



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

**EFFECTOS DEL CAMBIO Y VARIABILIDAD
CLIMÁTICA DEL MAÍZ (*Zea mays*) EN LA
REGIÓN CENTRO OCCIDENTE DE MÉXICO,
ESTUDIO DE CASO; DISTRITO DE
DESARROLLO RURAL, TOLUCA, ESTADO DE
MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

ASael ALEJANDRO SARABIA RODRÍGUEZ

ASESORA DE TESIS:

**DRA. GUADALUPE REBECA GRANADOS
RAMÍREZ**

Ciudad Universitaria, México D.F. a 1 de junio del 2011.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la beca del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) en la UNAM, cuya tesis fue enmarcada en el proyecto “*Variaciones de la precipitación y temperatura e impactos en la producción agrícola de la región Centro-Occidente de México* con clave IN307908.

A mis padres:

No tengo palabras para agradecerles el incondicional apoyo que me han brindado durante toda mi vida, y por haberme enseñado a ser tenaz y luchar por las cosas que uno ama en la vida. “GRACIAS POR TODO”.

A mi hermano:

Por el apoyo personal que me has brindado durante toda mi vida, espero que en los años venideros sigamos contando el uno con el otro, y ya te veré finalizando tu carrera en un corto tiempo para que la celebración sea doble.

Dra. Rebeca Granados:

Manifiesto mi gratitud por todo el tiempo y apoyo que me ha dedicado durante estos años, así como todo el aprendizaje que adquirí de usted durante la realización de la presente tesis. “GRACIAS”

Mtra. Ma. de la Paz Medina Barrios:

Le agradezco todas las atenciones que ha tenido hacia mí desde que era estudiante, así como todas las aportaciones que brindo para la realización de la presente tesis, no tengo más que expresar mi gratitud y admiración hacia usted, tanto en el plano profesional como personal.

Mtro. Vicente Peña y a la Dra. Estela Orozco:

Les agradezco su tiempo y atenciones que tuvieron conmigo, ya que su apoyo fue importante para que se pudiera llevar a cabo la presente tesis.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
<ul style="list-style-type: none">• El cultivo del maíz en México• Conceptos de Cambio Climático y variabilidad climática• Investigaciones de Cambio Climático desarrolladas en el campo de la agricultura en México• Principales investigaciones enfocadas en los efectos del Cambio Climático en el cultivo de maíz en México	
HIPÓTESIS	7
OBJETIVOS	7
<ul style="list-style-type: none">• Objetivo general• Objetivos particulares	
METODOLOGÍA	8
ESTRUCTURA DEL TRABAJO	9
CAPÍTULO 1. MARCO FÍSICO, DISTRITO DE DESARROLLO RURAL DE TOLUCA	10
1.1 Distritos de Desarrollo Rural del Estado de México.....	10
1.2 Ubicación geográfica del DDR-Toluca.....	11
1.3 Altimetría.....	12
1.4 Hidrografía.....	14
1.5 Clima.....	16
1.6 Edafología.....	18
1.7 Uso de suelo.....	22

CAPÍTULO 2. CULTIVO DEL MAÍZ EN EL DISTRITO DE DESARROLLO RURAL DE TOLUCA

2.1 Maíz en el sector agropecuario.....	26
2.1.1 Principales entidades federativas productoras de maíz en el año 2008.....	27
2.1.2 Producción agrícola en el Estado de México durante el periodo 1999-2008.....	30
2.2 Superficie agrícola de riego y temporal, destinada al cultivo del maíz en el distrito de Toluca, periodo 1999-2008.....	33
2.3 Producción de maíz en el distrito agrícola de Toluca, período 1999-2008.....	35
2.4 Rendimiento del maíz en el distrito agrícola de Toluca, período 1999-2008.....	38

CAPÍTULO 3. EL CULTIVO DEL MAÍZ

3.1 Descripción taxonómica.....	41
3.2 Condiciones agroecológicas del cultivo del maíz.....	42
3.2.1 Influencia del clima.....	42
3.2.2 Temperatura.....	44
3.2.3 Pluviometría y humedad.....	46
3.2.4 Viento.....	49
3.2.5 Fotoperíodo.....	51
3.2.6 Suelo.....	54
3.3 Fenología del maíz.....	55
3.3.1 Ficha fenológica.....	55
3.4 Variedades del maíz.....	58

CAPÍTULO 4. ESCENARIO BASE Y MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (ECHAM y HADLEY)

4.1	Introducción a los escenarios de Cambio Climático y Modelos de Circulación General	
4.1.1	Escenarios de Cambio Climático.....	61
4.1.2	Escenarios de emisiones.....	63
4.1.3	Modelos de Circulación General (MCG).....	68
4.1.4	Modelos de Circulación General aplicados a la República Mexicana.....	70
4.2	Escenario base 1950-2000.....	70
4.2.1	Comportamiento de la temperatura media.....	70
4.2.2	Comportamiento de la temperatura mínima.....	72
4.2.3	Comportamiento de la temperatura máxima.....	73
4.2.4	Comportamiento de la precipitación.....	74
4.3	Resultados del Modelo Hadley (horizonte 2050).....	78
4.3.1	Rangos proyectados en la temperatura media, mínima y máxima en los escenarios de emisiones B2 y A2, y análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.....	78
	• Escenario B2.....	78
	• Escenario A2.....	84
4.3.2	Rangos proyectados en la precipitación media en los escenarios de emisiones B2 y A2, y análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.....	91
	• Escenario B2.....	91
	• Escenario A2.....	95

4.4 Resultados del Modelo ECHAM (horizonte 2050).....	100
4.4.1 Rangos proyectados en la temperatura media en el escenario A2, y anomalía esperada en la temperatura mínima, media y máxima en el escenario B2, así como el análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.....	100
• Escenario B2.....	100
• Escenario A2.....	106
4.4.2 Rangos proyectados en la precipitación media en los escenarios de emisiones B2 y A2, y análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.....	108
• Escenario B2.....	108
• Escenario A2.....	112
CONCLUSIONES.....	117
BIBLIOGRAFÍA.....	124

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

FIGURAS

Figura 1. Distritos de Desarrollo Rural en el Estado de México	11
Figura 2. Distrito de Desarrollo Rural 073 Toluca	12
Figura 3. Altimetría	13
Figura 4. Hidrografía DDR-Toluca	15
Figura 5. Clima DDR-Toluca	18
Figura 6. Edafología DDR-Toluca	21
Figura 7. Tipos de Uso de Suelo	22

Figura 8. Uso de suelo DDR-Toluca (gráfica)	23
Figura 9. Uso de suelo DDR-Toluca (cartográfica)	25
Figura 10. Participación del maíz en la producción de cereales	27
Figura 11. Superficie sembrada en la modalidad de temporal, en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca, período 1999-2008	34
Figura 12. Superficie sembrada en la modalidad de riego, en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca, período 1999-2008	35
Figura 13. Producción total de maíz en el DDR-Toluca, período 1999-2008	36
Figura 14. Producción de maíz de temporal, DDR-Toluca, período 1999-2008	37
Figura 15. Producción de maíz de riego, DDR-Toluca, periodo 1999-2008	38
Figura 16.- Rendimiento promedio, temporal y de riego, en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca en el periodo 1999-2008	39
Figura 17. Fenología del maíz	57
Figura 18. Escenarios de emisiones	64
Figura 19. Principales características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios	67
Figura 20. Concentraciones atmosféricas de CO ₂ en el pasado y en el futuro	68
Figura 21. Temperatura media anual (isotermas) 1950-2000	71
Figura 22. Precipitación media anual (isoyetas) 1950-2000	75
Figura 23. Requerimientos hídricos óptimos (datos de referencia, estación climatológica de Calixtlahuaca) con respecto al escenario base.	77
Figura 24. Incremento de la temperatura media anual, según modelo Hadley (escenario B2), horizonte 2050.	78
Figura 25. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> proyección de la temperatura mínima mensual, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.	79
Figura 26. Requerimientos térmicos óptimos <i>versus</i> proyección de la temperatura mínima en los subperíodos fenológicos, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.	81

Figura 27. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> proyección de la temperatura máxima mensual, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.	82
Figura 28. Requerimientos térmicos óptimos <i>versus</i> proyección de la temperatura máxima en las fases fenológicas, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.	83
Figura 29. Incremento de la temperatura media anual, según modelo Hadley (escenario A2), horizonte 2050	85
Figura 30. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> temperatura mínima mensual, modelo Hadley (Escenario A2)	86
Figura 31. Requerimientos térmicos óptimos <i>versus</i> proyección de la temperatura mínima en los subperíodos fenológicos, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050	87
Figura 32. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> proyección de la temperatura máxima mensual, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050	88
Figura 33. Requerimientos térmicos óptimos <i>versus</i> proyección de la temperatura máxima en las fases fenológicas, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050	90
Figura 34. Precipitación media anual (isoyetas), modelo Hadley (escenario B2), horizonte 2050	92
Figura 35. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> proyección de la precipitación media mensual, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050	93
Figura 36. Requerimientos hídricos óptimos <i>versus</i> proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050	95
Figura 37. Precipitación media anual (isoyetas), modelo Hadley (escenario A2), horizonte 2050	96
Figura 38. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> precipitación media mensual, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050	97
Figura 39. Requerimientos hídricos óptimos <i>versus</i> proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050	99
Figura 40. Incremento de la temperatura media anual, según modelo ECHAM (escenario B2), horizonte 2050	101
Figura 41. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> temperatura mínima mensual, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050	102
Figura 42. Requerimientos térmicos óptimos <i>versus</i> proyección de la temperatura mínima en las fases fenológicas, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050	103

Figura 43. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> proyección de la temperatura máxima mensual, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050	104
Figura 44. Requerimientos térmicos óptimos <i>versus</i> proyección de la temperatura máxima en las fases fenológicas, modelo ECHAM, (Escenario B2), horizonte 2050	106
Figura 45. Incremento de la temperatura media anual, según modelo ECHAM (escenario A2), horizonte 2050	107
Figura 46. Precipitación media anual, ECHAM (escenario B2), horizonte 2050	109
Figura 47. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> precipitación media mensual, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050	110
Figura 48. Requerimientos hídricos óptimos <i>versus</i> proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050	111
Figura 49. Precipitación media anual, ECHAM (escenario A2), horizonte 2050	113
Figura 50. Escenario base 1950-2000 <i>versus</i> precipitación media mensual, modelo ECHAM (Escenario A2), horizonte 2050	114
Figura 51. Requerimientos hídricos óptimos <i>versus</i> proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo ECHAM (Escenario A2), horizonte 2050	116

