuertemente dependientes del forzamiento del límite de frontera, de las parametrizaciones, y la resolución horizontal (Fowler *et al.*, 2007). Es claro que mucho del valor agregado que ofrecen la reducción de escala dependerá del

entendimiento de los procesos que generan el clima local o regional y de las disponibilidad de datos para poderlo representar (figura 3.16) (Wilby y Dawson 2004).

La base en la reducción de escala es esencialmente que existen relaciones (dinámicas o estadísticas) entre el clima local y el de gran escala, que permiten determinar condiciones locales a partir de información de baja resolución, y que estas relaciones permanecerán validas aún bajo condiciones climáticas futuras (Semenov *et al.*, 2010).

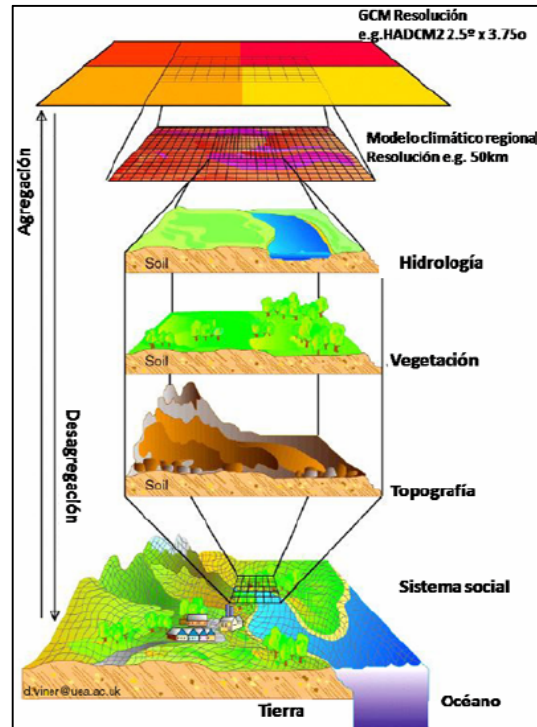


Figura 3.15 Esquema general del escalamiento espacial (INE, 2010)

Se deben tener en cuenta las ventajas y desventajas (tabla 3.4) que las técnicas de reducción de escala tienen independientemente de su naturaleza dinámica o estadística a la hora de reducir de escala una salida de un MCG (Amador, 2009; Christensen *et al.*, 2001). Algunas recomendaciones al momento de utilizar esquemas estadísticos (Wigley, 2004) se mencionan a continuación:

- i) Los MCG usados como información inicial en la reducción de escala deben simular algunas de las características dinámicas de gran escala que llevan o generan clima regional.

- ii) Las técnicas de reducción de escala deben estar basadas en una variable climática que no tenga grandes variaciones en escalas espaciales por debajo de la resolución del MCG, esto es, conviene usar variables tales como la presión atmosférica a nivel medio del mar más que la precipitación.
- iii) Las variables utilizadas en el proceso de reducción de escala espacial deben ser primordialmente variables primarias en el modelo y no derivadas, como por ejemplo, presión a nivel del mar. También es conveniente evitar usar variables resultado de parametrizaciones que involucran el uso de más de una variable, como es el caso de la precipitación.

Tabla 3.4 Ventajas y desventajas de las técnicas de reducción de escala (adaptado por A. Camargo de mador, 2009; Christensen *et al.*, 2001)

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Brinda información en la escala de las estaciones meteorológicas usadas a partir de las salidas de los MCG. 2. Económico, computacionalmente menos demandante que los métodos de reducción de escala con modelos numéricos basados en principios físicos. 3. Fácil de transferir entre diferentes plataformas de trabajo. 4. Los “ensambles” de los escenarios climáticos permiten el análisis de riesgo/incertidumbre. 5. Es aplicable a predictantes “no-tradicionales” tales como la calidad del aire o altura del oleaje. 6. Las técnicas estadístico-dinámicas están basadas en conocimiento de procesos físicos de gran escala y el clima local 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Depende del realismo del forzamiento en la frontera del MCG. 2. La elección del tamaño del dominio y su localización afectan los resultados. 3. Requiere gran cantidad de datos de muy buena calidad para la calibración del modelo. 4. Las relaciones predictor-predictante son con frecuencia no estacionarias. 5. Para algunas variables locales puede resultar difícil encontrar las relaciones estadísticas. 6. La elección de las variables usadas como predictores afectan el resultado. 7. La elección del esquema empírico de la función de transferencia afecta el resultado. 8. La variabilidad climática de baja frecuencia se vuelve problemática, especialmente si se usan series de tiempo cortas. 9. Los resultados no retroalimentan al MCG.

3.10.2 Modelo SDSM

Este método es un híbrido entre generación climática estocástica y función de transferencia que se basa en regresión lineal múltiple, establece relaciones empíricas entre predictandos a escala local (temperaturas, precipitación, etc.) y predictores de escala regional extraídos de los MCG. Este proceso requiere de la definición de relaciones estadísticas a partir de datos observados diarios, mediante la identificación de variables climáticas de gran escala, con características espaciales comparables a las que entrega un MCG. A estas variables se les conoce como variables

independientes o predictoras (Wigley et al., 2004), y son buenas candidatas aquellos que: a) son física y conceptualmente relevantes con respecto a las variables del sitio (la variable dependiente), b) están fuerte y consistentemente correlacionadas con el predictando, c) están disponibles en archivos de datos observados o salidas y d) son modeladas adecuadamente por el MCG. El proceso de construcción de las funciones de transferencia entre un campo y otro es conocido también como calibración. La función de transferencia resultante debe explicar un alto porcentaje de la varianza del clima en el sitio de interés. El error estándar asociado con la función de transferencia, debe ser menor que los cambios proyectados a futuro de la variable en cuestión, si es que la función realmente determina los cambios en la región o el punto en estudio. Si este no es el caso, entonces no se puede determinar si la sensibilidad del modelo estadístico a un forzamiento climático futuro es mayor que la precisión del modelo.

Una vez que las funciones de transferencia han sido calculadas, se procede a la verificación del modelo estadístico. Esto se realiza utilizando un conjunto de datos independiente de aquellos con los que se construyó el modelo. En principio, deben existir suficientes datos para que al menos con veinte años de información se deriven las funciones de transferencia que constituyan un modelo de regionalización y para que aún se disponga de diez años de datos o más para la validación de dicho modelo. Aunque esto no siempre es posible, se recomienda que se guarde un subconjunto de datos observados para la verificación del modelo, que consiste en comparar los valores observados con los predichos por el modelo estadístico para el mismo período. Una vez que se determina la calidad del modelo puede ser usado para la generación de escenarios regionales o locales de cambio climático. Si el modelo y la verificación producen buenos resultados, entonces el modelo puede usarse con confianza para análisis de cambio climático a escala regional.

3.10.3 Modelo LARS WG

El LARS WG es un generador estocástico de tiempo, el cual puede ser usado como una herramienta computacionalmente económica para simular datos diarios de tiempo de un sitio en particular (Racsko *et al.*, 1991; Semenov *et al.*, 1998; Semenov *et al.*, 1999). Tiene la habilidad de

producir series sintéticas a escala diaria con las mismas características estadísticas de la serie real de la estación (Richardson, *et al.*, 1984); supone que las correlaciones estadísticas entre las variables del clima derivadas de datos observados, son válidas bajo una suposición de cambio en el clima (Semenov *et al.*, 1997). La componente estocástica en un generador de tiempo está controlada por la selección de un número al azar llamado “semilla”. Cambiando este número se obtienen secuencias de tiempo completamente diferentes (Semenov *et al.*, 1999). Esto significa que es posible generar muchas secuencias de tiempo diario de un escenario en particular y que las secuencias estadísticas del escenario serán muy parecidas, al compartir las mismas características estadísticas como media y desviación estándar principalmente, pero no serán idénticas. Este generador de tiempo se basa en un enfoque de series autoregresivas (Racsko *et al.*, 1991) descritas en Semenov (2007). Utiliza una distribución semi-empírica (SED, por sus siglas en inglés) que se aproxima a una distribución de probabilidad de series húmedas y secas, precipitación diaria, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar (Richardson, 1981). La SED es definida como una función de distribución de probabilidad acumulada (PDF) y el número de intervalos (n) usados es 23, la cual ofrece una mayor precisión de la representación de la distribución observada. La simulación de la ocurrencia de precipitación es modelada con diferentes relaciones para días secos y húmedos, ya que está dividida en un proceso de ocurrencia y un proceso de cantidad muestreado al azar por una distribución apropiada. La longitud de cada serie es seleccionada aleatoriamente desde la SED húmeda o seca, para el mes en la cual la serie empieza, al igual que para las distribuciones de las series observadas. Para un día húmedo, el valor de precipitación es generado a partir de la SED de precipitación para el mes específico, independientemente de la longitud de la serie húmeda o de la cantidad de la precipitación en días previos. Las temperaturas mínimas y máximas diarias se consideran como procesos estocásticos de acuerdo al condicionamiento de la media y desviación estándar diarias al estado húmedo o seco del día. En la versión LARS-WG 5.0, se aproxima por la SED calculadas para cada mes, con auto correlaciones cruzadas (Semenov *et al.*, 2010).

3.11 Los SIG y la Interpolación de las variables climáticas

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas de análisis espacial, un conjunto organizado de tecnología computacional (equipo, paquetes de programas, datos geográficos digitales, métodos y técnicas) y personal, diseñados para capturar, almacenar, actualizar, manejar, analizar y desplegar diferentes formas de información geográficamente referenciada. Los componentes de un SIG operan de manera integrada para dar soporte a la toma de decisiones en la solución de un problema del entorno o espacio geográfico. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones (Bourrogh y McDonnell, 1998), que están considerados como parte de los elementos que se combinan para tomar una decisión (Hubert, 2012), como por ejemplo al evaluar la influencia que el clima tiene sobre muchos de los procesos bióticos, abióticos y su relación con la actividades humanas.

Diversos aspectos físicos naturales, tales como las precipitaciones o las temperaturas, se pueden representar y analizar como una superficie. Las superficies son objetos tridimensionales con dos dimensiones que representan los ejes espaciales y una tercera variable cuantitativa representada en cada punto del espacio. El principal problema es el relacionado con el carácter puntual de los datos y la heterogénea distribución espacial de los observatorios, en su mayoría en zonas con elevadas densidades de población o de clara orientación agrícola y escasos o no existentes, en zonas de montaña (Saz *et al.*, 2010). Variables climáticas como la temperatura y la precipitación son fenómenos que ocurren de forma continua, pero la información cuantificable de la cual se dispone es en su mayoría es discreta, por esta razón es necesario estimar el valor de un punto o localización no muestreada a partir de mediciones hechas en puntos o localizaciones vecinas. La interpolación se refiere a los métodos para determinar los valores de todos los puntos a partir de los valores en los puntos de muestreos, lo que nos permite crear mapas continuos a través de un número de observaciones discretas (Ninyerola *et al.*, 2000). El área de estudio se define, aunque no de forma muy clara, por el entorno de los puntos en los que sí se dispone de datos. La estimación de valores

fuera del área de estudio se denomina extrapolación. Todos los métodos de interpolación se basan en la presunción lógica de que cuanto más cercanos estén dos puntos sobre la superficie terrestre más se parecerán, para expresarlo más técnicamente, las variables espaciales muestran autocorrelación espacial. Los métodos de interpolación desarrollados pueden dividirse en:

1. *Métodos globales*, utilizan toda la muestra para estimar el valor en cada punto de estimación. Se dividen en métodos de regresión y de clasificación. Asumen la dependencia de la variable a interpolar de otras variables de apoyo.

2. *Métodos locales*, asumen autocorrelación espacial y estiman los valores de la variable de interés como una media ponderada de los valores de un conjunto de puntos de muestreo cercanos. En estos métodos destacan las medias ponderadas por inverso de la distancia, Kriging, TIN y Splines.

Distancia Inversa Ponderada (Inverse Distance Weighted, IDW) y Spline son dos modelos basados en métodos de interpolación determinista ya que se fundamentan en muestreos del área de estudio en fórmulas matemáticas que determinan la forma de la superficie resultante. Una segunda familia de modelos está basada en métodos geoestadísticos (como el Kriging) que utilizan fundamentos estadísticos que incluyen auto correlaciones. Es decir, son modelos que no solo predicen superficies de interpolación, sino que también indican el grado de exactitud y error de la predicción. Kriging es similar a IDW, en cuanto a que ponderan muestras del entorno para extraer predicciones de zonas próximas. La fórmula general para ambas interpolaciones está basada en la suma ponderada de todos los datos (Rapallo, 2005).

3.12 Importancia del cultivo del trigo

3.12.1 Panorama mundial y contexto nacional

El trigo (género *Triticum*) y sus productos son muy importantes en la nutrición humana por representar una fuente esencial de carbohidratos, por esta razón es uno de los cereales de mayor consumo y el más extensamente cultivado en el mundo (FAO, 2002). El trigo como el grano básico que más se produce a nivel mundial tiene un consumo per cápita de 102 kg., generando el más grande intercambio comercial en lo referente a granos alimenticios (Alvarado, 2007). A nivel

mundial la superficie sembrada es de 225 millones de has donde se estimó una producción record para el año 2010/2011 de 700 millones de toneladas (tabla 3.5), siendo China, la India y Estados Unidos, los países que más producen este cultivo (FAO, 2012).

En México el trigo es el segundo cereal en importancia dentro de la canasta básica después del maíz, pues con él se elaboran varios productos de consumo masivo como panes, tortillas, pastas, galletas, atoles, papillas, obleas y pasteles, siendo el consumo per cápita a nivel nacional de 57 kg (Alvarado, 2007). En 2010 la Canimolt (Camara Nacional de la Industria Molinera del Trigo) estimó la producción nacional para el ciclo agrícola 2009/2010 en 3 millones 680 mil toneladas y los rendimientos promedio son apenas mayores a 4 ton ha⁻¹.

La producción de trigo en México se concentra principalmente en las zonas del Bajío y la parte noroeste del país. En la región del bajío que incluye los estados de Guanajuato, Michoacán y Jalisco, se produce el 27% del trigo a nivel nacional; mientras que en la región noroeste conformada por los estados de Sonora, Sinaloa y Baja California, se produce el 57% (Alvarado, 2007). En el noroeste de México el trigo es uno de los cultivos más importantes, anualmente la superficie sembrada en los Estados de Sonora, Baja California y Sinaloa comprende aproximadamente 365 000 ha, con un rendimiento medio de 5.6 ton ha⁻¹ (SAGARPA, 2011).

Tabla 3.5 Principales productores de trigo a nivel mundial de acuerdo al ciclo 2009-2011 (FAO, 2012)

<i>(millones de toneladas)</i>					
	Promedio 2009-11	2010	2011 estim.	2012 pronóst.	Variación: 2012 respecto de 2011 (%)
UE	137.7	136.4	138.0	138.0	0.0
China Continental	116.1	115.2	117.9	115.5	-2.0
India	82.8	80.8	86.9	88.3	1.6
Estados Unidos	58.3	60.1	54.4	60.0	10.3
Fed. de Rusia	53.1	41.5	56.2	56.0	-0.4
Australia	26.4	27.9	29.5	25.0	-15.3
Canadá	25.1	23.2	25.3	25.6	1.1
Pakistán	23.9	23.3	24.3	24.4	0.4
Turquía	20.7	19.7	21.8	19.5	-10.5
Ucrania	20.0	16.9	22.3	19.0	-14.8
Kazajistán	16.4	9.6	22.5	21.0	-6.7
Irán (Rep. Islámica del)	14.0	15.0	14.0	14.0	0.0
Argentina	12.7	15.8	13.4	13.0	-2.9
Egipto	8.0	7.2	8.4	8.4	0.0
Uzbekistán	6.6	6.7	6.4	6.4	-0.5
Total mundial	680.5	655.9	700.0	690.0	-1.4

¹ Los países están clasificados según su producción promedio de 2009-11.

3.12.2 Situación en el Valle de Mexicali

En la región del Valle de Mexicali, Baja California, se siembran comercialmente alrededor de 50 especies de plantas de ciclo otoño-invierno que ocupan el 59.30 % de la superficie; en el ciclo de primavera-verano se siembra alrededor del 20.10 % de la superficie. De acuerdo por lo reportado por el INIFAP (2010) el trigo es el cultivo más sembrado.

El Valle de Mexicali comprende a las regiones agrícolas de Mexicali y San Luis Río Colorado. En la región, la superficie con potencial productivo anual es de aproximadamente 207,506 hectáreas, de las cuales 180,859 corresponden a la región de Baja California y 26,647 pertenecen al estado de Sonora; de la superficie total, 126,026 hectáreas son ejidales y 81,480 pertenecen a particulares (Sánchez, 2005). El Valle de Mexicali es una importante zona productora a nivel nacional, la cuarta más importante del país (SIAP, 2010), no sólo por su potencial productivo, sino por la calidad de sus productos agrícolas. La superficie anual sembrada de trigo oscila entre 80 000 y 85 000 ha/año, con una tendencia ascendente en los últimos 5 años. En este Valle se cultiva el trigo de mayor rendimiento comercial en el país con una producción superior a las 500 mil toneladas y un promedio de 6.3 ton ha⁻¹; como ejemplo de ello, en el ciclo agrícola 1997-1998 el rendimiento medio por hectárea de trigo se colocó en las 7.150 toneladas (tabla 3.6), la cifra más elevada a nivel nacional y del periodo de 1987-2010 (SAGARPA, 2011).

Tabla 3.6 Serie histórica de producción de trigo grano en el Valle de Mexicali (Fuente: SAGARPA. Delegación en Baja California, Subdelegación Agropecuaria, Jefatura de Fomento Agropecuario)

CICLO	SUPERFICIE SEMBRADA	SUPERFICIE COSECHADA	RENDIMIENTO	PRECIO MEDIO RURAL	PRODUCCION	VALOR DE LA
O-J	(HA)	(HA)	(TON /HA.)	\$/TON	TON.	MILES (\$)
1987-88	56,560	53,098	4.578	310,000.00	243,096.000	75,359,760.00
1988-89	52,379	50,572	4.356	395,000.00	220,304.000	87,020,080.00
1989-90	49,303	48,374	5.263	515,426.00	254,569.000	131,211,481.39
1990-91	62,510	60,366	5.434	593,505.00	328,027.000	194,685,664.64
1991-92	81,875	79,683	4.245	599,039.00	338,229.000	202,612,361.93
1992-93	81,875	79,683	5.719	\$613.00	455,746.000	279,372.30
1993-94	81,001	80,018	6.219	\$613.00	497,638.000	305,052.09
1994-95	71,056	69,658	5.404	\$866.00	376,423.000	325,982.32
1995-96	53,557	53,159	5.227	\$1,896.39	277,850.000	526,911.96
1996-97	67,882	67,224	6.119	\$1,405.27	411,329.000	578,028.30
1997-98	55,446	54,913	7.150	\$1,373.56	392,650.000	539,328.33
1998-99	51,000	50,636	6.701	\$1,369.01	339,313.000	464,522.89
1999-00	74,567	74,273	5.774	\$1,422.07	428,819.000	609,810.64
2000-01	68,341	68,033	5.646	\$1,139.95	384,099.000	437,853.66
2001-02	65,031	64,926	5.950	\$1,145.00	386,299.000	442,312.36
2002-03	75,035	74,394	6.283	\$1,350.20	467,418.000	631,107.78
2003-04	85,773	85,320	4.990	\$1,805.91	425,667.000	768,716.29
2004-05	81,111	80,555	5.911	\$1,600.00	476,152.00	761,843.20
2005-06	76,336	75,989	6.568	\$1,600.00	499,058.12	798,492.99
2006-07	80,202	79,946	6.010	\$2,200.00	480,374.72	1,056,824.38
2007-08	82,142	81,958	6.439	\$3,766.44	527,768.20	1,987,807.26
2008-09	89,032	88,937	6.624	\$3,068.81	589,106.00	1,807,852.03
2009-10*	89,152	87,724	6.978	\$3,050.00	612,118.00	1,866,959.90

Sánchez (2005) menciona que el 14% de la población económicamente activa del Valle de Mexicali labora en el sector agrícola, y según SAGARPA (2011) se dedican a la siembra de este cultivo aproximadamente 5000 familias rurales. Considerando el número de productores que se dedican cada año al cultivo del trigo la importancia económica de esta gramínea en el Valle de Mexicali es superior al resto de los cultivos; en 2009, 89,032 hectáreas fueron dedicadas a su producción, según se muestra en la tabla 3.7. La importancia económica del trigo en el Valle de Mexicali se refleja en su nivel de rendimiento (figura 4.9 y tabla 4.2) según el Centro de Apoyo al Desarrollo Rural para el trigo del Valle de Mexicali.

Tabla 3.7. Estadísticas 2009 del cultivo de trigo en el Valle de Mexicali (Fuente: SAGARPA. Delegación en Baja California, Subdelegación Agropecuaria, Jefatura de Fomento Agropecuario)

Estadística (Hectáreas), 2009	Mexicali	Baja California
Superficie sembrada total	163,979	228,136
Superficie cosechada total	162,000	207,336
Superficie mecanizada	163,978	228,135
Superficie sembrada de trigo grano	89,032	102,469
Superficie cosechada de trigo grano	88,937	95,377
Volumen de la producción de trigo grano	589,106	592,628

Tabla 3.8 Avance de producción por CADERS de primera cosecha en el Valle de Mexicali (Fuente: SAGARPA. Delegación en Baja California, Subdelegación Agropecuaria, Jefatura de Fomento Agropecuario)

CENTROS DE APOYO	AVANCE DE COSECHA DE TRIGO CICLO: OTOÑO-INVIerno 2010-2011						
	SUPERFICIE					PRODUCCION	
	SEMBRADA	SINIESTRADA	COSECHABLE	COSECHADA	%	REND. TON/HA	TONELADAS TOTALES
BENITO JUAREZ	17,007	20	16,987	10,434	61	6.562	68,467
HECHICERA	14,097	59	14,038	8,906	63	6.6	58,777
COLONIAS NUEVAS	7,383	77	7,306	3,640	50	5.417	19,717
GUADALUPE VICTORIA	11,332	84	11,248	3,695	33	6.273	23,180
DELTA	9,002	0	9,002	2,970	33	5.881	17,468
CERRO PRIETO	15,686	4	15,682	12,466	79	5.447	67,897
TOTAL	74,507	244	74,263	42,111	57	6.067	255,506

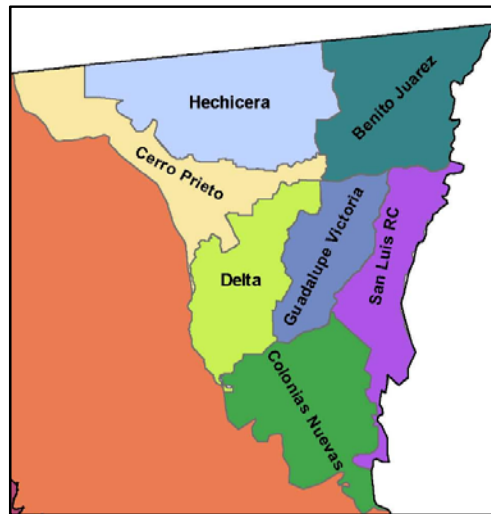


Figura 3.16 localización de los Centros de Apoyo al Desarrollo Rural para el trigo.

3.12.3 Generalidades del trigo en el Valle de Mexicali

El ciclo del cultivo del trigo en el Valle de Mexicali es el periodo otoño-invierno, el cual abarca los dos últimos meses de un año y los cinco primeros del siguiente, es una planta gramínea anual con espigas de cuyos granos molidos se obtiene la harina (figura 3.17). La forma del grano de Trigo es ovalada con extremos redondeados, en uno de ellos sobresale el germen y en el otro hay un mechón de pelos finos conocido como el pincel (INIFAP, 2009).



Figura 3.17 Ejemplo del trigo característico del Valle de Mexicali (INIFAP, 2009)

Experimentos de varios años realizados por el CEMEXI (Campo Experimental Mexicali) (INIFAP, 2010) indican que la mejor fecha de siembra del trigo comprende del 15 de noviembre al 31 de diciembre. La época de cosecha comprende los meses de mayo y junio. Las variedades de trigo que se sugiere para siembras en el Valle de Mexicali están entre los grupos que se comercializan en México. Sus características agronómicas se presentan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Características agronómicas y uso industrial de las variedades de trigo recomendadas por el INIFAP para el Distrito de Riego 014, Río Colorado.

VARIEDAD	DÍAS A ESPIGAMIENTO	MADUREZ FISIOLÓGICA	ALTURA DE PLANTAS (CM)	COLOR DE GRANO
GRUPO I				
Roeifs F2007	96-109	127-146	95-110	Blanco
Palmerín F2004	102-114	136-153	85-100*	Blanco
Kronstad F2004	95-104	128-147	90-105	Rojo
Cachanilla F2000	94-105	129-146	85-100	Blanco
Yécora F70	92-103	125-141	60-80	Blanco
Rayón F89	97-108	129-146	90-105*	Rojo
Oasis F86	95-105	130-145	65-85	Blanco
GRUPO II				
Baviácora M92	93-109	130-146	95-115*	Rojo
GRUPO III				
Cucurpe S86	91-102	125-140	80-95	Ámbar
GRUPO V				
CEMEXI C2008	96-112	132-146	90-105*	Ámbar
Batáquez C2004	96-110	131-144	90-105*	Ámbar
Río Colorado C2000	99-115	132-145	90-105*	Ámbar
Átil C2000	98-109	133-147	85-105*	Ámbar
Rafi C97	98-109	133-148	85-100*	Ámbar
Nácori C97	98-110	134-149	85-105	Ámbar
Aconchi C89	95-106	132-145	80-100*	Ámbar
Altar C84	94-105	128-143	85-100*	Ámbar

* La letra después del nombre de la variedad indica su uso industrial potencial.
* Variedades vigorosas con alto potencial de amacollamiento

3.12.4 Fenología del trigo

La fenología es el estudio de la secuencia temporal de las distintas fases por las que atraviesa un organismo a lo largo de su ciclo de vida, para el caso del trigo se presenta en la tabla 3.10 y figura

3.18, donde se observa que la temperatura es un elemento bioclimático que favorece o promueve cada etapa fenológica¹.

Tabla 3.10 del umbral térmico por etapa fenológica del trigo (Indicar fuente), revisar si esto corresponde a trigos de invierno, o trigos de primavera (que son los que se siembran en Mexicali)

Umbral/etapa fenológica	Temperatura del aire (°C)				
	Plántula	Amacollo	Encañe	Floración	Llenado de grano
Temperatura mínima letal	-4	-5	-1	0	0
Temperatura mínima Vital	0	3	5	8	10
Temperatura mínima de confort	6	4	8	10	12
Temperatura máxima de confort	20	18	22	24	26
Temperatura máxima Vital	24	22	26	28	29
Temperatura máxima Letal	32	31	31	31	32

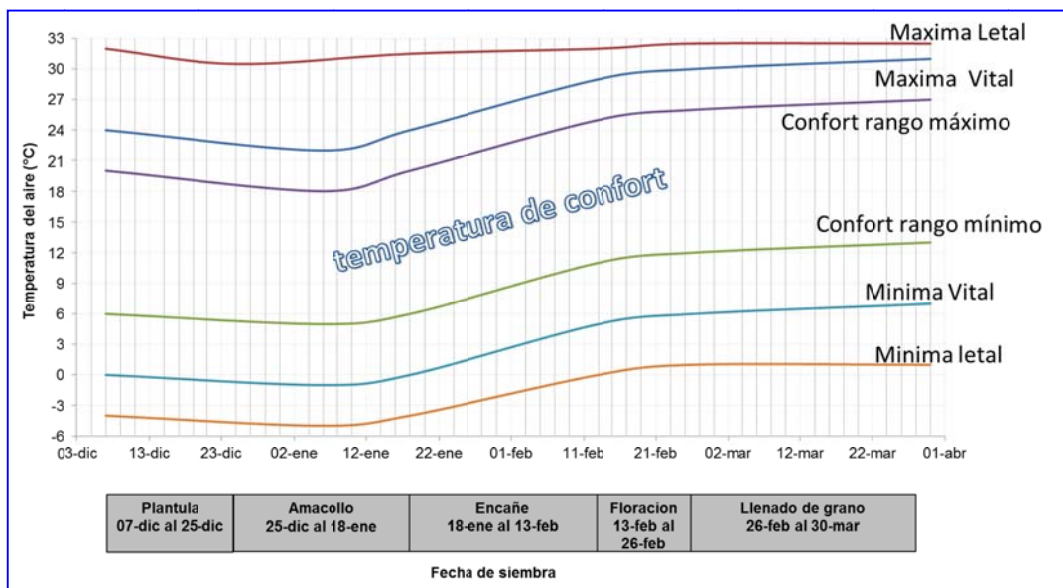


Figura 3.18 Dinámica de los umbrales térmicos durante las etapas fenológicas del trigo.(fuente)

Existen varias metodologías (útiles como índices bioclimáticos) para valorar la importancia de la temperatura del aire y explicar el comportamiento fenológico de los cultivos:

- a) Por la acción de la acumulación de calor (sumas térmicas): al sumar la temperatura media diaria, desde el momento en que se produce la germinación hasta el momento de la madurez, la suma total es siempre la misma, cualquiera que haya sido la ubicación del cultivo. A esta suma (propia de cada vegetal) se denomina constante térmica.

¹ Una etapa fenológica está delimitada por dos fases fenológicas sucesivas. A los fenómenos biológicos observables que constituyen cambios o transformaciones en un escaso periodo de tiempo se les denomina fases fenológicas.

- b) Por la acción de la acumulación de frío (horas de frío): suma de horas en que la planta está sujeta a un período de descanso o latencia, cuando la temperatura es igual o inferior a una temperatura base.

De acuerdo a estudios realizados por el INIFAP (2009). Las variedades de trigo que se cultivan en el Valle de Mexicali, muestran una expresión favorable entre la acumulación bien distribuida de horas frío durante el ciclo de cultivo y el rendimiento de grano. Esta metodología simplista de sumas térmicas (Confalone y Navarro, 1999) puede explicar el desarrollo de la planta hasta un 98% como lo señala Arnold (1959). De aquí la importancia de describir cada una de las etapas fenológicas del trigo:

Plántula. Etapa inicial del desarrollo que asegura altos rendimientos en el trigo, en función del número de plantas completamente desarrolladas. Esta etapa soporta temperaturas entre -5 a 32°C.

Macollos formados. Esta etapa puede alargarse con mayor frío formando más cuerpo (mayor índice de área foliar) y un mayor número de macollos; al contrario puede acortarse por efectos del calor produciendo macollos incompletos con menor cuerpo vegetal (menor índice de área foliar).

Primer nudo (Encañe). En esta fase de crecimiento cesa el desarrollo de macollos. Al acumular una cierta cantidad de horas calor, se diferencia la espiguilla (ubicada por debajo del nivel del suelo), determinándose su tamaño y el número de espiguillas en cada espiga, por lo que es importante que la planta desarrolle el máximo potencial, al estar expuesta a un periodo amplio de horas frío.

Encañe. Esta etapa se caracteriza por la aparición del segundo nudo sobre la superficie del suelo, puede durar 23 días con un acumulado cercano a 80 horas frío.

Hoja bandera (Embuche). Esta etapa comienza cuando la última hoja empieza a emerger y a desplegarse. Esta hoja es de gran importancia ya que conforma aproximadamente el 75% del área a foliar que contribuye de manera efectiva al llenado del grano (Travis, 1992). Esta etapa se define con aproximadamente 500 horas de calor y cerca de 500 horas frío.

Floración. La floración en una planta de trigo dura en promedio 12 días cuando es sembrada desde mediados de noviembre y 8 días a principio de enero. Cuando aparecen las anteras,

la flor ya fue polinizada. En un año fresco, la etapa de floración inicia cuando se acumulan alrededor de 530 horas de calor y 500 horas de frío, o 350 horas frío cuando el ciclo es cálido.

Llenado de grano. El periodo del llenado del grano es muy sensible a las variaciones de temperatura del aire. Esta etapa puede durar 35 días en un ambiente con estrés por calor durante el ciclo, falta de agua y normalmente por fecha de siembra tardía. Puede prolongarse a 50 días en siembras tempranas y en años fríos, sin estrés de agua y nutrición.

Madurez fisiológica. Aproximadamente la madurez del grano se logra a las 900 horas calor en siembras del 15 de noviembre y para siembras del 2 de enero se logra a las 800 horas de calor.

3.12.5 Unidades Calor

La temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos, que requieren de la acumulación de cierta cantidad de calor para pasar de un estado en su ciclo de vida a otro. La medida de este calor acumulado se conoce como Tiempo Fisiológico, y teóricamente este concepto que involucra la combinación adecuada de grados de temperatura y el tiempo cronológico, es siempre el mismo (WMO, 1993).

El concepto de acumulación de horas calor se basa en el hecho de que la mayoría de los procesos fenológicos y de crecimiento de los cultivos ocurre en relación directa con la acumulación de temperatura por el cultivo. Debajo de un nivel de temperatura base (temperatura umbral mínima), no se acumula tiempo térmico y el crecimiento se detiene. Arriba de una temperatura óptima (temperatura umbral máxima), el crecimiento se ve reducido. Estos valores se conocen como Temperaturas Cardinales (Ruiz, 1991). Este concepto asume que entre estos dos umbrales de temperatura, la planta acumula cierta cantidad de tiempo térmico a fin de completar su desarrollo (Roberts y Summerfield, 1987). El uso de UC ha mostrado ser más eficiente para modelar y predecir el desarrollo fenológico de los cultivos en comparación con el método tradicional de computar días después de la siembra (DDS), debido principalmente a que las variaciones entre ciclos agrícolas y localidades pueden ser estandarizadas en forma más precisa mediante UC en comparación con DDS. Boswell (1929) fue el primero en documentar el uso de UC en agricultura,

en 1929. A partir de ahí, las UC se han aplicado con éxito en numerosos cultivos, tales como: melón, (Baker y Reddy, 2001; Baker et al., 2001, y Soto et al., 2008), chile (Perry et al., 1993, y Soto et al., 2008), tomate (Perry et al., 1997), y trigo (McMaster y Wilhelm, 1998) entre otros.

Es así como surge el término de días grado o Grados Día (GD) que puede ser definido como días en términos de grado sobre una temperatura umbral (Arnold, 1959). De manera que para completarse una etapa fenológica es necesario la acumulación del Requerimiento Térmico, RT; este se mide en grados-días sobre la temperatura base.

$$GD (^{\circ} C) = (T \text{ máx. } ^{\circ}C + T \text{ mín. } ^{\circ}C) / 2 - t_b \text{ (Temperatura Base)}$$

Los GD permiten estimar la duración de cada estado fenológico de un cultivo en base a la acumulación de Unidades Calor y con esto estimar su fecha aproximada de madurez fisiológica, lo cual permitirá programar las actividades de cosecha apropiadamente.

CAPÍTULO 4. SITIO DE ESTUDIO

4.1 Sitio de estudio

4.1.1 Localización geográfica del Valle de Mexicali

La región del Valle de Mexicali se encuentra ubicado en el Estado de Baja California, en la parte noroeste de México, se localiza entre los meridianos $114^{\circ} 45'$ a $115^{\circ} 40'$ de longitud oeste y los paralelos $31^{\circ} 40'$ a $32^{\circ} 40'$ de latitud norte (Figura 4.1), con una altitud que varía de -2.0 a 46.0 metros respecto al nivel medio del mar. Limita al norte con los Estados Unidos de América (EUA), específicamente con el Valle Imperial del estado de California, al sureste con el Golfo de California y al suroeste con la sierra El Mayor, al oeste con la sierra Cucapá y al este con el Valle de Yuma Arizona, Estados Unidos y la mesa arenosa de San Luis Río Colorado, Sonora en México. Como parte de este valle se encuentra la región agrícola, el 88% corresponde al municipio de Mexicali, Baja California y el 12% a la zona de San Luis río Colorado, Sonora (Sánchez, 2005, INIFAP, 2010).



Figura 4.1. Vista satelital de la región del Valle de Mexicali (tomada de Google earth)

4.1.2 Clima

El Valle de Mexicali forma parte de la Región Climática 2 según la denominación en el trabajo de Vidal (2005), su clima se clasifica como $BW(h')hs(x')(e')$ de acuerdo al sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1964), se caracteriza por ser muy seco del tipo cálido, marcadamente extremoso con una gran oscilación anual de temperatura y una precipitación total en el año escasa con régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno.

La temperatura media anual es de 21.7 °C; de julio a agosto es normal que se registren temperaturas máximas de 45 °C, de diciembre a enero es común que se registren temperaturas mínimas de -2.0 °C aunque es posible que se presenten de -7.0 °C. La precipitación total media anual fluctúa entre 58 y 76 mm. De noviembre a mayo se acumulan 343 horas-frio. Con referencia a una temperatura base de 10 °C, anualmente se llegan a acumular alrededor de 4,500 unidades-calor. La máxima longitud del día es de 14.5 horas luz (junio-julio), y la mínima es de 10 horas de luz en diciembre y enero. El promedio anual de evaporación es de 2,350 milímetros; la evaporación diaria más alta es de 10.5 milímetros que se registra en junio y julio y la más baja es de 2.50 milímetros en diciembre y enero (INIFAP, 2010). La Radiación Solar Directa en el municipio de Mexicali se ubica por arriba de los 6.5 KW/m²/día, sobresaliendo algunos ejidos del Valle: Delta, Coahuila, México, Bataques, Puebla y Morelos así como la ciudad de Mexicali con niveles por arriba de 7 KW/m²/día (López y Marín, 2010).

4.1.2.1. Climatología dinámica

La región se encuentra bajo la influencia de la faja subtropical de alta presión que se localiza en las proximidades del paralelo 30° N, por lo que las condiciones de aridez del Valle de Mexicali se deben en parte al patrón general de circulación de la atmósfera que genera a esa latitud movimientos de aire descendentes muy estables que no provocan precipitación. Según Fields *et al.*, (1993) a esto se suma el efecto de sombra orográfica de la Sierra Juárez, ya que los vientos con humedad provenientes del Océano Pacífico llegan a la vertiente oeste de la sierra y al descender al

Valle de Mexicali por la vertiente del este absorben humedad, provocando con ello una condición de extrema aridez.

De forma particular para la climatología dinámica del Valle de Mexicali, García (1988) identificó que las masas de aire que se presentan en la región son de cinco tipos: Polar continental (Pc), Polar marítima (Pm), Tropical continental (Tc), Tropical marítimo (Tm) y de transición (Tr). Las características esenciales que determinan las principales propiedades de masas de aire y que son decisivas para el clima de la región son:

La Sierra de La Rumorosa: Esta sierra interfiere con el flujo libre de corrientes de aire y tiene gran influencia en la distribución de la temperatura y la lluvia. Separa las masas de aire Tm del Pacífico, de las masas de aire Tc de la región. También interfiere con el paso de las masas de aire Pm provenientes del Pacífico noroeste produciéndose la mayor parte de la lluvia en la vertiente occidental del Estado de Baja California y reduciéndose considerablemente en la región bajo estudio.

Forma de la Península de Baja California: La forma de la Península de Baja California sustrae al Golfo de California de las influencias marítimas que operan en su parte occidental, por lo que en el Valle de Mexicali, principalmente durante el verano, la masa de aire que con mayor frecuencia se presenta es del tipo continental (Tc), con la entrada irregular de masas de aire Tm desde su parte sur.

Corriente fría de California: Esta corriente oceánica torna sumamente estable a la masa de aire durante el verano, de manera que la precipitación pluvial es escasa constituyendo uno de los factores para hacer el clima desértico.

4.1.3 Agua

Ramírez (2006) señala que paradójicamente a pesar del clima extremo del Valle de Mexicali, el municipio de Mexicali cuenta con 85% del total del agua disponible en el estado de Baja California. La disponibilidad de agua en el estado se muestra en la figura 4.2. La única corriente fluvial que tiene el Valle de Mexicali, es el Río Colorado, el río nace en las montañas de Wyoming,

EUA y en su recorrido de 2,250 Km. cruza los estados de Utah, Colorado, Nevada, Nuevo México, Arizona y California; en territorio aún de EUA, recorre un tramo de 29 Km. que sirve de límite natural entre los dos Países y ya en territorio Mexicano recorre 60 Km. para desembocar en el mar de Cortés (Sánchez, 2005). El Valle de Mexicali, desde el punto de vista de abastecimiento de agua se ubica en el estado de Baja California dentro de la región fronteriza norte, que es abastecida por dos fuentes: 1) el agua del Río Colorado con un volumen anual de 1 850.234 hm³, (1 hm³= 1x10⁶m³) de acuerdo al Tratado Internacional de Límites y Aguas, suscrito en 1944 con los EUA, y 2) el agua del acuífero (Valle de Mexicali y mesa arenosa), cuyo volumen de extracción asciende a 719 y 197 hm³/año, respectivamente. Con este volumen se abastecen a través de una amplia red de canales, 207 935 hectáreas de tierras agrícolas del Distrito de riego 014, la población de la ciudad de Mexicali y su valle, la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora, y a través del acueducto Río Colorado-Tijuana, las ciudades de Tecate y Tijuana. Por su importancia, es posible afirmar que para el estado de Baja California y particularmente para el Valle de Mexicali, que el desarrollo económico y social registrado durante los últimos 60 años, ha sido sustentado en la disponibilidad de fuentes de agua locales, sean estas superficiales o subterráneas, sin embargo, estos pozos profundos han estado operando en el Distrito de riego 014, desde 1955 (Ramírez, 2006) y actualmente se encuentran sobre explotados y presentan intrusión de aguas salinas (Sánchez, 2005).

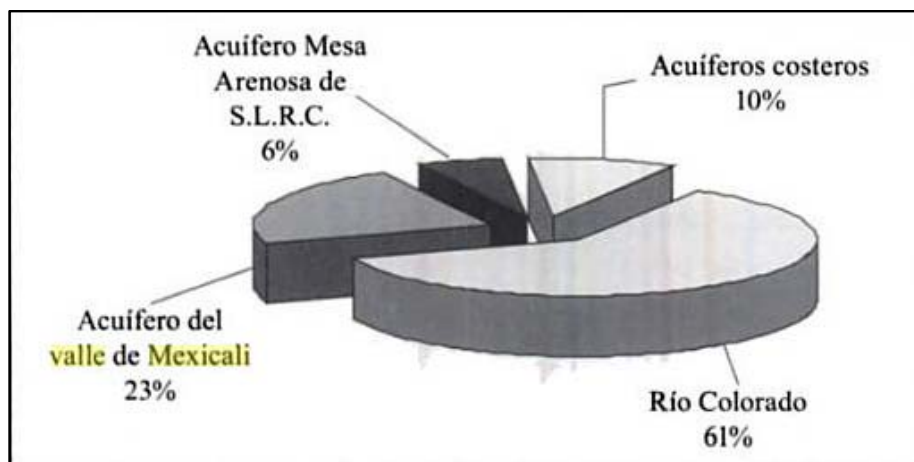


Figura 4.2 Disponibilidad de agua en el estado de Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora (tomado de Ramírez, 2006)

4.1.4 Suelo

La región de los valles de Mexicali, Imperial y Yuma, forman parte de la depresión del Salton. Ésta se originó a partir de la formación de bancos de arena en la desembocadura del río Colorado, que elevaron el área del delta por encima de la parte noroeste de la cuenca. Como consecuencia de ello el río descargó en la parte más profunda de la cuenca con lo que se formó un gran lago. Este lago desapareció cuando la elevación de la región del Salton permitió al antiguo río Colorado reencausarse hacia el Golfo (Sánchez, 2005). En este proceso el lago se secó originando tres tipos de suelo, cuyas texturas predominantes se clasifican en: pesados o arcillosos 15.6%, medios o francos 50.8% y ligeros o arenosos 33.6% (INIFAP, 2010).

El suelo de textura pesada es de color café oscuro, con 60 a 70% de arcilla, compactado en el subsuelo, lo que origina una alta capacidad de retención del agua y en general un drenaje deficiente. El contenido de materia orgánica es bajo. Por las características de estos suelos, se requiere un manejo muy cuidadoso para que los cultivos que se siembren en ellos, produzcan buenos rendimientos. El suelo medio es de color café gris, con el 80% de partículas de limo y arena, en general, con buen drenaje. Son suelos profundos que favorecen un buen desarrollo radicular y consecuentemente se pueden obtener altos rendimientos. El suelo ligero es de color gris claro, de alto contenido de arena, de 50 a 60%, que propicia el drenaje excesivo del agua. Esto ocasiona que se requiera un mayor número de riegos de auxilio para obtener altos rendimientos.

5. METODOLOGÍA

Para poder establecer estudios de tendencias de clima, detección de cambio climático, así como generar los escenarios y evaluar su posible impacto en el sector agrícola, en la figura 5.1 se muestra el diagrama de flujo general de los pasos que se siguieron para tales fines.



Figura 5.1 Diagrama de flujo general para generar escenarios de cambio climático mediante dos técnicas de reducción de escala y su aplicación al cultivo del trigo

5.1 Información climática

5.1.1 Base de datos

Se recopiló en forma digital los datos diarios de las variables climáticas (figura 5.2): temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin) y precipitación (P), mediante el Extractor Rápido de

Información Climatológica ERIC III (IMTA, 2006) y el sistema CLIma COMputarizado (CLICOM), base de datos oficial del clima en el país y que se encuentra disponible en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se completaron los datos faltantes con el archivo histórico de la Comisión Nacional del Agua (CNA), delegación Baja California. Para las estaciones de Estados Unidos se consultó la información en línea del *Weather Underground* (<http://www.wunderground.com/>), aunque no es una fuente oficial como la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, por sus siglas en inglés), es una fuente confiable debido a que sus series históricas datan desde antes de 1950 y raramente existen discontinuidades temporales en sus datos; además de que el equipo de monitoreo recibe mantenimiento regularmente.

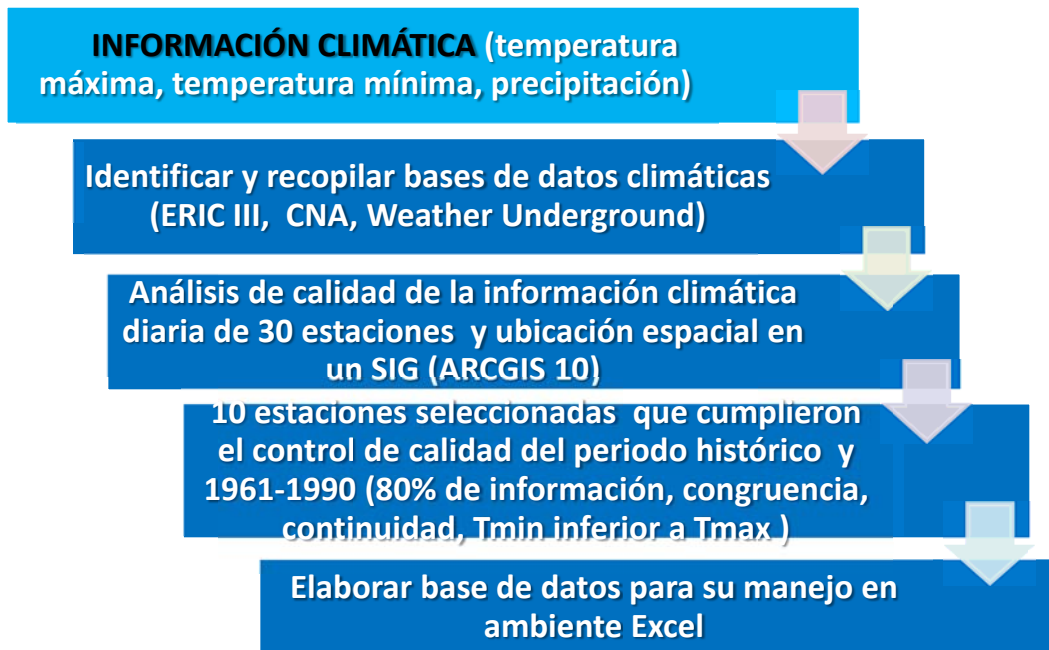


Figura 5.2 Diagrama de flujo de recopilación de la información climática y su análisis de calidad

La descripción de las variables climáticas consideradas para el estudio es la siguiente:

Temperatura máxima diaria: es la mayor temperatura registrada en un día, regularmente se presenta entre las 14:00 y las 16:00 horas.

Temperatura mínima diaria: es la menor temperatura registrada en un día, y se puede observar comúnmente entre las 06:00 y las 08:00 horas.

Precipitación: es la precipitación acumulada del periodo de 24 horas y se expresa en mm

5.1.2 Análisis de calidad de la información y selección de estaciones

Se identificaron en el Valle de Mexicali 30 estaciones de la base de datos ERIC III, correspondientes al estado de Baja California y al estado de Sonora. A estas estaciones se les aplicó un análisis de calidad de la información, seleccionando aquellas que de preferencia (aunque no necesariamente) contarán con un periodo histórico de datos desde 1950 a 2009 y que tuvieran un mínimo de 80% de datos completados, particularmente indispensable para el periodo observado 1961-1990; se verificó también su continuidad, congruencia y la revisión de valores de temperatura mínima inferiores a valores de temperatura máxima, así como ausencia de valores negativos en precipitación. En base a estos criterios se eligieron 8 estaciones, las cuales cubrieron la mayor parte del área de estudio, sin embargo, con el fin de poder elaborar los mapas climáticos, se seleccionó la estación Imperial para cubrir la información faltante en la parte noroeste y la estación Yuma en la parte noreste. Ambas estaciones corresponden a los estados de California y Arizona respectivamente en Estados Unidos; también se les aplicó el análisis de calidad mencionado anteriormente. Cabe señalar que para la parte suroeste no existe ninguna estación climática disponible.

5.2 Condiciones históricas de temperatura y precipitación: medias y tendencias

Las condiciones históricas medias y las tendencias de los datos disponibles para cada estación climatológica en el periodo 1950-2009, se obtuvieron mediante el programa Statistica versión 4.2 y la hoja de cálculo Excel. Para las condiciones medias se obtuvieron tanto para la temperatura máxima y temperatura mínima los promedios a nivel anual; para la precipitación se calcularon los acumulados anuales; con estos datos, para cada variable se calculó la media anual del periodo histórico correspondiente a cada estación. Con el fin de observar la tendencia de la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación con respecto al tiempo se aplicó un modelo de regresión lineal utilizando los promedios anuales del periodo histórico correspondiente de cada serie climática para cuantificar la asociación entre estas dos variables. Dicho modelo fue graficado y en el caso de obtener una pendiente positiva o negativa se concluyó como una tendencia positiva

o negativa respectivamente para el periodo de análisis estudiado. Para la detección de señales de cambio climático se realizó un análisis adicional, el cual consistió en la construcción de gráficas de cajas agrupando series de datos diarios en periodos iguales de diez años para todas las estaciones, según los datos disponibles 1950-2009 para cada serie climática: 1950-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999 y 2000-2009 (o bien 2000-actualización, según sea el caso).

5.3 Climatología base

El período base para el Valle de Mexicali se desarrolló para el período 1961-1990, a nivel anual y mensual, tanto para precipitación como para las temperaturas extremas máxima y mínima. Mediante el programa Statistica versión 4.2 y la hoja de cálculo Excel, al igual que para el análisis de los datos históricos, se obtuvieron los promedios anuales de la temperatura mínima y máxima, y con ello se obtuvo la temperatura media anual de cada una. En cuanto a la precipitación se calcularon los acumulados mensuales y se sumaron para obtener los valores anuales y se identificaron los valores máximos y mínimos de cada serie climática.

Se aplicó también para las series de temperatura máxima y mínima, así como precipitación un análisis de correlación de datos diarios observados 1961-1990 entre las estaciones, con el fin de observar el grado de homogeneidad de las variables climáticas analizadas en el área de estudio.

5.3.1 Climatología base y análisis espacial

Con el fin de realizar un análisis espacial se generaron los mapas de la climatología base 1961-1990 (así como los escenarios de cambio climático) anuales y mensuales de temperatura máxima y temperatura mínima y precipitación total en la región del Valle de Mexicali Baja California, se realizó un análisis y manejo de los datos en un Sistema de Información Geográfica ArcGis 10, aplicando un método de interpolación conocido como IDW (Distancia Inversa Ponderada, por sus siglas en inglés). Se descartó el método Kriging, por necesitarse un mínimo de 20 datos para su aplicación.

Para la interpolación del IDW mediante el programa ArcGis 10, se utilizaron los parámetros predeterminados establecidos por el programa tales como: el tamaño de la celda de salida la cual

tuvo un parámetro de 0.0034. Para exponente de la distancia se utilizó el valor predeterminado de 2. El radio de búsqueda se define en torno a los puntos que se utilizarán para el control de la imagen. Hay dos opciones: fijas y variables, se utilizó la opción variable con 10 puntos con el fin de que considere la influencia de todos los puntos o los puntos de muestreo más cercano para realizar la interpolación. Los 10 puntos corresponden al número de estaciones seleccionadas para el estudio.

5.4 Aplicación de las técnicas estadísticas de reducción de escala

En el presente apartado se describe el proceso de la aplicación, validación y comparación de dos técnicas estadísticas de reducción de escala para la generación de los escenarios de cambio climático en la región del Valle de Mexicali para las variables temperatura y precipitación. Los modelos utilizados son el SDSM (Statistical Downscaling Model, por sus siglas en inglés), y el LARS WG (Long Ashton Research Station Weather Generator, por sus siglas en inglés), los cuales son estructuralmente diferentes y no requieren computadoras con gran capacidad. Ambas técnicas se describen a continuación.

5.4.1 Generación de escenarios con el SDSM

El programa SDSM versión 4.2 puede ser descargado de manera gratuita (<https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM>). Es un método empírico cuya obtención de proyecciones climáticas futuras conlleva una serie de hipótesis entre las que se encuentra que el modelo paramétrico ajustado tenga validez bajo condiciones futuras de cambio climático (Wilby *et al.*, 2007). El programa requiere la siguiente información de entrada:

1. Datos diarios del periodo observado 1961-1990 de las variables meteorológicas analizadas en la zona de estudio: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación diaria acumulada.
2. Datos diarios de las variables predictoras, derivados del re-análisis (Kalnay, *et al.*, 1996) del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) del periodo 1961-2001. Estos datos son el resultado del proyecto NCEP/NCAR (Centro Nacional para la Investigación Atmosférica NCAR, por sus siglas en inglés), cuyo propósito fue crear una base

de datos retroactiva, del análisis global de las variables atmosféricas, lo que permite apoyar las necesidades de las comunidades de investigación y monitoreo del clima. Dicho proyecto implicó la recolección de datos medidos a nivel superficial (terrestre), en barcos, sondas meteorológicas, aviones y satélites. Esos datos fueron analizados con un sistema de asimilación que se mantuvo invariable en el período de re-análisis (Kistler et al, 1999).

3. Datos de los escenarios de cambio climático A2 y B2 derivados de la salida del MCG de baja resolución: el HadCM3 (Hadley Center versión 3) del período 1961-2099. El HadCM3 es un MCG que tiene una resolución horizontal de 2.5° en latitud por 3.75° en longitud, lo que produce una rejilla global de 96×73 celdas. En superficie representa una celda de aproximadamente $417 \text{ km} \times 278 \text{ km}$ en el ecuador y de $295 \text{ km} \times 278 \text{ km}$ a los 45° de latitud.

Los datos del MCG, el HadCM3, y los datos del NCEP se obtuvieron del sitio web <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi> (CCIS, 2010), del punto de rejilla más próximo a la zona de estudio (Y=22, latitud: 32.5°N , y X=66, longitud: 116.25°W), desde el punto de vista geográfico y climático (figura 5.3).

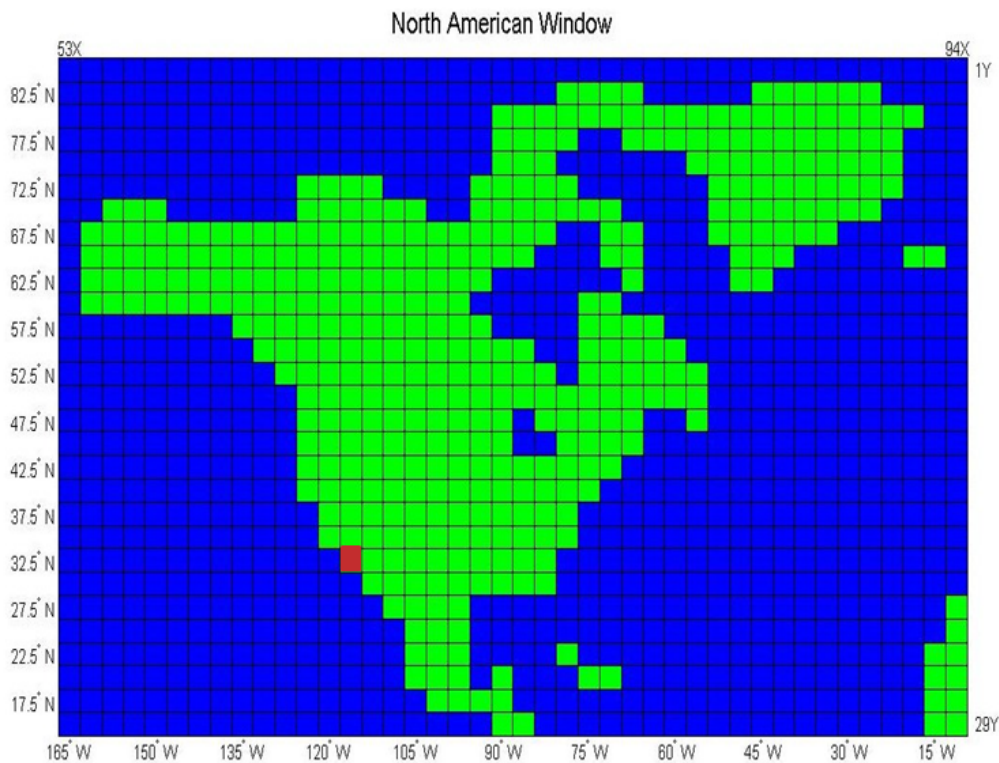


Figura 5.3 Celda de la rejilla del MCG HadCM3 asociado al área de estudio

El proceso para aplicar el SDSM se muestra en la figura 5.4 y consistió en realizar lo siguiente.



Figura 5.4 Diagrama de flujo general para generar escenarios de cambio climático mediante el SDSM

Parámetros del modelo: Dentro del programa primeramente fue necesario definir una serie de parámetros:

Longitud del año: para los datos observados y los del NCEP (calibración y validación del modelo), se definió una longitud de 366 días, lo que permite tener 29 días en febrero para los años bisiestos. Por otra parte, para la generación de escenarios y para el modelo HadCM3, el año consta de 360 días, por lo que la longitud en este caso fue definido con dicho valor.

Fecha de inicio y término: los datos de los predictores, tanto del NCEP como del HadCM3, comienzan en 1961. Para la calibración, el año final fue 1990 y para la generación de escenarios el año 2099.

Permitir valores negativos: para el caso de la precipitación no se marcó esta opción, sólo se hizo para la temperatura.

Identificador de datos faltantes: para que el programa pueda identificar aquellos días en que no hay datos observados, se debe definir un identificador para dichos casos, para el presente estudio fue fijado como -99.

Transformación del modelo: para el caso de la temperatura no se utilizó ninguna transformación, ya que se obtuvieron buenos resultados sin transformar. Para el caso de la precipitación se aplicó una transformación de la raíz cuarta (Wilby *et al*, 2007), la cual permitió obtener los mejores resultados que cualquiera de las disponibles en el programa.

Inflación de la varianza: se utilizó un valor de 12 y corresponde al que viene por definición en el programa.

Corrección de Sesgo: se utilizó un valor de 1 y corresponde a aquel que viene por definición en el programa.

Control de calidad y transformación de datos: dentro del programa, existe la opción de verificar la calidad de los datos observados que se ingresan, para así comprobar que no existan datos incoherentes (demasiado grandes o demasiado pequeños), especificar el código para datos incompletos y determinar algunos valores estadísticos (máximo, mínimo y promedio). Además, en esta etapa se permite la transformación de los datos de entrada, para así lograr una mejor correlación de éstos con los predictores del NCEP; algunas de las transformaciones que se pueden aplicar son: logarítmica, exponencial o logaritmo natural.

Determinación de las variables predictoras: este método de escalamiento estadístico se basa en identificar las relaciones empíricas entre los predictores (en este caso del NCEP) y los predictandos (precipitación y temperatura para nuestra zona de estudio). Los predictores que se utilizan en el modelo SDSM 4.2 se muestran en la Tabla 5.1 Se analizaron los 26 predictores disponibles en el archivo de datos predictores (NCEP), y se seleccionó el subconjunto que mostró el mejor ajuste evaluado a partir del coeficiente de determinación.

El principal propósito de esta etapa es determinar las variables predictoras que mejor representan a la variable que se busca calibrar (predictando). El programa entrega la opción de realizar un análisis

de la variación temporal y la correlación entre los predictores y el predictando, a un nivel anual, estacional o mensual.

Tabla 5.1 Predictores utilizados en el programa SDSM 4.2

Nº	Predictor	Descripción	Nº	Predictor	Descripción
1	mslp	Presión media al nivel del mar	14	p5zh	Divergencia a 500 hPa
2	p_f	Flujo de aire superficial	15	p8_f	Flujo de aire a 850 hPa
3	p_u	Velocidad zonal superficial	16	p8_u	Velocidad zonal a 850 hPa
4	p_v	Velocidad meridional superficial	17	p8_v	Velocidad meridional a 850 hPa
5	p_z	Vorticidad superficial	18	p8_z	Vorticidad a 850 hPa
6	p_th	Dirección del viento superficial	19	p850	Altura geopotencial a 850 hPa
7	p_zh	Divergencia superficial	20	p8th	Dirección del viento a 850 hPa
8	p5_f	Flujo de aire a 500 hPa	21	p8zh	Divergencia a 850 hPa
9	p5_u	Velocidad zonal a 500 hPa	22	r500	Humedad relativa a 500 hPa
10	p5_v	Velocidad meridional a 500 hPa	23	r850	Humedad relativa a 850 hPa
11	p5_z	Vorticidad a 500 hPa	24	rhum	Humedad relativa cercana a la superficie
12	p500	Altura ngeopotencial a 500 hPa	25	shum	Humedad específica superficial
13	p5th	Dirección del viento a 500 hPa	26	temp	Temperatura media a 2 m

De esta manera se determinan los mejores predictores para la posterior calibración del modelo, la cual se determina basada en cuatro aspectos: la varianza mensual (para un nivel de significancia dado) asociada a los distintos pares predictor-predictando, lo cual permite analizar la representatividad de los predictores para cada mes; la correlación inter-variables permite determinar la representatividad de cada predictor con respecto al predictando, considerando la influencia de todos los otros predictores; la correlación parcial permite determinar la representatividad de cada predictor con respecto al predictando, una vez que la influencia de todos los otros predictores ha sido removida; el valor p indica el nivel de significancia de la relación predictor-predictando, valores grandes indican que el valor de correlación es sólo casual.

Calibración del modelo: en esta etapa se determina la relación matemática, entre un determinado predictando y el grupo de predictores seleccionado en la etapa anterior, con lo cual el programa construye, mediante un algoritmo de optimización, un modelo de escalamiento basado en una ecuación de regresión lineal múltiple. La calibración se puede hacer a nivel mensual, estacional o anual. Además se debe especificar si el proceso asociado al predictando es no-condicional o condicional; en el primer caso se considera que existe una relación directa entre el predictor y el predictando, en el segundo existe un proceso intermedio entre el forzamiento regional y el clima local. En esta etapa se obtuvo el modelo de regresión calibrando con los datos observados correspondientes al período 1961-1980. Para la temperatura el modelo se definió como no condicional a nivel anual, ya que supone una relación directa entre el predictando y los predictores; mientras que para la precipitación se especificó de forma condicional a nivel estacional, debido a su naturaleza dependiente de otros parámetros, además de que se trabajó con un modelo transformado a la raíz cuarta.

Validación del modelo: mediante la herramienta Generador de tiempo (Weather Generator), el programa permite generar series sintéticas para un período distinto al de calibración, utilizando datos observados para el mencionado período y las ecuaciones de regresión lineal múltiple determinadas en la etapa anterior. De esta manera se puede validar el modelo calibrado, usando datos diferentes a los del período de calibración. Para nuestro caso el modelo obtenido se validó con los datos del período observado 1961-1990.

Generación de escenarios de cambio climático: la opción de generación de escenarios, permite generar para la variable climática en estudio (predictando), mediante la utilización de los predictores del MCG (para la celda de la rejilla asociada a la zona de estudio se tienen los mismos predictores indicados en la Tabla 4.2) y los parámetros del proceso de calibración, series climáticas sintéticas de estimaciones futuras. Con un nivel de significancia de 0.05, se generó un ensamble de 20 experimentos de series diarias de los escenarios A2 y B2 derivados del MCG HadCM3, desde el año 1961 hasta el año 2099.

5.4.2 Generación de escenarios con el LARS WG

Se utilizó el generador estocástico LARS WG versión 5.0 de libre acceso, (<http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/larswg/download.php>) que genera datos sintéticos diarios para una estación o punto a partir de condiciones observadas diarias de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Para la generación de escenarios se necesitan dos tipos de datos:

1. Datos diarios del periodo observado 1961-1990 de las variables meteorológicas analizadas en la zona de estudio: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación diaria acumulada.
2. Datos de escenarios regionales de cambio climático generados para México por Zermeño (2008) y aplicados por Magaña (2010). Se utilizaron los datos de las celdas más cercanas a las estaciones (figura 5.5). Estos son datos de escenarios mensuales de cambios relativos de enero a diciembre de temperatura y precipitación, con una resolución espacial de 50 km².

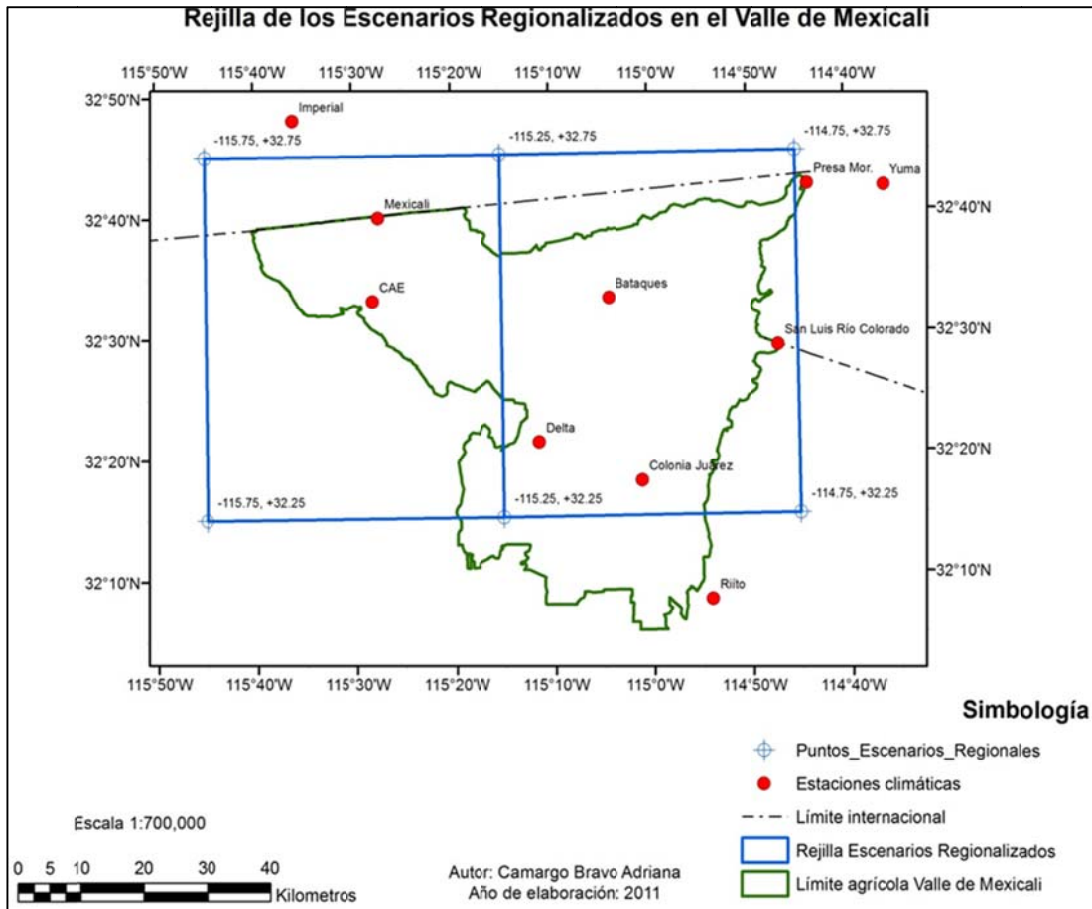


Figura 5.5 Celda de la rejilla de los escenarios regionales de cambio climático generados para México, asociados a área de estudio

Para generar las muestras diarias bajo escenarios de cambio climático se realizó lo siguiente (figura 5.6):

Calibración: se calibró el modelo analizando los datos observados diarios para determinar sus características estadísticas.

Validación: se validó mediante pruebas estadísticas y se verificó si las series generadas provenían de la misma población.

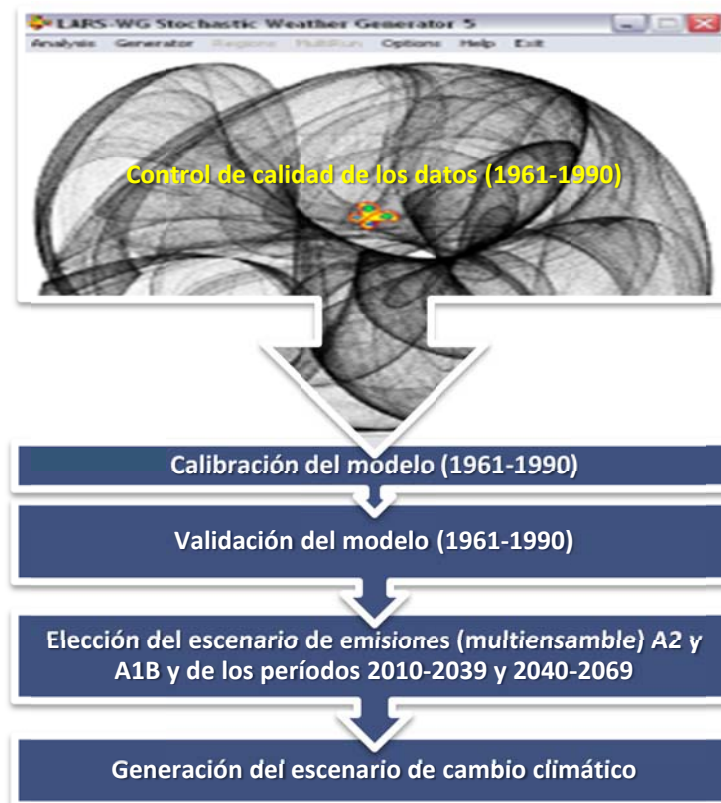


Figura 5.6 Diagrama de flujo general para generar escenarios de cambio climático mediante el LARS WG

Generación de escenarios de cambio climático: para generar los escenarios de cambio climático el LARS WG utiliza los parámetros estadísticos que se obtuvieron de los datos observados en la etapa de calibración. Una vez que se realiza la calibración y validación se introduce el archivo de datos de escenarios mensuales según la celda del modelo global a la cual pertenece la estación; para nuestro caso de estudio de acuerdo a la figura 5.5, se utilizaron dos celdas con el Modelo Multiensamble (MM). En la opción generador y seleccionando 100 años de experimentos según lo recomendado por Magaña (2010), el LARS WG construyó las series sintéticas futuras afectadas por

los índices (escenarios mensuales) del escenario A1B y A2, para la climatología 2020 (periodo 2010-2039) y 2050 (periodo 2040-2069). Las series sintéticas consistieron en datos diarios de 100 años, que se refiere a 100 experimentos de un ciclo anual representativo para cada climatología y escenarios correspondientes.

5.5 Impacto del cambio climático sobre la fenología del cultivo del trigo

5.5.1 Modelo agroclimático

Estudios realizados por el INIFAP (2009), mostraron que la fenología del trigo en el Valle de Mexicali depende directamente hasta en un 90% de la temperatura del aire, por lo que se aplicó un modelo agroclimático sencillo relacionado con esta variable. El uso de modelos de acumulación de Unidades Calor (UC) ha demostrado su eficiencia en la predicción de ocurrencia de las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo de las plantas.

Actualmente, la información relativa al comportamiento fenológico de las variedades de trigo cultivadas en el valle de Mexicali es escasa. Para el cálculo de las unidades calor fueron seleccionados como umbrales térmicos superior e inferior, temperaturas de 30°C y 5°C respectivamente para todo el ciclo fenológico, definidos empíricamente en el trabajo de Soto (2011) para el cultivo de trigo en la región del Valle de Mexicali. Dichos umbrales se han utilizado en otros estudios; por ejemplo, se ha reportado que exponer al cultivo a temperaturas cálidas superiores a los 30°C tiene como consecuencia un bajo peso en el grano, es decir un bajo rendimiento (Wang , 2008, INIFAP, 2009). Otros estudios en México, como el de Solís (2004), utiliza un umbral de 4.5 °C para el calculo de UC.

Las unidades calor fueron estimadas mediante el método de la curva seno, según el trabajo de Baskerville y Emin (1969) y su posterior modificación por Brown (1989), quien recomienda además este modelo para zonas áridas como las del estado de California, Estados Unidos de América, por lo que podría ser extensiva esta recomendación al Valle de Mexicali, que también es una zona árida. Para tal efecto, se utilizó la calculadora de unidades calor de acceso libre en el sitio Web del Programa de manejo integrado de plagas de la universidad de California

(<http://www.ipm.ucdavis.edu>), los parametros del modelo definidos fueron curva seno simple y corte transversal. La acumulación diaria de unidades calor se sumó desde la fecha de siembra y se reportó como Unidades Calor Después de la Siembra (UCDS).

5.5.2 Fases fenológicas estudiadas

Las etapas de desarrollo fenológico de acuerdo a la escala de Feekes (Large, 1954) que fueron consideradas según el estudio de Soto (2011), por su significado diferencial para el manejo agronómico del cultivo de trigo fueron: Amacollamiento, encañe, embuche, espigamiento, grano lechoso y madurez fisiológica (tabla 5.2). Las etapas fenológicas anteriores permiten realizar una cuantificación apropiada del crecimiento y desarrollo de las plantas de trigo, en función de las Unidades Calor Después de la Siembra UCDS correspondientes a cada etapa (tabla 5.3).

Tabla 5.2 Correspondencia de la escala de Feekes con las etapas fenológicas de trigo seleccionadas (Soto, 2011)

Escala de Feekes	Etapas fenológicas correspondiente	Características principales
5.0	Amacollamiento	La planta de trigo está completamente erecta y la aparición de nuevos hijuelos ha cesado.
6.0	Encañe	El primer nudo en el tallo principal se hace visible.
10.0	Embuche	La espiga aun cubierta y por debajo de la hoja bandera, está totalmente desarrollada y a punto de emerger.
10.5	Espigamiento	La espiga es visible en su totalidad.
11.1	Grano Lechoso	El grano es de consistencia suave y al presionarlo con los dedos se deforma expulsando un líquido blanquecino.
11.4	Madurez Fisiológica	El raquis que sostiene la espiga se torna de color amarillo.

5.5.3 Escenario base de UCDS

De cada una de las 10 estaciones climatológicas consideradas en el presente estudio, se utilizaron los datos diarios de las temperaturas máximas y mínimas del periodo 1961-1990 observado y los 100 años de muestras diarias simuladas con el generador estocástico LARS WG. Con esta información se obtuvieron los promedios diarios del 15 de noviembre considerada como fecha de siembra, hasta el 15 de mayo fecha aproximada de la madurez fisiológica. A continuación se calcularon las UCDS y se acumularon diariamente. Posteriormente se identificaron las fechas de cada una de las etapas fenológicas en que se alcanzan las UCDS correspondientes según la tabla 5.3. Se comparó el resultado obtenido entre los datos observados y simulados para el periodo 1961-1990. Por último mediante un SIG (ArcGis 10), se construyeron 6 mapas mensuales del 15 de

noviembre al 15 de mayo en función de la distribución espacial de las UCDS y las etapas fenológicas correspondientes según las UCDS acumuladas. Cabe señalar que las UCDS aquí señaladas corresponden al promedio obtenido en el trabajo de Soto (2011) con las 16 variedades más utilizadas en la región de estudio.

Tabla 5.3 Unidades Calor Después de la Siembra en el desarrollo fenológico del trigo (Soto, 2011)

ETAPA FENOLÓGICA	Unidades Calor Después de la Siembra (UCDS)
Amacollamiento	560
Encañe	641
Embuche	904
Espigamiento	1003
Grano Lechoso	1282
Madurez Fisiológica	1711

5.5.4 Escenarios de cambio climático de UCDS

Para construir los escenarios de cambio climático de cada sitio seleccionado, se utilizaron los 100 años de muestras diarias de las temperaturas máximas y mínimas generados por el LARS WG, para cada uno de los horizontes de tiempo 2010-2049 (climatología 2020) y el 2050-2069 (climatología 2050) y los escenarios de emisión A2 y A1B. Al igual que para el escenario base se calcularon los promedios diarios del 15 de noviembre al 15 de mayo y se interpolaron sobre la gráfica de la dinámica de los umbrales térmicos de las diferentes etapas fenológicas del trigo. Posteriormente se obtuvieron las UCDS y se utilizaron los acumulados diarios. Se identificaron las fechas de cada una de las etapas fenológicas en que se alcanzan las UCDS de acuerdo a la tabla 5.3, y se identificó la diferencia de fechas en alcanzar dicho valor respecto al escenario base simulado 1961-1990. Lo anterior es con el fin cuantificar en qué medida el cambio climático impacta al cultivo del trigo en cada etapa fenológica. Finalmente al igual que para el escenario base, mediante un SIG (ArcGis 10), se construyeron 6 mapas mensuales del 15 de noviembre al 15 de mayo en función de la distribución espacial de las UCDS y las etapas fenológicas correspondientes según las UCDS acumuladas; para los escenarios de cambio climático A2 y A1B para determinar las áreas potenciales más óptimas futuras para el cultivo del trigo.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Información climática

En total fueron seleccionadas 10 estaciones climáticas que cumplieron con el control de calidad establecido. En la figura 6.1 se muestra su ubicación espacial y en la tabla 6.1 se presentan los datos geográficos así como el periodo de datos para su análisis.

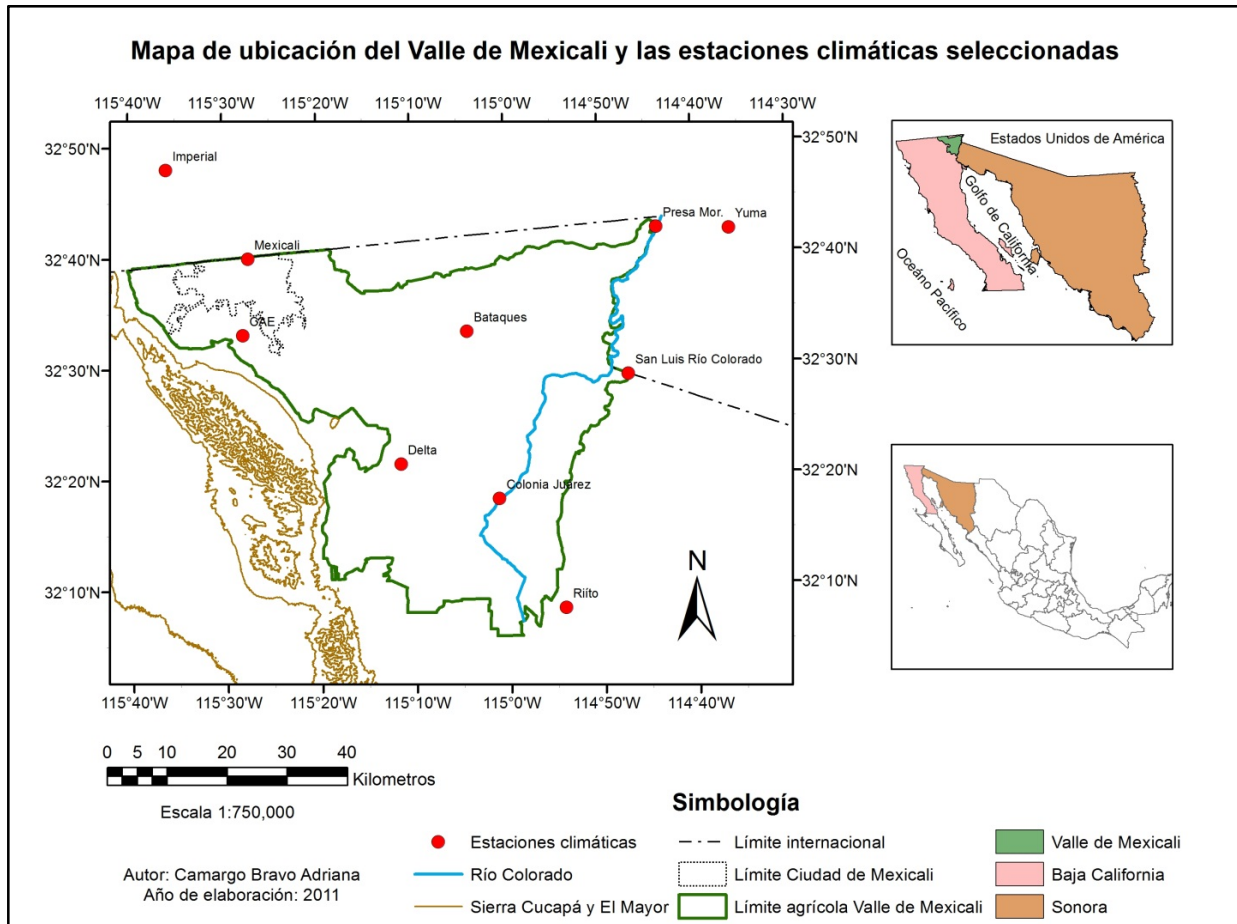


Figura 6.1 Ubicación de la región del Valle de Mexicali y las estaciones climatológicas seleccionadas.