CUADROS

Cuadro 1. Regiones y Cuencas Hidrológicas	14
Cuadro 2. Climas	16
Cuadro 3. Climas DDR-Toluca	17
Cuadro 4: Uso de suelo DDR-Toluca, números absolutos y relativos	23
Cuadro 5: Uso de suelo DDR-Toluca por cobertura, números absolutos y relativos	24
Cuadro 6. Volumen de la producción nacional de los principales cereales en el período 1996-2008 (miles de toneladas)	26
Cuadro 7. Entidades con mayor producción de maíz de temporal y riego en 2008	28
Cuadro 8. Entidades federativas con mayor producción de maíz en 2008 (modalidades riego y temporal)	29

Cuadro 9. Superficie sembrada de maíz (ha) de temporal y riego por DDR en el estado de México (1999-2008)	31
Cuadro 10. Producción de maíz (ton) de temporal y riego por DDR en el estado de México (1999-2008)	32
Cuadro 11. Superficie agrícola total y superficie sembrada con maíz en el DDR-Toluca	33
Cuadro 12. Clasificación taxonómica del maíz	41
Cuadro 13. Requerimientos agroecológicos del cultivo del maíz	42
Cuadro 14. Valores mínimos, máximos y óptimos en los diferentes estadios del maíz	45
Cuadro 15. Requerimientos hídricos mínimos, óptimos y máximos del cultivo del maíz	46
Cuadro 16. Duración del día (luminoso) en horas para la República Mexicana	53
Cuadro 17. Identificación de los estadios de desarrollo del maíz, utilizando el sistema de numeración	56
Cuadro 18. Nombre de las razas de maíz en México y la altitud en metros en donde se han localizado	59
Cuadro 19. Características generales de los Modelos de Circulación General (MCG)	69
Cuadro 20. Escenario base de la temperatura mínima (°C), <i>versus</i> requerimiento mínimo térmico por fase fenológica en el DDR-Toluca	72
Cuadro 21. Escenario base de la temperatura máxima (°C), <i>versus</i> requerimiento óptimo térmico por fase fenológica en el DDR-Toluca	73
Cuadro 22. Distribución de la precipitación durante mayo - noviembre de 1999, en la estación 15203 (Calixtlahuaca), municipio de Toluca	75
Cuadro 23. Requerimientos hídricos del maíz	76

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cambio climático antropogénico es sin duda uno de los acontecimientos que más preocupan a la humanidad, ya que sus efectos podrían afectar en todos los ámbitos en la vida de las personas en el planeta.

Uno de los principales aspectos en los cuales el calentamiento global tendrá una gran incidencia es en la agricultura. Como consecuencia de esto, la producción de granos básicos que se encuentran dentro de una agricultura no tecnificada y con una baja subvención gubernamental se verá sumamente afectada ante los efectos que el cambio climático pueda provocar, trayendo consigo un posible desabasto de productos básicos, que afectaría principalmente a las personas de más bajos recursos.

Los estudios actuales de variabilidad que permiten diseñar estrategias de adaptación son desarrollados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en Inglés), relacionados con la agricultura parten necesariamente de considerar que esta actividad se encuentra sumamente vulnerable en los países en desarrollo, ya que se encuentra doblemente expuesta (O'Brien y Liechenko, 2000, datos citados por Gay, *et al.*, 2004). Los efectos que el calentamiento global pueda provocar sobre la agricultura en México son de suma relevancia, ya que nuestro país se encuentra en una posición vulnerable con respecto a estos posibles cambios climatológicos, debido a que la agricultura existente en nuestro país se caracteriza principalmente por ser poco tecnificada y tener una baja productividad al compararla con la agricultura de países desarrollados. Como consecuencia de esto, la mayor parte del espacio agrícola en nuestro país se encuentra expuesta directamente al cambio climático.

La agricultura en México se fundamenta principalmente en el cultivo del maíz, ya que es el grano que más se consume en nuestro país desde tiempos ancestrales. Los efectos que el cambio climático pueda tener sobre el cultivo del maíz son cruciales, ya que esto, aunado a la insuficiencia alimentaria, con respecto a este cultivo, así como a las grandes fluctuaciones de los precios en los granos básicos a nivel internacional, podrían afectar severamente la alimentación de las personas.

El maíz ocupa un alto porcentaje de la superficie agrícola en México. Sin embargo, solamente el estado de Sinaloa cuenta con una óptima infraestructura, como lo es la maquinaria agrícola, y el acceso a la biotecnología. Por otro lado, la mayor parte de la superficie agrícola destinada al cultivo del maíz, se encuentra en condiciones poco tecnificadas o precarias, vulnerables a cualquier variabilidad que podría acarrear el cambio climático.

La preocupación ante las posibles secuelas que pueda traer consigo el cambio climático con respecto al cultivo del maíz en una agricultura de temporal es el principal objetivo del presente trabajo, enfocándose en el **cultivo del maíz de temporal en la región Centro-Occidente y principalmente en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca en el estado de México**. La elección de este espacio agrícola responde a que el estado de México es uno de los mayores productores de este cultivo de temporal en nuestro país, y el distrito de desarrollo rural de Toluca (DDR-Toluca) fue el segundo mayor productor de maíz en esta entidad federativa con 27.7% durante el periodo 1999-2008.

Las posibles consecuencias que pueda ocasionar el cambio climático con respecto a la variación positiva o negativa de precipitación y temperatura se simulan mediante la utilización de diferentes modelos de cambio climático, los cuales son recomendados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA, UNAM). La elección de determinados modelos responde a que tuvieron una mayor correlación con las condiciones de la circulación general de la atmósfera prevaeciente en México.

- **El cultivo del maíz en México**

Nuestro país es centro de origen, diversidad y domesticación del maíz. Este cultivo ha sido cosechado desde hace 8 mil 700 años (PNAS, 2009). Supera a cualquier otro país en la diversidad de sus razas y variedades. El maíz es el núcleo de la economía campesina, base de la dieta popular, el cereal de mayor consumo y un símbolo nacional.

El maíz es el cultivo más importante de México, cuenta con alrededor de 3.2 millones de productores —en su mayoría con parcelas menores a cinco hectáreas; en el año 2007 se produjeron 23,512, 751 toneladas de maíz grano que equivalen al 60 por ciento de la producción, en 8.5 millones de hectáreas. Más del 70 por ciento de los productores

siembran variedades de maíz nativas o criollas (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP, www.siap.gob.mx/).

Las variables macroeconómicas en nuestro país no indican una contribución importante de este grano en el producto interno bruto, aunque indudablemente de su producción dependen millones de campesinos a todo lo largo y ancho del país. El maíz se cultiva a nivel del mar y a más de 2,000 metros de altitud, y ha sido el sustento básico de muchas generaciones en el sector rural (Gay, *et al.*, 2004).

Así, la producción de maíz en México depende fuertemente del clima y se desarrolla prácticamente en todo el territorio nacional. Los bajos rendimientos y la gran superficie siniestrada que se presentan año con año, son indicativos de que este cultivo no se desarrolla ni exclusiva ni fundamentalmente para su comercialización a gran escala; además, en áreas en donde no existe aptitud para ello, tanto como en el ámbito climatológico como en el de suelos y pendientes, lo que en parte explica las altas pérdidas en las cosechas de este cultivo y los bajos rendimientos (menores a 2 toneladas por hectárea) en más de la mitad del territorio nacional (Gay, *et al.*, 2004).

Por otra parte, la existencia de un espacio agrícola poco tecnificado y productivo ha provocado que México se encuentre en una posición de dependencia alimentaria. Como consecuencia de esto, nuestro país ha tenido que importar de Estados Unidos y otros países un gran porcentaje de maíz que se consume en nuestro territorio.

Como consecuencia de la apertura del TLCAN y las políticas económicas implementadas, la dependencia alimentaria del cultivo del maíz ha crecido de manera vertiginosa. Para el año 2007, se importaron diez millones de toneladas de este grano, debido a que nuestro país produjo solamente veinte millones de toneladas de las treinta millones que se necesitan para cubrir la demanda nacional de este grano (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP, www.siap.gob.mx/).

No obstante de la problemática que han acarreado las fallidas políticas económicas en el ramo de la independencia intrínseca alimentaria como es el caso del maíz, otro elemento como es el cambio climático puede acentuar aun más la crisis en el espacio agrícola en donde se produce este grano.

Proyecciones realizadas por el Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) muestran que con el cambio climático se puede esperar que la disminución en la retención de humedad en el suelo disminuya la productividad y aumente el riesgo de fracaso de las cosechas. La susceptibilidad a las sequías y a las inundaciones aumentará probablemente con el tiempo, teniendo impacto en las zonas agrícolas.

Hoy, las variaciones climáticas causan más preocupación ya que las alteraciones que presentan los elementos del clima (temperatura y precipitación) con respecto a la normal, se traducen en pérdidas de cultivos y su respectivo impacto en la producción de alimentos.

- **Conceptos de Cambio Climático y variabilidad climática**

Hare (1985) define a la variabilidad climática como la diferencia observada de un año al otro en los valores de las variables climáticas dentro de un período, normalmente de 30 años, (datos citados por Liverman, *et al.*, 1996). Por otro lado, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) precisa que el concepto de variabilidad climática denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del *clima* en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del *sistema climático (variabilidad interna)* o a *variaciones del forzamiento externo* natural o antropógeno (*variabilidad externa*) (IPCC, 2007).

El Cambio Climático es definido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático como la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El Cambio Climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra.

Por otro lado, La *Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas*, en su Artículo 1, define el Cambio Climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMCC, en resumen, concreta que el Cambio Climático es resultado de las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática es atribuida a causas naturales.

- **Investigaciones de Cambio Climático desarrolladas en el campo de la agricultura en México**

Con base en los escenarios desarrollados por el IPCC, se proyecta que como consecuencia del incremento de los niveles de concentración atmosférica de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, se espera que la temperatura media superficial a nivel global aumente entre 1.4 y 5.8° C para el año 2100. Con base en esto, y las proyecciones de los posibles escenarios a futuro desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, Semarnat e INE, estiman que un aumento de la temperatura promedio de entre 3 y 5°C afectaría drásticamente a la agricultura en México.

Por otro lado, con la aplicación de modelos de cambio climático se proyecta una mayor ocurrencia e intensidad de las sequías, como consecuencias de esto el 50% de las tierras cultivables en México se encontrarían severamente afectadas. Dentro de este panorama, los estados que presentarían mayor afectación en la agricultura ante la falta de recursos hídricos, serían los que se encuentran situados al norte de la República Mexicana, ya que se hallarían afectados por la sequía en el 90% de su superficie, por otro lado, la región centro y sur de México, presentarían una menor ocurrencia de sequías en comparación con la región norte del país, sin embargo, la mayor parte del territorio nacional se vería afectado en mayor o menor grado por la sequía (Martínez, *et al.*, 2004).

- **Principales investigaciones enfocadas en los efectos del Cambio Climático en el cultivo de maíz en México**

Las investigaciones que se han realizado con respecto a los efectos del Cambio Climático han sido desarrolladas principalmente por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA, UNAM), el cual se ha encargado de aplicar los modelos de Cambio Climático y obtener los escenarios posibles que podrían acontecer en México.

Mediante la aplicación de los diferentes modelos de cambio climático hechos por el CCA, se obtuvo que los diferentes escenarios para el año 2020 apuntan a una reducción moderada en la aptitud para el cultivo de maíz de temporal e incrementos en la superficie no apta de hasta 4.2%, así como una reducción de rendimientos en algunas regiones del país. Por otro lado, la canícula se intensificará o tendría mayor duración lo cual acarrearía efectos negativos en los cultivos de temporal en la mayoría de los casos (Martínez, 2003).

HIPÓTESIS

Las secuelas que puede traer consigo el cambio climático serán poco favorables para el cultivo del maíz, ya que se ha estimado que la mayor parte del Distrito Agrícola de Toluca se encontrará severamente afectada por el Cambio Climático; se prevé una menor precipitación y una significativa fluctuación en la temperatura, lo que puede acarrear una caída en la producción del maíz en el DDR-Toluca, agravando la coyuntura existente en el área de estudio.

OBJETIVOS

- **Objetivo general**

Realizar un análisis de las posibles alteraciones que puede traer consigo el cambio climático, particularmente las variaciones de los elementos del clima (precipitación y temperatura) en la producción de maíz en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca.

- **Objetivos particulares**

- Recopilar y analizar la información histórica del maíz, así como las condiciones geográficas del área en estudio.
- Recopilar conceptos de cambio y variabilidad climática.
- Analizar la información arrojada por los modelos de cambio climático en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca, para obtener los diferentes escenarios que se pueden suscitar en las variables de precipitación y temperatura, horizonte 2050.
- Comparar los resultados que arrojaron los modelos de cambio de climático, con respecto al comportamiento que ha tenido la precipitación y temperatura en los períodos 1950-2000 y 1961-1990.

- Analizar los posibles umbrales críticos que puede soportar el maíz.
- Analizar los impactos potenciales del cambio climático en el cultivo del maíz en la región.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión bibliográfica para definir los conceptos de cambio y variabilidad climática, así como las investigaciones enfocadas en la agricultura en México, y sus efectos en el cultivo del maíz. Así mismo, se obtuvieron las características físico-geográficas del área en estudio.

Mediante visitas a las oficinas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, Estado de México), se recopiló información cartográfica de uso de suelo, producción y búsqueda de diversos programas de apoyo existentes en el Estado de México.

La obtención de la información agrícola como las variables uso de suelo, producción y rendimiento, permitió generar cuadros y gráficos, que sintetizan la situación del distrito en el estado de México, así como a nivel nacional.

Mediante consultas en páginas web de instituciones oficiales como la del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y Canadian Climate Impacts Scenarios (CICS) se respaldó la información de los escenarios seleccionados, misma que fue ordenada por ciclo agrícola y fase fenológica, para su análisis, mediante tablas, gráficos y cartografía.

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

La presente investigación consta de cinco apartados; el capítulo I aborda el marco físico geográfico de la zona de estudio, tales como geomorfología, clima, hidrografía, edafología y uso de suelo. En el capítulo II se presenta información estadística agropecuaria del área en estudio como producción, rendimiento, y evolución de la superficie agrícola durante el periodo 1980-2008. El capítulo III aborda las condiciones agroecológicas del cultivo del maíz, tales como temperatura, pluviometría y humedad, fotoperíodo, suelos y fenología de este cereal.

El capítulo IV explica los escenarios de Cambio Climático elaborados por el IPCC, así como los Modelos de Circulación General de la Atmósfera aplicados a la República Mexicana, también presenta los resultados obtenidos por los modelos de Cambio Climático ECHAM y HADLEY, en las variables precipitación y temperatura, dentro de los escenarios de emisiones A2 y B2 (horizonte 2050), y evalúa las anomalías esperadas con respecto a los requerimientos hídricos y térmicos que requiere el cultivo del maíz dentro de cada fase fenológica.

CAPITULO 1. MARCO FÍSICO, DISTRITO DE DESARROLLO RURAL DE TOLUCA

1.1 DISTRITOS DE DESARROLLO RURAL DEL ESTADO DE MÉXICO

El Distrito de Desarrollo Rural de Toluca (DDR-Toluca), se encuentra entre los distritos con mayor producción agrícola del estado de México. Esta entidad federativa cuenta con ocho distritos agrícolas. El antecedente de esta regionalización distrital está plasmado en el decreto de descentralización de la Administración Pública Federal, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de marzo de 1988, en apego a los objetivos y metas establecidas por el Programa Nacional de Desarrollo Rural Integral (Ponadri) 1985-1988, se llevó a cabo la reestructuración de las delegaciones estatales en sus áreas centrales y desconcentradas.

El objetivo de la regionalización única busca adaptarse a las características del estado, así como satisfacer las necesidades de organización de cada una de las instituciones que median el sector, con mayor eficiencia y oportunidad, para beneficio de los productores.

Los distritos fueron unidades administrativas básicas de operación de la SARH y se originaron de la adecuación y ajuste de los distritos de riego y temporal. En 1995 la SARH cambia su denominación a Sagar y a partir del año 2000 a Sagarpa.

En cuanto a sus funciones, la Sagarpa es cabeza del sector agropecuario, al dictaminar la asignación de apoyos de Procampo y, en concordancia, con sus fines y objetivos en el ámbito nacional, estatal y municipal; maneja el sector agropecuario a partir de los Distritos de Desarrollo Rural y sus centros de apoyo (Orozco *et al.*, 2004).

El estado de México se divide en ocho distritos con 56 Centros de Apoyo al Desarrollo Rural (Caders), los distritos tienen su sede en municipios estratégicos, y tienen un número asignado el cual le corresponde a nivel nacional. Estos distritos son: 073 Toluca, 074 Zumpango, 075 Texcoco, 076 Tejupilco, 077 Atlacomulco, 078 Coatepec Harinas, 079 Valle de Bravo y 080 Jilotepec (Figura 1).

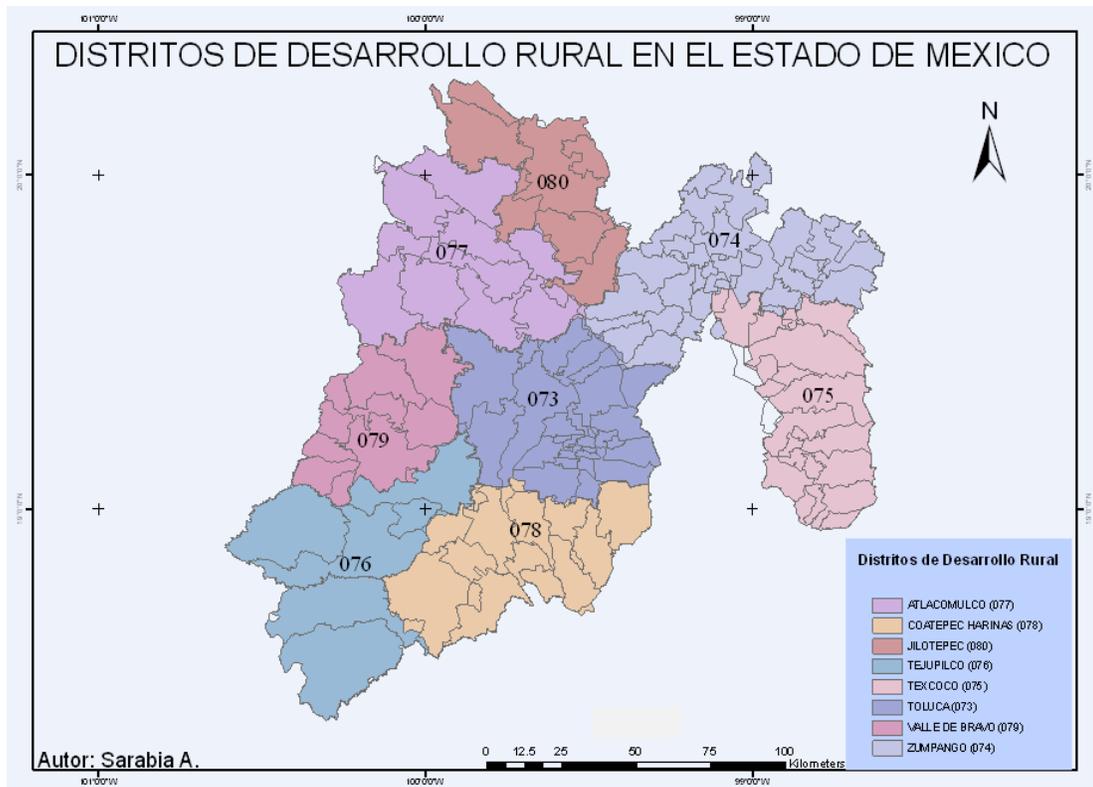


Figura 1. Distritos de Desarrollo Rural en el Estado de México

1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL DDR-TOLUCA

La zona en estudio se ubica en la parte central del estado de México y comprende una superficie de 3,026.03 kilómetros cuadrados, lo que representa 13% de la superficie total de la entidad (Orozco *et al.*, 1999).

El DDR-Toluca 073 se sitúa entre los 18° 59' 04" y los 19° 34' 54" de latitud norte y los 99° 14' 43" y 99° 56' 27" de longitud oeste (Orozco *et al.*, 1999), y se conforma por 24 municipios (limita al norte con los distritos 077 Atlacomulco y 074 Zumpango respectivamente, al sur con el distrito 078 Coatepec Harinas; al este con el Distrito Federal y al oeste con el distrito 079 Valle de Bravo y 076 Tejupilco al suroeste) (Figura 2).

El DDR-Toluca tiene una altitud media de 2,680 msnm (Peña *et al.*, 2004), Las oficinas centrales del distrito se localizan en el municipio de Zinacantepec. Además, dispone de nueve centros de apoyo al desarrollo rural (Caders), ubicados en los municipios de

Lerma, Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Tenango del Valle, Toluca, Temoaya, Santiago Tianguistenco, Mexicaltzingo y Xonacatlan, los cuales dan asistencia técnica a 24 municipios.