Es importante mencionar que cada estación tiene diferente periodo histórico, según los datos disponibles. Respecto a los 8 sitios correspondientes a Baja California y Sonora, las estaciones Delta, Mexicali, Yuma e Imperial contaron con datos históricos para el periodo 1950-2009. La estación Campo Agrícola Experimental (CAE) y Presa Morelos registran datos a partir de 1960 y 1961 respectivamente, sin embargo, la primera tiene registros hasta 1998 y la segunda hasta 2009. La estación CAE fue la que presentó menos años de registro de 1960-1998. La estación Colonia

Juárez solo cuenta con registros hasta 1986, pero tiene información histórica importante desde 1950, por lo que se consideró para el estudio. Finalmente aunque no se cuenta con información climática hasta 2009, la estación Bataquez, Colonia Juárez, Riíto y San Luis cuentan con registros desde 1950. Es importante mencionar que todas las estaciones no contaron con información en algún periodo; la más completa fue la estación Mexicali y la estación San Luis Río Colorado aunque contiene información hasta el 2007, presenta un vacío importante de los años 1988 y 1999. Una sola base de datos no fue suficiente para disponer de la información climática necesaria, debido a que la información digitalizada no contiene datos que existen en los archivos históricos, la cual se tiene que completar manualmente lo que implica una inversión de tiempo importante.

Tabla 6.1. Estaciones consideradas en el estudio del Valle de Mexicali

Estación	Período de datos	Clave CNA	Municipio, Estado, País	Longitud (W)	Latitud (N)	Altitud (msnm)
Bataquez	1950-2002	2003	Mexicali, Baja California, México	115.07°	32.55°	5 m
Colonia Juárez	1950-1986	2009	Mexicali, Baja California, México	115.01°	32.29°	7 m
Delta	1950-2009	2011	Mexicali, Baja California, México	115.19°	32.35°	12 m
Mexicali	1950-2009	2033	Mexicali, Baja California, México	115.45°	32.66°	4 m
CAE ¹	1960-1998	2034	Mexicali, Baja California, México	115.46°	32.55°	3m
Presa Morelos	1961-2009	2037	Mexicali, Baja California, México	114.73°	32.70°	28 m
Riíto	1950-2003	26076	San Luis Río Colorado, Sonora, México	114.90°	32.13°	13 m
San Luis Río Colorado	1950-2007	26086	San Luis Río Colorado, Sonora, México	114.78°	32.48°	26m
Yuma	1950-2009	-----	Yuma, Arizona, EUA	114.60°	32.70°	64m
Imperial	1950-2009	-----	Centro, California, EUA	115.60°	32.80°	-17m

Notas: (1) CAE: Campo Agrícola Experimental

Por otra parte aunque en un inicio se contabilizaron 30 estaciones para el Valle de Mexicali, la falta de calidad en su información espacial y temporal originó seleccionar solo 8 sitios distribuidos en forma heterogénea en una distancia en dirección meridional de entre 50 y 100 km de la parte sur a norte respectivamente y una distancia en dirección latitudinal de aproximadamente 100 km. Su

cubertura no fue suficiente y para cubrir la información faltante en la parte noroeste y noreste se utilizaron dos estaciones de Estados Unidos. En la parte suroeste no existe ninguna estación climática por lo que esta área queda sin datos disponibles.

6.2 Condiciones históricas de temperatura y precipitación: medias y tendencias

Las condiciones medias de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en términos del promedio del periodo histórico, así como las tendencias obtenidas aplicando un modelo de regresión lineal, se muestran para cada una de las estaciones climatológicas elegidas en la tabla 6.1.

Tabla 6.2 Tendencias históricas medias de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación total de la región del Valle de Mexicali. Las letras en negrita se refieren a los valores máximos y las negritas cursivas a los valores mínimos.

Estación/periodo histórico seleccionado	Temperatura anual histórica (°C)				Precipitación total anual histórica (mm)	
	Mínima		Máxima		Media	Tendencia
	Media	Tendencia	Media	Tendencia		
Bataquez (1950-2002)	14.2	+	31.3	+	77.2	-
Colonia Juárez (1950-1986)	11.4	+	29.8	-	60.7	+
Delta (1950-2009)	14.0	+	32.6	+	39.3	+
Mexicali (1950-2009)	14.9	+	31.4	+	67.8	+
CAE ¹ (1960-1998)	14.0	+	31.3	+	79.6	+
Presas Morelos (1961-2009)	14.3	+	30.9	+	55.5	-
Riito (1950-2003)	12.9	+	31.0	+	50.3	-
San Luis Río Colorado (1950-2007)	13.7	-	32.0	+	75	-
Imperial (1950-2009)	14.8	+	30.9	+	90.2	+
Yuma (1950-2009)	16.6	+	31.0	+	59.1	+

Las condiciones históricas medias de los datos disponibles en el periodo 1950-2009 y su tendencia obtenida aplicando un análisis de regresión lineal, para las temperaturas extremas, mínima y máxima, así como precipitación total anual de las 10 estaciones climáticas seleccionadas para el área de estudio del Valle de Mexicali, se muestran en la tabla 6.1. De la figura 6.2 a 6.31 se expone

en forma gráfica el modelo lineal obtenido para cada una de las series y adicionalmente se presenta un análisis de diagramas de cajas por década para la detección de las señales de cambio climático para las variables temperatura máxima y temperatura mínima.

Los valores mínimos de temperatura mínima y máxima se registran en la estación Colonia Juárez con 11.4 °C y 29.8 °C respectivamente, dicho comportamiento puede explicarse al hecho de que se encuentra cerca del Río Colorado, un cuerpo de agua que al parecer muestra cierta influencia en el clima regional, al calentarse más lentamente que la Tierra y de igual forma libera paulatinamente la energía a la atmosfera. Los rangos de valores máximos corresponden a la estación de Yuma con 16.6 °C para temperatura mínima y para temperatura máxima de 32.6 °C en la estación Delta, esta última revela la posible influencia en su temperatura local de la proximidad a los campos geotérmicos de Cerro Prieto, que por su naturaleza emiten importantes cantidades de energía a la atmósfera en forma de vapor de agua. La estación Delta sobresale además por ser la más seca con una precipitación histórica promedio de 39.3 mm total anual, mientras que la estación Imperial se caracterizó por ser la más húmeda con una lámina de 90.2 mm.

Los coeficientes de determinación (R^2) que se obtuvieron del modelo de regresión lineal aplicado para medir el grado de asociación entre la variable climática (temperatura y precipitación) en función del tiempo, son bajos, con valores para temperatura mínima entre 0.001 y 0.7241, para temperatura máxima de 0.0003-0.1399 y para precipitación 0.0030-0.2085. En general los R^2 de la temperatura mínima fueron los más altos respecto a la precipitación y la temperatura máxima, siendo esta última la que registró los valores más bajos. Lo anterior es un indicativo de que el modelo lineal explica sólo una pequeña parte de la evolución de la temperatura y precipitación respecto al tiempo, mayormente para la temperatura mínima que para la temperatura máxima y la precipitación; sin embargo este modelo resultó útil para analizar las tendencias históricas en base a la pendiente, considerando una tendencia positiva o negativa según el signo de esta.

El modelo de regresión lineal aplicado a las series históricas indica de manera consistente un calentamiento que se refleja en que las tendencias de temperatura fueron predominantemente

positivas, excepto por la estación San Luis Río Colorado en la temperatura mínima y la estación Colonia Juárez en la temperatura máxima que mostraron tendencias negativas. En relación a la precipitación 6 estaciones presentaron tendencia positiva y 4 tendencia negativa. El análisis de las tendencias de la lluvia a partir de la serie histórica permitió identificar dos zonas, una en la parte occidental del Valle de Mexicali donde se concentran 4 estaciones con tendencia positiva (Imperial, Mexicali, CAE y Delta) y la otra en la parte oriental con 4 estaciones de tendencia negativa (Presa Morelos, Bataquez, San Luis Río Colorado y Riíto) y dos con tendencia positiva (Colonia Juárez y Yuma).

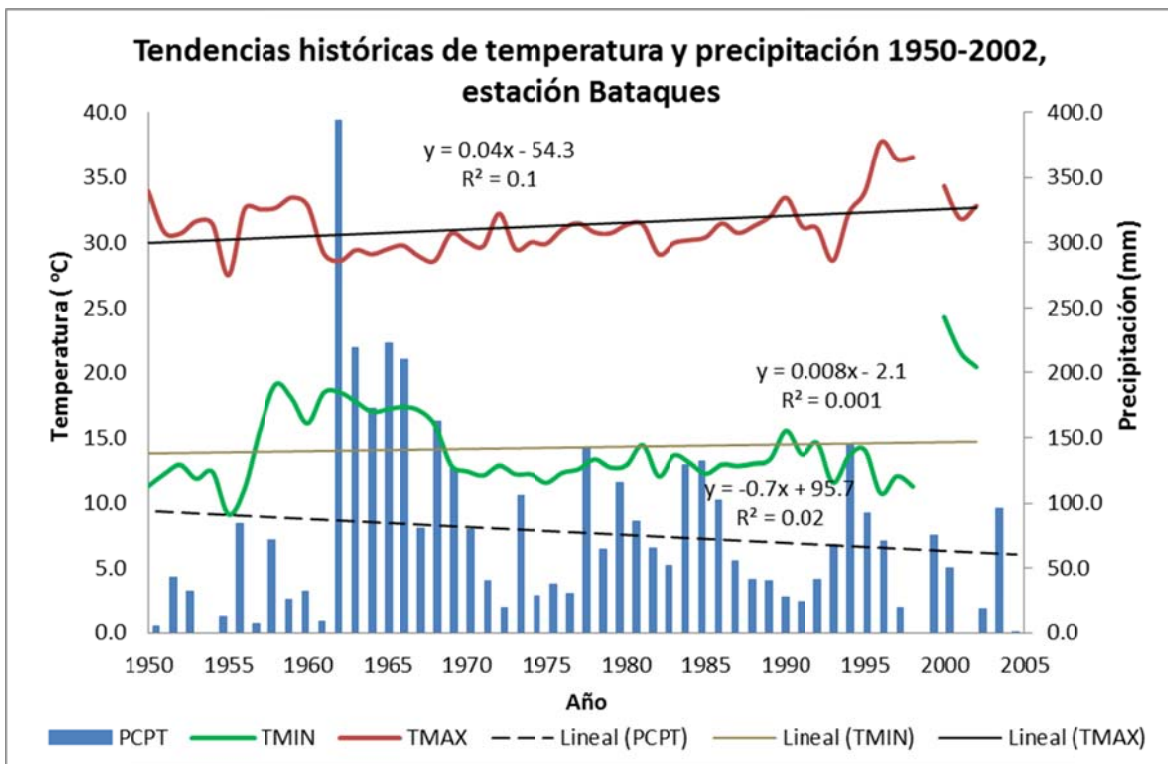


Figura 6.2 Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Bataquez.

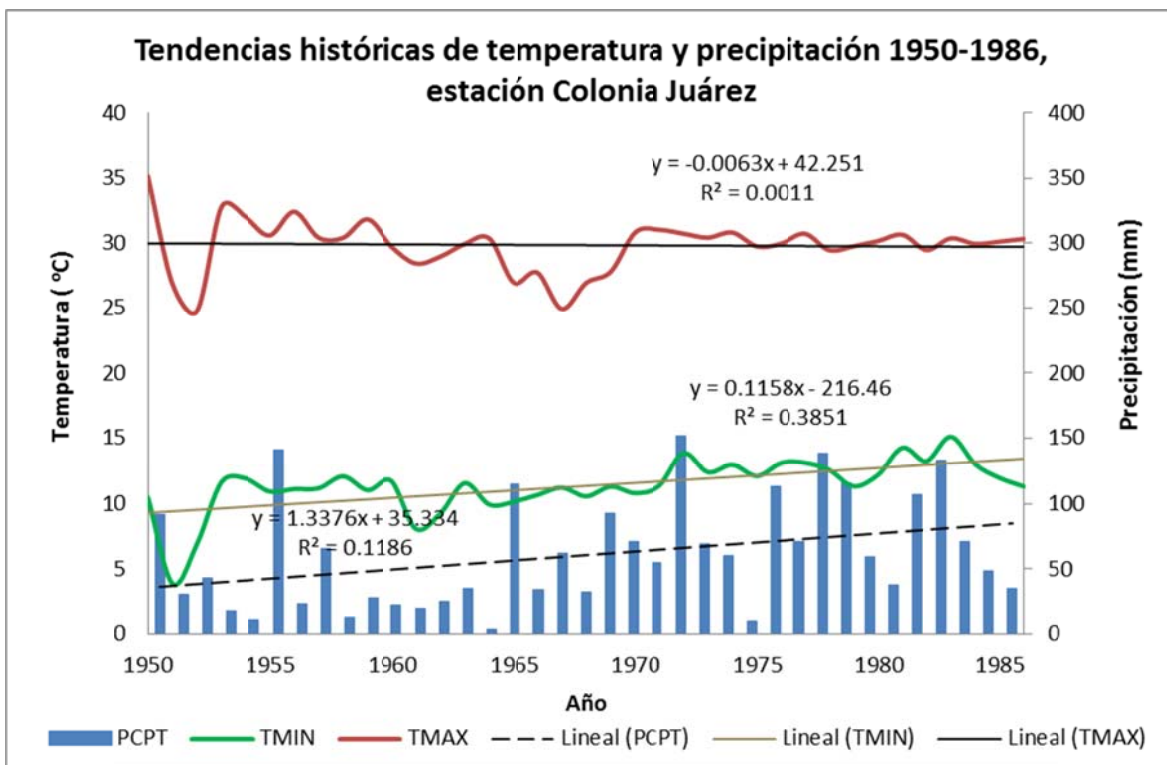


Figura 6.3 Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Colonia Juárez.

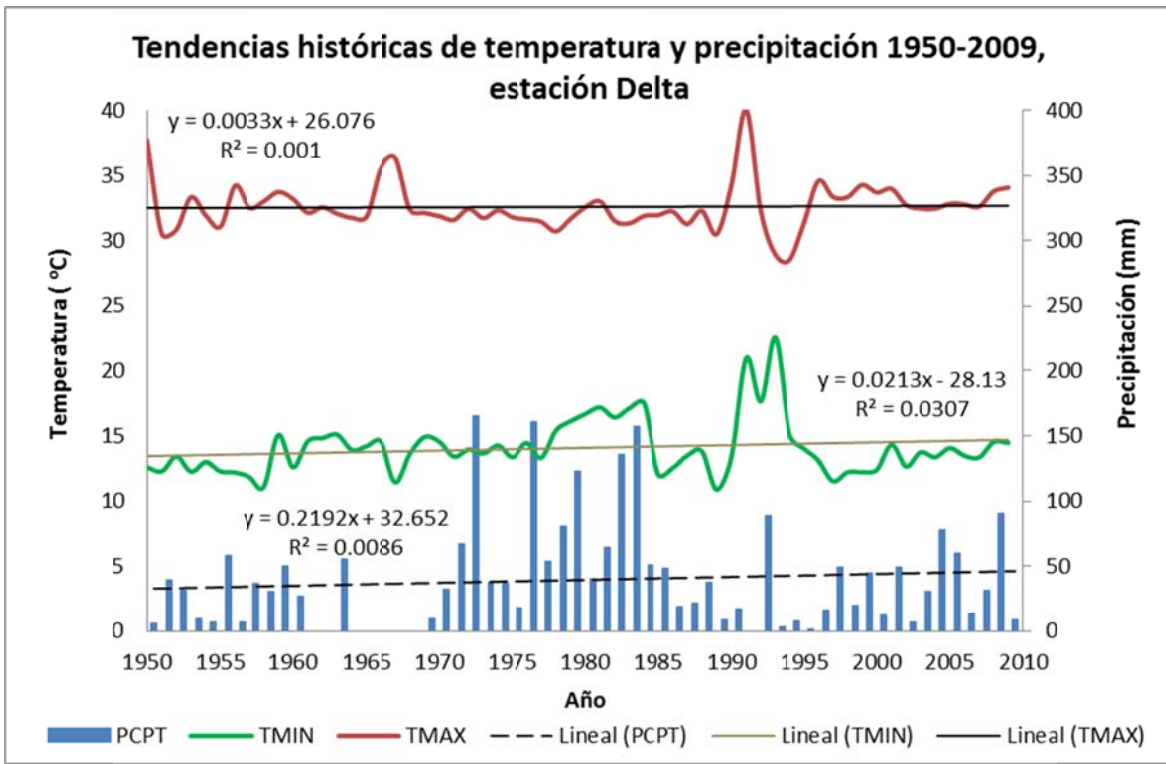


Figura 6.4 Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Delta.

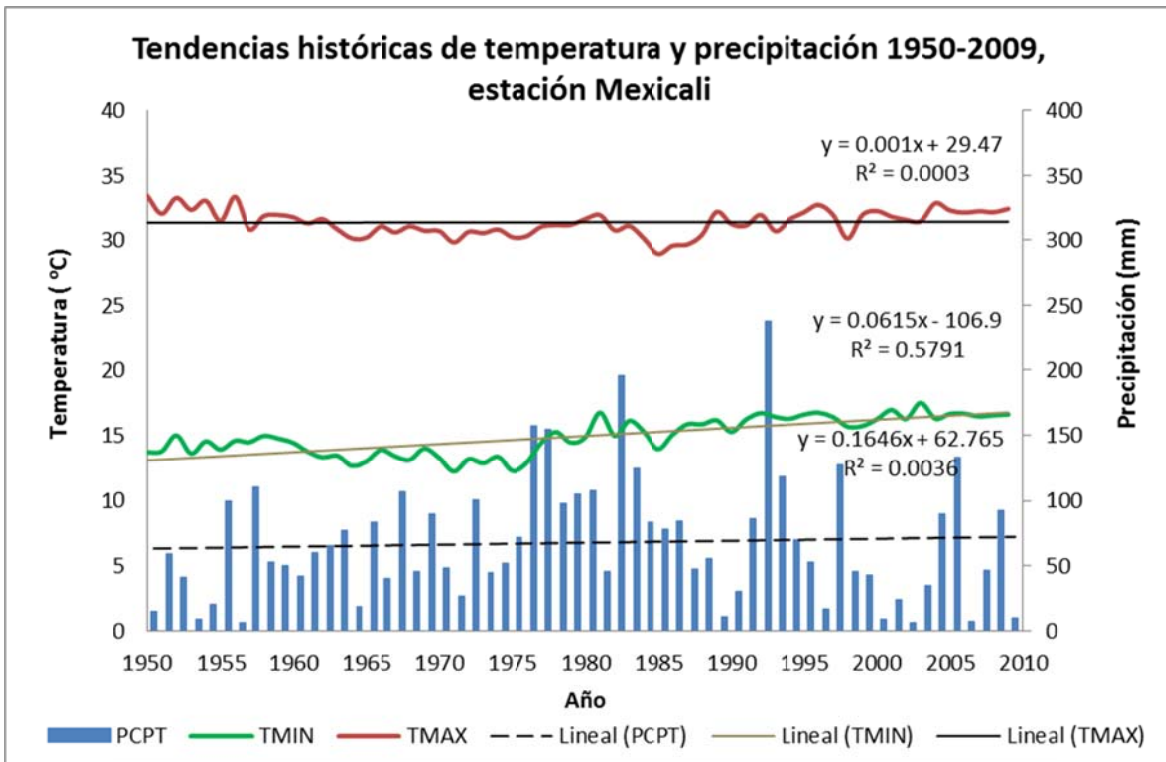


Figura 6.5. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Mexicali.

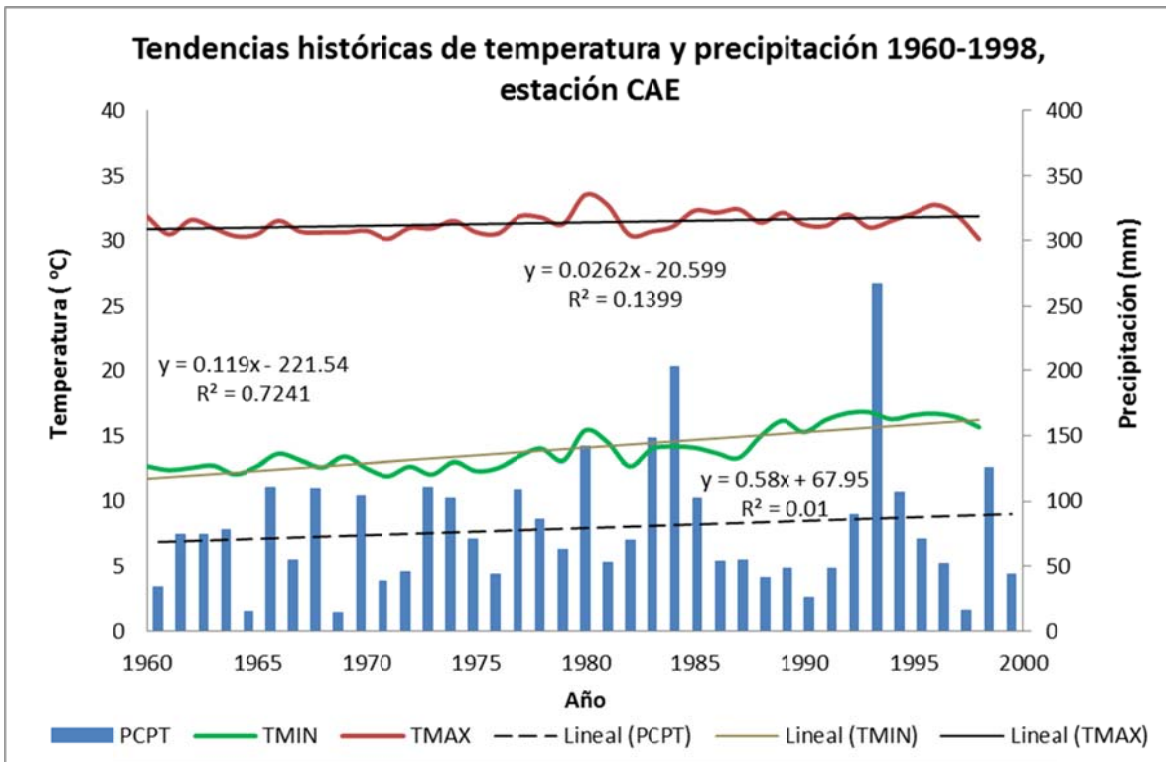


Figura 6.6. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación CAE.

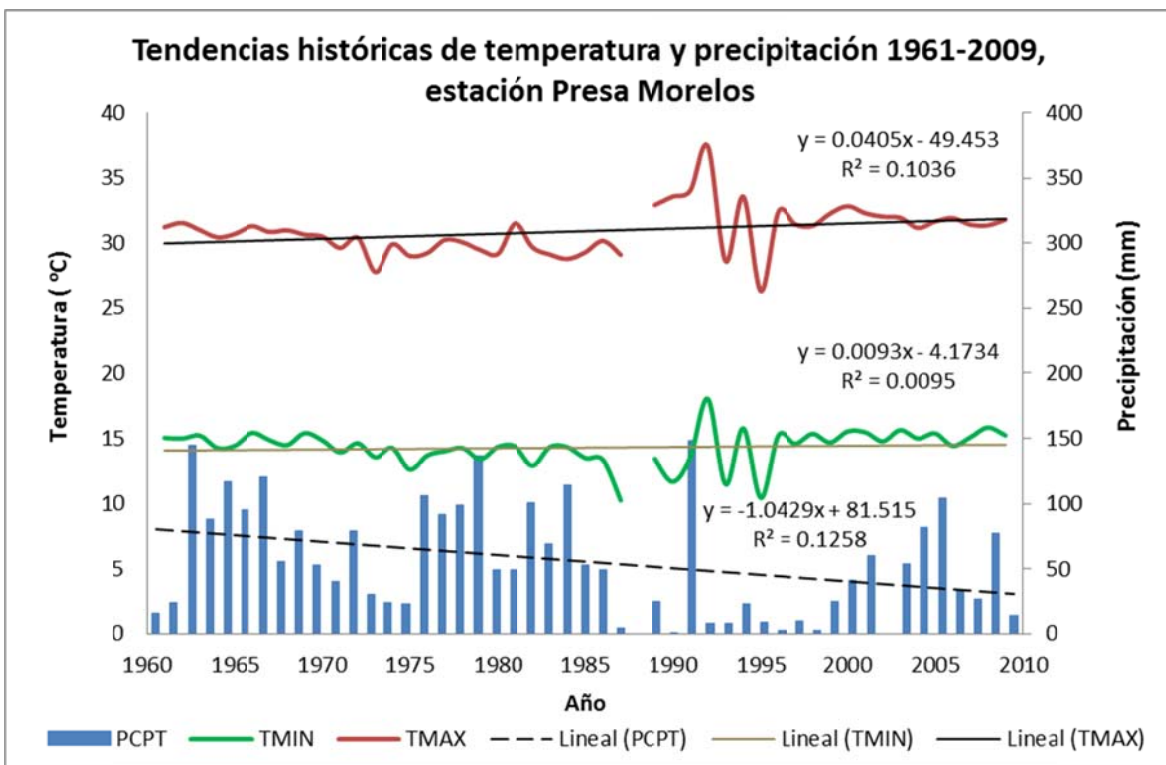


Figura 6.7. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Presa Morelos.

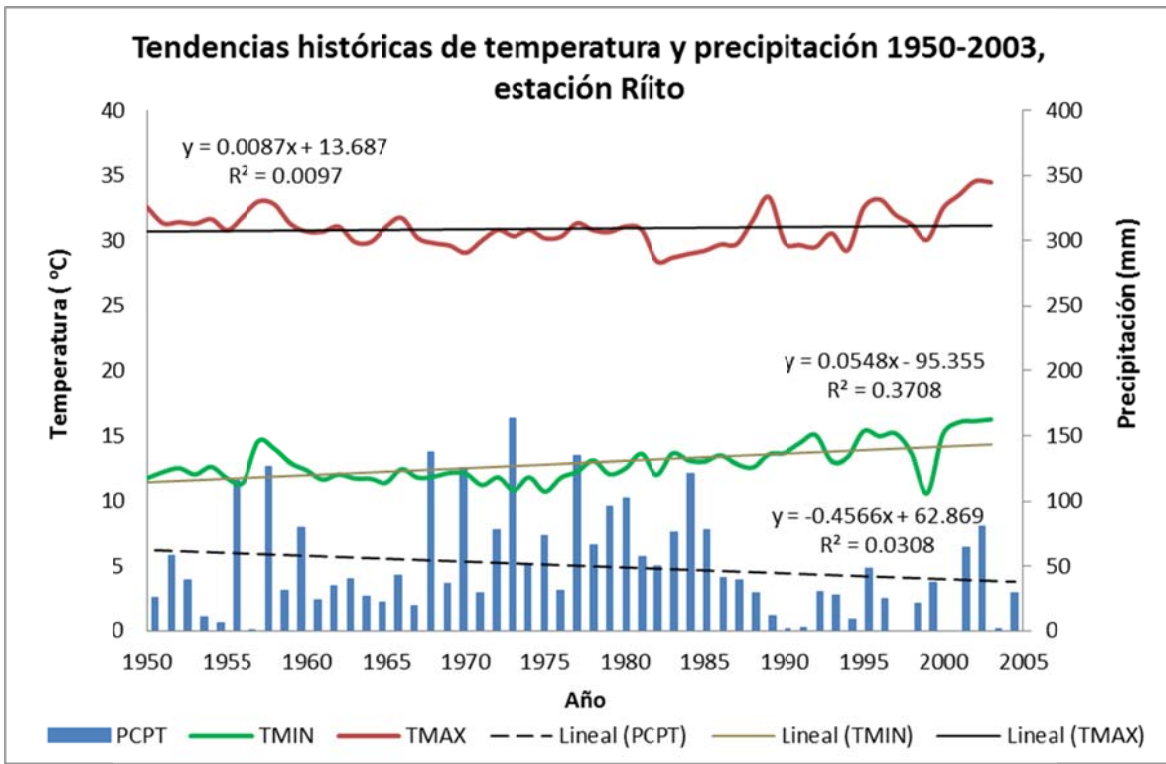


Figura 6.8. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Ríito

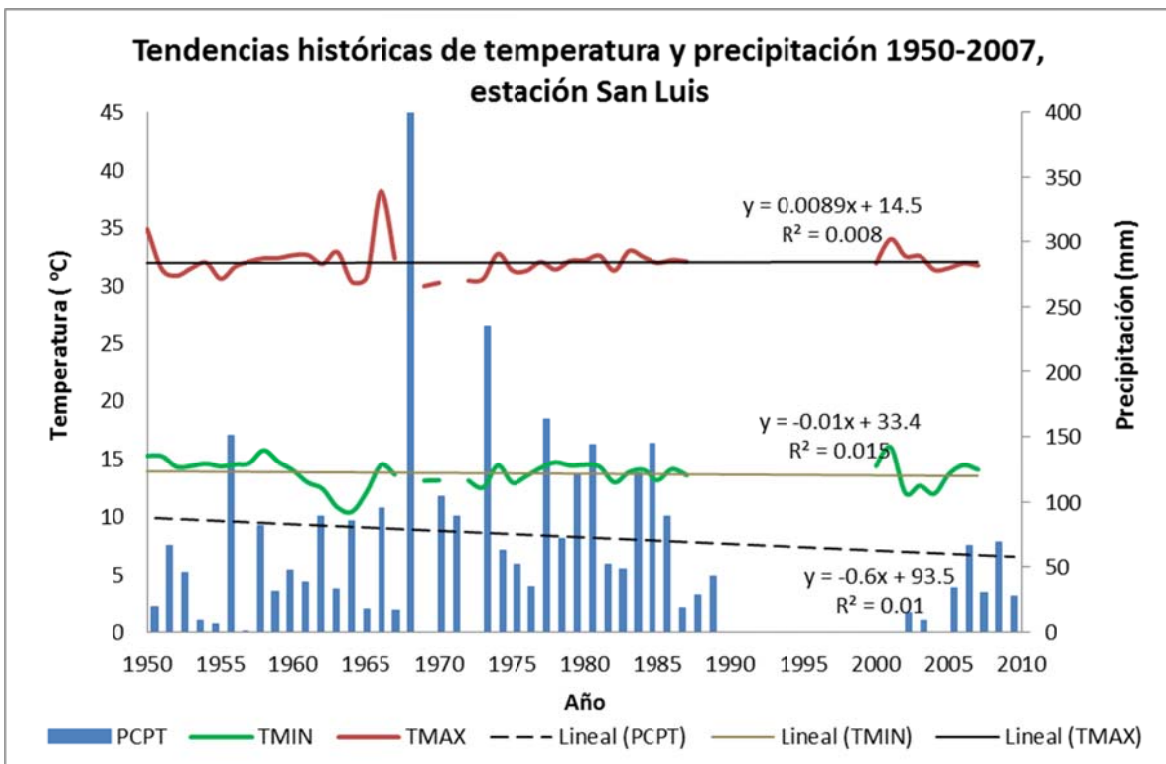


Figura 6.9. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación San Luis.

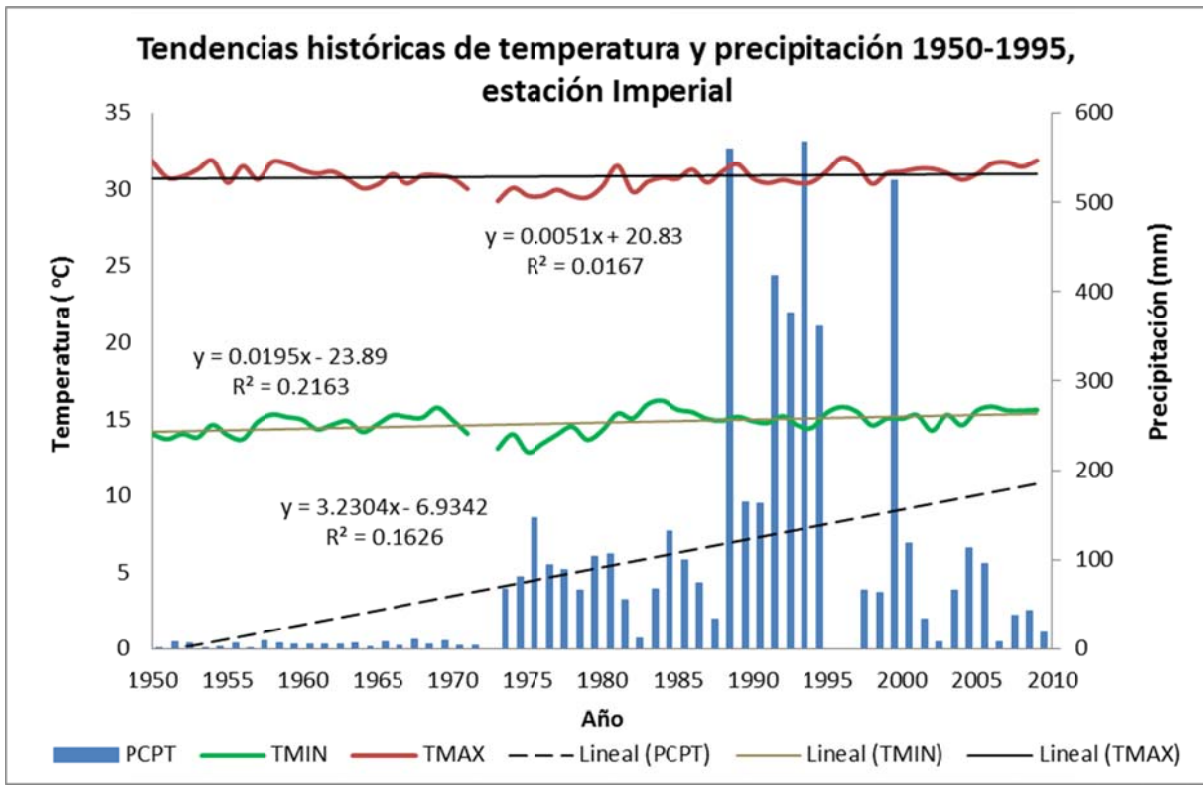


Figura 6.10. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Imperial.

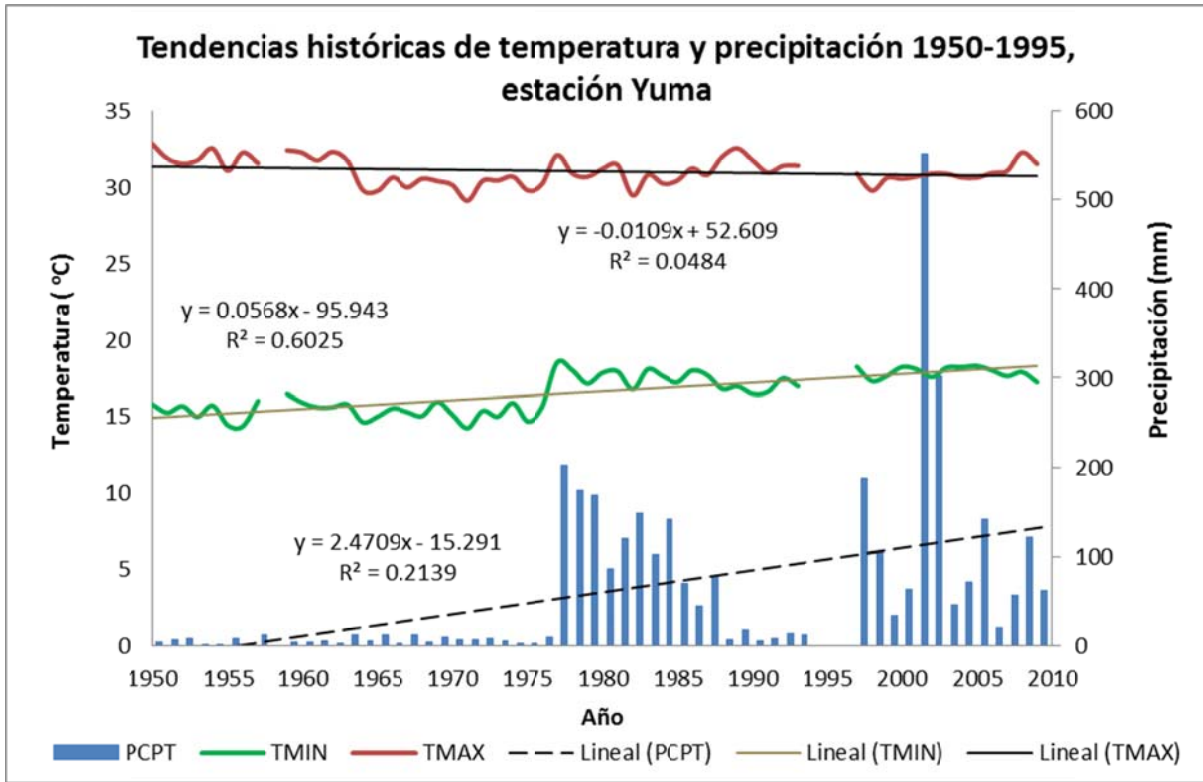


Figura 6.11. Tendencias históricas de la temperatura y precipitación de la estación Yuma.

Las tendencias obtenidas dependen directamente del periodo de análisis, el cual es diferente para cada estación; por esta razón, con el fin de comparar los mismos periodos de tiempo se realizó un análisis por décadas mediante diagramas de cajas, que evidencian los cambios en las medias comparables entre las estaciones al tratarse del mismo periodo de tiempo. Dicho análisis se aplicó para temperatura mínima y máxima y se describe a continuación:

La estación Bataquez muestra para la temperatura mínima una tendencia positiva del periodo 1950-1969, posteriormente existe una tendencia negativa con el periodo 1970-1979, y a partir de esta década la tendencia es claramente positiva, acentuada principalmente en el último periodo 2000-2002. Para la temperatura máxima la tendencia positiva se presenta una década anterior a partir de 1960-1969.

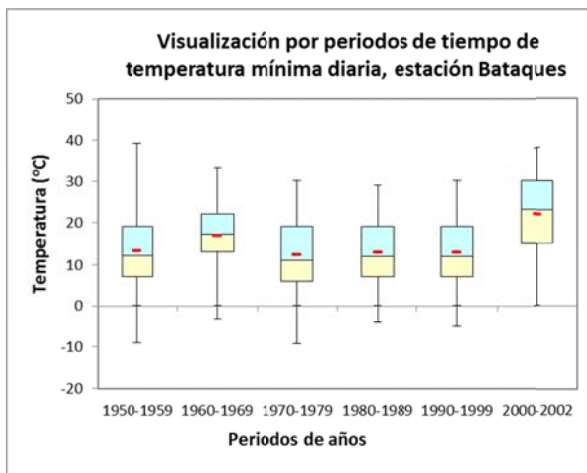


Figura 6.12. Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Bataquez.

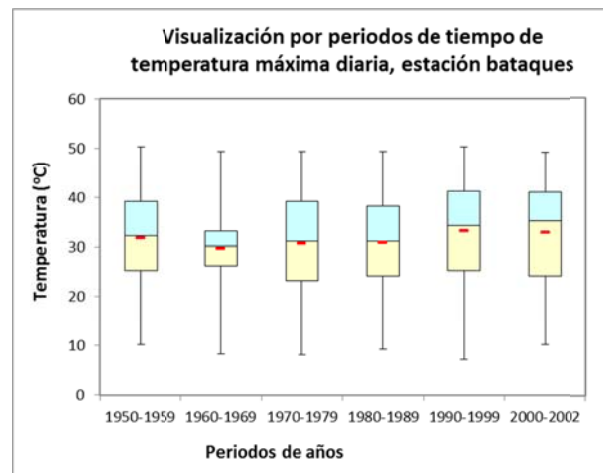


Figura 6.13 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Bataquez.