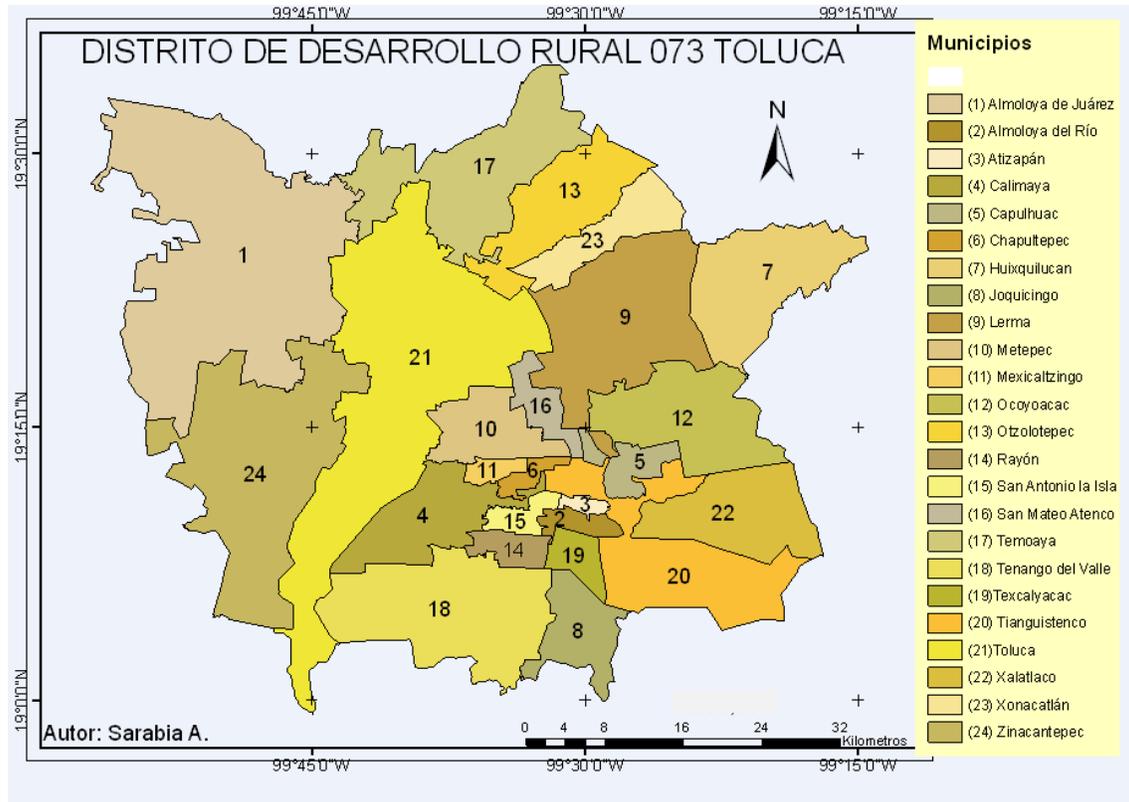


Figura 2. Distrito de Desarrollo Rural 073 Toluca

1.3 ALTIMETRÍA

El relieve del estado de México es sumamente accidentado; así, en la parte sur se localizan altitudes inferiores a los 1,000 msnm, mientras que en las sierras nevadas como las Cruces, Ajusco, Monte Alto, Monte Bajo, Nevado de Toluca y Sierra de Carimangacho se localizan a altitudes mayores a los 4,000 msnm (INEGI, 1997).

El DDR-Toluca 073, forma parte de la provincia del Eje Neovolcánico y de la subprovincia de los lagos y volcánes de Anáhuac. El territorio presenta un relieve variado; en la parte central localizada entre los 600 y 3,000 msnm se localiza una gran planicie que se dedica a la agricultura tanto de riego como de temporal, aún cuando existen elevaciones variadas (Figura 3).

Otra geoforma existente son los lomeríos localizados entre los 2,400 y 3,700 msnm, que corresponden a las partes bajas del Volcán Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces en donde se practica la explotación forestal. Las zonas montañosas del Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces; se ubican entre los 2,600 y 4,680 msnm y propician el desarrollo de bosques, así como la Sierra Nevada la cual se localiza a los 5,450 msnm (Orozco *et al.*, 1999).

Entre los paralelos 19° 00' y 19° 15' de latitud norte, sobresale un macizo con más de 5,000 msnm de altitud, con una orientación noroeste-sureste coronado en su parte sur por el Nevado de Toluca (Xinantécatl) 4,680 msnm, hacia el occidente, con dirección norte-sur y con una altitud de 4,578 msnm emerge la Sierra de Carimangacho (INEGI, 1997).

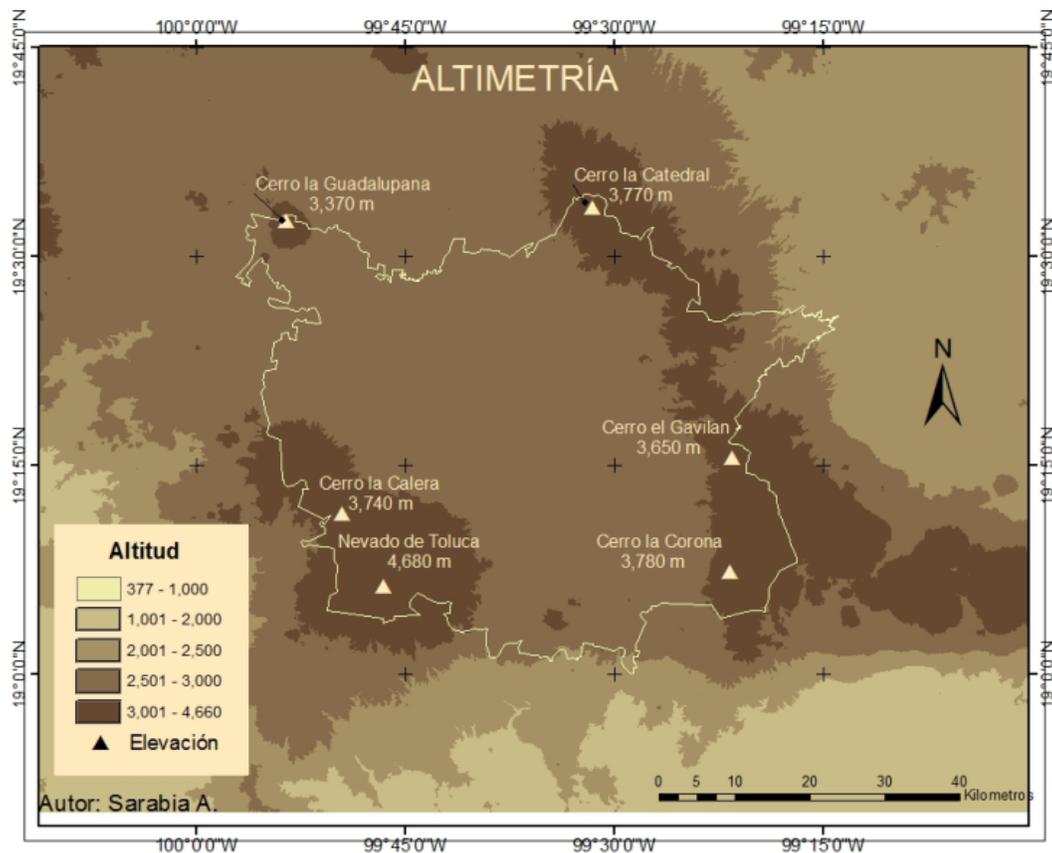


Figura 3. Altimetría

Fuente: INEGI, 2010.

1.4 HIDROGRAFÍA

El estado de México se encuentra comprendido por las regiones hidrológicas: la (RH) 12 “Lerma-Santiago”, que cubre la porción centro-oeste representa 25% de la superficie estatal, encontrándose en ésta la cuenca del Río Lerma-Toluca; la (RH) 18 “Balsas” ubicada en la parte sur y cubriendo 39.2% de la superficie estatal y se compone de las cuencas del río Atoyac, el río Balsas-Zirándaro, el río Grande de Amacuzac y el río Cutzamala; y la (RH) 26 “Pánuco” el cual, comprende 35.2% de la superficie estatal en la porción norte del estado, compuesto por la cuenca río Moctezuma (Cuadro 1).

Por otro lado, existen en la entidad federativa varios ríos, lagos y presas de importancia; con respecto a los ríos, cuyos escurrimientos anuales se estiman en 2,400 millones de metros cúbicos, son relevantes: Lerma, San Felipe, Temascaltepec, Sultepec e Ixtapan: en lo referente a lagos destacan; Zumpango, Texcoco y algunas presas importantes como José Antonio Alzate, Tepetitlán, Valle de Bravo, Villa Victoria, Huapango, Danxho y Guadalupe (INEGI, 1997).

Cuadro 1. Regiones y Cuencas Hidrológicas

Región		Cuenca		% Superficie estatal
Clave	Nombre	Clave	Nombre	
RH12	Lerma-Santiago	A	R. Lerma-Toluca	25.53
RH18	Balsas	A	R. Atoyac	0.47
		C	R. Balsas-Zirándaro	6.44
		F	R. Grande de Amacuzac	9.42
		G	R. Cutzamala	22.91
RH26	Pánuco	D	R. Moctezuma	35.23

Fuente: INEGI, Anuario Estadístico del Estado de México, Edición 2000

El territorio estatal drena sus aguas hacia tres grandes cuencas hidrográficas: Pánuco, Lerma y Balsas. La primera corresponde al curso de las pequeñas corrientes estacionales que proceden de la Sierra Nevada, la Sierra del Chichinautzin y el Monte de las Cruces; concurren a la cuenca de México para luego desembocar en el Golfo de México.

La cuenca del Lerma se origina en los manantiales de Almoloya del Río y forma parte del sistema Lerma-Chapala-Santiago, que confluyen hacia el Océano Pacífico. La tercera cuenca recibe aportaciones de diversos afluentes de la entidad y desemboca en el Pacífico (Orozco *et al.*, 2004).

El DDR-Toluca 073 pertenece en 90% a la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago, a la del río Balsas en 6% y a la del Alto Panuco en 4%. La primera región se compone por la cuenca Lerma-Toluca; la segunda, por el río Grande de Amacuzac y a la cuenca del río Cutzamala, y la tercera, por la cuenca del río Moctezuma (Gobierno del Estado de México/ Secretaria de Fomento Agropecuario y Agroindustrial, 1993) (Figura 4).

Por otro lado, en el DDR-Toluca destaca la presa Ignacio Ramírez, ubicada en Almoloya de Juárez, así como más de cien vasos auxiliares concentrados en Toluca, Temoaya, Oztotitlán y Almoloya de Juárez, principalmente (Orozco *et al.*, 2004).