A pesar que para Colonia Juárez la serie disponible es solo para el periodo 1950-1986, y en el modelo propuesto de regresión lineal la tendencia histórica resulta negativa para la temperatura máxima, mediante el análisis del diagrama de cajas se observa que tanto para la temperatura máxima como mínima se evidencia un cambio de tendencia de negativa a positiva a partir de la década de 1960-1969.

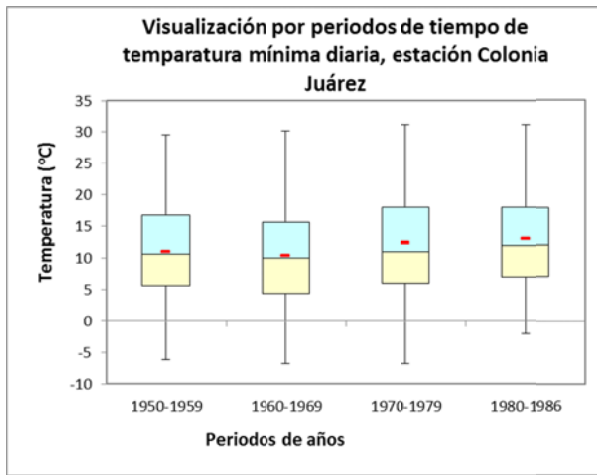


Figura 6.14 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Colonia Juárez.

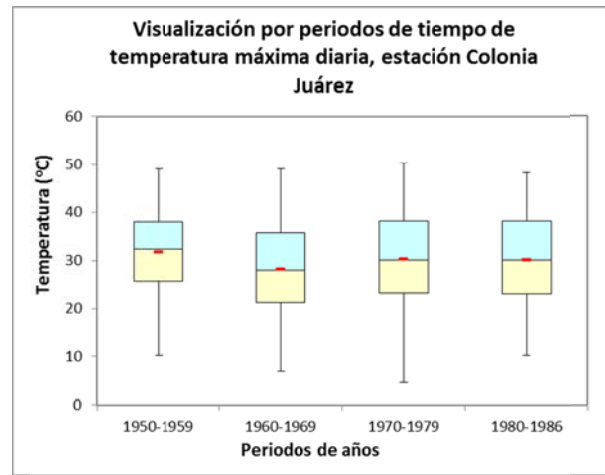


Figura 6.15 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Colonia Juárez.

La estación Delta mostró en el análisis histórico una tendencia positiva para ambas temperaturas sin embargo fue el único sitio que presentó para la temperatura mínima un cambio en la tendencia de positivo del periodo 1950-1989, a negativo a partir de este periodo hasta 2009. Para el caso de la temperatura máxima se observa una tendencia positiva a partir de la década de 1970-1979.

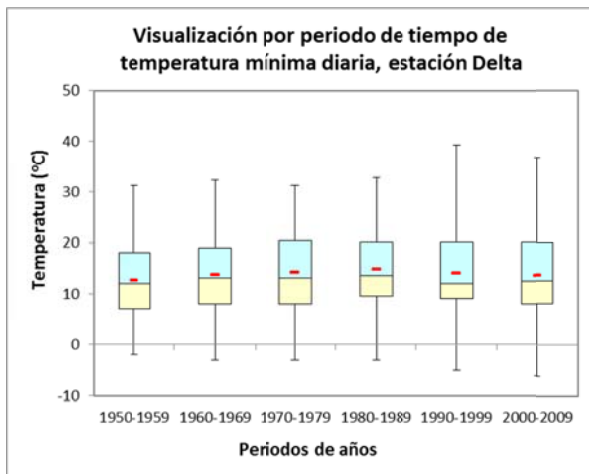


Figura 6.16 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Delta.

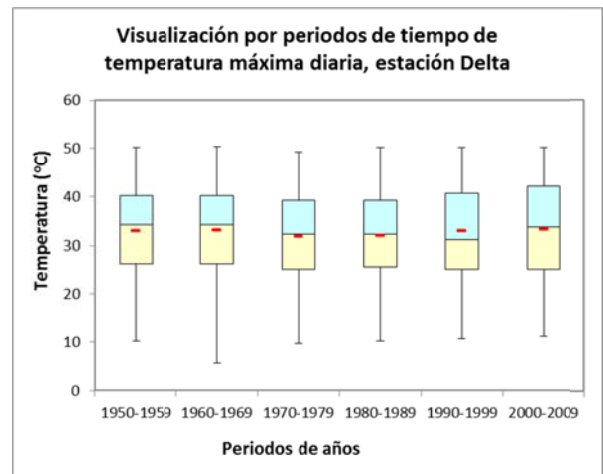


Figura 6.17 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Delta.

Para la estación Mexicali tanto la temperatura mínima como máxima presentan un cambio de tendencia negativa de 1950-1979, a una tendencia positiva posterior a esta década hasta 2009. Dicho comportamiento es más acusado para las temperaturas mínimas respecto a las máximas, lo cual posiblemente tenga relación con el hecho de ser una estación localizada en el área urbana influenciada por el desarrollo de la isla urbana de calor.

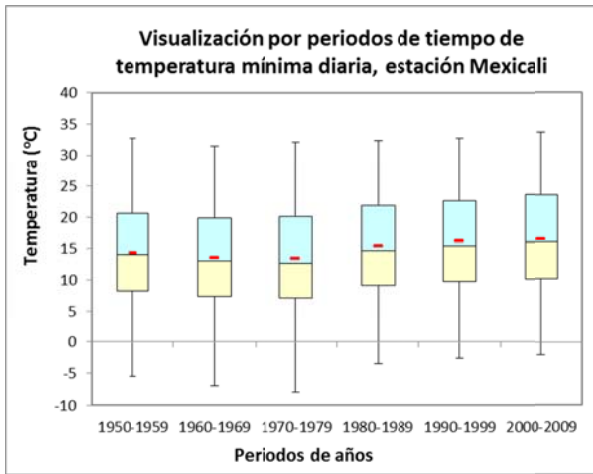


Figura 6.18 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Mexicali.

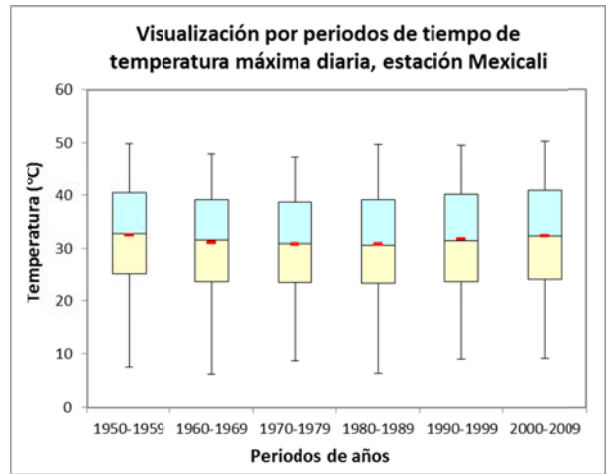


Figura 6.19 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Mexicali.

La estación CAE es el sitio más próximo a la estación Mexicali, y al igual que esta pasa de un cambio de tendencia de negativa a positiva a partir de la década de 1970-1979 hasta 1998, y de igual manera este comportamiento se hace más evidente para las temperaturas mínimas, posiblemente el mismo factor de la isla de calor urbano tenga afectación en este sitio.

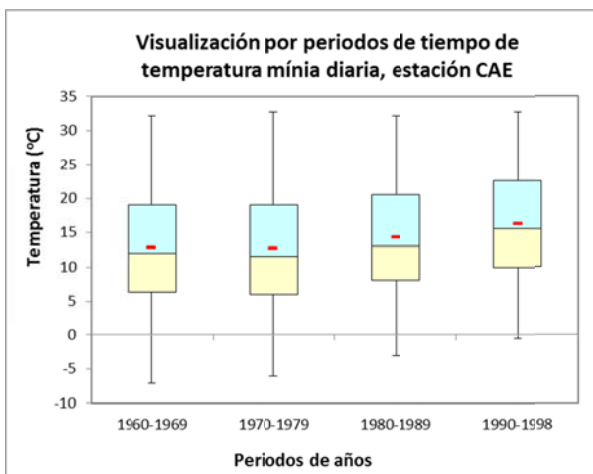


Figura 6.20 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación CAE.

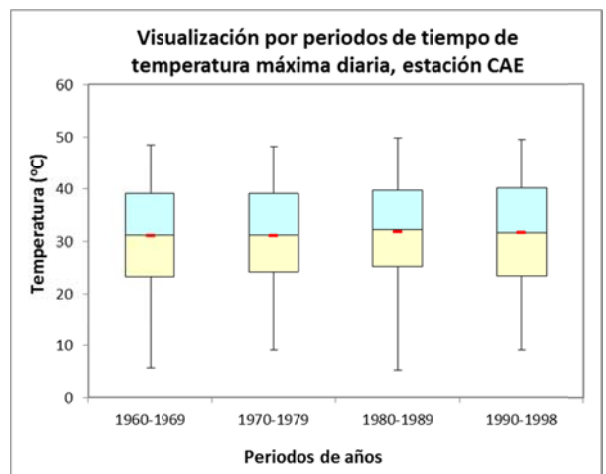


Figura 6.21 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación CAE.

La estación Presa Morelos tiene un cambio de tendencia de negativo del periodo 1960-1989 a positivo posterior a este periodo hasta 2009, y nuevamente se observa esta variación más evidente para las temperatura mínimas que para las máximas, además que para estas últimas el cambio ocurre en la década anterior 1970-1979.

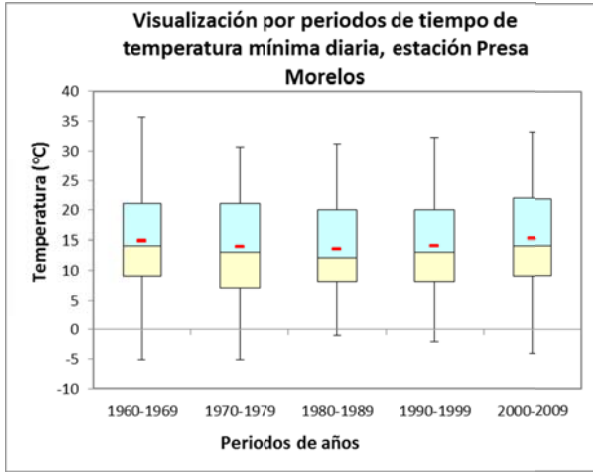


Figura 6.22 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Presa Morelos.

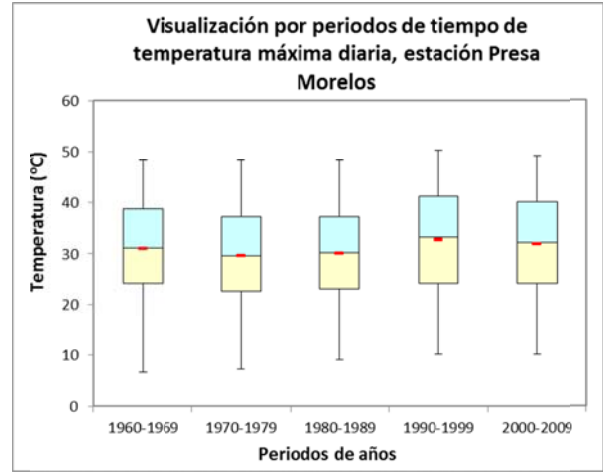


Figura 6.23 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Presa Morelos.

La estación Riíto presenta un cambio de tendencia negativa de 1950-1979 a positiva a partir de este periodo hasta 2003, como en el caso de otras estaciones es más pronunciado el cambio en las temperaturas mínimas que en las máximas.

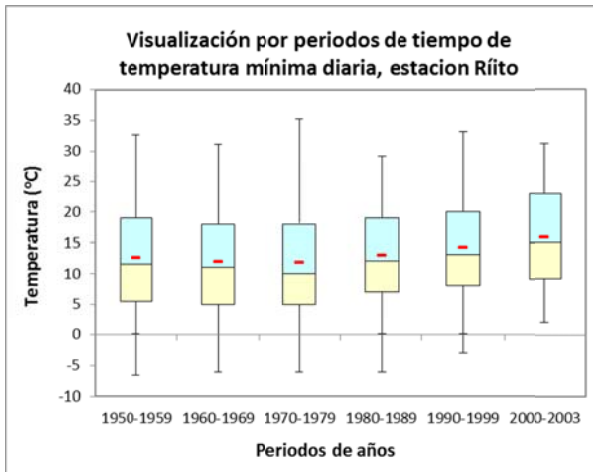


Figura 6.24 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Riíto.

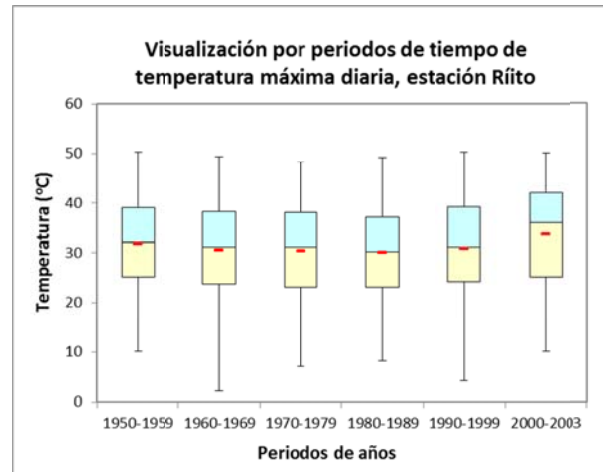


Figura 6.25 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Riíto.

Para la estación San Luis se analizó un periodo que abarca de 1950-1987, sin embargo aunque en el análisis histórico se presentó una tendencia negativa en la temperatura mínima, es posible apreciar un cambio de tendencia de negativo a positivo para las temperaturas mínimas a partir de la década de 1960-1969 hasta el periodo 1980-1987, mientras que las temperaturas máximas permanecen prácticamente constantes.

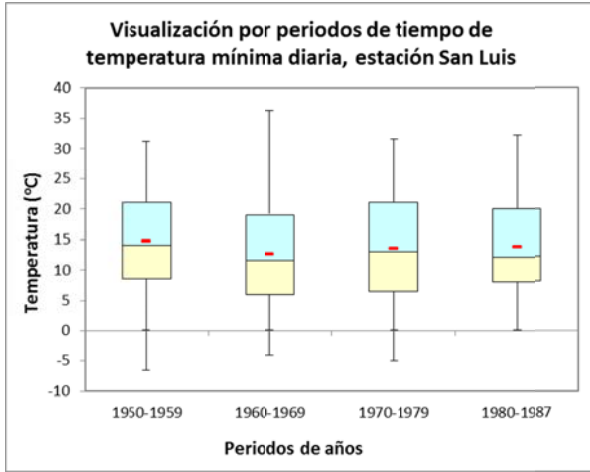


Figura 6.26 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación San Luis.

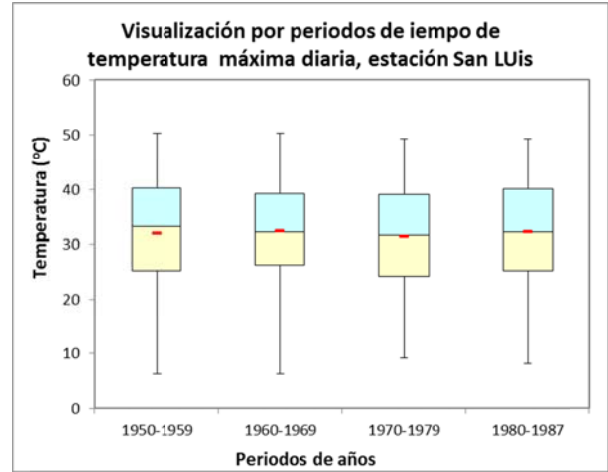


Figura 6.27 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación San Luis.

En la estación Imperial se observa también un cambio de tendencia de negativo del año 1950-1979, a una tendencia positiva a partir de la década de 1970-1979 hasta la década 2000-2009, pronunciándose esta variación en las temperaturas mínimas y siendo muy suave en las temperaturas máximas.

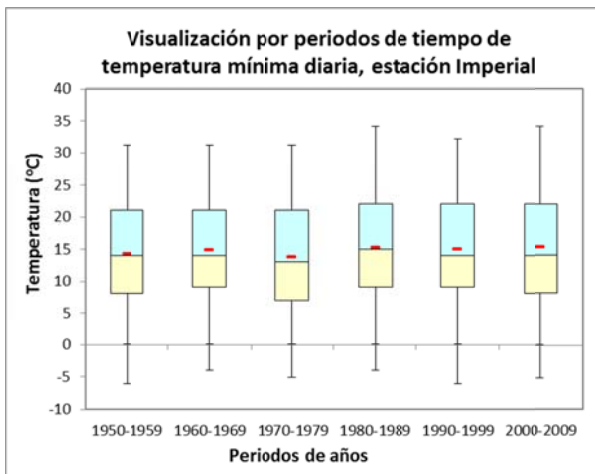


Figura 6.28 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Imperial.

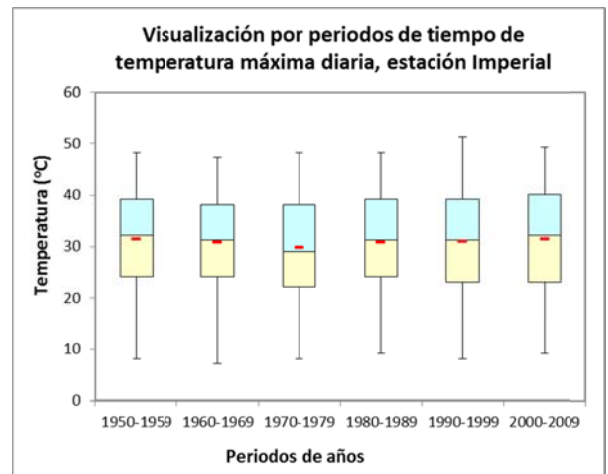


Figura 6.29 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Imperial.

La estación Yuma tiene para la temperatura mínima un comportamiento consistentemente positivo en todo el periodo histórico 1950-2009, mientras que para la temperatura máxima muestra un cambio de tendencia de negativo del periodo 1950-1979, a positivo posterior a este periodo hasta 2009, sin embargo hay que resaltar que es menos pronunciada respecto a la temperatura mínima.

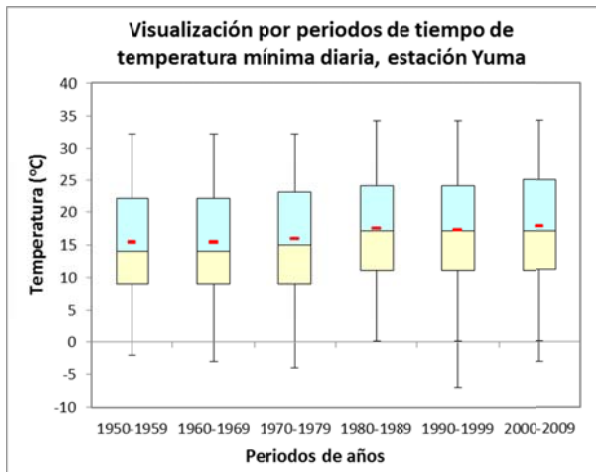


Figura 6.30 Diagrama de cajas temporal de la temperatura mínima diaria estación Yuma.

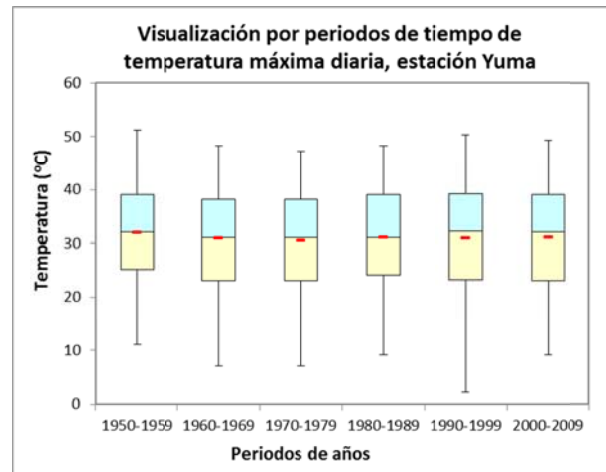


Figura 6.31 Diagrama de cajas temporal de la temperatura máxima diaria estación Yuma.

La construcción de gráficas de caja resulta ser un ejercicio útil en la detección de señales de cambio climático a través de un análisis en los cambios de las medias al agruparse los datos por décadas. La mayoría de las estaciones coincidieron en que el último cambio de tendencia ocurrió en la década de 1970-1979 y este se refirió a un cambio de tendencia de negativa a una tendencia positiva y que además se caracterizó por ser más pronunciado en las temperaturas mínimas que en las temperatura máximas. Estos resultados muestran evidencia de un aumento de temperatura en años recientes consistente con el aumento de temperatura del planeta, además de que coinciden con las investigaciones de Englehart y Douglas (2005) que reportan que a escala regional México presenta para temperatura tendencias negativas en el periodo de 1940-1970 y tendencias positivas para el periodo 1971-2001, sobre todo en las temperaturas mínimas. Con esto se hace evidente que el Valle de Mexicali se ha calentado en las últimas décadas, particularmente desde 1970. Lo anterior es importante principalmente porque el calentamiento local podría significar condiciones más secas para la región, lo cual se traduce en una mayor demanda de energía para la climatización,

creciente necesidad de agua para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos de la zona así como consecuencias importantes en el sector salud principalmente.

6.3 Climatología base

Las condiciones del periodo base observado 1961-1990 para la región del Valle de Mexicali se muestran en la tabla 5.2. Las medias anuales de temperatura máxima y temperatura mínima son de 30.8°C y 13.8°C respectivamente, con un valor de temperatura media anual de 22.3°C y valores extremos de -9 °C y 50 °C. La precipitación total media anual es de 73.1 mm. Un análisis de correlación de datos diarios observados entre las estaciones, presentó coeficientes de determinación (R^2) de 0.8 a 0.9 para la temperatura mínima y máxima, respectivamente, mientras que para la precipitación excepto por Imperial con una correlación de 0.08 con Bataquez, CAE y San Luis Río Colorado, las demás estaciones mostraron un coeficiente de determinación entre 0.2 a 0.6. Estos valores revelan que para la temperatura la zona es más homogénea que respecto a la precipitación.

Como en el caso del análisis histórico los valores mínimos de temperatura mínima y máxima se registraron en la estación Colonia Juárez con 12.0 °C y 29.6 °C respectivamente. Los rangos de valores máximos corresponden a la estación de Yuma con 16.3 °C para temperatura mínima y para temperatura máxima de 32.2 °C en la estación Delta, la cual se caracteriza otra vez por ser la más seca con una precipitación promedio de 47.8 mm total anual, mientras que la estación San Luis Río Colorado resultó ser para el periodo observado 1961-1990 la más húmeda con 102.9 mm.

6.3.1 Climatología base y análisis espacial

Los resultados fueron los mapas de la climatología base promedio del periodo observado 1961-1990, de la temperatura mínima, temperatura máxima y la precipitación total anual (figura 6.32). También se construyeron mapas mensuales, un ejemplo de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación se muestra en la figura 6.33 (los mapas mensuales completos se presentan en el anexo 1).

Tabla 6.3 Condiciones medias anuales del periodo base observado 1961-1990 para la temperatura y precipitación en el Valle de Mexicali. Para los valores medios las letras en negrita se refieren a los valores máximos y las negritas cursivas a los valores mínimos.

Estación	Temperatura (°C) base 1961-1990						Precipitación total (mm) base 1961-1990		
	Mínima			Máxima			Diaria	Diaria	Anual
	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media
Bataquez	-9.0	32.0	14.0	7.0	49.0	30.3	0.0	80.4	102.5
Colonia Juárez	-6.7	35.0	12.0	4.4	50.0	29.6	0.0	120.0	69.1
Delta	-3.0	32.5	14.3	5.5	50.0	32.2	0.0	63.0	47.8
Mexicali	-8.0	32.2	14.1	6.0	49.4	30.7	0.0	62.0	76.2
CAE ¹	-7.0	32.5	13.3	5.0	49.5	31.2	0.0	65.0	78.6
Presa Morelos	-5.0	35.5	14.0	6.5	50.0	30.3	0.0	60.0	67.5
Riíto	-6.0	35.0	12.3	2.0	49.0	30.3	0.0	80.0	61.9
San Luis Río Colorado	-5.0	36.0	13.2	6.0	50.0	32.0	0.0	194.0	102.9
Imperial	-6.0	34.0	14.7	7.0	49.0	30.5	0.0	78.0	75.4
Yuma	-4.0	34.0	16.3	7.0	50.0	30.8	0.0	30.0	49.1
Promedio			13.8			30.8			73.1

En relación a la climatología base, se puede observar al realizar un análisis de variabilidad espacial de la región del Valle de Mexicali que para la temperatura tanto máxima como mínima, se encuentra perfectamente definido que la parte sureste, correspondiente a Colonia Juárez y Riíto, es la más fresca de la región; la parte suroeste y noreste, determinada por las estaciones Delta y San Luis Río Colorado, respectivamente, como la más cálida. Respecto a la precipitación a nivel anual en la figura 6.32 se observa que una parte de la zona noreste conformada por Bataquez y San Luis son las más húmedas cuyo gradiente se va extendiendo de mayor a menor en todas direcciones, quedando como las áreas más secas la zona suroeste, particularmente la conformada por la estación Delta y la parte extrema noreste integrada por la zona de Presa Morelos y Yuma. El resto de la región que prácticamente corresponde al área urbana se observa como una zona de precipitación intermedia entre las dos zonas extremas.

Tanto para temperatura máxima como mínima a nivel mensual, la zona cercana a la estación Delta sigue conservando su condición cálida para prácticamente todos los meses del año, la cual es compartida en las temperaturas mínimas en menor grado en la época fría, de noviembre a abril, por la región de Bataquez. Situación contraria para las temperaturas máximas en los meses más cálidos

de mayo a octubre, donde la estación Bataquez en conjunto con la región de Colonia Juárez forma la zona más fría.

La precipitación muestra un mayor grado de variabilidad espacial a nivel anual, sin embargo es posible distinguir a nivel mensual los meses más lluviosos como son: enero, diciembre y agosto particularmente en la zona de Bataquez (figura 6.33), en menor grado septiembre y octubre, y predominantemente seco mayo y junio.

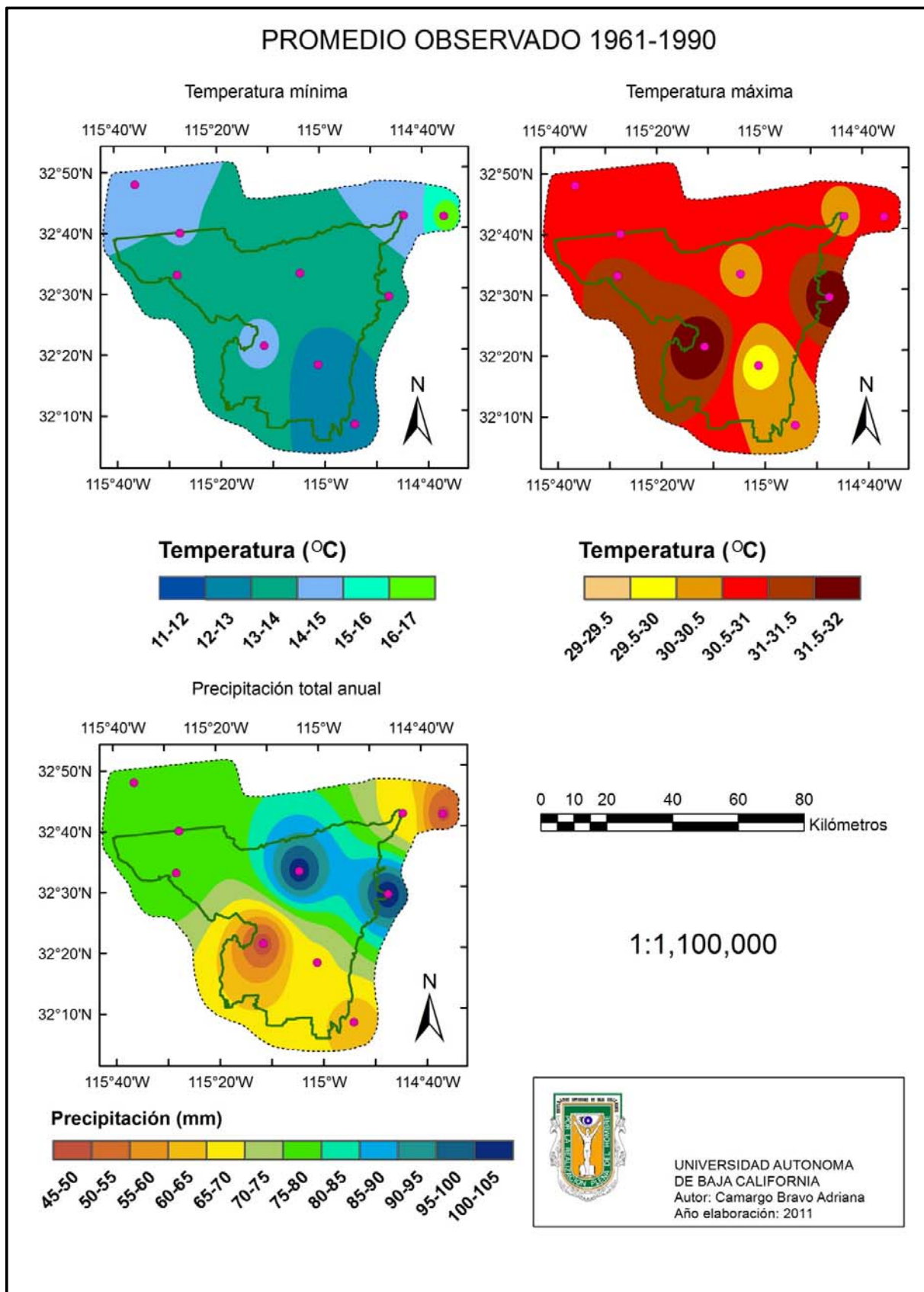


Figura 6.32 Climatología base anual 1961-1990 para la región del Valle de Mexicali.

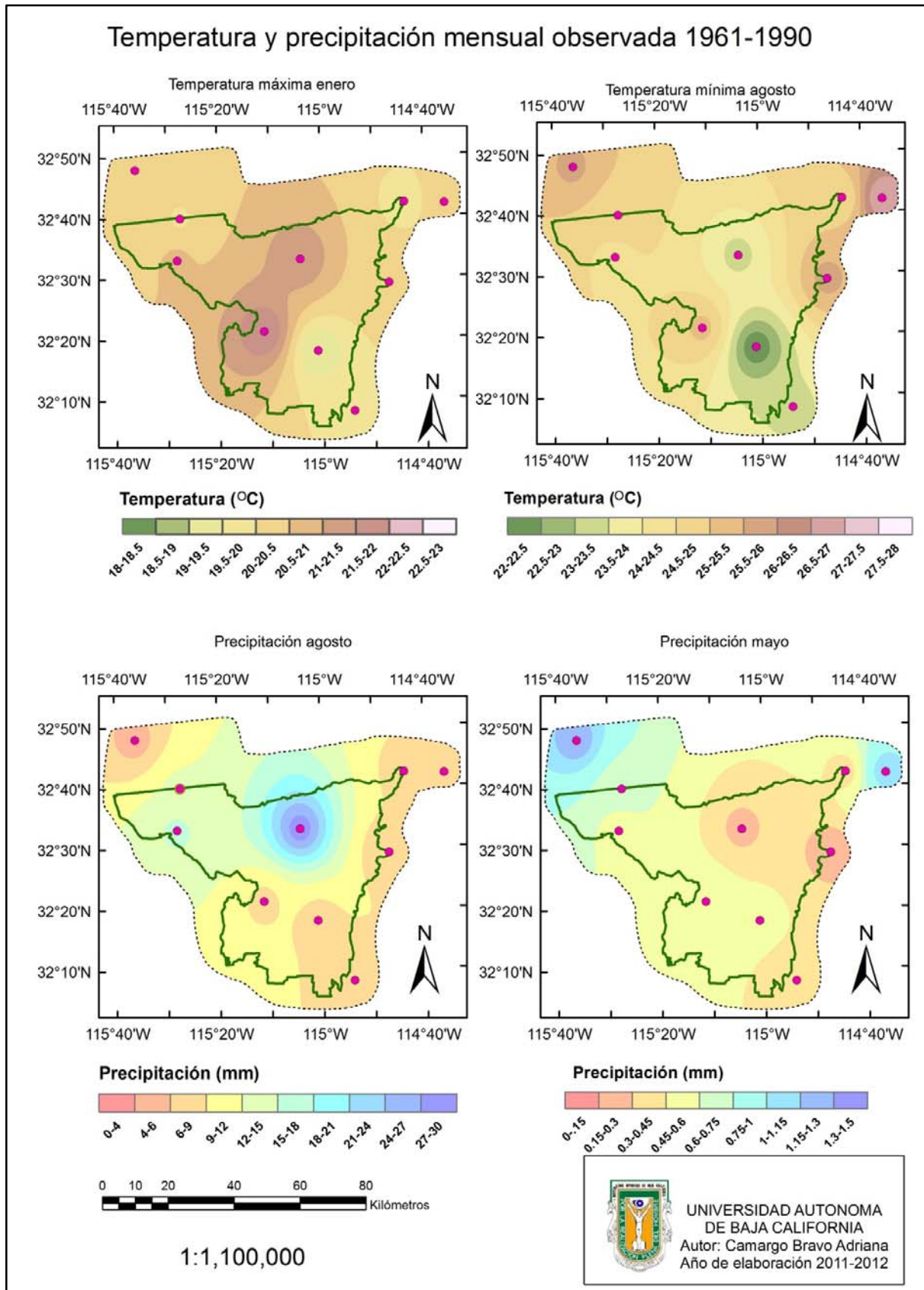


Figura 6.33 Climatología base mensual 1961-1990 para la región del Valle de Mexicali.

6.4 Aplicación de los métodos de reducción de escala

Para aplicar los métodos de reducción de escala se utilizó como período de referencia el período base observado 1961-1990. Las pruebas comparativas para el LARS WG y el SDSM que se analizan en este trabajo, se refieren a las incluidas propiamente en cada programa respectivo. Esta parte estructural de cada modelo es de suma importancia debido a que las salidas de ambos se refieren a series de datos de una longitud muy grande, lo que hace impráctico su manejo de forma externa. Mientras el LARS WG crea automáticamente un archivo con los resultados de las pruebas estadísticas que evalúan su capacidad para reproducir gran variedad de estadísticas del tiempo con precisión, el SDSM genera una serie sintética de tiempo diferente al periodo de calibración y se compara directamente con el correspondiente periodo observado, para mostrar que tanto se asemeja a este. Aunque son varias las características estadísticas que evalúan el rendimiento de cada técnica, en este trabajo solo se analizaron los valores medios y la variabilidad climática en términos de medias aritméticas y desviación estándar o varianza respectivamente.

6.4.1 Generación de escenarios con el SDSM

Calibración del SDSM

En la etapa de calibración del SDSM, se determinaron para los datos observados diarios (1961-1990) de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de cada una de las estaciones seleccionadas, los predictores que presentaron los valores más altos de correlación inter-variables y la correlación parcial con los valores de probabilidad (p) más bajos (tabla 5.3), así como la más alta varianza mensual explicada en la mayoría de los meses (tabla 5.4).

Tanto para la temperatura máxima como para la temperatura mínima se obtuvieron mayores correlaciones (respecto a precipitación) y una varianza mayor explicada por alguno de los predictores en todos los meses. Para la precipitación en la mayoría de las estaciones no se obtuvo una varianza explicada por alguno de los predictores para el mes de mayo y junio.

Tabla 6.4 Ejemplo de matriz de correlación inter-variables y correlación parcial entre la precipitación total diaria observada 1961-1990 de la estación Colonia Juárez y las variables predictoras NCEP

Predictor/Predictando	(1)	(2)	(3)	(4)	Correlación parcial	Valor p
Precipitación (1)	1	-0.113	-0.207	0.142	--	--
mslp (2)	--	1	-0.300	-0.367	-0.135	0.0217
p_una (3)	--	--	1	0.202	-0.269	0.0000
shum (4)	--	--	--	1	0.141	0.0158

Tabla 6.5 Ejemplo de varianza explicada a un nivel de significancia de 0.05, entre los datos de temperatura máxima diaria observada de la estación Bataquez y los predictores elegidos NCEP. Los números resaltados en negrita indican la variable con mayor correlación para el mismo mes

Predictor	Varianza mensual explicada											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
mslp			0.029		0.023	0.015		0.038	0.030	0.013	0.009	
p500	0.194	0.281	0.429	0.400	0.381	0.260	0.041	0.026	0.242	0.288	0.235	0.214
rhum	0.064	0.090	0.209	0.199	0.230	0.298	0.023	0.041	0.183	0.093	0.051	0.073

Las variables predictoras con las que se correlacionaron en común las estaciones analizadas (tabla 5.5), fueron la presión media al nivel del mar (mslp) y altura geopotencial a 500 hPa (p500) para la temperatura máxima y la temperatura mínima; y adicionalmente, la temperatura máxima mejoró de forma importante la correlación con la humedad relativa superficial (rhum); mientras que la temperatura mínima con la velocidad zonal a 500 hPa (p5_u) y la humedad específica superficial (shum). Para la precipitación, la humedad específica superficial (shum) fue el predictor común con la que se correlacionaron los sitios de estudio, sumando cierta mejora en la correlación, el uso de distintas variables predictoras para los diferentes sitios como la velocidad zonal superficial (p_u), vorticidad superficial (p_z), velocidad zonal a 850 hPa (p8_u), vorticidad a 850 hPa (p8_z), divergencia a 850 hPa (p8zh), humedad relativa a 500 hPa (r500), humedad relativa a 850 hPa (r850) y humedad relativa superficial (rhum).

Para llevar a cabo la calibración del modelo se utilizaron datos observados diarios del período 1961-1980. Se eligió este periodo debido a que se encontró una mejor correlación con respecto al periodo observado 1961-1990, que el periodo 1961-1975 sugerido para el SDSM, lo cual se refleja

también en la dispersión de los residuales (figura 6.32) en toda la serie de valores, particularmente en la modelación de la precipitación.

Tabla 6.6 Relación de los predictores que se correlacionaron adecuadamente con los predictandos temperatura máxima (+), temperatura mínima (*) y precipitación (X), de las estaciones utilizadas para el Valle de Mexicali en el periodo observado 1961-1990, aplicando el SDSM

Predictor /Descripción	Temperatura		Precipitación
	Máxima	Mínima	
mslp/Presión media a nivel del mar	+	*	X
p_f/Flujo de aire superficial			X
p_u/Velocidad zonal superficial			X
p_z/Vorticidad superficial			X
p5_u/Velocidad zonal a 500 hPa		*	
p500/Altura geopotencial a 500 hPa	+	*	
p8_u/Velocidad zonal a 850 hPa			X
p8_z/Vorticidad a 850 hPa			X
p8zh/Divergencia a 850 hPa			X
r500/Humedad relativa a 500 hPa			X
r850/Humedad relativa a 850 hPa			X
rhum/Humedad relativa superficial	+		
shum/Humedad especifica superficial		*	X

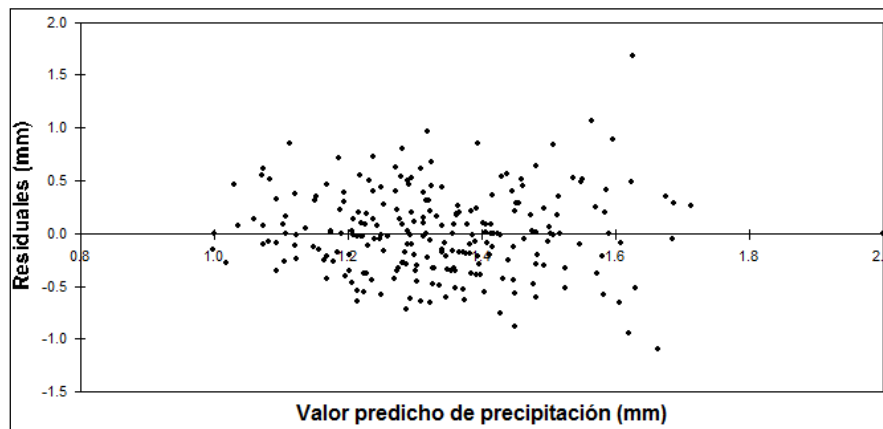


Figura 6.34 Gráfica de dispersión de los valores de precipitación diaria total (1961-1980) de la estación Colonia Juárez modelados con las variables predictoras presión media a nivel del mar (mslp), velocidad zonal superficial (p_u) y humedad específica superficial (shum) vs los residuales.