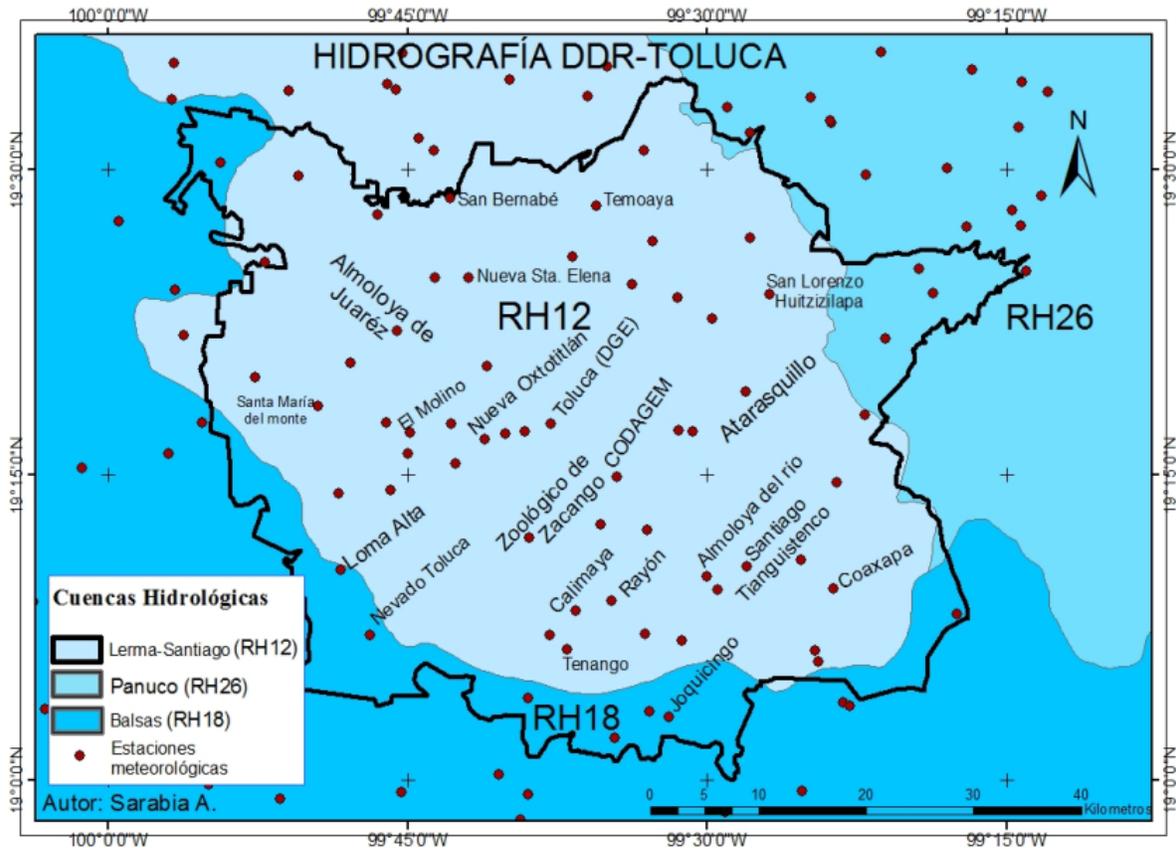


Figura 4. Hidrografía del DDR-Toluca

Fuente: Conabio, 2009

1.5 CLIMA

Por su ubicación en el Altiplano Mexicano, los climas predominantes en el estado de México son: cálidos y semicálidos; templados húmedos, subhúmedos y semifríos (Cuadro 2). Las variaciones climáticas son condicionadas por la diferencia en altitud, mismas que oscilan 1,130 a 4,558 msnm. El régimen de lluvias dominante es de verano; la precipitación media anual fluctúa entre los 500 mm en los distritos de Zumpango y Texcoco, hasta los 1,500 mm en los distritos de Toluca y Atlacomulco (Orozco *et al.*, 2004).

Entre la diversidad de climas que se presentan en el estado de México predomina el templado. Las temperaturas medias anuales en el sureste son mayores a 20° C, en tanto que en el centro y norte son inferiores a los 13° C. Los climas templados se concentran en los valles altos de las regiones norte, centro y este de la entidad, particularmente en las inmediaciones del Valle de México (INEGI, 1997).

El clima semifrío, se localiza en las regiones centro y este, principalmente en las cercanías de Toluca en menor grado se encuentran los climas cálidos y semicálidos, ubicados en el extremo sur, límites con el estado de Guerrero. El clima frío rige sólo en algunas zonas pequeñas en las partes más elevadas de la entidad como son el Nevado de Toluca y Popocatepetl.

Cuadro 2. Climas

Tipo y Subtipo	Símbolo	% Superficie estatal
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	A(w)	11.35
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	ACw	10.33
Templado subhúmedo con lluvias en verano	C(w)	61.19
Semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano	C(E) (m)	0.83
Semifrío subhúmedo con lluvias en verano	C(E) (w)	10.80
Semiseco templado	BS1k	5.30
Frío	E(T)	0.20

Fuente: INEGI, Anuario Estadístico del Estado de México, Edición 1995.

El clima predominante en la zona en estudio es el templado, aproximadamente en 80% de su superficie y su temperatura media anual varía entre 10 y 14° C; las precipitaciones van de los 800 a los 1,100 mm.

Por otro lado, los climas existentes en el resto de la superficie del área en estudio (aproximadamente 20%) son fríos y semifríos y se localizan en la parte suroeste del distrito, correspondiente a la porción del Nevado de Toluca. Estos climas también se localizan en el este, sureste y noreste de la región perteneciente a la Sierra de las Cruces (Figura 5).

En las regiones donde se localiza el clima frío, la temperatura media anual se encuentra entre -4 y 2° C con abundante precipitación (1,200 a 1,500 mm). Estas características climatológicas se presentan básicamente por la altitud a la que se encuentra, que corresponde a la parte más alta de la zona y va desde 4,000 a 4,680 metros de altura.

El otro tipo de clima existente es el semifrío, que se caracteriza por presentar temperaturas que oscilan entre 5 y 12° C y precipitaciones entre 1,000 a 1,500 mm; es una zona de transición donde se presenta la mayor parte de los lomeríos (Orozco *et al.*, 1999).

Cuadro 3. Climas DDR-Toluca

Tipo y Subtipo	Símbolo
Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18°C.	C (w ₁)
Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 y 18°C.	C (w ₂)
Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 y 12° C.	Cb' (w ₂)
Frío, temperatura media anual entre -2 y 5° C	E(T) CHw

Fuente: Conabio, 2009.

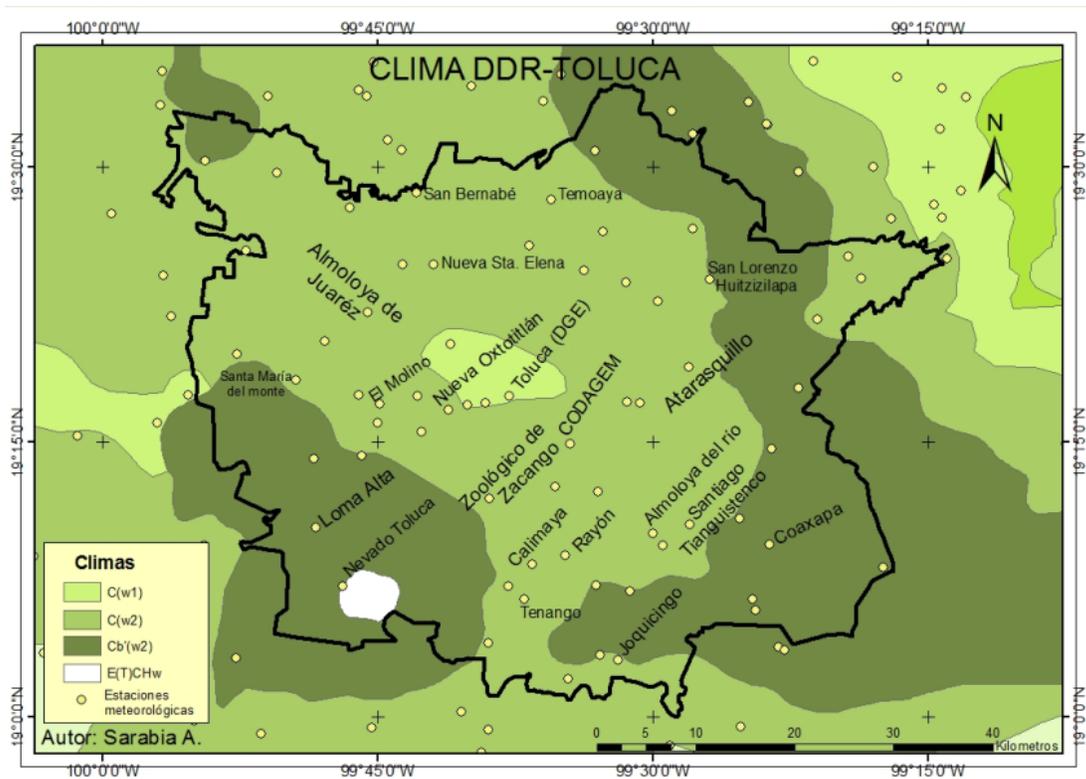


Figura 5. Clima DDR-Toluca

Fuente: Conabio, 2009

1.6 EDAFOLOGÍA

En el DDR-Toluca se identifican seis zonas, que resultan de la combinación de los diferentes componentes del medio natural, dando origen a diferentes unidades edáficas (Figura 8).

- **Zona plana de material volcánico**

Es una zona donde sobresalen las planicies con andosoles, fluvisoles, regosoles, luvisoles, cambisoles, planosoles, feozem y vertisoles; los tres primeros se utilizan básicamente para la agricultura de temporal, así como una pequeña porción a uso forestal. Los luvisoles, cambisoles y planosoles, localizados en el norte y noreste de la región, son destinados a la agricultura, obteniendo rendimientos moderados; se utilizan poco en la actividad forestal, también se acompañan de pastizales.

Los suelos que presentan mayor potencialidad agrícola son los feozem y los vertisoles, ya que son suelos aptos para el desarrollo de la agricultura; se localizan en la porción norte, noreste y noroeste de la región donde se establecen los dos tipos de agricultura: la de temporal, que se desarrolla principalmente en los suelos feozem, y la agricultura de riego, sustentada en los vertisoles; también existen pastizales (Orozco *et al.*, 1999).

- **Zona plana de depósitos aluviales**

Es la zona más importante por su extensión, ubicada en una zona plana que se compone de suelos con características de productividad de moderada a alta.

Las unidades edáficas con potencialidad media para el desarrollo de la agricultura son el cambisol y planosol, que se presentan en mínima cantidad; el uso principal que se les da en la zona es agrícola, aun cuando la actividad óptima que se debe desarrollar en estos suelos es la forestal y pecuaria.

Los feozem, histosoles y vertisoles están destinados a la agricultura de riego y temporal, proporcionando las condiciones edáficas necesarias para el desarrollo de cultivos. El suelo más importante es el feozem, ya que cubre la mayor parte del terreno, incluyendo la porción que se encuentra en la parte noreste de la región, específicamente en el municipio de Huixquilucan (Orozco, *et al.*, 1999).

- **Zona plana de depósitos lacustres**

Éstos corresponden a la porción noreste y sureste de la región; se caracterizan por presentar vegetación de tipo natural que se encuentra en los suelos feozem, histosoles, y vertisoles; éstos, a su vez, también son utilizados en la agricultura donde termina la vegetación tular, con resultados favorables debido a que contienen gran humedad.

Las tres zonas que se han descrito representan aproximadamente 80% de la superficie de la región, y existen condiciones favorables para el desarrollo de cultivos como maíz, haba, papa, avena forrajera, frijol y alfalfa (Orozco *et al.*, 1999).

- **Zona de material andesítico**

Se localiza en la parte suroeste del distrito y corresponde a la porción del Nevado de Toluca. También se encuentra en el este, sureste y noreste de la región perteneciente a la Sierra de las Cruces; propicia la existencia de suelos como andosoles, regosoles, cambisoles y luvisoles.

Los andosoles son los que cubren mayor área, encontrándose en la parte suroeste donde se acompañan de pequeñas porciones de regosoles, existe vegetación de alta montaña. La actividad que se desarrolla es la forestal, aunque también existen pequeñas porciones de pastizal; estos suelos también se encuentran al este, noreste y sureste, donde se les dan otros usos como el desarrollo de la agricultura, la actividad forestal y algunos pastizales para el uso pecuario. Estos suelos son de baja productividad debido principalmente a que contienen alto porcentaje de fósforo; además, son muy susceptibles a la erosión. Su uso óptimo debe ser el forestal o la introducción de pastizales utilizados en la ganadería.

Los suelos cambisoles y luvisoles se encuentran en pequeñas áreas localizadas al noreste de la región; se les da un uso agrícola y forestal principalmente, aunque también existen partes de pastizales; la agricultura que se practica en éstas posee rendimientos moderados (Orozco *et al.*, 1999).

- **Zona de tobas básicas, brechas volcánicas básicas y basaltos**

Estos tipos de materiales se encuentran integrados principalmente en una unidad geológica que se encuentra ubicada al sur, este, sureste que corresponde a la porción de la sierra de las Cruces y una pequeña parte ubicada al noroeste de la región, en el municipio de Almoloya de Juárez. Estos materiales originan suelos de tipo litosol, andosol, feozem y vertisol. En los dos primeros, las actividades principales que se desarrollan son la forestal y la agrícola, siendo la primera más apta, debido a las características del suelo, así como al clima semifrío que se presenta; en los suelos feozem y vertisol la actividad predominante es la agricultura, teniendo resultados favorables en su desarrollo debido a la composición que estos tipos de suelos presentan (ricos en materia orgánica y nutrientes) (Orozco *et al.*, 1999).

- **Zona de brecha sedimentaria**

Se localiza en las faldas del Nevado de Toluca; en la porción sureste del área, se presentan dos tipos de suelos, uno de ellos es el andosol, cuya superficie es ocupada por bosques y pastizales, así como agrícola (esta última con un bajo rendimiento); el otro tipo de suelo es el feozem, en donde la actividad que existe es la agricultura, cuyos resultados son favorables debido también a las condiciones imperantes del clima frío.

También es importante mencionar que la brecha sedimentaria es un material que se utiliza en la industria de la construcción, lo que justifica el hecho de que en los municipios de Toluca, Zinacantepec, Calimaya y Tenango se desarrolle la explotación minera (Orozco *et al.*, 1999).

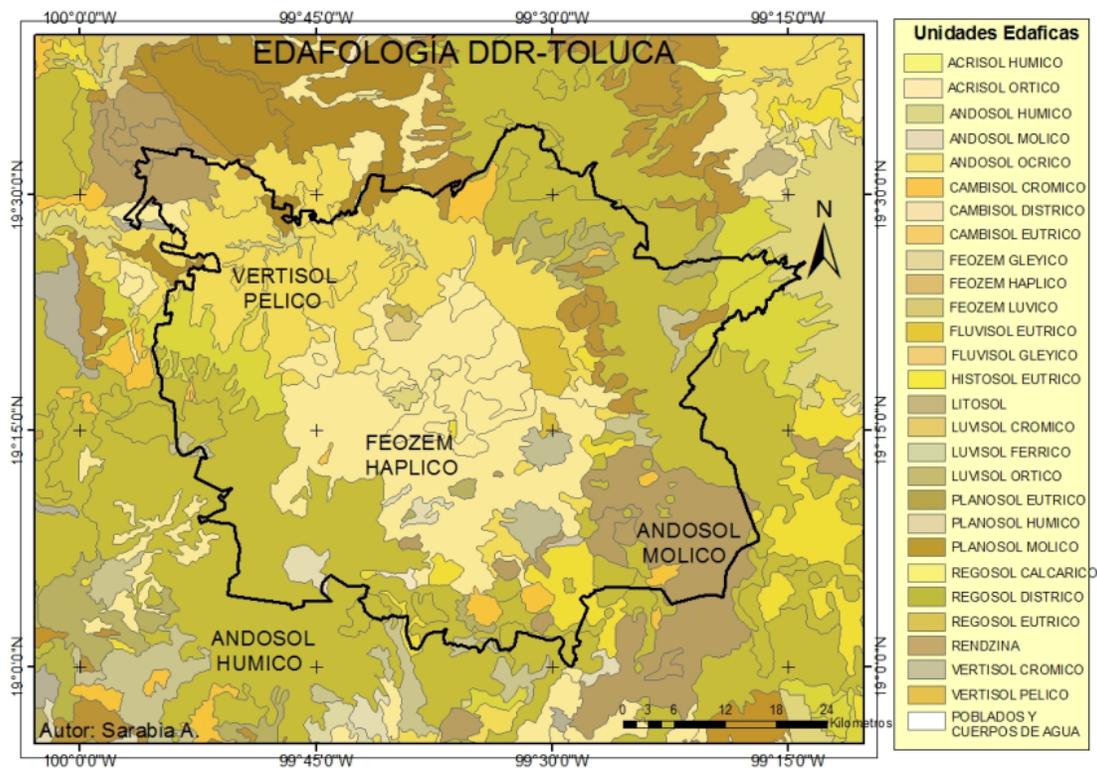


Figura 6. Edafología en el DDR-Toluca

Fuente: Conabio, 2009

En el DDR-Toluca imperan las unidades edáficas como: andosoles, fluvisoles, regosoles, luvisoles, cambisoles, planosoles, feozem y vertisoles (Figura 6); estos dos últimos son los más aptos para el desarrollo de la agricultura. Su distribución en el

distrito depende de la combinación de los diferentes componentes del medio natural como geología, clima y geomorfología.

1.9 USO DE SUELO

El uso de suelo en el estado de México se encuentra ocupado por la superficie agrícola, forestal y pecuaria, mismas que comprenden 85% de la superficie total de la entidad federativa (Figura 7), mientras que la mancha urbana abarca 4% de la superficie total de esta.

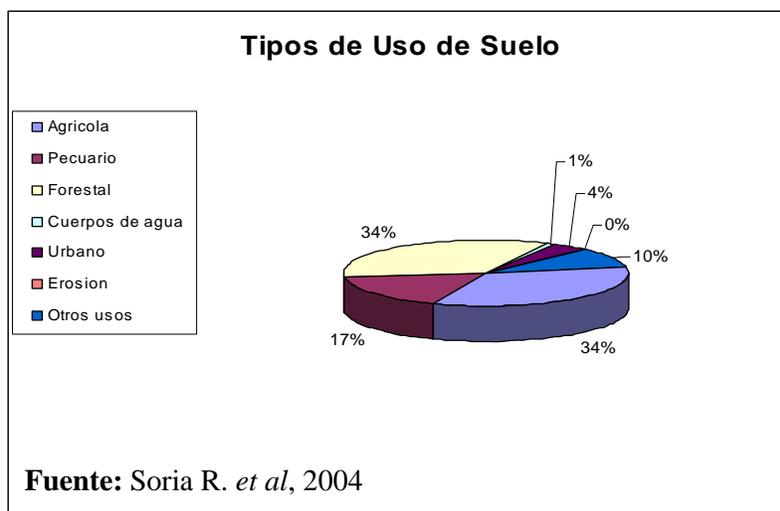


Figura 7. Tipos de Uso de Suelo

Por esta razón, esta entidad federativa es considerada como una de las más importantes en el sector agropecuario en México. Dentro del área en estudio del DDR-Toluca, el uso de suelo agrícola es el más importante ya que comprende 44.2% de la superficie total del distrito, seguido por la superficie forestal y pecuaria que abarcan 28.8% y 11.5% respectivamente. Estas tres coberturas ocupan casi 85% de la superficie del distrito (Figura 8).

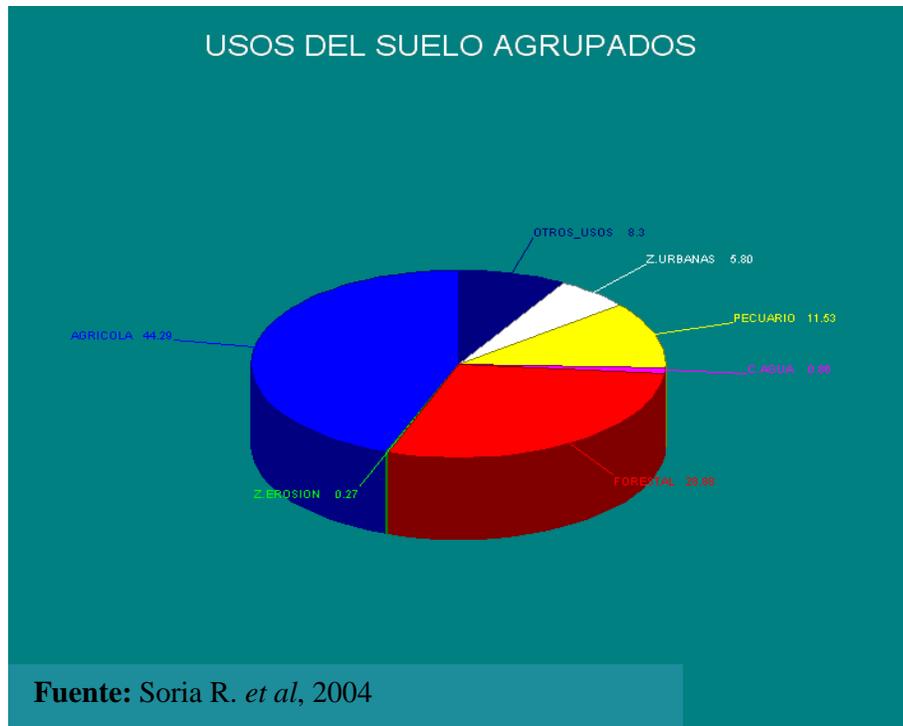


Figura 8. Uso de suelo DDR-Toluca (gráfica)

El uso de suelo agrícola en el DDR-Toluca comprende en números absolutos 132,340 hectáreas, sólo se encuentra por debajo del distrito de Atlacomulco que comprende 173,120 hectáreas de este mismo rubro en el año 2004 (Cuadro 4).