En la tabla 6.7 se muestra un ejemplo de los coeficientes R^2 y el error estándar (EE), del ajuste de los datos observados con las variables predictoras a nivel mensual, para las calibraciones de la precipitación en la estación Colonia Juárez y la temperatura mínima en la estación Mexicali. Para la precipitación existen algunos meses en que la correlación es muy pequeña, lo cual sugiere que este

predictando se encuentra posiblemente más relacionados a fenómenos locales. A nivel anual promedio los mejores resultados para el coeficiente R^2 (tabla 5.7) se tienen para la temperatura, mientras que para la precipitación se muestran valores menores de este coeficiente y a su vez el error estándar es menor para precipitación que para la temperatura.

Tabla 6.7 Ejemplo de calibración del modelo obtenido entre las variables predictoras y los datos de precipitación total diaria observada de la estación Colonia Juárez y la temperatura mínima de la estación Mexicali y NCEP (1961-1980)

Mes	Precipitación		Temperatura mínima	
	Condicional		No condicional	
	R^2	EE	R^2	EE
Ene	0.127	0.369	0.548	2.599
Feb	0.127	0.369	0.526	2.150
Mar	0.148	0.299	0.558	2.110
Abr	0.148	0.299	0.611	1.833
May	0.148	0.299	0.703	1.743
Jun	0.165	0.317	0.684	2.011
Jul	0.165	0.317	0.410	2.266
Ago	0.165	0.317	0.528	2.073
Sep	0.05	0.513	0.526	2.479
Oct	0.05	0.513	0.557	2.486
Nov	0.05	0.513	0.474	2.370
Dic	0.127	0.369	0.446	2.414
PROM	0.122	0.375	0.548	2.211

Tabla 6.8 Coeficientes de R^2 anuales promedio de la calibración del modelo obtenido entre los datos de precipitación total diaria observada, temperatura máxima y temperatura mínima de los 10 sitios de estudio y las variables predictoras NCEP (1961-1980)

Sitio	Calibración del modelo					
	Precipitación		Temperatura máxima		Temperatura mínima	
	R^2	EE	R^2	EE	R^2	EE
Bataquez	0.118	0.391	0.220	3.968	0.141	3.707
Colonia Juárez	0.122	0.375	0.288	3.746	0.302	2.927
Delta	0.191	0.403	0.409	3.300	0.355	2.774
Mexicali	0.145	0.447	0.522	2.525	0.582	2.211
CAE	0.099	0.455	0.545	2.621	0.463	2.555
Presa Morelos	0.104	0.434	0.513	2.854	0.399	2.414
Riíto	0.111	0.414	0.514	2.703	0.461	2.507
San Luis Río Colorado	0.163	0.470	0.353	3.448	0.309	3.055
Imperial	0.077	0.439	0.609	2.289	0.512	2.282
Yuma	0.102	0.430	0.633	2.227	0.491	2.311

Validación con el SDSM

Mediante la herramienta Weather Generator (Generador de tiempo), el programa permite generar 20 series sintéticas a nivel mensual, para un período distinto al de calibración utilizando datos observados para el mencionado período y las ecuaciones de regresión lineal múltiple determinadas en la etapa de calibración. De esta manera se puede validar el modelo calibrado, usando datos diferentes a los del período de calibración. Para nuestro caso el periodo de calibración se refiere a los datos observados 1961-1980 y la muestra independiente 1981-1990, sin embargo, dado que inicialmente se detectó que los datos observados en este periodo muestran diferencias importantes, se decidió validar con el periodo completo 1961-1990. Como ejemplo se muestra en la figura 6.35 la simulación de la temperatura máxima en la estación Presa Morelos; se puede notar que la reconstrucción a partir de los datos NCEP y del modelo HadCM3 A2, entrega muy buenos resultados para el clima observado 1961-1990, mientras que el HadCM3 B2 muestra una pequeña pero clara sobreestimación en todo el ciclo anual.

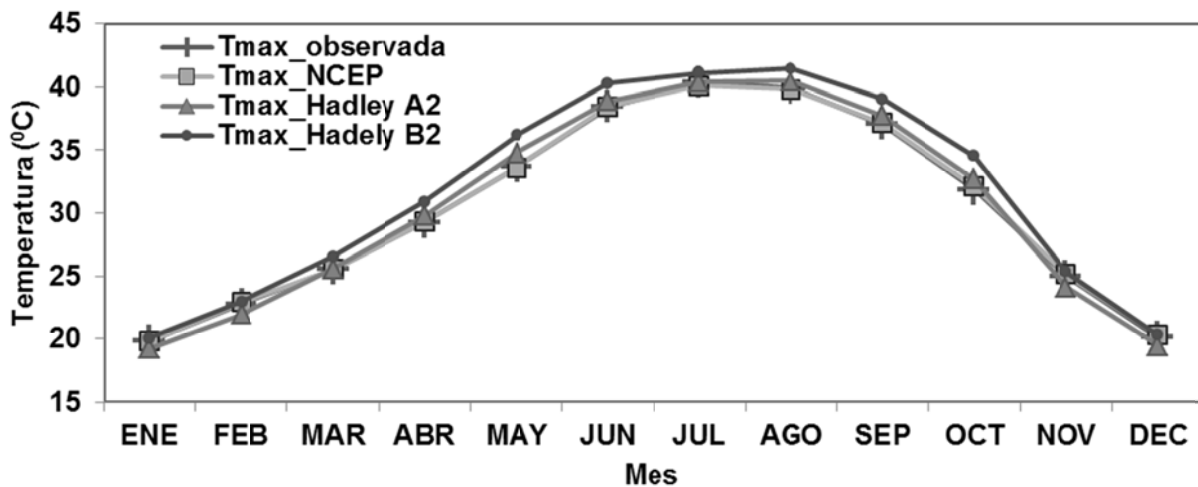


Figura 6.35 Simulación de temperatura máxima media mensual del periodo 1961-1990 con observaciones de la estación Presa Morelos usando el modelo SDSM

La varianza para la temperatura máxima y mínima es simulada con una correlación entre datos observados y simulados de entre 0.7 y 0.9, reproduciendo la tendencia del ciclo anual, pero ofreciendo subestimaciones y sobreestimaciones en diferentes meses en cada uno de los sitios de estudio. Cabe señalar que los niveles de correlación fueron variables entre la simulación con datos

del NCEP, el HadCM3 A2 y el HadCM3 B2, siendo la más baja para este último. Un ejemplo de correlación se muestra para la temperatura mínima de la estación Bataquez en la figura 6.36 y 6.37.

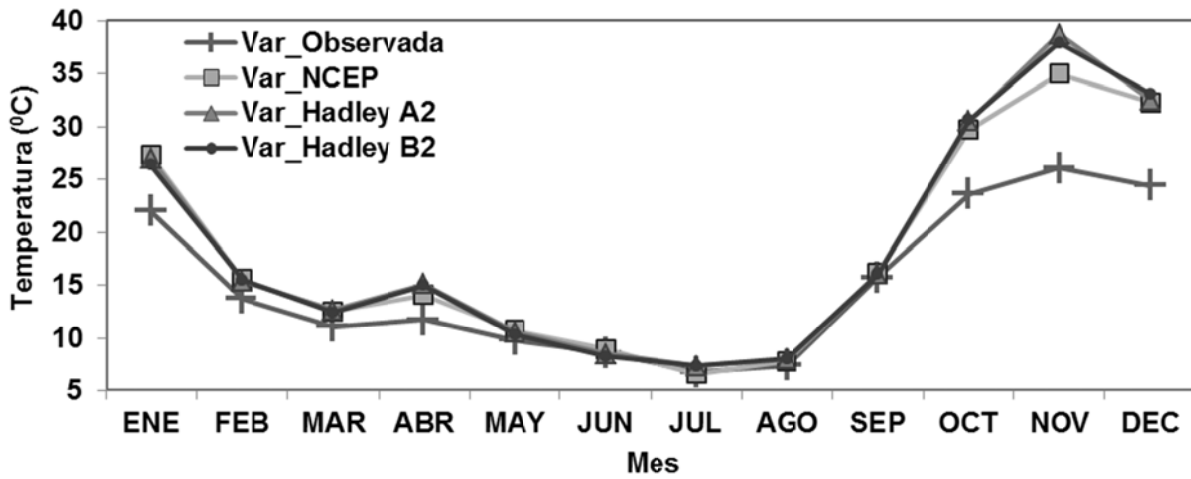


Figura 6.36 Simulación de la varianza de la temperatura mínima media mensual del periodo 1961-1990 con observaciones de la estación Bataquez usando el modelo SDSM

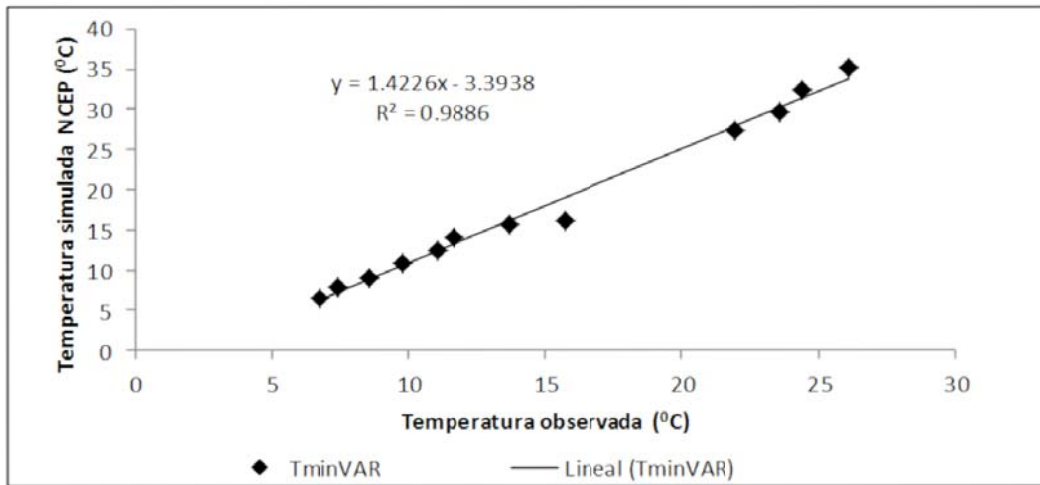


Figura 6.37 Relación lineal entre la varianza de la temperatura mínima observada de la estación Bataquez y la varianza modelada con los datos NCEP, del periodo 1961-1990.

Respecto a la precipitación, la reconstrucción del ciclo anual de las lluvias en términos de variables climáticas de gran escala resultó un trabajo difícil en los 10 sitios de estudio, principalmente porque la región del Valle de Mexicali se encuentra en una zona de transición entre latitudes medias y bajas, y los sistemas que pueden generar ocurrencias de lluvia, sobre todo en el verano, son a nivel

de mesoescala. La simulación con datos del NCEP representa cierta tendencia del ciclo anual, aunque existieron sobreestimaciones y subestimaciones en la mayoría de los meses; enero fue el mejor modelado, como se observa para la estación de Bataquez en la figura 6.38. En esta misma gráfica se aprecia que la modelación con el Hadley A2 y B2 fue muy deficiente pues no fue capaz de reproducir a nivel mensual el ciclo anual de lluvia. Sin embargo el valor total anual promedio fue muy próximo al observado de 1961-1990.

Con base en los resultados se puede inferir que el modelo parece ser adecuado para simular los valores medios mensuales de la temperatura máxima y mínima, así como su variabilidad en términos de la varianza; sin embargo para la precipitación, es evidente que su aplicación solo es rescatable en valores anuales totales promedio.

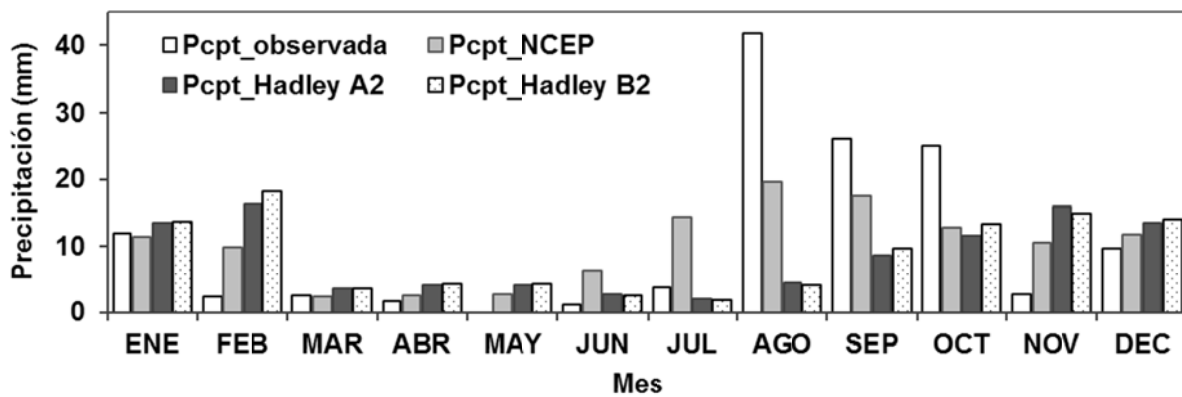


Figura 6.38 Simulación de la precipitación total mensual del periodo 1961-1990 con observaciones de la estación Bataquez usando el modelo SDSM

6.4.2 Generación de escenarios con el LARS WG

Validación con el LARS WG

Para la etapa de validación el LARS WG corrobora si las series generadas pueden considerarse como provenientes de la misma “población”, en el sentido estadístico. Esta comprobación que determina si las distribuciones, valores medios y desviaciones estándar de los datos sintéticos son perceptiblemente diferentes de los datos observados, se realiza mediante las pruebas estadísticas: chi-cuadrada (χ^2), t-student y la F de Snedecor, respectivamente.

Las pruebas estadísticas asumen que el tiempo observado es una muestra aleatoria de alguna distribución existente, la cual representa el “clima verdadero” en un sitio. Todas las pruebas muestran las diferencias en las distribuciones generadas a partir de los datos observados y sintéticos. Cada una de estas pruebas calcula un estadístico de prueba y un correspondiente valor p de significancia, el cual indica la probabilidad de que los datos observados y generados provienen de la misma distribución, por lo tanto el valor de p es usado para aceptar la hipótesis nula (H_0) de que “los dos conjuntos de datos pueden provenir de la misma población”; entonces un valor de p por debajo del nivel de significancia establecido en 0.05 para nuestro caso de estudio (el mismo nivel usado para las 3 pruebas estadísticas: chi-cuadrada (χ^2), t-student y la F de Snedecor); indica que “el clima simulado es poco probable que sea el mismo que el clima verdadero” (Semenov *et al.*, 2002). Un ejemplo de los datos de salida de temperatura mínima para la estación Presa Morelos se muestra en la tabla 6.9.

Tabla 6.9 Comparación mensual de la temperatura mínima media, desviación estándar (sd) y distribución de los datos observados con los datos sintéticos generados con LARS WG en la estación Presa Morelos. Se muestran también los valores mensuales de probabilidad (p) calculados mediante las pruebas t, F y χ^2 , para las medias mensuales, la desviación estándar y la distribución respectivamente. Un valor p de 0.05 o inferior indica que es significativo al nivel del 5%

Mes	Observada		Generada		Prueba t	Valor P	Prueba F	Valor p	Prueba χ^2	Valor p
	Media	sd	Media	sd						
E	5.33	1.548	5.51	0.607	-0.729	0.468	6.504	0	0.106	0.99
F	6.81	1.819	6.64	0.573	0.620	0.537	10.078	0	0.105	0.99
M	8.99	1.302	9.15	0.575	-0.744	0.459	5.127	0	0.105	0.99
A	11.89	1.57	11.97	0.597	-0.327	0.744	6.916	0	0.106	0.99
M	15.84	1.415	15.85	0.590	-0.035	0.972	5.752	0	0.106	0.99
J	20.17	1.494	19.89	0.489	1.191	0.237	9.334	0	0.158	0.91
J	24.56	1.857	24.77	0.488	-0.743	0.460	14.481	0	0.106	0.99
A	24.54	1.605	24.22	0.544	1.293	0.200	8.705	0	0.210	0.64
S	20.97	1.829	20.59	0.586	1.377	0.172	9.742	0	0.106	0.99
O	14.83	1.632	14.93	0.564	-0.391	0.697	8.373	0	0.106	0.99
N	9.2	1.437	9.65	0.555	-1.953	0.055	6.704	0	0.053	1.00
D	5.61	1.33	5.68	0.558	-0.335	0.739	5.681	0	0.106	0.99

En la tabla 6.10 se muestra el número de estaciones que no pasaron cualquiera de las tres pruebas estadísticas en algún mes. Refiriéndonos a los valores medios, los valores de p de la prueba t indican que para la precipitación, el generador de tiempo mostró una simulación adecuada excepto

para el mes de junio en la estación Mexicali; para la temperatura mínima en la estación Riíto no se simuló adecuadamente en los meses de enero y agosto; finalmente para la temperatura máxima se encontró mayor dificultad pues se rechazó la H_0 en el mes de enero en tres estaciones y cuatro para el mes de agosto, siendo la estación CAE y Riíto, las que coincidieron en ambos meses, además se tiene rechazo de dos estaciones en el mes de mayo, una en febrero y una en octubre, este comportamiento indica que seguramente las temperaturas extremas en los meses cálidos no son simuladas adecuadamente. Respecto a la variabilidad del clima en términos de los valores p correspondientes a la prueba F que compara la desviación estándar calculada por el programa entre el “clima verdadero y el clima simulado”, se tiene que tanto para la temperatura máxima como mínima, en los diez sitios de estudio se rechazó la H_0 en todos los meses; sin embargo, los resultados fueron relativamente mejores para la precipitación, siendo enero, febrero, agosto y diciembre, los meses en que se representó apropiadamente el clima en toda la región y que son los más lluviosos, al contrario de mayo en que la H_0 se rechazó para cinco estaciones y nueve en junio, lo cual podría no ser tan significativo debido a que son meses predominantemente secos. La prueba chi-cuadrada χ^2 que ejecuta el generador, revela que las distribuciones de la serie observada y la serie sintética tienen la misma distribución para la temperatura mínima y temperatura máxima en las diez estaciones de estudio. Para la precipitación, el caso más crítico, como se observa de la tabla 6.10 ocurre en los meses de mayo y junio, lo cual hace evidente las dificultades para simular en la época seca.

Con base en el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas estadísticas, se puede observar para la región del Valle de Mexicali que el modelo planteado por el generador tiene la habilidad de reproducir la temperatura máxima y mínima adecuadamente en términos de valores medios, sin embargo, no muestra una habilidad apropiada para la simulación de la variabilidad climática en términos de desviación estándar. Para la precipitación mostró un buen ajuste para los valores medios y una deficiencia en cuanto a la variabilidad climática para los meses de mayo y junio, lo cual en un momento dado podría no ser tan importante, ya que estos meses son los más secos del

ciclo anual de lluvias. Aunque el LARS WG es un generador que ha demostrado ser un buen simulador para varios climas del mundo (Semenov *et al.*, 1998), es de esperarse que en la región bajo estudio, el clima no puede ser aproximado a la distribución teórica que propone el generador, pues es poco probable que esta sea capaz de coincidir con la gran variedad de climas en todo el mundo.

Tabla 6.10 Número de estaciones que en base a los valores de p calculados no pasan alguna de las tres pruebas estadísticas utilizadas para comparar los datos observados del periodo 1961-1990 con los datos sintéticos generados por LARS WG

Variable	Prueba estadística	Valor de probabilidad (p) mensual											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P	t	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	F	0	0	1	2	5	9	2	0	1	3	3	0
	χ^2	0	0	0	1	4	6	1	0	0	0	0	0
Tmin	t	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	F	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	χ^2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tmax	t	3	1	0	0	2	0	0	4	0	1	0	0
	F	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	χ^2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Un aspecto importante en la validación del clima observado como etapa previa a la generación de escenarios de cambio climático son los mecanismos de los forzantes físicos que no pueden ser rectificadas pues se encuentran implícitos en los MCG, y que son asociados al clima regional de invierno, particularmente modulado por El Niño Oscilación del Sur (ENOS) a una escala de tiempo interanual y por la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) a una escala de tiempo decadal, con condiciones más húmedas en invierno asociadas con la fase El Niño/+OPD y más secas con la fase La Niña/-ODP (Arriaga y Cavazos, 2010). Estos moduladores regionales necesitan ser evaluados con una resolución más fina de los MCG o la aplicación de modelos dinámicos del clima regional. La precipitación es una variable climática difícil de representar, como en nuestro caso, otros estudios también han encontrado cierta dificultad, por ejemplo, en la reducción de escala estadística aplicada por Cavazos (2012) para el estado de Baja California, el modelo tiende a sobreestimar la media del ciclo anual y subestimar la magnitud de la variabilidad interanual de precipitación, sin embargo cabe destacar que logró una representación espacial más realista que los MCG.

6.4.3 Generación de escenarios de cambio climático

Una vez analizada la habilidad de las dos técnicas estadísticas de reducción de escala, el SDSM y el LARS WG, para reproducir el clima observado 1961-1990 para la región del Valle de Mexicali en términos de las variables climáticas temperatura y precipitación, se generaron escenarios de cambio climático para las climatologías 2020 (periodo 2010-2039) y 2050 (periodo 2040-2069); con los escenarios de emisión alta (A2), media (A1B) y baja (B2), los cuales corresponden a un nivel de estabilización de CO₂ para finales del siglo veintiuno de 850 ppm, 720 ppm y 550 ppm respectivamente. Las anomalías anuales promedio para temperatura se expresan en diferencia absoluta (°C) y la precipitación en términos de diferencia porcentual (%). Los resultados obtenidos muestran en ambas técnicas anomalías positivas para la temperatura máxima y la temperatura mínima (tablas 6.11 y 6.12). En el caso de la precipitación como se aprecia en la tabla 6.13, con el SDSM las anomalías son positivas excepto para la estación Imperial, mientras que con el LARS WG son al contrario predominantemente negativas.

Se estimó un promedio espacial de las diez estaciones de estudio de la región del Valle de Mexicali observando que cuando los cambios se derivan del MCG HadCM3 aplicando el SDSM bajo el escenario A2, se obtiene una tendencia al aumento en los valores promedio anuales para temperatura mínima de 0.8 °C y 1.7 °C para la climatología 2020 y 2050 respectivamente, y de 0.8°C y 1.8 °C para temperatura máxima en estas mismas climatologías correspondientes. En tanto para el escenario B2 las anomalías de temperatura mínima son de 1.0 °C para el horizonte 2020 y de 1.7 °C para el horizonte 2050, mientras que para la temperatura máxima para estos mismos periodos de tiempo se presentan cambios de 1.1 °C y 1.7 °C respectivamente. Para la precipitación la anomalía es positiva y semejante entre el escenario A2 y B2, encontrando un aumento aproximado del 20% para la climatología 2020 y del 50% para la climatología 2050.

Aplicando el esquema LARS WG a partir del Modelo Multiensamble (MM), se encontró que para el escenario A2 en el periodo 2010-2039 existe un incremento de temperatura mínima de 0.9 °C, mientras que para el periodo 2040-2069 de 1.6 °C. En cuanto a temperatura máxima se tiene un

incremento de 1.0 °C y 1.6 °C, para ambos periodos, respectivamente. El escenario A1B muestra incrementos para temperatura mínima y máxima de 1.0 °C para el periodo 2010-2039 y de 1.8 °C para el periodo 2040-2069. Respecto a la precipitación, los cambios son anomalías negativas mayormente acentuadas para el escenario A2 de -14.3 % para la climatología 2020 y de -18.4% para la climatología 2050, mientras que para el escenarios A1B, es de -4.2% y -9.2%, para estas mismas climatologías respectivas.

Del análisis anterior es posible observar que para temperatura, con el escenario A2, el SDSM registra un mayor calentamiento en el escenario B2 en la climatología 2020 con una diferencia de 0.2 °C para la temperatura mínima y de 0.3 °C para la temperatura máxima. Siguiendo esta misma comparación, en relación al escenario A2, el LARS WG presenta un mayor calentamiento en el escenario A1B tanto para temperatura mínima como máxima con un diferencia de 0.1 °C en la climatología 2050, y de 0.2 °C en el horizonte 2050. Esta diferencia se explica entendiendo que el escenario A2 corresponde a una evolución de emisiones de GEI más creciente que los escenarios A1B que corresponde a emisiones medias y que el B2 que se refiere a emisiones bajas, la cual es evidente para finales del presente siglo, sin embargo los horizontes analizados (2010-2039 y 2040-2069) pueden corresponder a un periodo de transición que caracteriza al escenario A1B por una orientación más mundial con una mayor demanda de recursos y servicios, y el escenario B2 por cambios lentos a tecnologías no fósiles.

Tabla 6.11 Anomalías de temperatura máxima en diferencia absoluta obtenidas bajo cambio climático para la región del Valle de Mexicali, aplicando dos técnicas de reducción a escala

	Anomalía media anual de temperatura máxima (Tmax) en diferencia absoluta (°C)							
MODELO	SDSM				LARS WG			
ESCENARIO	A2		B2		A2		A1B	
CLIMATOLOGÍA	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
ESTACIÓN								
Bataquez	0.5	1.1	0.7	1.1	1	1.6	1	1.7
Colonia Juárez	0.7	1.4	0.9	1.4	0.9	1.6	1	1.8
Delta	0.9	1.8	1.1	1.7	1	1.6	1.1	1.8
Mexicali	0.9	1.9	1.2	1.8	1	1.6	1	1.7
CAE	1	2	1.2	1.9	1	1.6	1.1	1.8
Presa Morelos	0.9	1.9	1.1	1.8	0.9	1.6	1	1.7
Riito	0.8	1.7	1	1.6	0.9	1.6	1	1.8
San Luis Río Colorado	0.9	1.9	1.2	1.8	1	1.6	1	1.7
Imperial	0.9	1.9	1.2	1.8	0.9	1.7	1	1.8
Yuma	0.9	1.9	1.2	1.8	0.9	1.6	1	1.7
Promedio	0.8	1.8	1.1	1.7	1.0	1.6	1.0	1.8

Tabla 6.12 Anomalías de temperatura mínima en diferencia absoluta (°C) obtenidas bajo cambio climático para la región del Valle de Mexicali, aplicando dos técnicas de reducción a escala

	Anomalía media anual de temperatura mínima (Tmin) en diferencia absoluta (°C)							
MODELO	SDSM				LARS WG			
ESCENARIO	A2		B2		A2		A1B	
CLIMATOLOGÍA	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
ESTACIÓN								
Bataquez	0.6	1.2	0.7	1.2	0.9	1.6	1	1.7
Colonia Juárez	0.7	1.4	0.9	1.4	0.9	1.6	1	1.8
Delta	0.8	1.6	1	1.6	1	1.6	1.1	1.8
Mexicali	1	2	1.1	2	0.9	1.6	1	1.7
CAE	0.9	1.9	1.1	1.9	1.1	1.8	1.2	1.9
Presa Morelos	0.9	1.7	1	1.7	0.9	1.6	1	1.7
Riito	0.9	1.9	1	1.8	0.9	1.6	1	1.8
San Luis Río Colorado	0.8	1.7	1	1.6	0.9	1.6	1	1.7
Imperial	1	2	1.1	1.9	0.9	1.6	1	1.7
Yuma	0.9	1.9	1.1	1.8	1	1.6	1	1.7
Promedio	0.8	1.7	1.0	1.7	0.9	1.6	1.0	1.8

Tabla 6.13 Anomalías de precipitación en diferencia porcentual (%) obtenidas bajo cambio climático para la región del Valle de Mexicali, aplicando dos técnicas de reducción a escala

	Anomalía de precipitación (P) en diferencia porcentual (%) total anual							
MODELO	SDSM				LARS WG			
ESCENARIO	A2		B2		A2		A1B	
CLIMATOLOGÍA	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
ESTACIÓN								
Bataquez	5.7	15.8	5.1	16.4	-14.6	-23.3	-9.2	-15.7
Colonia Juárez	24.6	43.7	19.8	47.1	-12.9	-13.5	-2.5	-6.0
Delta	50.2	123.8	51	110.1	-12.0	-16.9	-2.1	-7.6
Mexicali	12.4	23.1	11.6	18.6	-19.8	-23.4	-6.5	-14.6
CAE	29.1	57.6	42.6	80.6	-15.0	-14.5	-7.2	-5.9
Presa Morelos	16.1	34.7	14.9	32.7	-20.3	-23.8	-5.6	-13.7
Riíto	38.4	97.3	47.9	86.1	-15.3	-21.3	-4.0	-7.8
San Luis Río Colorado	29.1	49.9	21.9	51.6	-0.6	-17.2	9.0	-19.7
Imperial	-0.2	-2.9	-6	-6.3	-15.3	-14.9	-9.7	-2.3
Yuma	18.4	45.7	15.7	29.7	-17.5	-15.2	-4.5	1.0
Promedio	22.4	48.9	22.5	46.7	-14.3	-18.4	-4.2	-9.2

6.4.4 Escenario comparativo A2 entre el SDSM y el LARS WG

El escenario comparado entre las dos técnicas de reducción de escala es el A2, específicamente las anomalías promedio de toda la región; para la climatología 2020 y 2050, para temperatura máxima (figura 6.39), y temperatura mínima (figura 6.40) y precipitación (figura 6.43). Se encontró que para temperatura, tanto máxima como mínima, las dos técnicas coinciden en aumentos de los valores mensuales, y anuales promedio para la climatología 2020 y más aún para la 2050 (tabla 6.14). En términos de temperatura media anual para la región del Valle de Mexicali, ambas técnicas de reducción de escala mostraron anomalías positivas, por un lado con el SDSM se determina para la temperatura máxima un aumento de 0.8 °C y 1.8 °C para los horizontes temporales 2020 y 2050 respectivamente, mientras que para la temperatura mínima se estima una anomalía de 0.9 °C y 1.7°C para estos mismos periodos de tiempo correspondiente. Por otro lado el LARS WG muestra para la climatología 2020 un aumento de temperatura máxima de 1.0 °C y para la temperatura mínima de 0.9 °C; para la climatología 2050 para ambas temperaturas tanto máxima como mínima se estima un aumento de 1.6°C. A nivel anual la diferencia entre el LARS WG y el SDSM, para el escenario y horizontes comparados, es de 0.1 °C para la temperatura mínima para la climatología

2050; para la climatología 2020 no existió diferencia. Respecto a la temperatura máxima en ambas climatologías analizadas la diferencia fue de 0.1 °C. En términos de cambio porcentual en la precipitación anual total, el HadCM3 estima aumentos con el SDSM de 22.40% para la climatología 2020, a 48.9% para la climatología 2050; por el contrario, LARS WG proyecta disminución en el total del ciclo anual de lluvia utilizando el MM de -14.3 % para la climatología 2020 y -18.4% para la climatología 2050.

Tabla 6.14 Anomalía de temperatura mínima media mensual en diferencia absoluta (°C). Las letras en negrita cursiva se refieren a los valores máximos.

Mes	Anomalía de temperatura mínima media mensual en diferencia absoluta (°C)				Anomalía de temperatura máxima media mensual en diferencia absoluta (°C)			
	Climatología				Climatología			
	2020		2050		2020		2050	
	SDSM	LARS WG	SDSM	LARS WG	SDSM	LARS WG	SDSM	LARS WG
Enero	0.7	0.7	1.0	1.4	0.5	0.8	1.2	1.3
Febrero	0.4	0.7	0.9	1.4	0.8	0.8	1.1	1.4
Marzo	0.5	0.6	1.1	1.2	0.7	0.7	1.7	1.3
Abril	0.4	0.8	1.2	1.4	0.6	0.9	1.8	1.4
Mayo	0.8	1.0	1.5	1.6	1.3	1.0	2.2	1.6
Junio	0.9	1.0	2.1	1.6	1.1	1.1	2.6	1.6
Julio	0.8	0.9	2.6	1.8	0.4	0.9	1.2	1.8
Agosto	1.0	0.7	2.6	1.3	0.7	0.8	1.5	1.4
Septiembre	2.7	0.9	3.6	1.7	1.2	1.0	2.1	1.7
Octubre	1.5	1.0	2.6	1.9	1.3	1.1	2.4	1.9
Noviembre	0.3	0.9	1.0	1.8	0.9	1.1	1.7	1.8
Diciembre	0.3	1.1	0.7	2.2	0.7	1.3	1.7	2.1
Promedio	0.8	0.9	1.7	1.6	0.8	1.0	1.8	1.6

A nivel mensual el SDSM indica que la temperatura mínima tiene su mayor aumento en otoño de 2.7 °C para el horizonte 2020, y 3.6 °C para el 2050; en particular para la temperatura mínima, este incremento se muestra en octubre de 1.3 °C y 2.4 °C, para cada horizonte, respectivamente. Por otro lado, el LARS WG muestra también los cambios estacionales más importantes en el otoño, para la temperatura mínima de 1.1 °C para la climatología 2020 y de 2.2 °C para la 2050; mientras que para la temperatura máxima de 1.3 °C para la climatología 2020, y 2.1 °C para el horizonte

2050; todos estos cambios se presentan en el mes de diciembre. Estos resultados son un indicador de que la estación cálida será más prolongada.

Básicamente las diferencias que existen entre estas dos técnicas de reducción de escala radica en que para un periodo y escenario correspondiente LARS WG genera 100 experimentos de datos diarios de un año típico que aseguran estabilidad a las estadísticas y robustez a los resultados (Semenov *et al.*, 1998 y 1999), y se parte de escenarios regionalizados de 50 km por 50 km construidos con la Herramienta de Predicibilidad del Clima (CPT, por sus siglas en inglés) y comparables a algunos de los escenarios producidos usando modelos dinámicos de meso escala, por lo que se logra capturar en buena medida, el efecto de circulaciones regionales que producen en estas escalas espaciales una mejor resolución que la obtenida con el SDSM con una medida de rejilla mucho mayor (2.5° latitud por 3.75° de longitud) y con el cual se generó una muestra del periodo de 30 años con 20 experimentos, además de que parte directamente de la perturbación de las salidas a gran escala de un solo CGM el HadCM3.

6.4.5 Análisis espacial y escenarios

Al igual que para la climatología base, con el propósito de realizar un análisis espacial, se elaboraron mediante un SIG, los mapas de anomalías para la temperatura máxima (figura 6.39 y 6.41), la temperatura mínima (figura 6.40 y 6.42) y la precipitación (figura 6.43), para los escenarios A2, A1B y B2, para las climatologías 2020 (periodo 2010-2039) y 2050 (periodo 2040-2069). Los mapas permiten observar que el SDSM, presentó una mejor resolución espacial que el LARS WG al mostrar detalles locales de la distribución de las anomalías de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, y que al parecer son consistentes para el caso de la temperatura con el mapa de climatología base. El LARS WG entregó resultados de anomalías prácticamente iguales para toda la región, mostrando apenas una diferenciación en el caso de la temperatura máxima y mínima, en la zona noroeste correspondiente a la estación CAE y Mexicali, y para la precipitación adicionalmente la zona del extremo noreste, correspondiente a las estaciones Presa Morelos y Yuma. De acuerdo a los detalles espaciales de anomalías que proporciona el

SDSM, se observa que para el caso de temperatura se distinguen 3 zonas: 1) la zona con los menores aumentos que corresponden a la estación Bataquez y Colonia Juárez, 2) la zona con los mayores aumentos que se define fuertemente por las estaciones CAE, Mexicali e Imperial y 3) el resto de la región que se puede definir como una zona intermedia entre los menores y mayores aumentos de temperatura. Es importante señalar que a diferencia del mapa de climatología base 1961-1990, que distingue a la zona Delta como la más cálida, en el mapa de anomalías de temperatura, los mayores cambios corresponden a la zona que conforma el área urbana, por lo que pudiera considerarse que existe la influencia de la Isla Urbana de Calor.

Respecto a los cambios porcentuales de precipitación comparados con el mapa de climatología base, se observa que en general para toda la región se presentan cambios positivos, pero se distinguen por ser más acentuados en la zona más seca, integrada por las estaciones Delta, Colonia Juárez y Riíto.

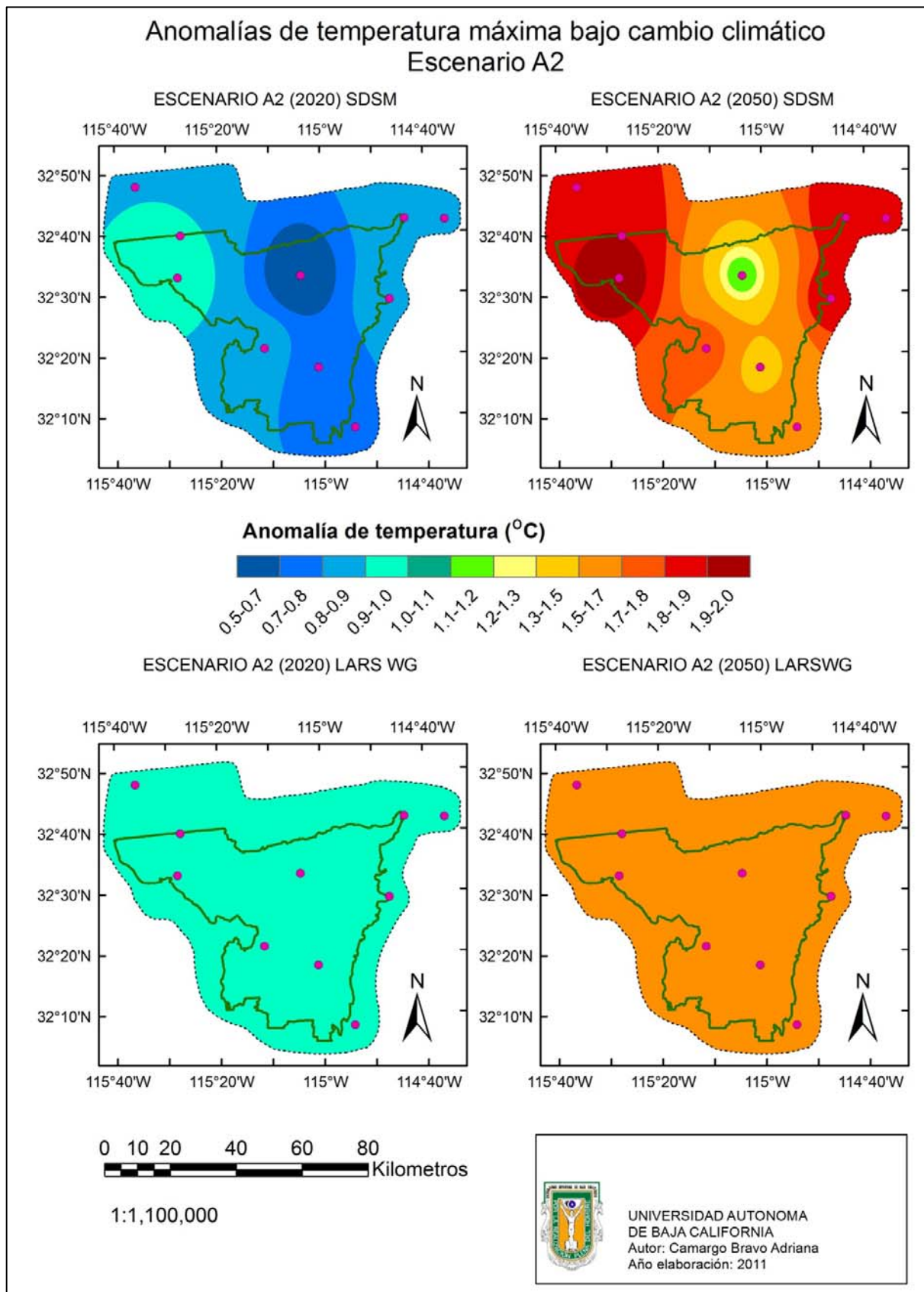


Figura 6.39 Anomalías de temperatura máxima obtenidas con el escenario A2.