Cuadro 4: Uso de suelo DDR-Toluca, números absolutos y relativos

Tipo de superficie	Números absolutos (ha)	Números relativos (%)
Agrícola	132,340	44.29
Zona de erosión	801	0.27
Forestal	86,305	28.88
Cuerpo de agua	2,579	0.86
Pecuario	34,443	11.53
Zonas urbanas	17,345	5.80
Otros usos	25,013	8.3

Fuente: Soria R. *et al*, 2004

El DDR-Toluca es eminentemente una región maicera; 38.40% de la superficie de uso agrícola es ocupada por maíz, seguido por bosque de pino y pradera que abarcan 11.91 y 1.42% respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 5: Uso de suelo DDR-Toluca por cobertura, números absolutos y relativos

Tipo de superficie	Números absolutos (hectáreas)	Números relativos (%)
Maíz	115,271	38.40
Bosque de Pino	35,764	11.91
Pradera	34,297	11.42
Otros usos	21,699	7.23
Bosque de Pino-Encino	21,280	7.09
Bosque de Oyamel	21,205	7.06
Zonas urbanas	17,345	5.78
Trigo	8,234	2.74
Bosque de Encino	7,950	2.65
Avena	4,699	1.57
Zonas de inundación	3,303	1.10
Frijol	2,136	0.71
Cuerpos de agua	1,854	0.62
Papa	1,368	0.46

Fuente: Soria R. *et al.*, 2004

Dentro de los principales cultivos que se siembran en el DDR-Toluca destacan el maíz, seguido en importancia por los cultivos de trigo, avena, frijol, papa y cebada. La distribución espacial de dichos cultivos se localiza principalmente en el Valle de Toluca (Figura 9).

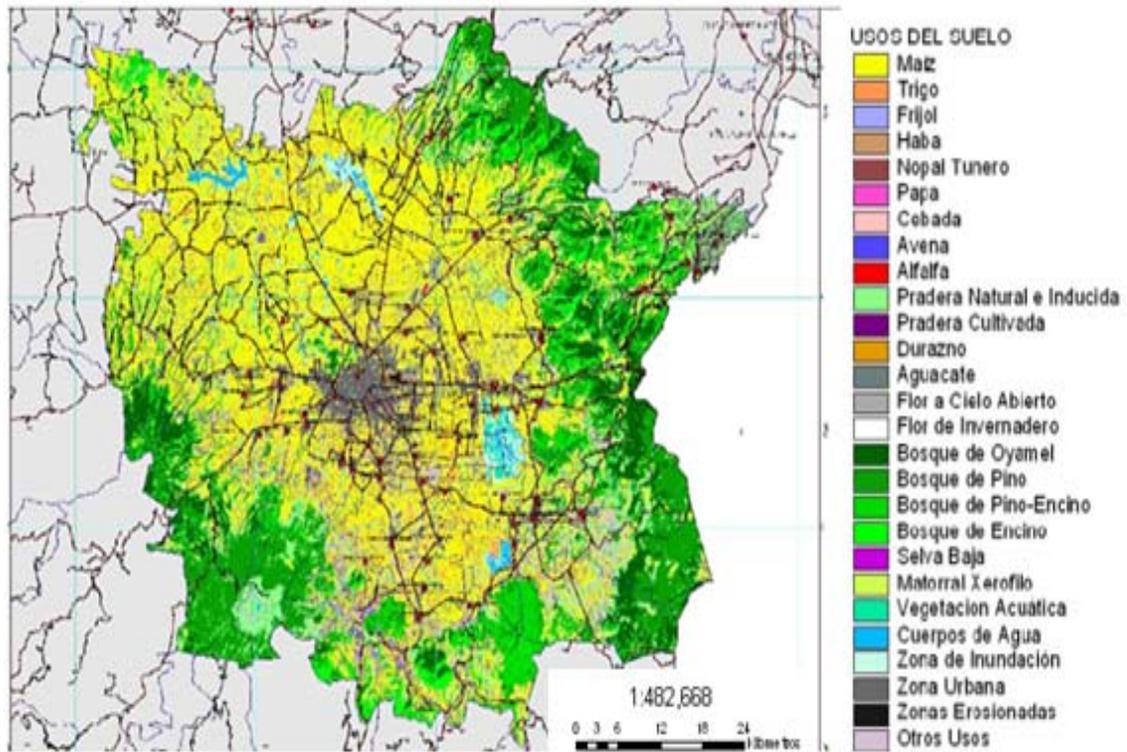


Figura 9. Uso de suelo DDR-Toluca (cartográfica)

Fuente: Soria *et al.*, 2004

CAPÍTULO 2. CULTIVO DEL MAÍZ EN EL DISTRITO DE DESARROLLO RURAL DE TOLUCA

2.1 MAÍZ EN EL SECTOR AGROPECUARIO NACIONAL

El maíz es el cultivo más importante en México desde el punto de vista alimentario, industrial, político, social y respecto al volumen de producción. La tasa media anual de crecimiento (TMAC) de 1996 a 2008 fue de 2.0%, no obstante los decrementos registrados en 2002 y 2005 (-4.1 y -10.8% respectivamente) según cifras del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), institución que es el órgano desconcentrado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) y es la encargada de diseñar y coordinar la operación del Sistema Nacional de Información del Sector Agroalimentario y Pesquero en México. Por tal motivo, la información estadística citada en el presente capítulo es proveniente de dicho organismo.

La TMAC de avena también tuvo un comportamiento positivo de 0.7%. En contrapartida, el sorgo, el arroz y el trigo tuvieron una TMAC en su producción de -2.0, -1.8 y -0.4%, en ese orden (Cuadro 6).

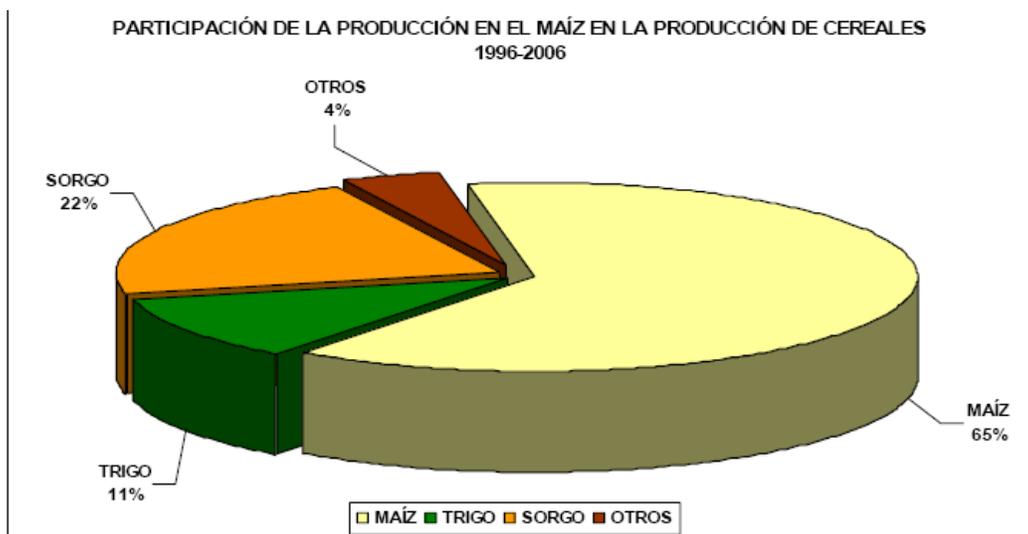
Cuadro 6. Volumen de la producción nacional de los principales cereales en el periodo 1996-2008 (miles de toneladas)

Año	Maíz	Trigo	Sorgo	Cebada	Arroz	Avena
1996	18,026.0	3,375.0	6,809.5	585.8	394.1	121.5
1997	17,656.3	3,656.6	5,711.6	470.7	469.5	96.5
1998	18,456.4	3,235.1	6,474.8	410.8	458.1	88.8
1999	17,708.2	3,020.9	5,720.3	454.1	326.5	133.1
2000	17,559.0	3,493.2	5,842.3	712.6	351.4	32.5
2001	20,134.3	3,275.5	6,566.5	761.6	226.6	88.9
2002	19,299.1	3,236.2	5,205.9	736.6	227.2	60.1
2003	20,703.1	2,715.8	6,759.1	1,081.6	273.3	94.1
2004	21,689.0	2,321.2	7,004.4	931.5	278.5	98.9
2005	19,341.0	3,015.2	5,524.4	760.7	291.1	127.1
2006	21,962.6	3,249.0	5,504.3	856.6	331.6	130.3
2007	23,512.7	3,515.3	6,202.9	653.0	294.6	124.6
2008	24,410.2	4,213.5	6,593.0	781.1	224.3	148.1
TMAC	2.0	-0.4	-2.0	3.8	-1.8	0.7

Fuente: Sistema de Información Agroalimentaria y de consulta (Siacon-SIAP)

Por otra parte, se observa que la participación del volumen obtenido del maíz en la producción de cereales es creciente. En 1996, la participación del maíz fue de 61.5% mientras que en 2002 su contribución alcanzó 67%, en tanto que 2006 llega a su máximo nivel alcanzado en el periodo que se analiza: 68.6% de la producción total de cereales (SIAP, 2007).

Comportamiento diferente tiene el sorgo, cultivo sustituto del maíz con respecto al uso pecuario, ya que el sorgo registra una participación decreciente en el periodo que nos ocupa al pasar de 23.2% en 1996 a 18.1% en el 2008. Se observa que los cinco puntos porcentuales que aumentó el maíz en su participación dentro de los principales cereales que se producen en el país, los disminuyó el sorgo (Figura 10).



FUENTE: Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. (SIACON-SIAP)

Figura 10. Participación del maíz en la producción de cereales.

2.1.1 Principales entidades federativas productoras de maíz en el año 2008

Durante el año agrícola 2008, nueve entidades federativas registraron una producción mayor de un millón de toneladas de maíz, de las cuales el estado con mayor producción fue Sinaloa, con 5,368,861 ton, lo cual representó el 21.99% de la producción nacional, seguido por los estados de Jalisco y México, los cuales representaron 13.1 y 7.7% respectivamente (Cuadro 7).

Cuadro 7. Entidades con mayor producción de maíz de temporal y riego en 2008.

Entidad Federativa	Sup. Sembrada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Sup. Siniestrada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
Sinaloa	606,916	582,761	24,155	5,368,861	9.21
Jalisco	605,917	588,883	17,033	3,205,017	5.44
México	559,920	557,745	2,175	1,902,018	3.98
Chiapas	699,921	693,497	6,423	1,625,349	2.34
Michoacán	469,373	458,002	11,371	1,608,916	3.51
Guanajuato	396,360	355,184	41,176	1,499,194	4.22
Guerrero	481,718	478,530	3,188	1,403,046	2.93
Veracruz	595,067	555,721	39,345	1,330,344	2.39
Puebla	594,039	547,248	46,791	1,020,642	1.86
Chihuahua	228,263	200,171	28,092	829,904	4.15

Fuente: SIAP, Anuario Agropecuario, 2009

El estado de Chiapas registró la mayor superficie sembrada en 2008, con 699,921 has, así como la mayor superficie cosechada con 693,497 ha; lo anterior, sin embargo, no se vio reflejado en la producción total, ya que Sinaloa, Jalisco y México, tuvieron una menor superficie sembrada y cosechada, superaron en producción a Chiapas, debido a los bajos rendimientos registrados (sólo 2.34 ton/ha).