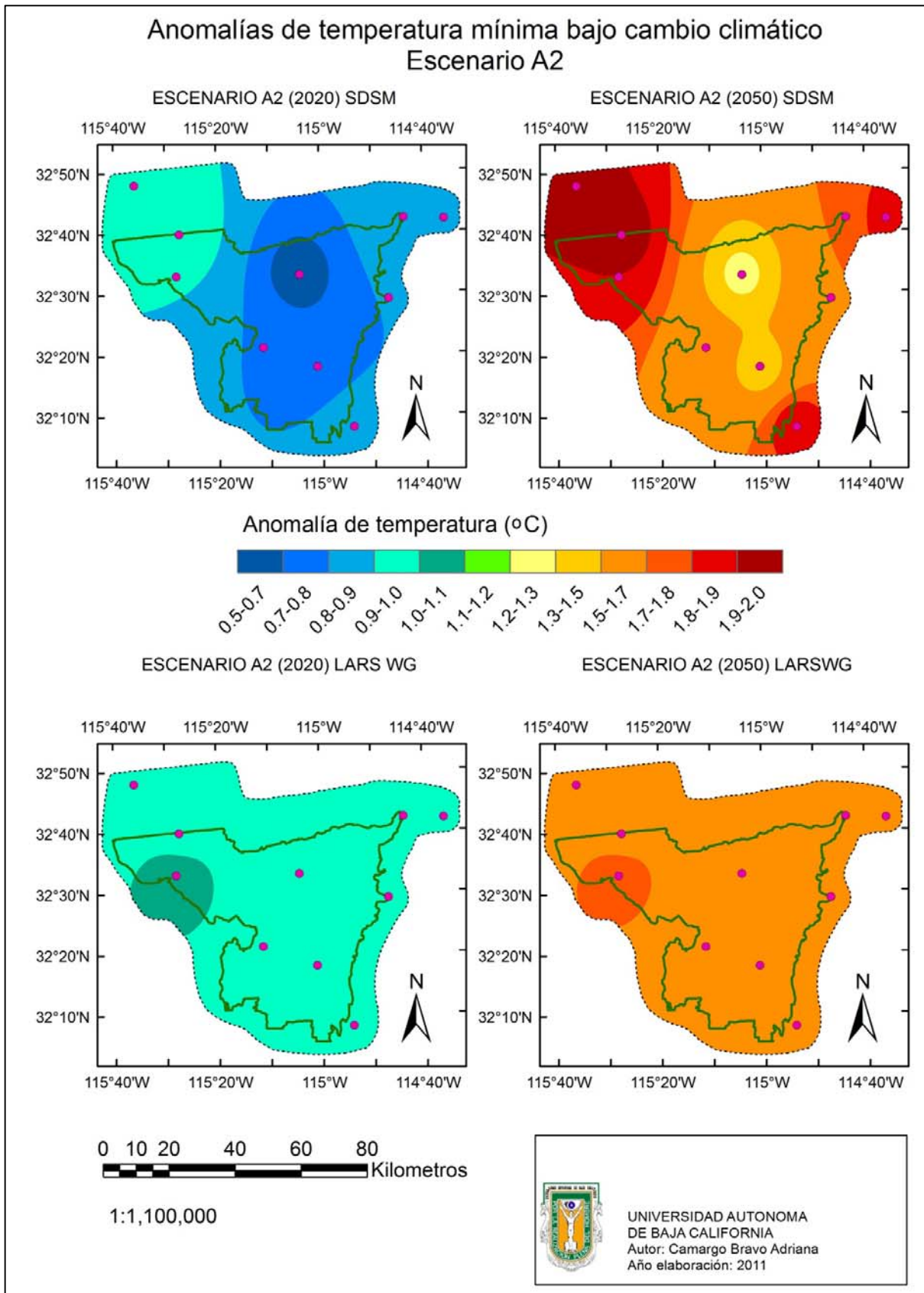


Figura 6.40 Anomalías de temperatura mínima obtenidas con el escenario A2.

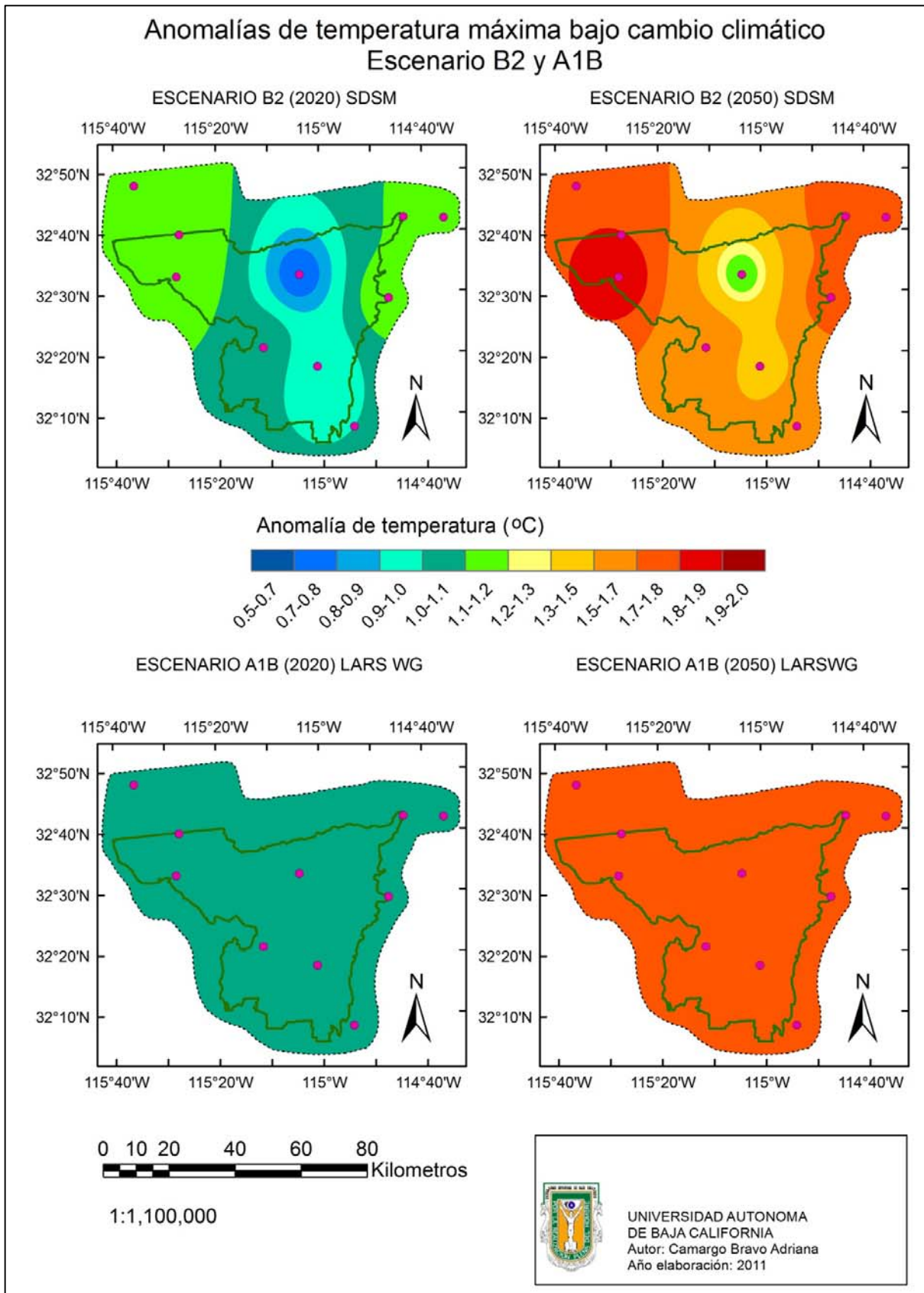


Figura 6.41 Anomalías de temperatura máxima obtenidas con el escenario B2 y A1B.

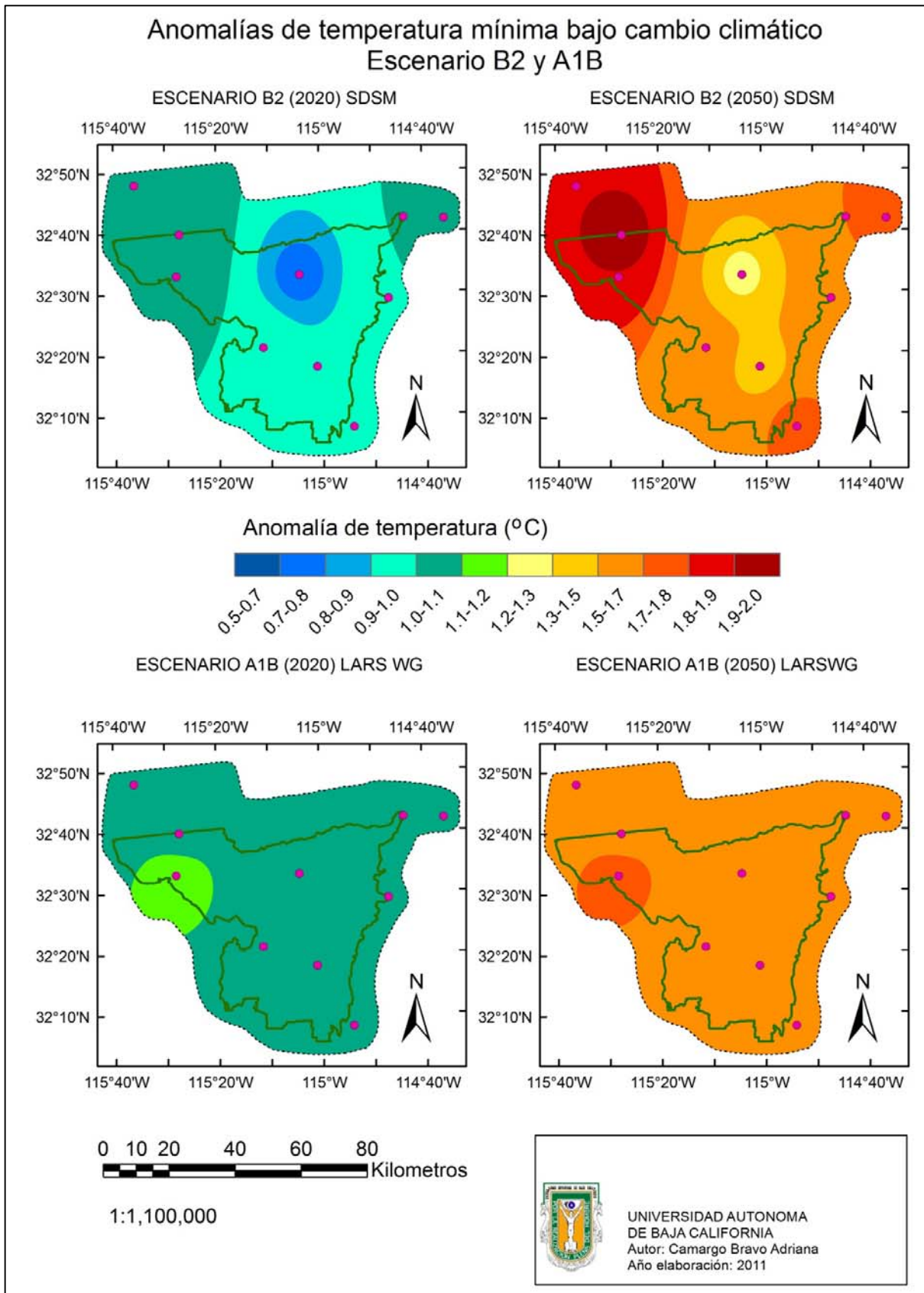


Figura 6.42 Anomalías de temperatura mínima obtenidas con el escenario B2 y A1B.

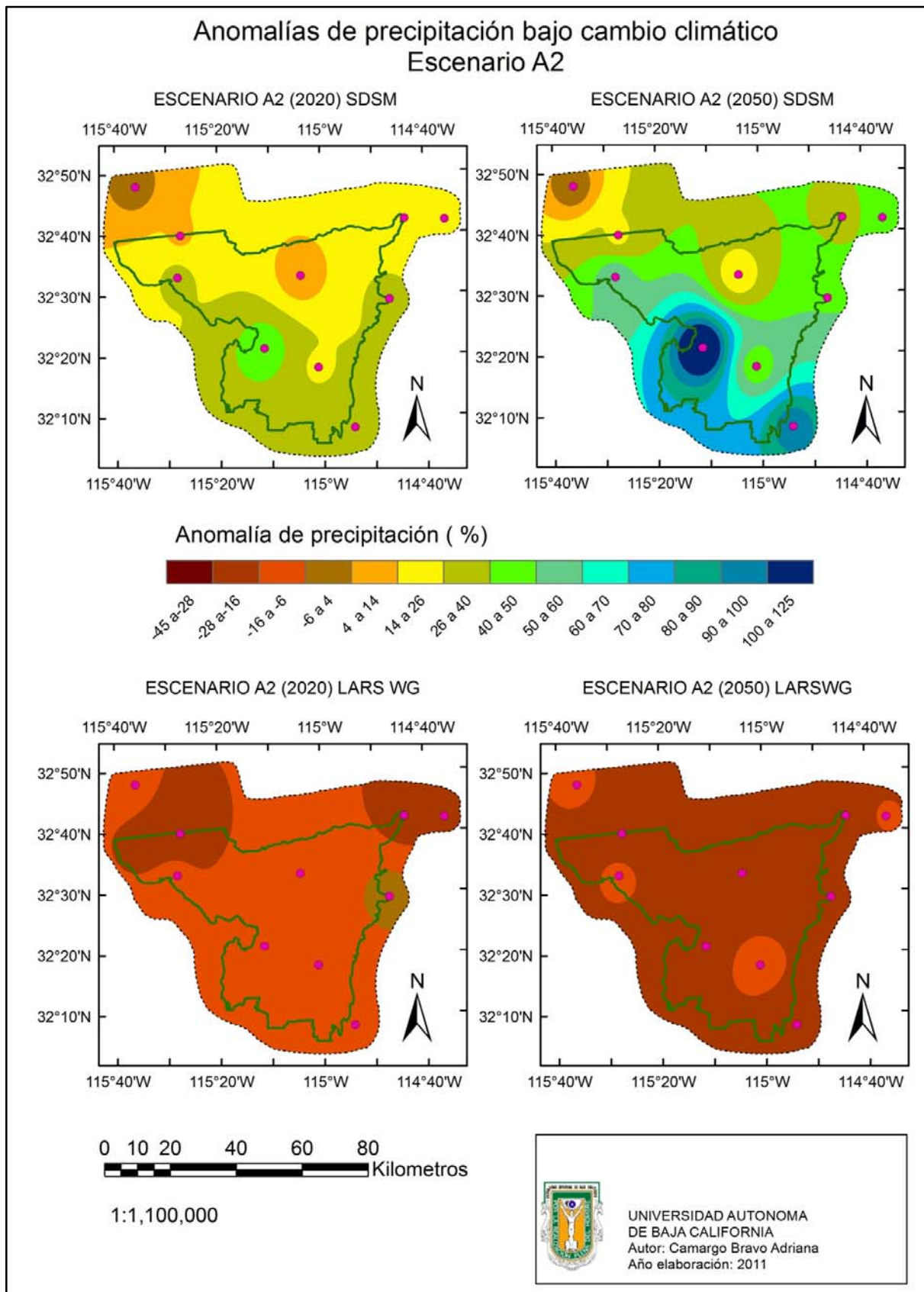


Figura 6.43 Anomalías de precipitación obtenidas con el escenario A2.

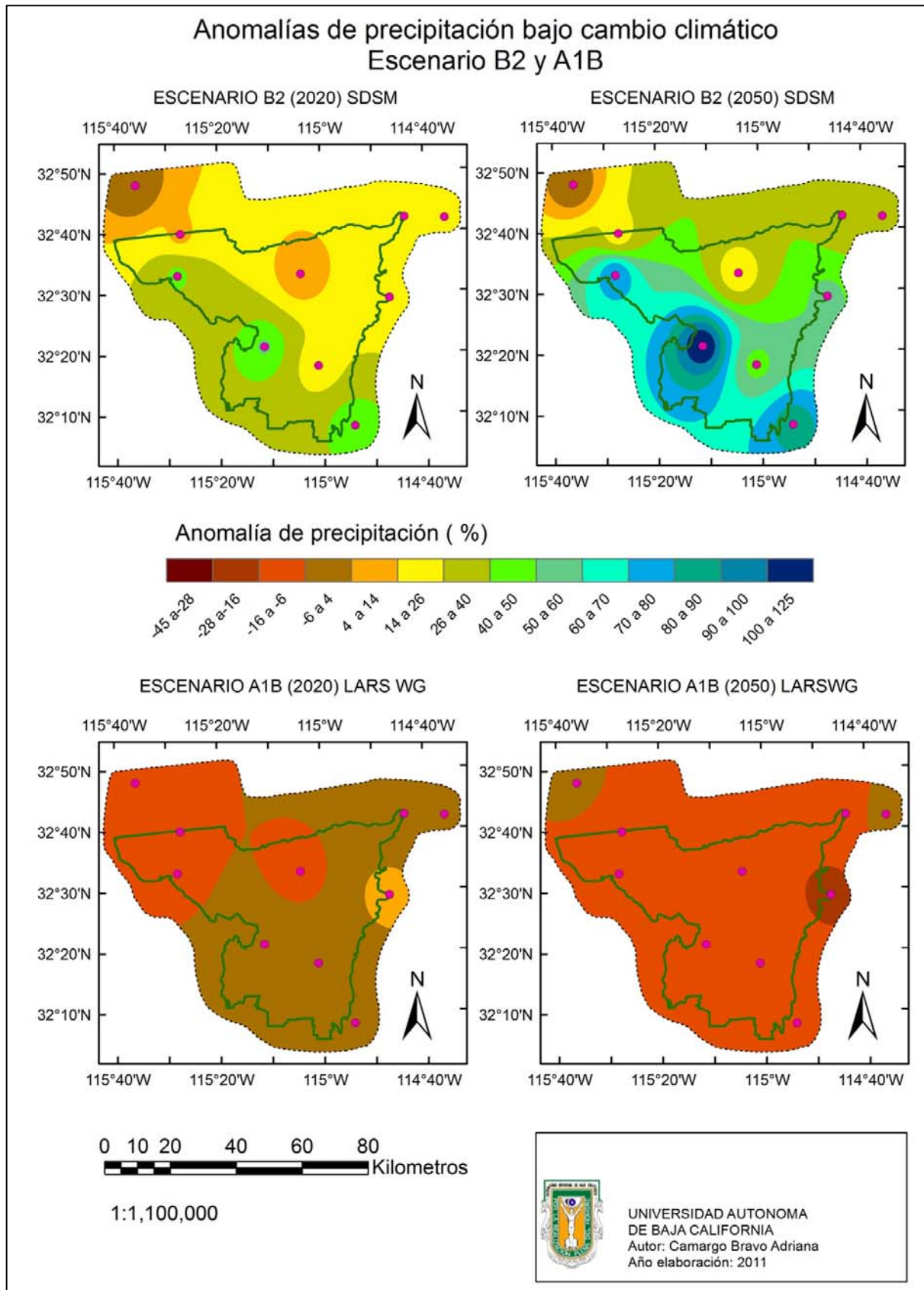


Figura 6.44 Anomalías de precipitación obtenidas con el escenario B2 y A1B.

6.4.6 Escenarios y tendencias

De acuerdo a las anomalías proyectadas en el presente trabajo para la región del Valle de Mexicali, los cambios esperados para temperatura y precipitación son importantes, lo cual corresponde a las tendencias de los últimos 100 años según datos de la Unidad de Investigación Climática (CRU, por sus siglas en inglés).

Temperatura

En el trabajo que Magaña describe en INE (2009), conforme al análisis de temperatura de superficie, indica que en la mayor parte de México han ocurrido aumentos que varían de región en región. Los cambios observados en temperatura media anual varían de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, en ciertas partes del noreste, a cerca de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el noroeste. Según estas tendencias, para la zona del Valle de Mexicali, son claramente positivas para la temperatura ($0.6\text{-}0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Para el Noroeste de México y el Suroeste de Estados Unidos las tendencias positivas para temperatura son consistentes, de acuerdo a Karol y Wu (2005), en relación a que esta zona ha experimentado un incremento significativo de temperatura durante el último cuarto del siglo veinte, lo cual también es consistente con el aumento de temperatura de $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ reportado por Englehart y Douglas (2003) para el norte de México.

La reducción de escala con una técnica estadística aplicada por Cavazos y Arriaga (2012) para generar escenarios regionales para el estado de Baja California, proyectó un incremento de temperatura de $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto al periodo observado 1961-1990, para el periodo 2010-2039 (climatología 2040) bajo los escenarios de emisiones altas (A2) y bajas (B1); es decir un aumento de la temperatura media de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Magaña *et al.*, (2012) también aplicó una técnica de reducción de escala para generar escenarios regionales a nivel nacional, estimando que para el noroeste de México se esperan aumentos de temperatura de hasta $2.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ para mediados del siglo XXI, bajo el escenario de emisiones altas A2, cuyo valor es también similar al obtenido para el escenarios de emisiones medias, el A1B. Cabe señalar que ambos escenarios regionales mencionados se derivan de modelos Multi Ensamble de diferentes MCG y las salidas que ofrecen

son cambios mensuales futuros de temperatura y precipitación. Para el presente caso de estudio, en el Valle de Mexicali coincide con un aumento de temperatura media anual para la climatología (2020) pero con un valor de alrededor de 1°C para los tres escenarios seleccionados A2, A1B y B2, obtenido por los modelos aplicados el SDSM y el LARS WG; sin embargo el detalle local logrado y las obtención de series de tiempo diarias permitieron una diferenciación de la zona, mostrando estimaciones con valores entre 0.5°C y 1.0 °C (la diferencia obtenida entre los escenarios fue discutida en la sección anterior), lo cual representa ventajas importantes al momento de la aplicación en el sector agrícola.

Precipitación

Por otra parte, respecto a las tendencias de la precipitación para México sugieren una especie de dipolo: incremento en el sur y disminución en el norte. De acuerdo al INE (2009) para el área de interés se presentan tendencias negativas para la precipitación (0 a -3 %).

De acuerdo a Terán (2010) en su análisis estacional de las tendencias de la lluvia de 1950-2009 a partir de la serie histórica de la CNA, coincide con el trabajo de Magaña (INE, 2009) en una tendencia negativa en la mayor parte de la región del Valle de Mexicali (excepto por la zona noreste) particularmente en invierno y verano; indica también una tendencia positiva para las estaciones de primavera y otoño.

En contraste a la temperatura, los cambios proyectados de precipitación anual muestran mayores incertidumbres y una mayor variabilidad interanual en la región de Baja California, tal como lo discute Cavazos y Arriaga (2012) en los escenarios escalados, encontrándose bajo el escenario extremo A2 un decremento de la precipitación de aproximadamente el 30% para la segunda mitad del siglo veintiuno, dicho valor difiere en forma importante de los resultados obtenidos con el SDSM y el LARS WG aplicados en el presente estudio, pues mientras para precipitación se proyectaron incrementos con el SDSM alrededor del 50% para el periodo 2040-2069 (climatología 2050), para este mismo periodo el LARS WG estimó decrementos de casi el 20%. Estos cambios porcentuales de precipitación obtenidos mediante las técnicas de reducción de escala mencionadas,

coinciden con el trabajo de Magaña *et al.*, (2012) en el que se generaron escenarios regionales derivados del MCG HADCM3 (utilizado con el SDSM), en el que se estiman aumentos de precipitación en el oeste de México, tal como sucedió en el presente estudio. Por otra parte, los escenarios regionales escalados a partir de un Modelo Multiensamble (el utilizado por el LARS WG), proyecta decrementos de precipitación para el escenario A2 y el periodo 2010-2039 de entre el 10-20% , valores que coinciden con los decrementos obtenidos en esta investigación (14-19%)

De acuerdo a lo resultados obtenidos en el presente trabajo y los reportados por otros estudios, coinciden en cambios espaciales de precipitación, condiciones de calentamiento extremas y decremento en la precipitación (Cavazos y Arriaga, 2012; Magaña *et al.*, 2012), revelando que la región de Baja California y específicamente la zona árida del Valle de Mexicali es particularmente vulnerable a los impactos del cambio climático al coincidir las más altas temperaturas con los episodios de mayor escasez de agua. El recurso hídrico representa una de las mayores afectaciones, aumentando la presión ya existente sobre este recurso derivada de la disponibilidad de agua en función de los tratados aplicables a la frontera México-Estados Unidos (Magaña *et al.*, 2012).

Lo anterior muestra que para la temperatura existe una tendencia clara de incremento para la zona de estudio, mientras que para la precipitación resulta más complejo, como se observa en la divergencia de las estimaciones de lluvia bajo cambio climático obtenidas por ambas técnicas de reducción de escala, pues mientras el SDSM proyecta aumentos, el LARS WG estima disminuciones.

6.5 Impacto del cambio climático sobre la fenología del cultivo del trigo

6.5.1 Escenario base de UCDS

Las UCDS acumuladas del escenario base 1961-1990 (y para los escenarios A2 y A1B) se calcularon tomando como temperaturas umbrales inferior y superior 5°C y 30°C respectivamente, utilizando el método de la curva seno. En la tabla 6.15 se muestran las fechas y los días requeridos para alcanzar la madurez fisiológica en función de las UCDS acumuladas (1711 UCDS) a partir del

15 de noviembre como fecha de siembra. En el anexo 2 se muestran las UCDS por etapa fenológica.

En la tabla 6.15 se observa que comparando el escenario observado 1961-1990, no existe diferencia en las estaciones Bataquez, Delta, CAE, Presa Morelos e Imperial; mientras que Yuma, Mexicali y Riíto presentan una diferencia de un día antes y de dos días también anteriores en las estaciones Colonia Juárez y San Luis Río Colorado. En general los días en que se alcanza en la región la madurez fisiológica se encuentra entre 148 a 176 días, el valor más bajo corresponde a la zona Delta y el más alto a la región Colonia Juárez.

La distribución espacial de este escenario base mensual del 15 de noviembre (fecha de siembra) al 15 de mayo (fecha de cosecha), se puede observar en los mapas correspondientes de las figuras 6.46, 6.47 y 6.48. Según dichos mapas en los 6 periodos mensuales analizados se identifica que la zona Delta es la que registra los mayores valores de UCDS (340-2240 UCDS), con un gradiente de mayor a menor en dirección suroeste a noreste hasta llegar a la región Bataquez (300-2170 UCDS). El extremo noreste que corresponde al área de Yuma también presenta altos valores semejantes a la zona Delta (320-2240 UCDS). Los menores valores corresponden a la zona Juárez (280-1890) con un gradiente de menor a mayor en dirección noroeste-sureste hasta llegar a la zona Riíto (280-1960 UCDS). El resto de la región podría considerarse como una zona de valores intermedios (300-2100 UCDS). Lo anterior revela que con respecto a la climatología base observada 1961-1990, las UCDS se encuentran consistentemente más relacionadas con la distribución espacial de las temperaturas mínimas en la época fría de los meses noviembre-abril (ver mapas mensuales en anexo 1).

6.5.2 Escenarios de cambio climático A2 y A1B en las etapas fenológicas del trigo

En este apartado se muestra la evaluación del impacto de los posibles cambios climáticos futuros sobre las etapas fenológicas del cultivo del trigo utilizando las salidas del modelo LARS WG con los escenarios de emisiones A1B y A2, para la climatología 2020 y 2050. Este análisis se realizó para las 10 estaciones elegidas para el presente estudio.

Tabla 6.15 Fecha y días transcurridos de la siembra a madurez fisiológica con respecto a las Unidades Calor Después de la Siembra Acumuladas. En paréntesis se muestran los días de acortamiento que corresponden a la diferencia de días entre el escenario base simulado y el escenario generado

Estación	FECHA / DÍAS (UNIDADES CALOR DESPUÉS DE LA SIEMBRA ACUMULADAS A MADUREZ FISIOLÓGICA)						
		Escenario línea base		Escenario bajo cambio climático			
	Fecha/ Días	Observada	Simulado	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Delta	Fecha	11-abr	11-abr	3-abr	28-Mar	2-abr	27-Mar
	días transcurridos	148	148	140 (8)	134 (14)	139 (9)	133 (15)
Yuma	Fecha	16-abr	15-abr	7-abr	2-abr	7-abr	1-abr
	días transcurridos	153	152	144 (8)	139 (13)	144 (8)	138 (14)
Bataquez	Fecha	18-abr	18-abr	9-abr	4-abr	9-abr	3-abr
	días transcurridos	155	155	146 (9)	141 (14)	146 (9)	140 (15)
San Luis Río Colorado	Fecha	23-abr	21-abr	13-abr	7-abr	12-abr	7-abr
	días transcurridos	160	158	150 (8)	144 (14)	149 (9)	144 (14)
Imperial	Fecha	25-abr	25-abr	17-abr	11-abr	16-abr	10-abr
	días transcurridos	162	162	154 (8)	148 (14)	153 (9)	147 (15)
Mexicali	Fecha	26-abr	25-abr	17-abr	11-abr	16-abr	10-abr
	días transcurridos	163	162	154 (8)	148 (14)	153 (9)	147 (15)
Presa Morelos	Fecha	26-abr	26-abr	18-abr	12-abr	17-abr	11-abr
	días transcurridos	163	163	155 (8)	149 (14)	154 (9)	148 (15)
CAE	Fecha	28-abr	28-abr	19-abr	13-abr	19-abr	12-abr
	días transcurridos	165	165	156 (9)	150 (15)	156 (9)	149 (16)
Riíto	Fecha	5-May	4-May	26-abr	20-abr	25-abr	19-abr
	días transcurridos	172	171	163 (8)	157 (14)	162 (9)	156 (15)
Colonia Juárez	Fecha	11-May	9-May	1-May	30-abr	25-abr	23-abr
	días transcurridos	178	176	168 (8)	167 (9)	162 (14)	160 (16)

Primeramente se interpolaron los escenarios de cambio climático de temperatura mínima y máxima en la gráfica que explica la dinámica de los umbrales térmicos durante las etapas fenológicas del trigo. Se presenta un ejemplo de la estación Bataquez en la figura 6.45, las demás estaciones mostraron un comportamiento similar. Este análisis aunque cualitativo, es un buen indicativo en el que se puede observar que las principales fases afectadas se encuentran en el invierno en los meses de diciembre y enero, particularmente en las etapas de plántula y amacollo, donde las temperaturas máximas se encuentran fuera de los rangos de la temperatura de confort.

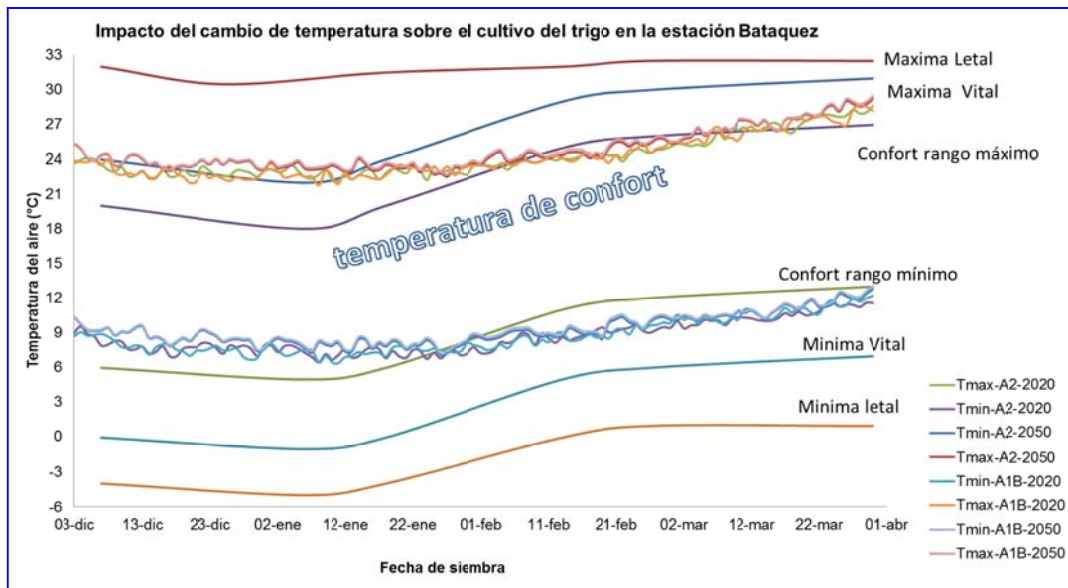


Figura 6.45 Comparación de la temperatura mínima y máxima bajo cambio climático y la dinámica de los umbrales térmicos durante las etapas fenológicas del trigo para la estación Bataquez.

En la tabla 6.15 mencionada anteriormente, se presenta una estimación cuantitativa de los posibles escenarios de cambio climático en función de las UCDS acumuladas, en términos de fechas y días requeridos para alcanzar la madurez fisiológica. Se observa que para la climatología 2020 para la región del valle de Mexicali, los días en que se alcanza la madurez fisiológica se presentan en valores entre 140 y 168 días y entre 139 y 162 días, para el escenario A2 y el escenario A1B, respectivamente. En relación a la climatología 2050, el intervalo es de 134-167 días para el escenario A2 y de 133-160 días para el escenario A1B. Con excepción de la estación Colonia Juárez, el acortamiento del ciclo para la climatología 2020 y ambos escenarios analizados es de 8-9

días, para la climatología 2050 de entre 13-15 días para el escenario A2, y entre 14-16 días para el escenario A1B. La estación Colonia Juárez es la que presenta los menores cambios entre 8 y 9 días de acortamiento para la climatología 2020 y 2050 respectivamente, y de 14 a 16 días para estas mismas climatologías correspondientes.

La distribución espacial de las UCDS de los escenarios base 1961-1990 y los escenarios de cambio climático A2 se presentan en las figuras 6.46, 6.47 y 6.48 (el escenario A1B se muestra en el anexo 3), permiten identificar zonas definidas con diferentes gradientes de UCDS.

El patrón de distribución, los contornos de UCDS, y las duraciones de las etapas fenológicas, mostradas en este estudio, proporcionan una adecuada información al agricultor que le permite localizar su zona de cultivo en el Valle de Mexicali, y relacionarlo con la afectación del aumento de la temperatura en términos de UCDS acumulables. Por ejemplo se identifica que las zonas de mayor rendimiento denominadas Benito Juárez y Guadalupe Victoria (6.2 y 6.5 Ton/Ha respectivamente), son también la zonas donde mayor afectación se estima respecto a los escenarios de cambio climático de UCDS acumulada.

6.5.3. Implicaciones de las UCDS en el impacto del cambio climático

De forma concreta en base a los escenarios de cambio climático de UCDS en función del aumento en la temperatura induce un posible acortamiento en el número de días para alcanzar las diferentes etapas fenológicas (asumiendo que la suma térmica es constante para cada una de las diferentes etapas fenológicas). Lo anterior trae importantes implicaciones:

1. La implicación fisiológica es la más importante, un acortamiento en el número de días que se requieren para llegar a madurez fisiológica, implica una potencial reducción en el rendimiento del trigo, sobre todo debido al acortamiento del periodo conocido como "llenado de grano", (etapa en la cual los fotosintatos son trasladados al grano, que da origen al rendimiento de este cultivo).
2. Los patrones de uso de agua deben modificarse para adaptarse a los nuevos requerimientos evapotranspirativos del cultivo (se asume una mayor demanda hídrica del cultivo).

3. Las fechas de siembra deben modificarse para exponer el cultivo a mayor cantidad de días con temperaturas frías (antes de amacollamiento, se requiere de días fríos para promover el ahijamiento y por tanto aumentar el rendimiento).

4. Se requieren nuevos genotipos tolerantes a las altas temperaturas esperadas.

De lo anterior se sugiere emplear especies híbridas resistentes al estrés térmico y que sean de ciclo corto.

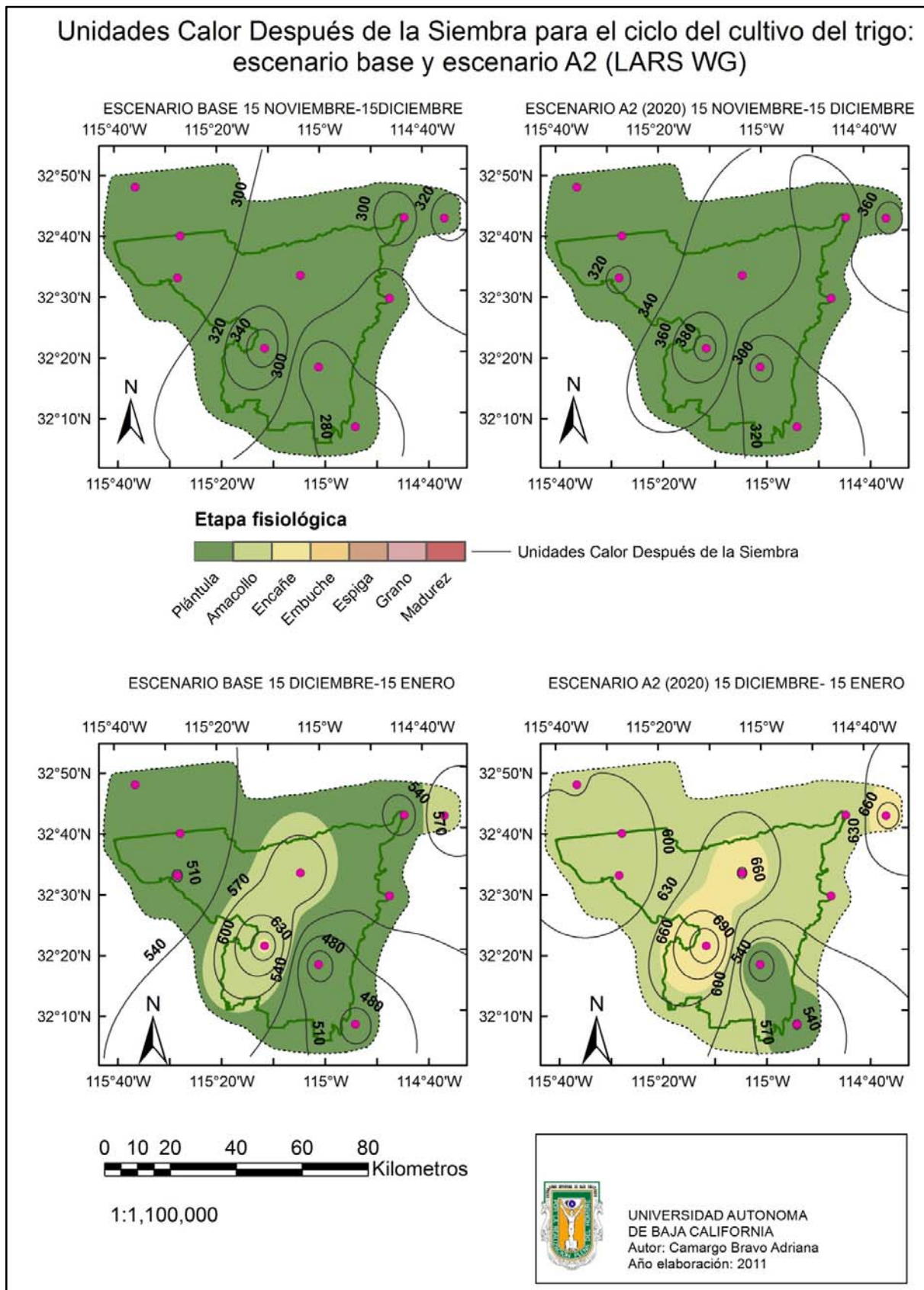


Figura 6.46 Unidades Calor Después de la Siembra de noviembre a enero, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A2, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C

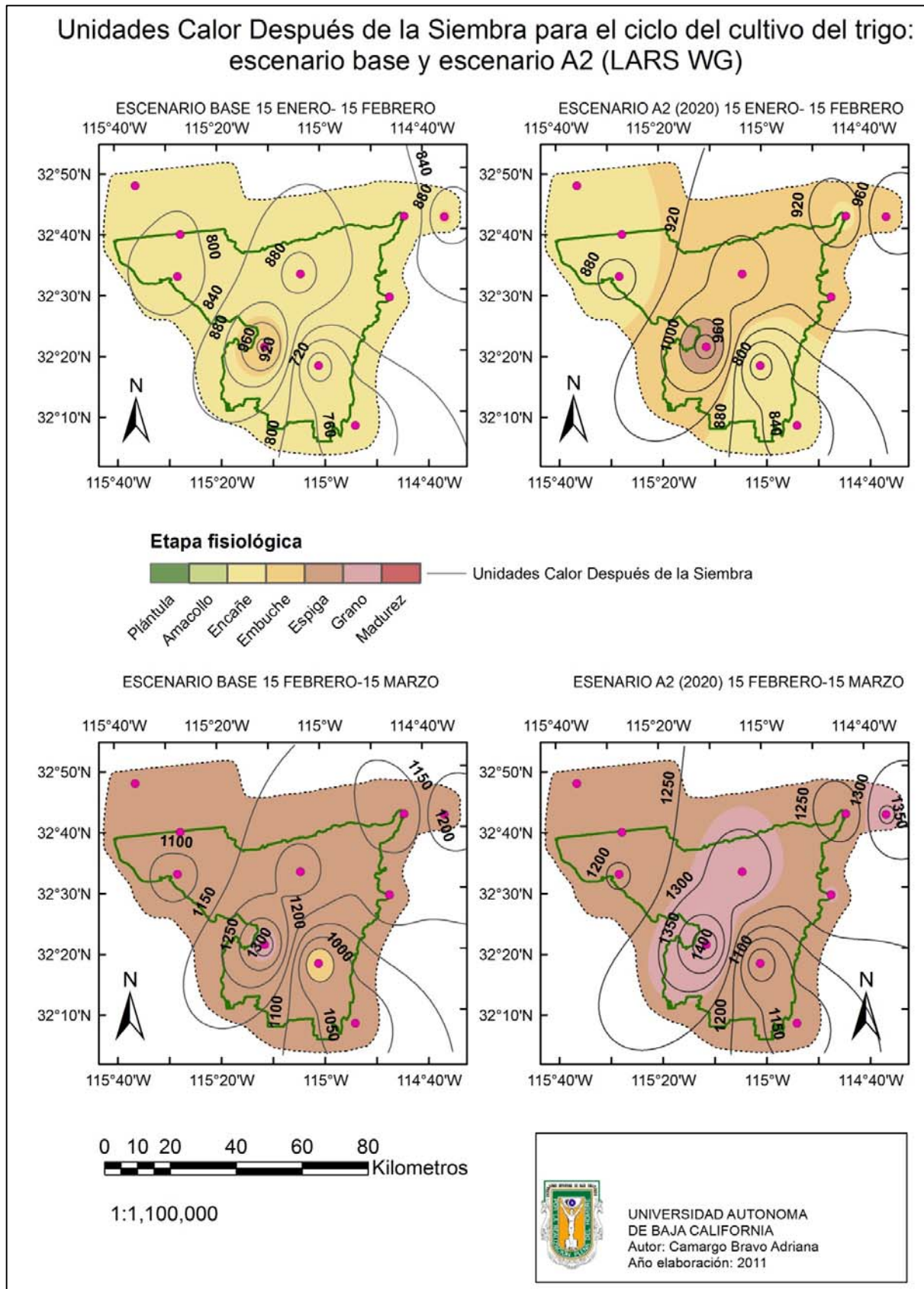


Figura 6.47 Unidades Calor Después de la Siembra de enero a marzo, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A2, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C

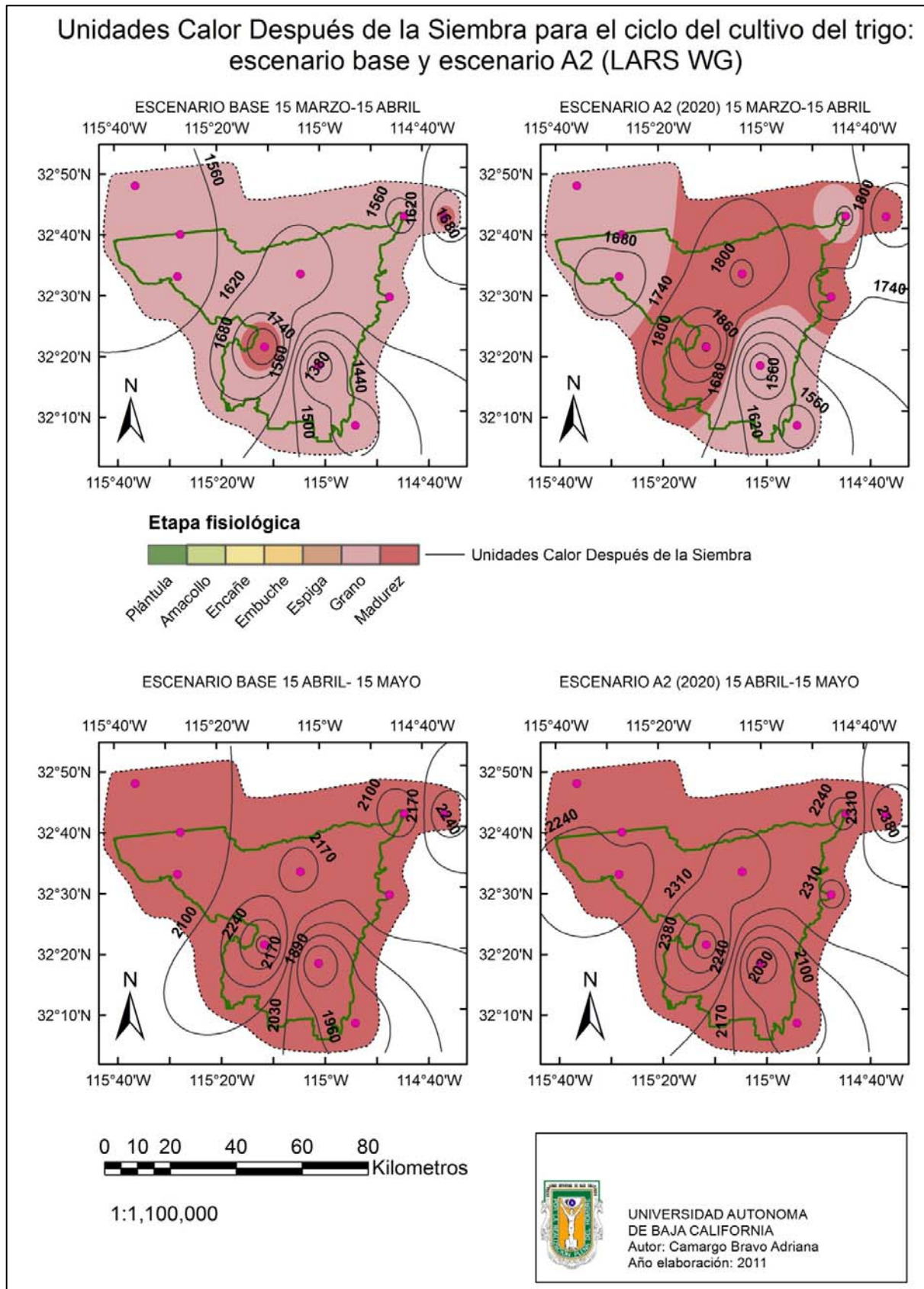


Figura 6.48 Unidades Calor Después de la Siembra de marzo a mayo, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A2, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para estimar los impactos del cambio climático en la región del Valle de Mexicali, es necesario reducir la escala temporal y espacial de la información que ofrecen los MCG. De acuerdo a los resultados obtenidos al aplicar dos técnicas estadísticas de reducción de escala en el presente estudio, se lograron generar escenarios de cambio climático de temperatura y precipitación con una mayor resolución espacial y temporal respecto a los escenarios regionales; con lo cual se consiguió evaluar el posible impacto del cambio climático en el cultivo del trigo, contribuyendo así a la planeación agrícola local de este cereal en el mediano plazo.

Los resultados más sobresalientes en cada una de las etapas de este trabajo se mencionan a continuación.

Respecto a la Información climática:

1. A pesar de que aspectos de la información climática existente para la región del Valle de Mexicali, como falta de calidad en los datos, insuficiente cobertura espacial y temporal de las estaciones climáticas y la falta de homogeneidad en los métodos de registro, limitaron realizar un análisis detallado de la información histórica, fue posible estudiar las tendencias del clima, así como la generación de escenarios de cambio climático y su aplicación en el sector agrícola.

Respecto a las tendencias de las series históricas de temperatura y precipitación

2. Las tendencias de temperatura, obtenidas mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal indica que existe un calentamiento consistente para toda la región del Valle de Mexicali, mientras que para precipitación se presenta una especie de dipolo, en el que la parte oeste muestra una tendencia totalmente positiva y la parte este una tendencia predominantemente negativa.
3. La construcción de gráficas de cajas permitió detectar para la temperatura un cambio de tendencia de negativa a positiva en la década de 1970-1979, más pronunciado en las temperaturas mínimas que en las temperatura máximas.

Respecto a la climatología base 1961-1990

4. La elaboración de mapas de la climatología base 1961-1990 mediante un SIG, aplicando el método de interpolación Inverso de las Distancias Ponderadas, particularmente cuando se cuenta con pocos datos, permitió obtener espacialmente información climática continua.
5. Los mapas de climatología base son una herramienta útil para el análisis espacial y temporal de las variables climáticas, en este caso, de temperatura y precipitación.

Respecto a los escenarios de cambio climático de temperatura y precipitación

6. El LARS WG y el SDSM son dos técnicas de reducción de escala estructuralmente diferentes y ambas resultaron computacionalmente económicas y relativamente fáciles de aplicar, siendo el SDSM más demandante en tiempo y conocimiento especializado.
7. El LARS WG reproduce de forma adecuada los valores medios mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. Se encontró una escasa habilidad del modelo para reproducir la oscilación térmica anual.
8. El SDSM mostró eficiencia para simular el comportamiento de la temperatura y su varianza; y por el contrario, una pobre simulación para la precipitación en ambas características.
9. Ambas técnicas de reducción de escala coinciden en un aumento promedio de temperatura para toda la región del Valle de Mexicali. El SDSM proyectó los mayores aumentos para la temperatura máxima y mínima en la climatología 2050, para el escenario A2 de aproximadamente 1.8 °C, mientras que para el escenario B2 de 1.7°C. El LARS WG estimó los máximos incrementos en la climatología 2050, tanto para temperatura mínima como temperatura máxima en el escenario A1B de 1.8 °C, y los menores incrementos de 1.6 °C para el escenario A2.
10. Para el escenario comparado A2 entre el SDSM y el LARS WG, se tiene a nivel promedio en la región para temperatura mínima una diferencia de 0.1°C y de 0.2 °C para la temperatura máxima en ambas climatologías (2020 y 2050). Las máximas diferencias a nivel del sitio de

estudio para este escenario comparado fueron de hasta 0.5°C para la temperatura mínima en ambas climatologías.

11. Para precipitación, el LARS WG estima disminuciones, las menores son del -4.2% para la climatología 2020 bajo el escenario A1B y las mayores son de -18.4% que se presentan bajo el escenario A2 en la climatología 2050. Por otro lado el SDSM proyecta aumentos, los menores aumentos, de 22.5% se presentan en el escenario B2 para el horizonte 2020, mientras que los máximos incrementos, de 48.9%, se estiman en la climatología 2050 bajo el escenario A2. De acuerdo a estos resultados contradictorios entre ambos modelos será necesaria para esta variable la evaluación de otras estrategias de reducción de escala.

Respecto a los escenarios de cambio climático de UCDS

12. Los escenarios de cambio climático de Unidades Calor Después de la Siembra estiman que los posibles impactos en el cultivo del trigo se darán en las etapas fenológicas de plántula y amacollo, particularmente condicionantes en el rendimiento de este grano.

13. Los mapas generados de UCDS resultan ser información práctica para que el agricultor identifique su área de cultivo y la mejor estrategia a seguir en cuanto a fecha de siembra y variedad del cultivo de trigo a seleccionar (ciclo corto o largo)

14. El presente estudio realiza una importante aportación para que los tomadores de decisiones y especialistas en políticas públicas establezcan la mejor estrategia a seguir en el sector agrícola en el corto plazo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio y en consonancia con otras investigaciones, se observó que el Valle de Mexicali es una zona altamente vulnerable, pues las tendencias y los escenarios de cambio climático proyectados indican potenciales problemas asociados a un déficit del recurso hídrico. Por tal razón, se recomienda introducir mejoras en cada una de las etapas en la aplicación de las técnicas estadísticas de reducción de escala:

1. Implementar una red climatológica de monitoreo con una cobertura espacial representativa para la región del Valle de Mexicali y áreas colindantes, que opere con métodos

estandarizados y validados en el mantenimiento del equipo, los métodos de registro y el acceso a la información.

2. Realizar estudios estadísticos adicionales que asocien las tendencias históricas encontradas con los moduladores del clima local, principalmente el ENSO y la ODP, con el fin de comprender la variabilidad climática de la región.
3. Incorporar a especialistas en la aplicación de técnicas dinámicas para la generación de escenarios de cambio climático a nivel local.
4. Aplicar un modelo agroclimático que considere otras variables importantes en el cultivo del trigo, por ejemplo el modelo CERES-WHEAT.
5. Evaluar en base a los escenarios de cambio climático generados, los posibles impactos futuros en otros sectores, como la salud, el recurso hídrico y la industria, entre otros.

8. REFERENCIAS

1. Alexander, L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, y J. L. Vázquez-Aguirre. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*. 111:d05109. Doi:10.1029/2005jd006290.
2. Alvarado, N. F., L. E. Sánchez, B. M. Loreto y Z. L. Beltrán. Evaluación del comportamiento del financiamiento no bancario aplicado a la producción de trigo en Mexicali, B. C. *Revista Mexicana de Agronegocios*. XI (20):282-297.
3. Amador, A. J. y J. E. Alfaro. 2009. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. 11: 39-52. [<http://ddd.uab.cat/pub/revibec/13902776v11p39.pdf>].
4. Arnold, C. Y. 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proceeding of the American Society of Horticultural Science*. 74:430-445.
5. Arriaga-Ramirez, S. y T. Cavazos. 2010. Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and southwest United States. *Journal of Geophysical Research*. 115:D14111. Doi:10.1029/2009JD013248.
6. Badr, O., S. D. Probert, P. W. O'Callaghan. 1991. Atmospheric methane: Its contribution to global warming. *Applied Energy*. 40(4):273-313.
7. Baker, J.T. y V.R. Reddy. 2001. Temperature effects on phenological development and yield of muskmelon. *Annals of Botany*. 87:605-613.
8. Baker, J.T., D.I. Leskovar, V.R. Reddy, y F.J. Dainello. 2001. A simple phenological model of muskmelon development. *Annals of Botany*. 87:615-621.
9. Bardossy, A. 1997. Downscaling from GCMs to local climate through stochastic linkages. *Journal Environmental Management*. 49:7-17.

10. Barrow, E., M. Hulme y M. A. Semenov. 1996. Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: examples from Europe. *Climate Research*. 7:195-211.
11. Baskerville, G.L. y P. Emin. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology*. 50:514-517.
12. Baskerville, G.L. y P. Emin. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology*. 50:514-517.
13. Bernal N., L.A. Molina, C.J. Martínez y J.D. Pabon. 2000. El método de reducción de escala estadístico aplicado a estudios de cambio climático. *Meteorología Colombiana*. 2:87-93.
14. Boswell, V. R. 1929. Factors influencing yield and quality of peas. Maryland Agric. Exp. Sta. Bull. 306. Págs. 341-382.
15. Bradley, R. S., H. F. Diaz, J. K. Eischeid, P. D. Jones, P. M. Kelly y C. M. Goodess. 1987. Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th century. *Science*. 237: 171-175.
16. Brown, P. W. 1989. Heat units. Ariz. Coop. Ext. Bull. 8915. Univ. of Arizona, Tucson, AZ.
17. Brown, P. W. 1989. Heat units. Ariz. Coop. Ext. Bull. 8915. Univ. of Arizona, Tucson, AZ.
18. Bruinsma J. 2003. World Agriculture: Towards 2015/30. An FAO Perspective. London. Earthscan.
19. Brunetti, M., B. Letizia, M. Maurizio y N. Teresa. 2000. Precipitation intensity trends in Northern Italy. *International Journal of Climatology*. 20:1017-1031.
20. Burrough, P. A. y R. A. McDondell. 1998. Principles of Geographic Information Systems. 2da edición. Oxford University Press. New York. 333 págs.
21. CANIMOLT. 2010. Reporte estadístico al 2010. 98 págs. [<http://www.canimolt.org/revista-canimolt>].
22. Casas, C.C. y J.M. Alarcón. 1999. *Meteorología y clima*. Ediciones UPC. Barcelona. 157 págs. [<http://www.scribd.com/doc/72588905/LIBRO-Meteorologia-y-Clima>].

23. Cavazos, T. 1997. Downscaling large-scale circulation to local winter rainfall in north-eastern México. *International Journal of Climatology*.17:1069-1082.
24. Cavazos, T. y S. Arriaga-Ramírez. 2012. Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the 21st century. *Journal of Climate*. doi:10.1175/JCLI-D-11-00425.1. In press.
25. Cavazos, T., y B. C. Hewitson. 2005: Performance of NCEP–NCAR reanalysis variables in statistical downscaling of daily precipitation. *Climate Research*. 28:95-107.
26. CCIS (2010). Canadian Climate Impacts Scenarios. [<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>].
27. Christensen, J. H., B. Hewitson , A. Busuioc , A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. K. Kolli, W. T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña-Rueda, L. Means, C. G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, y P. Whetton. 2007. *Regional Climate Projections*. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York.
28. Christensen, J.H., J. Raisanen, T. Iversen, D. Bjorge, O.B. Christensen, y M.A. Rummukainen. 2001. Synthesis of regional climate change simulations-A Scandinavian perspective. *Geophysical Research Letter*. 28:1003-1006.
29. Cline, R. W. 1992. *The economics of global warming*. Instituto for International Economics. Washington. 381 págs.
30. Conde C., F. Estrada, B. Martínez, O. Sánchez y C. Gay. 2011. Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24(1): 125-140.
31. Conde C., O. Sánchez y C. Gay. 1994. *Escenarios Básicos y Regionales. Memorias del Primer Taller de “Estudio de País: México”*. México Ante el Cambio Climático. Págs. 9-43.

32. Conde, C. y H. Eakin. 2003. *Adaptation to climatic variability and change in Tlaxcala, Mexico*. En: J. Smith, R. Klein y S. Huq (eds.). *Climate change, adaptive capacity and development*. Imperial College Press, Londres.
33. Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villareal y C. Gay. 1997. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research*. 9(1): 17-23.
34. Confalone, A. E. y D. M. Navarro. 1999. Comparación de dos modelos de tiempo térmico para maíz. *Revista Brasileña de Agrometeorología*. 7(2):207-211.
35. Diaz, H.F. R. S. Bradley y J. K. Eischeid. 1989. Precipitation fluctuations over global land areas since the late 1800. *Geophysical Research*. 94: 1195-1210.
36. Dore M.H.I. 2005. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*. 31:1167-1181.
37. Englehart P. J. y A. V. Douglas. 2004. Characterizing regional-scale monthly and seasonal temperature variations over Mexico. *International Journal of Climatology*. 24: 1897-1909. DOI:10.1001/JOC.1117.
38. Englehart P. J. y A. V. Douglas. 2005. Changing behavior in the diurnal range of surface air temperatures over Mexico. *Geophysical Research Letters*. 32:L01701. DOI:10.1029/2004GL021139.
39. Englehart, P.J. y A.V. Douglas. 2003. Urbanization and seasonal temperature trends: observational evidence from a data sparse part of North America. *International Journal of Climatology*. 23(10):1253-1263.
40. EPA (2009) US Environmental Protection Agency. [<http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases.html>].
41. Estrada F., V. Guerrero y C. Gay. 2010. Una nueva metodología para realizar downscaling estadístico y para la estimación de impactos potenciales de cambio climático en el consumo de

- energía en las ciudades. *VII Congreso de la Asociación Española de Climatología*. Clima, Ciudad y Ecosistemas. Págs. 73-82. España, Madrid 27 a 29 Noviembre 2010.
42. FAO. 2002. *Capítulo 26: Cereales, raíces feculentas y otros alimentos con alto contenido de carbohidratos*. En: *Nutrición humana en el mundo en desarrollo*. Págs. 265-280. [<http://www.fao.org/DOCREP/006/W0073S/w0073s0u.htm>].
43. FAO. 2012. Perspectivas de cosechas y situación alimentaria. En: Sistema mundial de información y alerta sobre la alimentación y la agricultura. Marzo núm. 1. 40 págs. [<http://www.fao.org/gIEWS/>].
44. Fields, G.P., C.L. Houdashelt y P. Carlson. 1993. *State Implementation Plan for PM-10 in the Imperial Valley. Final report prepared for Imperial County Air Pollution Control District*. E.H. Pechan and Associates, Inc. Pechan. Report No. 93.04.006/449.
45. Fowler, H. J., S. Blenkinsop y C. Tebaldi. 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling. *International Journal of Climatology*. 27:1547-1578.
46. García, E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. 2da edición. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. págs. 7-56.
47. García-Cueto, O.R. y A. Valdés. 1988. *Estudio Preliminar de la Climatología Dinámica del Valle de Mexicali, B.C.* Memorias del III Congreso Interamericano de Meteorología. México, D.F. Págs. 301-305.
48. García-Cueto, O.R., A. Tejeda y G. Bojórquez. 2009. Urbanization effects upon the air temperature in Mexicali, B.C., México. *Atmósfera*. 22(4): 349-365.
49. Gay C, F. Estrada, C. Conde, H. Eakin y L. Villers. 2006. Potential impacts of climate change on agriculture: a case study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climate Change*. 79 259-288.

50. Gay C. (Compilador). 2000. México: *Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Resultados de los estudios de vulnerabilidad del país coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program. SEMARNAP, UNAM, USCSP. 220 págs.
51. Gillen, D. 2008. Eco-Historicism. *The Journal For Early Modern Cultural Studies*. 8(2):1-7.
52. Giorgi F., B. Hewitson, J. Christensen, M. Hulme, H. Von Storch, P. Whetton, R. Jones, L. Mearns y C. Fu. 2001. *Regional climate information -Evaluation and projections*. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
53. Hansen J. E. 2007. Scientific reticence and sea level rise. *Environmental Research Letters*. 2:1-6.
54. Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, y K. Lo. 2010. Global surface temperature change. *Geophysical Research*. 48:RG4004. Doi: 10.1029/2010RG000345.
55. Hardy, J. 2003. *Climate Change: Causes, Effects and Solutions*. John Wiley and Sons. USA. 247 págs.
56. Haylock, M. y Nicholls N. 2000. Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910-1998'. *International Journal of Climatology*. 20: 1533-1541.
57. Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, P. Braconnot, N. P. Gillett, Y. Luo, J. A. Marengo Orsini, N. Nicholls, J. E. Penner y P. A. Stott. 2007. *Understanding and attributing climate change*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
58. Hubert, B. M., M. Bonneville, T. Joliveau, M. P. Olivier y F. Paran. 2012. *Chapter 10. Coupling Geographic Information System (GIS) and Multi-Criteria Analysis (MCA) for*

- Modelling the Ecological Continuum in Participative Territorial Planning. In: New Technologies for constructing Complex Agricultural and Environmental Systems.* Premier Reference Source. Págs. 167-189. DOI:10.4018/978-1-4666-0333-2.ch010. [<http://www.igi-global.com/viewtitlesample.aspx?id=63761>].
59. Hulme M., T. M. L. Wigley, E. M. Barrow, S. C. B. Raper, A. Centella, S. J. Smith y A. C. Chipanshi. 2000. *Using a climate scenario generator for vulnerability and adaptation assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook.* Climatic Research Unit. Norwich, United Kingdom. 52 págs.
60. Hulme, M., Osborn T.J. y Johns T.C. 1998. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HADCM2 simulations. *Geophysical Research Letters.* 25: 3379-3382.
61. Hurrell, J.W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation. *Science.* 296: 676-679.
62. IMTA. 2006. *Extractor Rápido de Información Climatológica III, v. 1.0. Información climatológica disponible en formato electrónico.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
63. INE. 2004. *Cambio climático: una visión desde México.* Instituto Nacional de Ecología. Martínez J., B.A. Fernández y P. Osnaya (compiladores). México, D. F. 525 págs.
64. INE. 2009. *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México.* Editorial Buenfil. México D. F. Vol. II. págs. 571-588.
65. INE-SEMARNAT 2008. *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático.* Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 133 págs.
66. INE-SEMARNAT. 2006. *México, Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Programa de las Naciones Unidas para el

- desarrollo México, Environmental Protection Agency, Global Environment Facility México. 210 págs. [<http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc3.pdf>].
67. INE-SEMARNAT. 2009. México, Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo México, Environmental Protection Agency, Global Environment Facility México. 274 págs. [<http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc4.pdf>].
68. INIFAP. 2009. *Horas frío en relación al rendimiento de trigo. Áreas de producción del estado de Sonora*. Centro de Investigación Regional del Noroeste Campo Experimental Valle del Yaqui. Folleto Técnico No. 63. 40 págs.
69. INIFAP. 2010. *Guía técnica para el área de influencia del Campo Experimental Valle de Mexicali*. Centro de Investigación Regional del Noreste Campo Experimental Valle de Mexicali. 149 Págs.
70. IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 881 págs.
71. IPCC. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 104 págs.
72. Jansen E., J. Overpeck, K. R. Briffa, J. C. Duplessy, F. Joos, V. Masson-Delmotte, D. Olago, B. Otto-Bliesner, W. R. Peltier, S. Rahmstorf, R. Ramesh, D. Raynaud, D. Rind, O. Solomina, R. Villalba y D. Zhang. 2007. *Chapter 6. Palaeoclimate. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of*

- the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
73. Jáuregui, O. E. 2003. Algunos conceptos modernos sobre la circulación de la atmósfera. *Investigaciones Geográficas*. 59:121-143.
74. Jones, P. D. 1994. Hemispheric surface air temperatures variations: a reanalysis and an update to 1993. *Journal of Climate* 7:1794-1802.
75. Jones, P.D. y Hulme M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal Climatology*. 16: 361-377.
76. Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne y D. Joseph. 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 77(3): 437-470.
77. Karoly, D. J., y Q. Wu. 2005. Detection of regional surface temperature trends. *Journal of Climate*. 8:4337-4343.
78. Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., y Fiorino, M. 1999. The NCEP/NCAR 50-year Reanalysis. [ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51we/reanal/bams_paper.2001/reanal2.htm].
79. Kruger, A.C. 2006. Observed trends in daily precipitation indices in South Africa: 1910-2004. *International Journal of Climatology*. 26 (15): 2275-2285.
80. Large, E.G. 1954. Growth stages in cereals: Illustration of the Feekes scale. *Plant Pathology*. 3(4): 128-129.
81. Large, E.G. 1954. Growth stages in cereals: Illustration of the Feekes scale. *Plant Pathology*. 3 (4): 128-129.

82. León A. 2008. *Hacia la evaluación de prácticas de adaptación ante la variabilidad y el cambio climático: Desarrollo económico y vulnerabilidad asociados a la variabilidad y cambio climático en América Latina*. Editores Aldunce P., C. Neri y C. Szlafstein. Brasil. Págs. 21-29.
83. Liverman D. M. y K. L. O'Brien. 1991. Global Warming and climate change in Mexico. *Global Environmental Change*. 1(5):351-364.
84. Liverman, D., M. Dilley, K. O'Brien y L. Menchaca. 1994. Possible impacts of climate change on maize yields in Mexico. In: *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study* [Rosenzweig, C. and A. Iglesias (eds.)]. U.S. Environmental Protection Agency, Mexico chapter. Washington, D.C. págs. 1-14.
85. Lobell, B. D., W. Schlenker y J. C. Roberts. 2011. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*. 333(6042):616-620. DOI: 10.1126/science.1204531.
86. López, T. G. y V. E. Marín. 2010. *Proyecto Valle Verde, una aplicación de triple hélice para el impulso de la generación y uso de las energías renovables: solar y eólica en Baja California*. En: *Redes de colaboración academia y sector industrial: casos exitosos*. 18 págs.
87. Magaña V, C. Conde, O. Sánchez y C. Gay. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios for México. *Climate Research*. 9:107-114.
88. Magaña, O.V. 2010. *Guía para Generar y Aplicar Escenarios Probabilísticos Regionales de Cambio Climático en la Toma de Decisiones. Informe final de proyecto*. Instituto Nacional de Ecología/ Embajada Británica/CEDAN. México D. F. 80 págs.
89. Magaña, V. 1999. Los impactos de El Niño en México. UNAM/Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación. México. 229 págs.
90. Magaña, V. O. 2008. *Adaptación a la variabilidad y cambio climático: Desarrollo económico y vulnerabilidad asociados a la variabilidad y cambio climático en América Latina*. Editores Aldunce P., C. Neri y C. Szlafstein. Brasil. pp 43-50.
91. Magaña, V. y C. Conde. 2000. Climate and freshwater resources in northern Mexico, Sonora: a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*. 61:167-185.

92. Magaña, V., D. Zermeño y C. Neri. 2012. Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*. 51: 171-184.
93. Magaña, V., J. Matías, R. Morales y C. Millán. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático: una visión desde México. (Martínez, J. y A. Fernández, compiladores. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Págs. 203-223.
94. Manahan, S. E. 2007. *Environmental Chemistry*. 7th ed. Columbia. U.S.A. págs. 444-459.
95. McGuffie, K. y A. Henderson-Sellers. 2005. *A Climate Modelling Primer*. 3a edición. John Wiley y Sons. USA. 280 págs.
96. McMaster, G.S., y W.W. Wilhelm. 1998. Is soil temperature better than air temperature for predicting winter wheat phenology? *Agronomy Journal*. 90:602-607.
97. Mearns, L.O., I. Bogardi, F. Giorgi, I. Matyasovskiy y M. Paleski. 1999. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling. *Journal of Geophysical Research*. 104:6603–6621.
98. Mendoza, M., E. Villanueva, y J. Adem. 1997. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climatic Research*. 9:139-145.
99. Murphy, J. 1999. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *Journal of Climatology*. 12:2256-2284.
100. Nakicenovic N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor y Z. Dadi. 2000. *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 599 págs.
101. National Academy of Sciences. 2008. *Understanding and Responding to Climate Change*. National Academies Press, Washington, DC. 24 págs.

- 102.Ninyerola, M., X. Pons y J.M. Roure. 2000. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*. 20:1823-1841.
- 103.NOAA (2010) U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration. [<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>].
- 104.Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra y H. Unland-Weiss. 2006. Integral programming for corn irrigation in northern Sinaloa, Mexico. *Agrociencia*. 40: 13-25.
- 105.Oliver, J. 2005. Climate Classification. In: Oliver, J. (ed) *Encyclopedia of World Climatology*. Springer. The Netherlands.
- 106.OMS (2003). *Cambio Climático y Salud humana: riesgos y respuestas: Resumen*. Organización Mundial de la Salud. 40 págs. [<http://www.who.int/globalchange/publications/en/Spanishsummary.pdf>].
- 107.Pavia E. G., F. Graef y J. Reyes. 2009. Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*. 29(9):1324-1329. Doi:10.1002/joc.1787.
- 108.Peixoto, J.P. y A. H. Oort. 1992. *Physics of Climate*. New York, America Institute of Physics. 520 pags.
- 109.Perry, K.B., D.C. Sanders, D.M. Granberry, J. T. Garret, D.R. Decoteau, R.T. Nagata, R. J. Deufault, K.D. Batal, y W.J. McLaurin. 1993. Heat units, solar radiation and day length as pepper harvest predictors. *Agricultural and Forest Meteorology*. 65:197-205.
- 110.Perry, K.B., Y.Wu, D.C. Sanders, J.T. Garret, D.R. Decoteau, R.T. Nagata, R.J. Dufault, K.D. Batal, D.M. Granberry, y W.J. McLaurin. 1997. Heat units to predict tomato harvest in the southeast USA. *Agricultural and Forest Meteorology*. 84:249-254.
- 111.Peterson, T. C., X. B. Zhang, M. Brunet-India, y J. L. Vazquez-Aguirre. 2008. Changes in North American extremes derived from daily weather data. *Journal of Geophysical Research*. 113:D07113.

112. Racsko P, L. Szeidl y M. A. Semenov. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*. 57: 27-41.
113. Ramírez, H. J., C. J. Román, L. J. A. Reyes y M. O. Lázaro. 2006. *Capítulo I: El escenario del agua en el Valle de Mexicali*. En: *Una visión de la problemática ambiental de Mexicali y su valle* [Ramírez, H. J. (Coordinador)]. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California. Págs. 19-70.
114. Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi y K.E. Taylor. 2007. *Chapter 8. Climate Models and Their Evaluation*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
115. Rapallo, R. F. 2005. *Utilización de Sistema de Información Geográfica para la Seguridad Alimentaria sostenible en zonas marginadas de Honduras, Nicaragua y Guatemala*. FAO. [<ftp://ftp.fao.org/TC/TCA/ESP/pdf/rapallo/Bloque%20I.III.pdf>].
116. Richardson C.W. 1981. Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation. *Water Resources Research*. 17:182-190.
117. Richardson, C.W. y Wright, D.A. 1984. *WGEN: A model for generating daily weather variables*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, USDA, Washington, DC. 83 págs.
118. Roberts, E.H., y R. J. Summerfield. 1987. Measurement and prediction of flowering in annual crops. In: *Manipulation of flowering*. J.C. Atherton (ed). Butterworths, London. Págs. 17-50.

119. Rosenzweig, C., K.M. Strzepek, D.C. Major, A. Iglesias, D.N. Yates, A. McCluskey, y D. Hillel. 2004. Water resources for agriculture in a changing climate: International case studies. *Global Environmental Change*. 14:345-360.
120. Ruddiman, F.W. 2008. *Earth's Climate*. 2da edición. W.H. Freeman and Company. NY, USA. 388 págs.
121. Ruíz, C. A., L. E. Flores, D. L. Ramírez y E. D. González. 2002. Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*. 36(5):569-577.
122. SAGARPA. 2011. Delegación en Baja California, Subdelegación Agropecuaria. Jefatura de Fomento Agropecuario. [<http://www.oeidrus-bc.gob.mx/sispro/trigobc/Produccion/Primaria/SerieHistorica.pdf>] (última revisión: Agosto de 2011).
123. Salon S, G. Cossarini, S. Libralato, X. Gao, S. Solidoro y F. Giorgi. 2008. Downscaling experiment for the Venice lagoon. Validation of the present-day precipitation climatology. *Climate Research*. 38:31-41.
124. Sánchez, L.E. 2005. *Políticas en materia agrícola en Mexicali y San Luis Río Colorado*. En: *Desarrollo y medio ambiente de la región fronteriza México-Estados Unidos. Valles de Imperial y Mexicali*. [Quintero, N. M., L.E. Sánchez, K. Collins, P. Ganster y C. Mason (coordinadores)]. Universidad Autónoma de Baja California y Miguel Ángel Porrúa. Págs. 83-106.
125. Santer, B., Wigley, T., Schlesinger, M. y J. Mitchell. 1990. *Developing Climate Scenarios from Equilibrium MACGA Results*. In: Max-Planck-Institut für Meteorologie Report No. 47, Hamburg, Germany.
126. Sarría, F. A. 2004. *SIG aplicados al análisis y cartografía de riesgos climáticos. Métodos y Técnicas de Análisis de Riesgos Climáticos*. II Curso de Verano de la Asociación Española de Climatología. 70 págs.

- 127.Saz, S. M., N. R. Serrano, L. M. Arrillaga y L. A. Aladrén. Comparación de métodos de interpolación y de regresión para la cartografía de temperaturas máximas y mínimas absoltas: el caso de Navarra (norte de España) en 2009. *VII Congreso de la Asociación Española de Climatología*. Clima, Ciudad y Ecosistemas. Págs. 473-482. España, Madrid 27 a 29 Noviembre 2010.
- 128.Schoijet, M. 2008. *Limites del crecimiento y cambio climático*. Editorial siglo XXI. México. 352 págs.
- 129.Semenov M. A. y P. Stratonovitch. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*. 41:1-14.
- 130.Semenov, M. A. 2007. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agricultural and Forest Meteorology*. 144:127–138.
- 131.Semenov, M. A. y E. M. Barrow 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*. 35:397-414.
- 132.Semenov, M. A. y E. M. Barrow. 2002. *LARS-WG a Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. Version 3.0 User Manual*. 28 págs. [<http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/download/LARS-WG-Manual.pdf>].
- 133.Semenov, M. A. y R. J. Brooks. 1999. Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research*. 11:137-148.
- 134.Semenov, M. A., R. J. Brooks, E. M. Barrow y C. W. Richardson. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research*. 10: 95-107.
- 135.Seoáñez C. M. 2001. *Tratado de climatología aplicado a la ingeniería medioambiental*. Mundi-Prensa. Madrid, España. Págs. 467-485.
- 136.SIAP. 2010. Estadística Agrícola básica. Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera. [<http://www.siap.gob.mx/index.php/agricultura/produccion-anual/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado.html>] (última revisión: Agosto de 2010).

137. Solís, M. E., M. M. Hernández, A. Borodanenko, A. J. L. y C. O. A. Grajeda. 2004. Duración de la etapa reproductiva y el rendimiento de trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 27(4):323-332.
138. Solomon S., D. Qin, M. Manning, R. Alley, T. Berntsen, N. L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J. Gregory, G. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T. F. Stocker, Ronald J. Stouffer, P. Whetton, R. A. Wood y D. Wratt. 2007. *Technical Summary*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, Eds.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 págs.
139. Soto, O. R., A. L. Sandoval, G. L. Escoboza, L. F. López y M. M. Avilés Marín. 2011. *Modelo De Desarrollo Fenológico Para Variedades De Trigo Del Noroeste De México*. Presentación oral en el XIV Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas. Mexicali Baja California, 27 y 28 de Octubre 2011.
140. Soto, O.R. y Silvertooth, J. 2008a. Crop Phenology for irrigated spring cantaloupes (*Cucumis melo* L.). Vegetable Report P-152. College of Agriculture. University of Arizona. Págs. 113-122.
141. Soto, O.R. y Silvertooth, J. 2008b. A Crop Phenology model for irrigated New Mexico Chile (*Capsicum annuum* L.). Vegetable Report P-152. College of Agriculture. University of Arizona. Págs. 104-112.
142. Stern, N. 2007. *The Economics of Climate Change*. *The Stern Review*. Cambridge University Press. Cambridge United Kingdom. 692 págs.
143. Sutton, R. T., B. Dong, y J. M. Gregory. 2007. Land/sea warming ratio in response to climate change: IPCC AR4 model results and comparison with observations. *Geophysical Research Letters*. 34:L02701. Doi:10.1029/2006GL028164.

144. Terán, C. 2010. *Escenarios de lluvia en México*. Tesis de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. 205 págs.
145. Tol, R. 1998. *Socio-economic scenarios*. In: *Handbook on methods of climate change impacts assessment and adaptation strategies* (J. Feenstra, I. Burton, J. B. Smith y R. S. J. Tol, Eds.). United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, and Institute for Environmental Studies, Amsterdam. The Netherlands. 448 págs.
146. Travis, D. Miller. 1992. *Estadíos de Crecimiento del Cultivo de Trigo*. La identificación y su entendimiento para un mejor manejo de los cultivos (traducido de Better Crops with Plant Food. Potash and Phosphate Institute (PPI), Norcross, GA, USA). Department of Soil and Crop Sciences, Texas A&M University. College Station, Texas, USA. 4 págs.
147. Trenberth K. E. y P. D. Jones. 2007. *Observations: surface and atmospheric climate change*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, K. B. M. Marquis, M. T. Averyt, and H. L. Miller, Eds.). Cambridge University Press, New York, USA.
148. UNEP. 2002. *Global Environment Outlook. Past, present and future perspectives*. United Nations Environment Programme. CPI. UK. [<http://www.unep.org/geo/GEO3/english/pdf.htm>].
149. Vidal Z. R. 2005. *Las regiones climáticas de México*. En: Colección Temas Selectos de Geografía de México I.2.2. Instituto de Geografía, UNAM. México D. F. 213 págs.
150. Wang, H. L., Y. T. Gang, R. Y. Wang, R. Y. Wang, J. Y. Niu, H. Zhao, Q. G. Yang y G. C. Li. 2008. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148(8/9):1242-1251.
151. Wigley T. 2003. *MAGICC/SCENGEN 4.1: User Manual*. Boulder, CO, USA. 14 págs.
152. Wigley T. M. L. 2004. *Input Needs for Downscaling of climate*. Scientific report for California. Energy Commission. USA. 32 págs.

153. Wilby R. L., S. P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton y L. O. Mearns. 2004. *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*. Published on-line, supporting material to the IPCC. 27págs. [<http://www.narccap.ucar.edu/doc/tgica-guidance-2004.pdf>].
154. Wilby, R. L. y T. M. L. Wigley. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*. 21(4): 530-548.
155. Wilby, R. L., T. M. L. Wigley, D. Conway, P. D. Jones, B. C. Hewiston, J. Main y D. S. Wilks. 1998. Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. *Water Resources Research*. 34:2995–3008.
156. Wilby, R.L. y C.W. Dawson. 2007. SDSM 4.2—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. 94 págs. [<https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/index.html>].
157. WMO. 1993. Practical use of agro meteorological data and information for planning and operational activities in agriculture. World Meteorology Organization. Geneva. Publication N° 60. 113 págs. [<http://www.wamis.org/agm/pubs/CAGMRep/CAGM60.pdf>].
158. WMO. 2003. World Meteorological Organization Press Release No. 695. July 2. Geneva, CH. [<http://www.ratical.org/ratville/linkscopy/Press695.html>].
159. Xu, Z. X., K. Takeuchi, H. Ishidaira y J. Y. Li. 2005. Long-term trend analysis for precipitation in Asian Pacific Friend river basins. *Hydrological Processes*. 18:3517-3532.
160. Zermeño, D. 2008. *Análisis probabilístico de escenarios escalados de precipitación y temperatura bajo cambio climático en México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
161. Zhang X., F.W. Zwiers, G. C. Hegerl, F. H. Lambert, N. P. Gillett, S. Solomon, P.A. Stott y T. Nozawa. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature Letters*. 448:461-465. DOI:10.1038/nature06025.

ANEXO I. CLIMATOLOGÍA BASE MENSUAL

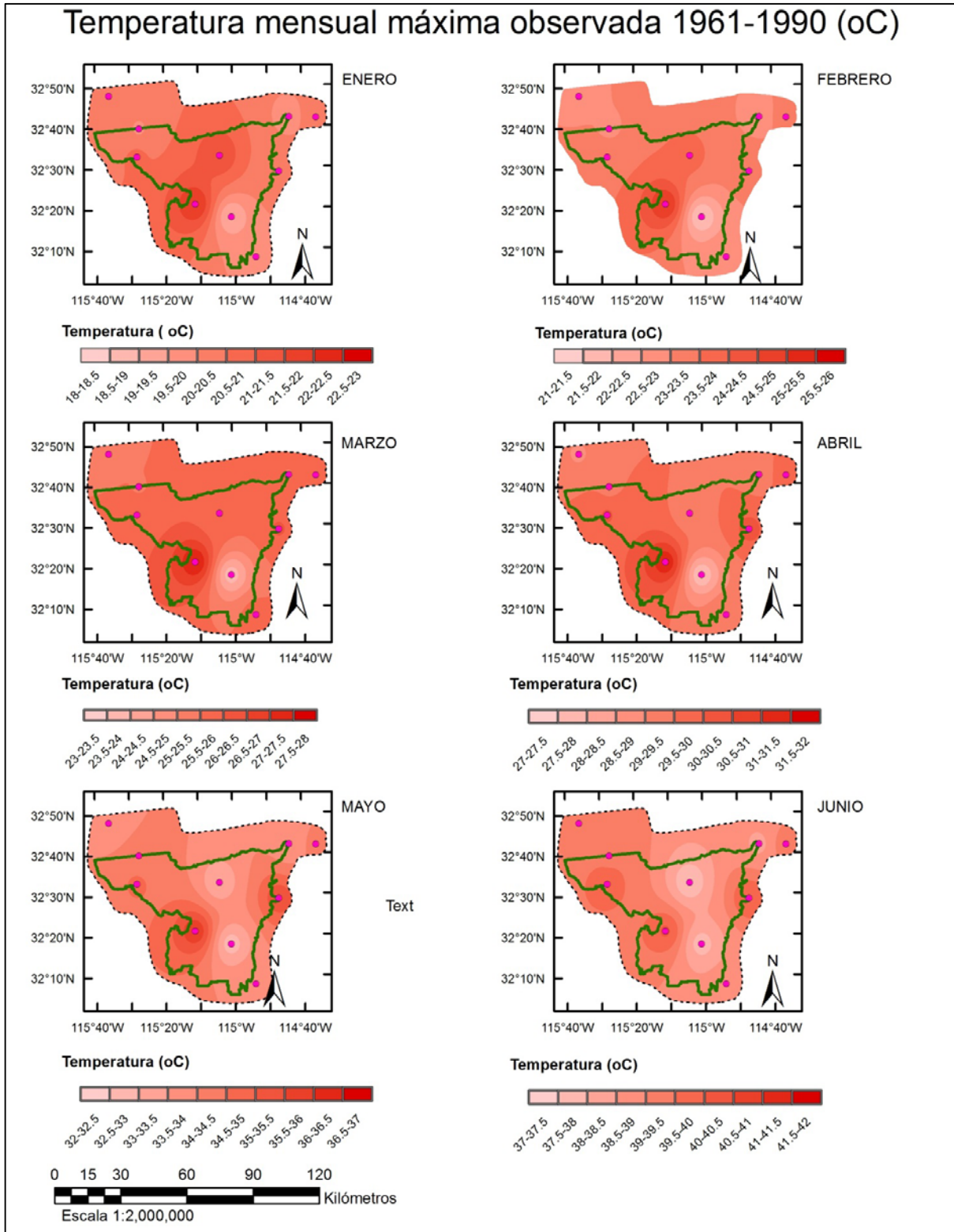


Figura I.1 Climatología base mensual 1961-1990 enero-junio de temperatura máxima para la región del Valle de Mexicali.

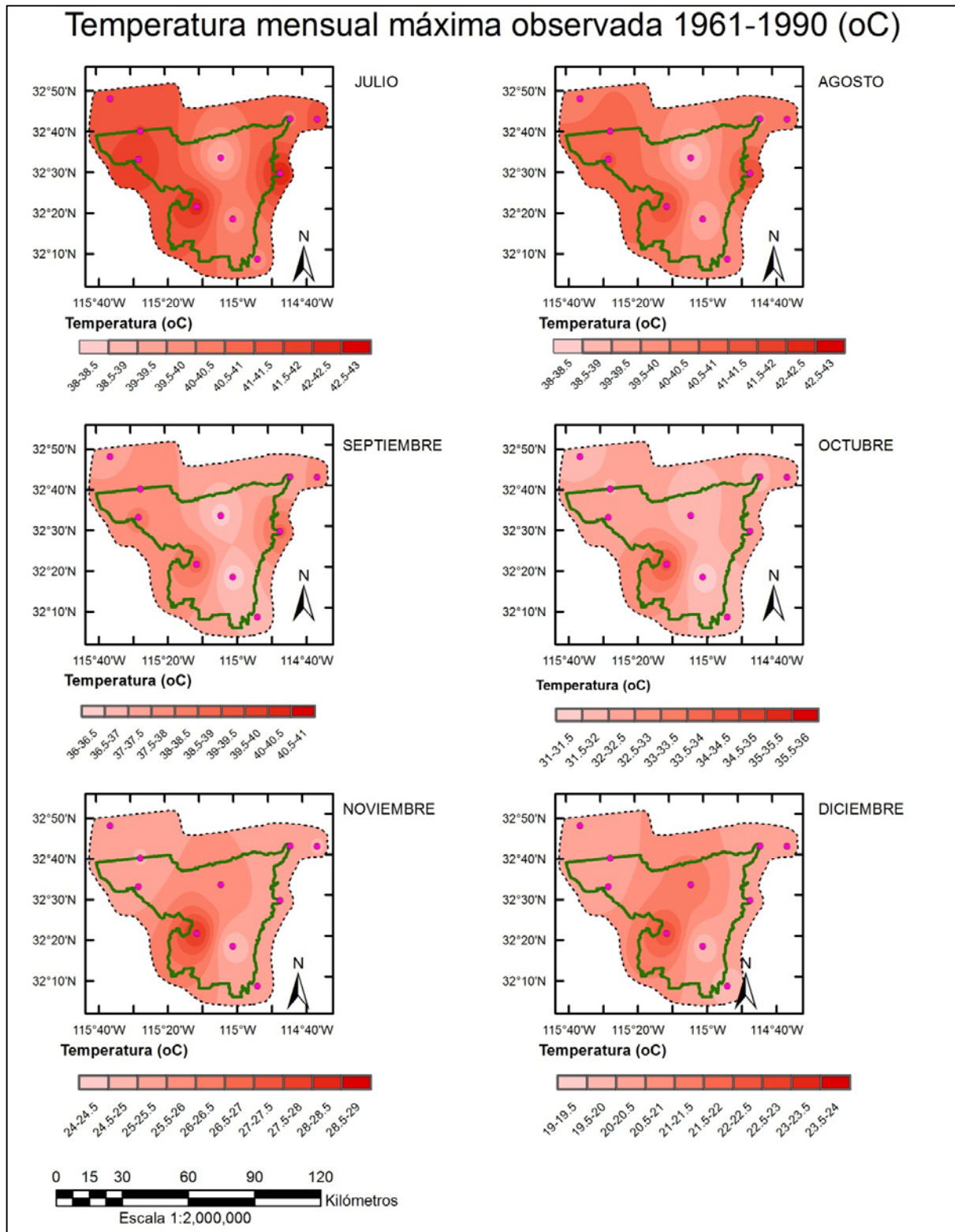


Figura I.2 Climatología base mensual 1961-1990 julio-agosto de temperatura máxima para la región del Valle de Mexicali.

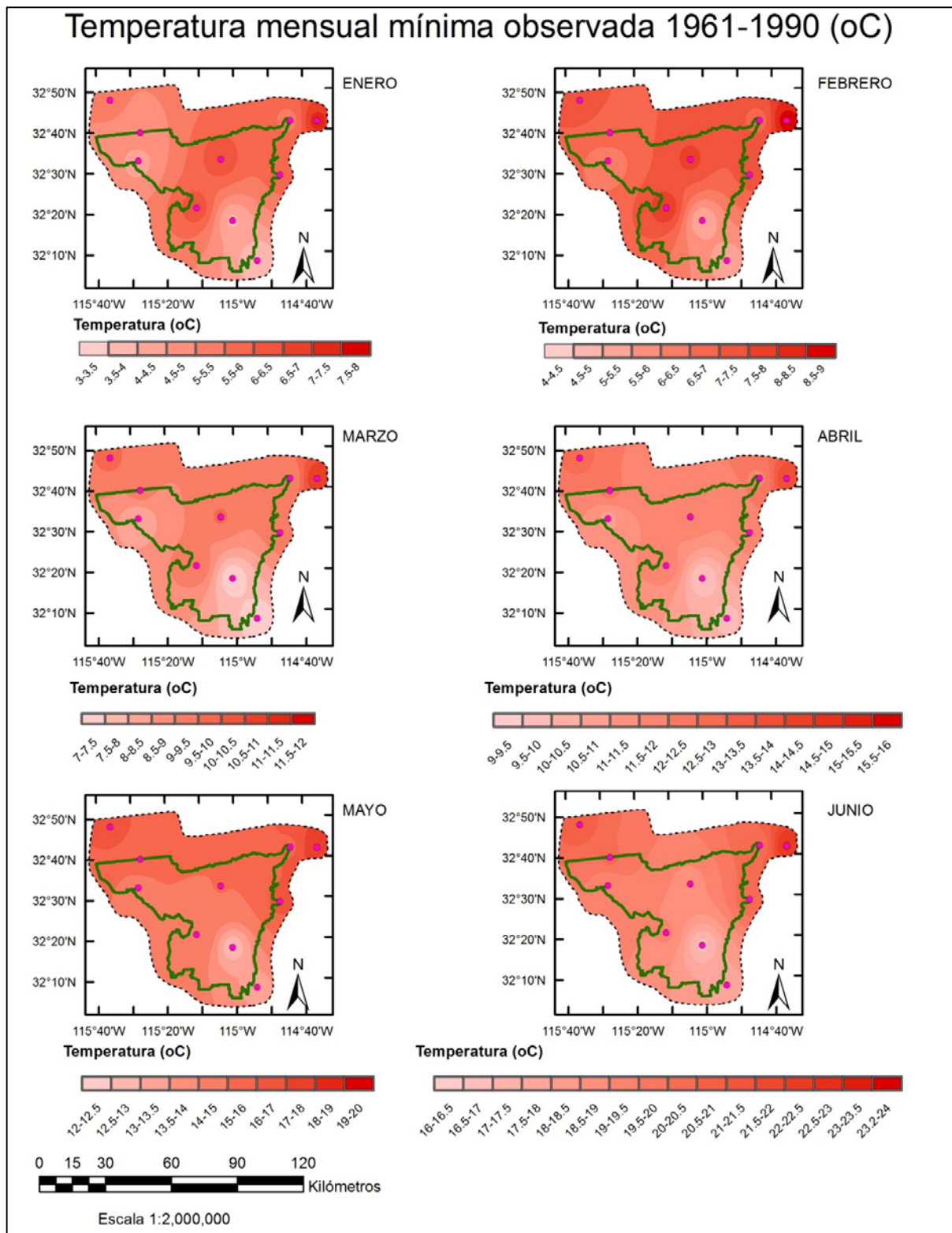


Figura I.3 Climatología base mensual 1961-1990 enero-junio de temperatura mínima para la región del Valle de Mexicali.

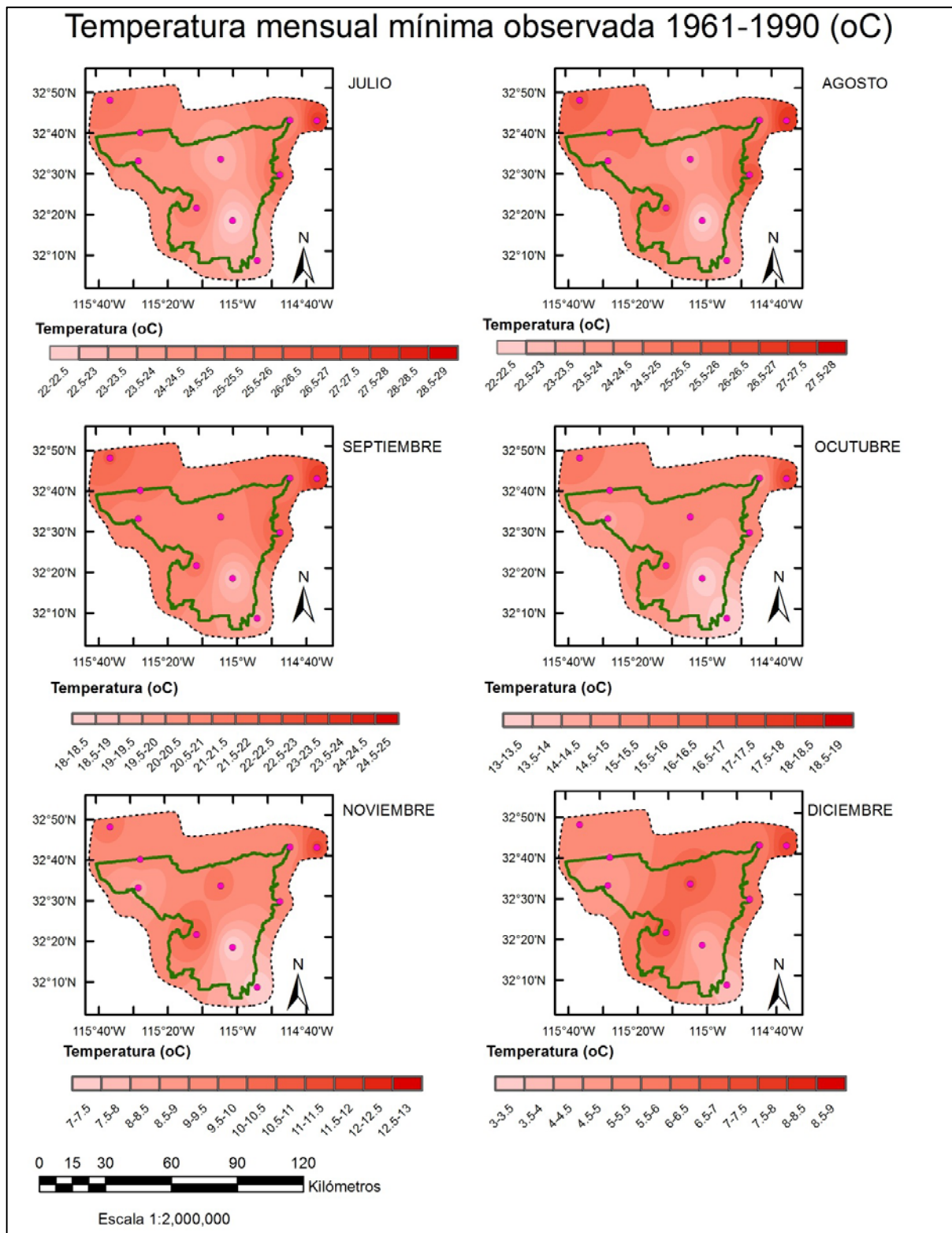


Figura I.4 Climatología base mensual 1961-1990 julio-diciembre de temperatura mínima para la región del Valle de Mexicali.

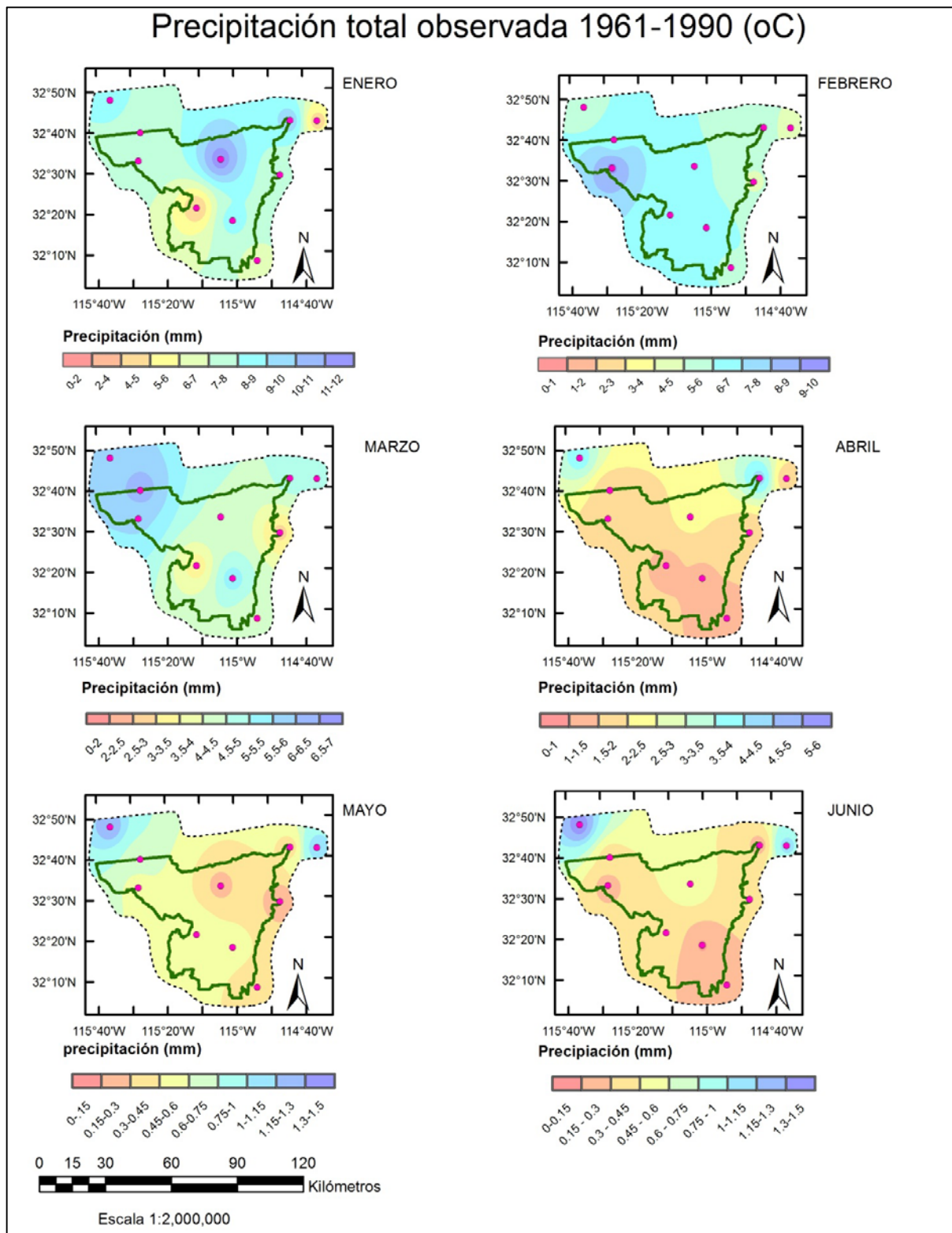


Figura I.5 Climatología base mensual 1961-1990 enero-julio de precipitación para la región del Valle de Mexicali.

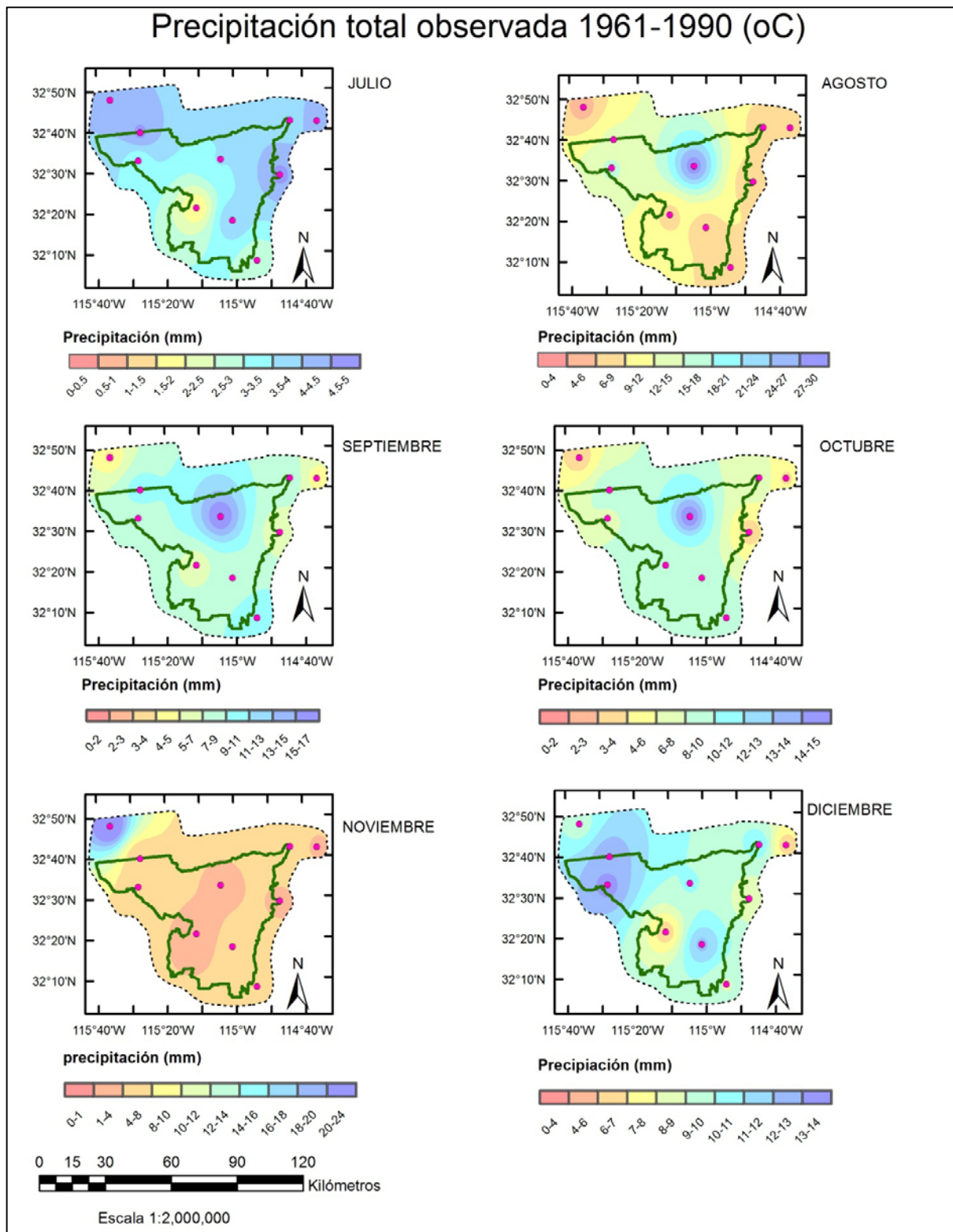


Figura I.6 Climatología base mensual 1961-1990 julio-diciembre de precipitación para la región del Valle de Mexicali.

ANEXO II. FECHA DE LAS UCDS ACUMULADAS DESPUÉS DE LA SIEMBRA POR ETAPA FENOLÓGICA.

Tabla II.1 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Bataquez

ETAPA FENOLÓGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN BATAQUEZ					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	12-ene	12-ene	6-ene	1-ene	6-ene	1-ene
	59	59	53	48	53	48
Encañe (641)	21-ene	21-ene	13-ene	9-ene	14-ene	9-ene
	68	68	60	56	60	56
Embuche (904)	16-Feb	16-Feb	8-Feb	2-Feb	8-Feb	2-Feb
	94	94	86	80	86	80
Espigamiento (1003)	25-Feb	25-Feb	17-Feb	11-Feb	17-Feb	10-Feb
	103	103	95	89	95	88
Grano lechoso (1282)	20-Mar	20-Mar	11-Mar	6-Mar	11-Mar	5-Mar
	126	126	117	112	117	111
Madurez fisiológica (1711)	18-abr	18-abr	9-abr	4-abr	9-abr	3-abr
	155	155	146	141	146	140

Tabla II.2 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Colonia Juárez

ETAPA FENOLÓGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN COLONIA JUÁREZ					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	27-ene	29-ene	20-ene	15-ene	20-ene	14-ene
	74	76	67	62	67	61
Encañe (641)	7-Feb	8-Feb	30-ene	24-ene	30-ene	23-ene
	85	86	77	71	77	70
Embuche (904)	9-Mar	9-Mar	28-Feb	27-Feb	22-Feb	20-Feb
	115	115	106	105	100	98
Espigamiento (1003)	19-Mar	19-Mar	10-Mar	9-Mar	3-Mar	2-Mar
	125	125	116	115	109	108
Grano lechoso (1282)	12-abr	11-abr	2-abr	1-abr	27-Mar	25-Mar
	149	148	139	138	133	131
Madurez fisiológica (1711)	11-May	9-May	1-May	30-abr	25-abr	23-abr
	178	176	168	167	162	160

Tabla II.3 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Delta

ETAPA FENOLOGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN DELTA					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	7-ene	7-ene	1-ene	28-dic	1-ene	28-dic
	54	54	48	44	48	44
Encañe (641)	15-ene	15-ene	9-ene	5-ene	9-ene	5-ene
	62	62	56	52	56	52
Embuche (904)	10-Feb	10-Feb	3-Feb	29-ene	2-Feb	28-ene
	88	88	81	76	80	75
Espigamiento (1003)	19-Feb	19-Feb	11-Feb	6-Feb	11-Feb	5-Feb
	97	97	89	84	89	83
Grano lechoso (1282)	13-Mar	13-Mar	5-Mar	28-Feb	5-Mar	27-Feb
	119	119	111	106	111	105
Madurez fisiológica (1711)	11-abr	11-abr	3-abr	28-Mar	2-abr	27-Mar
	148	148	140	134	139	133

Tabla II.4 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Mexicali

ETAPA FENOLOGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN MEXICALI					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	20-ene	20-ene	11-ene	6-ene	12-ene	6-ene
	67	67	58	53	59	53
Encañe (641)	30-ene	30-ene	21-ene	15-ene	21-ene	15-ene
	77	77	68	62	68	62
Embuche (904)	26-Feb	26-Feb	17-Feb	11-Feb	17-Feb	10-Feb
	104	104	95	89	95	88
Espigamiento (1003)	7-Mar	7-Mar	25-Feb	20-Feb	26-Feb	19-Feb
	113	113	103	98	104	97
Grano lechoso (1282)	30-Mar	29-Mar	20-Mar	14-Mar	20-Mar	13-Mar
	136	135	126	120	126	119
Madurez fisiológica (1711)	26-abr	25-abr	17-abr	11-abr	16-abr	10-abr
	163	162	154	148	153	147

Tabla II.5 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación CAE

ETAPA FENOLOGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN CAE					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	21-ene	21-ene	14-ene	8-ene	14-ene	8-ene
	68	68	61	55	61	55
Encañe (641)	31-ene	31-ene	23-ene	17-ene	23-ene	17-ene
	78	78	70	64	70	64
Embuche (904)	27-Feb	28-Feb	19-Feb	12-Feb	19-Feb	11-Feb
	105	106	97	90	97	89
Espigamiento (1003)	9-Mar	9-Mar	28-Feb	27-Feb	21-Feb	20-Feb
	115	115	106	105	99	98
Grano lechoso (1282)	31-Mar	31-Mar	22-Mar	16-Mar	22-Mar	15-Mar
	137	137	128	122	128	121
Madurez fisiológica (1711)	28-abr	28-abr	19-abr	13-abr	19-abr	12-abr
	165	165	156	150	156	149

Tabla II.6 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Presa Morelos

ETAPA FENOLOGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN PRESA MORELOS					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	18-ene	19-ene	11-ene	6-ene	11-ene	6-ene
	65	66	58	53	58	53
Encañe (641)	28-ene	28-ene	20-ene	14-ene	20-ene	15-ene
	75	75	67	61	67	62
Embuche (904)	103	104	94	88	94	88
	25-Feb	26-Feb	16-Feb	10-Feb	16-Feb	10-Feb
Espigamiento (1003)	6-Mar	7-Mar	26-Feb	19-Feb	26-Feb	19-Feb
	112	113	104	97	104	97
Grano lechoso (1282)	29-Mar	29-Mar	20-Mar	14-Mar	20-Mar	13-Mar
	135	135	126	120	126	119
Madurez fisiológica (1711)	26-abr	26-abr	18-abr	12-abr	17-abr	11-abr
	163	163	155	149	154	148

Tabla II.7 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Ríto

ETAPA FENOLÓGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN RÍTO					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	27-ene	27-ene	18-ene	13-ene	19-ene	13-ene
	74	74	65	60	66	60
Encañe (641)	6-Feb	6-Feb	28-ene	22-ene	28-ene	22-ene
	84	84	75	69	75	69
Embuche (904)	6-Mar	6-Mar	25-Feb	19-Feb	25-Feb	18-Feb
	112	112	103	97	103	96
Espigamiento (1003)	15-Mar	15-Mar	6-Mar	28-Feb	6-Mar	27-Feb
	121	121	112	106	112	105
Grano lechoso (1282)	7-abr	6-abr	28-Mar	22-Mar	28-Mar	21-Mar
	144	143	134	128	134	127
Madurez fisiológica (1711)	5-May	4-May	26-abr	20-abr	25-abr	19-abr
	172	171	163	157	162	156

Tabla II.8 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación San Luis Río Colorado

ETAPA FENOLÓGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN SAN LUIS RÍO COLORADO					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	16-ene	17-ene	9-ene	5-ene	10-ene	5-ene
	63	64	56	52	57	52
Encañe (641)	26-ene	26-ene	18-ene	13-ene	18-ene	13-ene
	73	73	65	60	65	60
Embuche (904)	22-Feb	22-Feb	13-Feb	7-Feb	13-Feb	7-Feb
	100	100	91	85	91	85
Espigamiento (1003)	3-Mar	2-Mar	21-Feb	16-Feb	22-Feb	16-Feb
	109	108	99	94	100	94
Grano lechoso (1282)	25-Mar	24-Mar	15-Mar	10-Mar	15-Mar	10-Mar
	131	130	121	116	121	116
Madurez fisiológica (1711)	23-abr	21-abr	13-abr	7-abr	12-abr	7-abr
	160	158	150	144	149	144

Tabla II.9 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Imperial

ETAPA FENOLOGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN IMPERIAL					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	19-ene	19-ene	11-ene	5-ene	11-ene	6-ene
	66	66	58	52	58	53
Encañe (641)	28-ene	29-ene	20-ene	14-ene	20-ene	14-ene
	75	76	67	61	67	61
Embuche (904)	24-Feb	26-Feb	16-Feb	10-Feb	16-Feb	9-Feb
	102	104	94	88	94	87
Espigamiento (1003)	6-Mar	7-Mar	26-Feb	19-Feb	25-Feb	18-Feb
	112	113	104	97	103	96
Grano lechoso (1282)	28-Mar	29-Mar	20-Mar	14-Mar	19-Mar	13-Mar
	134	135	126	120	125	119
Madurez fisiológica (1711)	25-abr	25-abr	17-abr	11-abr	16-abr	10-abr
	162	162	154	148	153	147

Tabla II.10 Comparación de las Unidades Calor Después de la Siembra entre el escenario base observado 1961-1990 y los escenarios: escenario base simulado, escenario A2 y escenario A1B, estación Yuma

ETAPA FENOLOGICA (UCDS) UMBRALES (	FECHA / DÍAS DESPUES DE LA SIEMBRA, ESTACIÓN YUMA					
	Observada	Línea Base	A2 (2020)	A2 (2050)	A1B (2020)	A1B (2050)
Amacollamiento (560)	60	58	52	47	52	48
	13-ene	11-ene	5-ene	31-dic	5-ene	1-ene
Encañe (641)	21-ene	20-ene	13-ene	8-ene	13-ene	8-ene
	68	67	60	55	60	55
Embuche (904)	17-Feb	15-Feb	7-Feb	2-Feb	8-Feb	2-Feb
	95	93	85	80	86	80
Espigamiento (1003)	25-Feb	24-Feb	16-Feb	10-Feb	16-Feb	10-Feb
	103	102	94	88	94	88
Grano lechoso (1282)	20-Mar	18-Mar	10-Mar	4-Mar	10-Mar	4-Mar
	126	124	116	110	116	110
Madurez fisiológica (1711)	16-abr	15-abr	7-abr	2-abr	7-abr	1-abr
	153	152	144	139	144	138

ANEXO III. ESCENARIOS DE UCDS EN FUNCIÓN DE LA FENOLOGÍA DEL TRIGO.

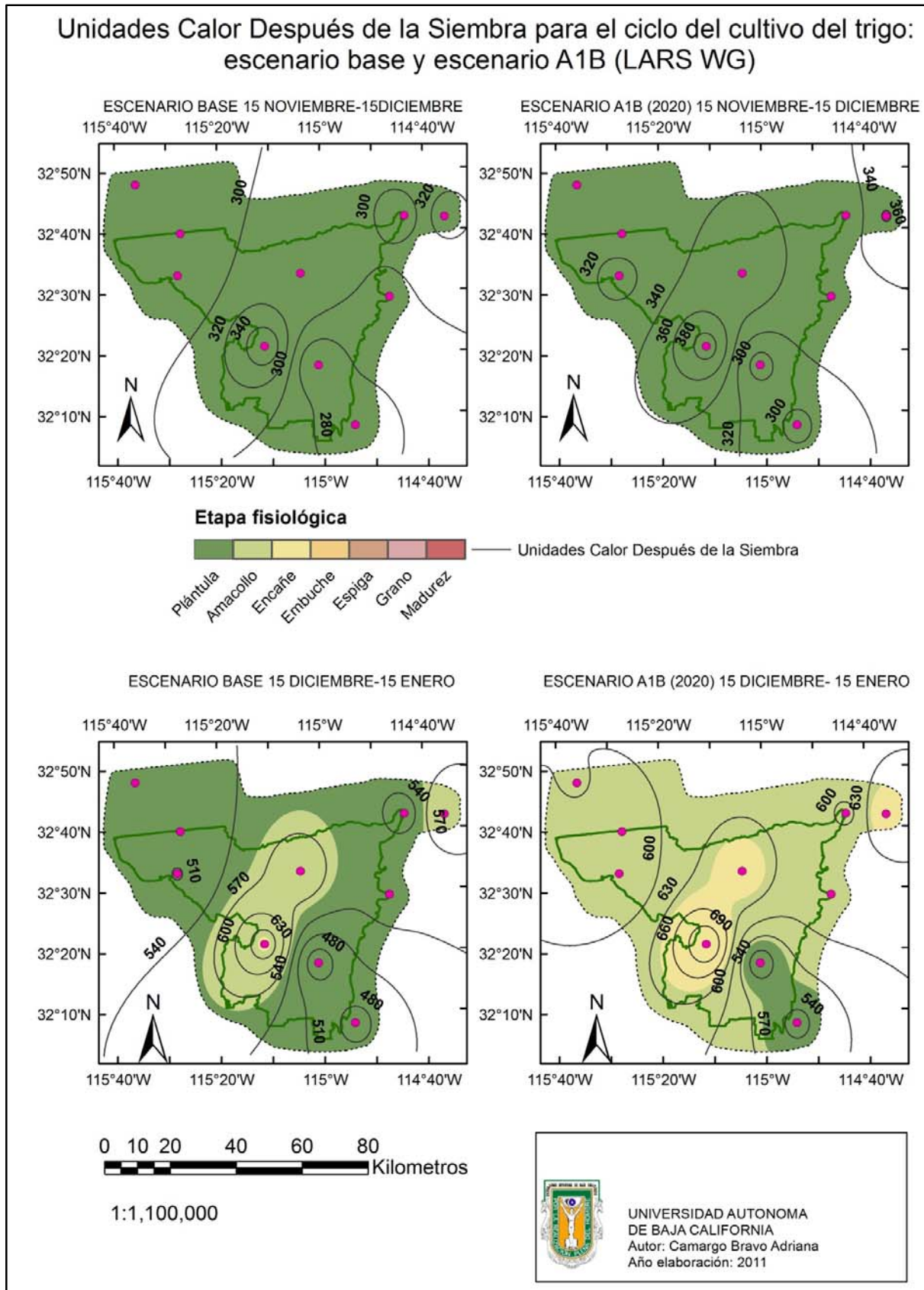


Figura III.1 Unidades Calor Después de la Siembra de noviembre a enero, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A1B, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C

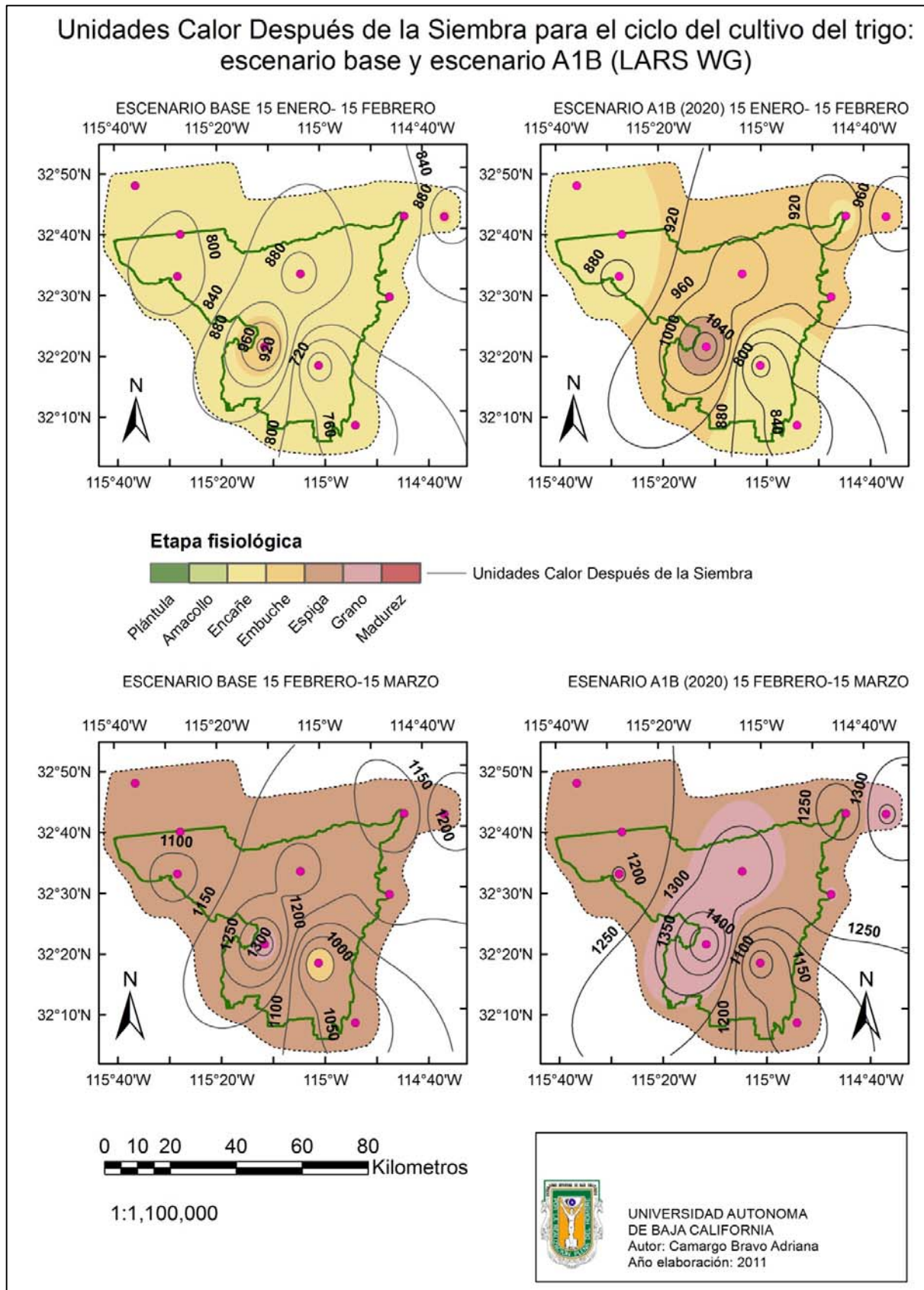


Figura III.2 Unidades Calor Después de la Siembra de enero a marzo, para el ciclo del cultivo del trigo, escenarios base y escenario A1B, calculado en base a las temperaturas umbrales de 30°C y 5°C