El mayor rendimiento de este cereal se registró desde la primera mitad de la década de 1990 en el estado de Sinaloa. Durante los últimos veinte años esta entidad federativa ha obtenido rendimientos agrícolas muy similares a los que existen en los países desarrollados, con 9.21 ton/ha en el año 2008. El estado que registró el segundo mayor rendimiento fue el estado de Jalisco, con 5.44 ton/ha, lo cual representó 41% menos rendimiento en su superficie agrícola con respecto a Sinaloa, lo que denota un alto grado de tecnificación del espacio agrícola, mientras que la mayor parte de las entidades federativas en México manejan una modalidad agrícola poco tecnificada o de temporal.

La modalidad agrícola del cultivo del maíz imperante en México se sitúa en la agricultura de temporal (Cuadro 8), la cual carece de elementos biotecnológicos, como

riego, semillas mejoradas y maquinaria agrícola, lo que conlleva un bajo rendimiento y una completa exposición a las variaciones climáticas.

**Cuadro 8. Entidades federativas con mayor producción de maíz en 2008
(modalidades riego y temporal)**

Entidad Federativa	Modalidad riego (ton)	Modalidad temporal (ton)	Producción total (ton)
Sinaloa	5,292,859	76,002	5,368,861
Jalisco	250,713	2,954,303	3,205,017
México	426,223	1,475,794	1,902,018
Chiapas	36,411	1,588,938	1,625,349
Michoacán	535,430	1,073,485	1,608,916
Guanajuato	935,115	564,079	1,499,194
Guerrero	123,123	1,279,922	1,403,046
Veracruz	21,545	1,308,799	1,330,344
Puebla	189,431	831,210	1,020,642
Chihuahua	715,661	114,243	829,904

Fuente: SIAP, 2009

El estado de Sinaloa encabezó la producción de maíz en el año 2008 en la modalidad de riego, ya que el 98.5% de la producción de este cereal se llevó a cabo dentro de esta modalidad. También destacaron en este aspecto Chihuahua y Guanajuato, con 86.2 y 62.3% respectivamente.

Sinaloa debe en gran medida la alta tecnificación de su espacio agrícola a la política agraria que se ha llevado a cabo en México, ya que se han concentrado los recursos en pocos estados, zonas y productores. Los resultados obtenidos por el programa de apoyo a la comercialización de maíz en 1998, muestran que 61.19% del apoyo lo absorbió el estado de Sinaloa, seguido por Jalisco con 5.99% y Tamaulipas con 4.55%; mientras que los estados de México, Nuevo León y Chiapas percibieron sólo el 2.6, 1.0 y 1.66%, respectivamente (Aserca, 1999, datos citados por Orozco *et al.*, 2009). Esta política no cuenta con recursos suficientes y los disponibles se distribuyen selectivamente, promoviendo relaciones a clientes entre autoridades y beneficiarios.

Por otro lado, la modalidad de temporal que se lleva a cabo en la mayoría del espacio agrícola en la República Mexicana, tuvo como principal productor al estado de Jalisco en 2008, con 2,954,303 ton, lo que representó 92.1% de la superficie agrícola destinada al cultivo del maíz en esta modalidad; no obstante la baja tecnificación del espacio agrícola en Jalisco, ésta obtuvo los más elevados rendimientos de la agricultura de temporal en México, con 5.44 ton/ha.

Dentro de la agricultura de temporal también destacaron los estados de Chiapas y México. En el primer caso, se situó como el segundo mayor productor de maíz en la modalidad de temporal en México. Chiapas obtuvo una gran producción de maíz debido a que registró la mayor superficie agrícola destinada al cultivo del maíz a nivel nacional. Sin embargo, tuvo rendimientos muy bajos situándose en las 2.34 ton/ha. En el segundo caso, el estado de México se ubicó en la tercera posición, con 1,475,794.00 toneladas, lo cual representó 77.5% de la producción de maíz dentro de esta modalidad, y registró uno de los rendimientos más altos a nivel nacional, con 3.25 ton/ha.

2.1.2 Producción agrícola en el estado de México durante el período 1999-2008.

Durante el período 1999-2008 en el estado de México, la superficie agrícola ocupó un promedio de 777,878.0 hectáreas, de las cuales fueron destinadas en promedio para el cultivo del maíz alrededor de 582,075.2 ha, lo que indicó que dentro de este período, el estado de México destinó el 74.8% de su superficie agrícola exclusivamente al cultivo del maíz, lo que lo convierte en un estado evidentemente maicero (SIAP, Anuario Estadístico 2008).

Por otro lado, el estado de México enfrenta problemas de reducción de su superficie destinada a la agricultura, ya que en 1999 la superficie agrícola en esta entidad tenía 788,181.0 ha, y para el año 2008 esta registró 762,330.0 ha. En el período 1999-2008, la superficie sembrada presentó una reducción de 3.3%, y en la segunda mitad de este período no se alcanzó la cobertura de la superficie agrícola que existió en el primer lustro de este lapso.

Derivado de la reducción de la superficie agrícola en el estado de México, la superficie del cultivo del maíz también presentó disminución, lo que se vio reflejado en los

distritos de desarrollo rural, ya que la mayoría presentaron una reducción en su superficie maicera durante el período 1999-2008 (Cuadro 9).

Cuadro 9. Superficie sembrada de maíz (ha) de temporal y riego por DDR en el estado de México (1999-2008)

DDR	Toluca	Zumpango	Texcoco	Tejupilco	Atacomulco	Coatepec	Valle de Bravo	Jilotepec
1999	139,543	55,390	44,450	51,460	162,170	43,459	63,618	43,040
2000	138,813	49,855	45,412	52,021	153,734	41,563	62,910	44,154
2001	141,734	44,620	46,235	52,033	172,479	41,810	63,315	43,674
2002	140,042	40,557	37,265	52,890	166,829	41,059	62,722	37,114
2003	139,086	49,836	41,060	56,443	157,685	39,664	61,702	46,084
2004	138,122	50,704	39,628	50,532	162,380	39,333	61,958	47,760
2005	132,743	36,453	38,150	50,611	154,121	37,413	57,181	34,935
2006	136,459	48,790	37,767	49,230	165,402	34,034	56,371	51,565
2007	135,036	53,767	35,912	49,690	165,731	33,851	57,200	50,465
2008	134,343	53,871	34,116	49,771	159,252	30,548	49,692	48,325
Prom.	137,592	48,384	39,999	51,468	161,978	38,273	59,666	44,711

Fuente: SIAP, 2009

Los distritos agrícolas más importantes en la aportación de superficie agrícola promedio durante el período 1999-2008 fueron Toluca y Atacomulco, con 137,592.0 y 161,978.0 ha respectivamente, lo cual representó 54.1% de la superficie promedio sembrada de maíz en el estado de México, denotando el papel fundamental que llevan a cabo estos distritos en el cultivo del maíz dentro de esta entidad federativa. Sin embargo, estos distritos agrícolas tuvieron reducciones dentro de su superficie maicera durante el período 1999-2008, siendo más acentuada esta circunstancia en el distrito de Toluca, el cual presentó un decrecimiento durante este periodo debido a la expansión de la mancha urbana principalmente.

Por otro lado, los distritos que han llevado a cabo la mayor producción de este cereal son también Atacomulco y Toluca, con una producción promedio durante el período 1999-2008 de 540,752.0 y 519,420.0 toneladas respectivamente. La producción

registrada en estos distritos agrícolas representó 56.5% de la producción promedio total durante el período (Cuadro 10).

Cuadro 10. Producción de maíz (ton) de temporal y riego por DDR en el estado de México (1999-2008)

DDR	Toluca	Zumpango	Texcoco	Tejupilco	Atlacomulco	Coatepec	Valle de Bravo	Jilotepec
1999	638,390	121,996	176,679	164,636	621,908	167,412	236,023	66,459
2000	501,716	185,494	119,887	135,196	439,174	93,860	148,234	134,146
2001	665,226	137,577	151,134	153,504	726,901	124,233	197,394	128,710
2002	574,048	109,778	75,501	130,079	704,310	99,576	174,696	108,796
2003	489,260	148,346	104,514	174,902	508,906	112,233	208,706	176,539
2004	411,220	154,926	97,213	127,164	473,249	107,062	178,668	131,366
2005	302,959	84,544	86,247	139,723	327,151	81,018	86,894	102,895
2006	536,351	136,527	107,915	164,676	463,618	91,407	153,631	147,202
2007	545,006	136,972	118,001	172,113	580,639	102,217	175,452	172,298
2008	530,032	130,564	110,004	153,956	561,670	86,666	179,490	149,632
Prom.	519,420	134,672	114,709	151,594	540,752	106,568	173,918	131,804

Fuente: SIAP, 2008

No obstante los altos promedios que registraron en producción los distritos de Atlacomulco y Toluca, éstos presentaron una tendencia descendente a lo largo de este período, en el primer caso, el distrito agrícola de Atlacomulco no alcanzó los mismos niveles de producción que se registraron durante el primer lustro de este período, los cuales sobrepasaron las 700,000.0 ton en los años 2001 y 2002, ya que para el segundo lustro de este periodo los máximos niveles de producción se situaron en 580,639.0 ton en el año 2007. En el segundo caso, el distrito de Toluca no alcanzó los máximos niveles de producción que se situaron en el primer lustro de este período, los cuales se ubicaron por encima de las 600,000.0 ton, presentando una situación análoga con respecto al distrito agrícola de Atlacomulco.

El descenso generalizado en la producción de maíz en los DDR a lo largo del período 1999-2008, fue consecuencia de dos aspectos: por un lado, la disminución de la

superficie destinada al maíz en el estado de México y, por otro lado, la ocurrencia de fenómenos climatológicos que afectaron a los cultivos, principalmente en 2005, en el cual se registró una intensa sequía que afectó a gran parte del país en el ciclo comprendido de mayo a agosto, lo cual provocó un descenso de 40.6% en la producción de maíz a nivel nacional, comparado con los datos registrados en el ciclo agrícola anterior (SIAP, 2009).

2.2 SUPERFICIE AGRÍCOLA DE RIEGO Y TEMPORAL, DESTINADA AL CULTIVO DEL MAÍZ EN EL DISTRITO DE TOLUCA, PERÍODO 1999-2008

El DDR-Toluca posee una de las mayores superficies agrícolas destinadas al cultivo del maíz en el estado de México. Solamente se encuentra por debajo del distrito agrícola de Atlacomulco. El DDR-Toluca contribuyó en promedio con 23.6% de la superficie en el periodo 1999-2008 (SIAP, 2008).

Durante el período 1999-2008 la superficie agrícola promedio registrada fue de 150,818.0 ha de las cuales 137,592.0 ha fueron empleadas para maíz, lo cual representó 91.2% de la superficie total (Cuadro 11).

Cuadro 11. Superficie agrícola total *versus* superficie sembrada con maíz en el DDR-Toluca.

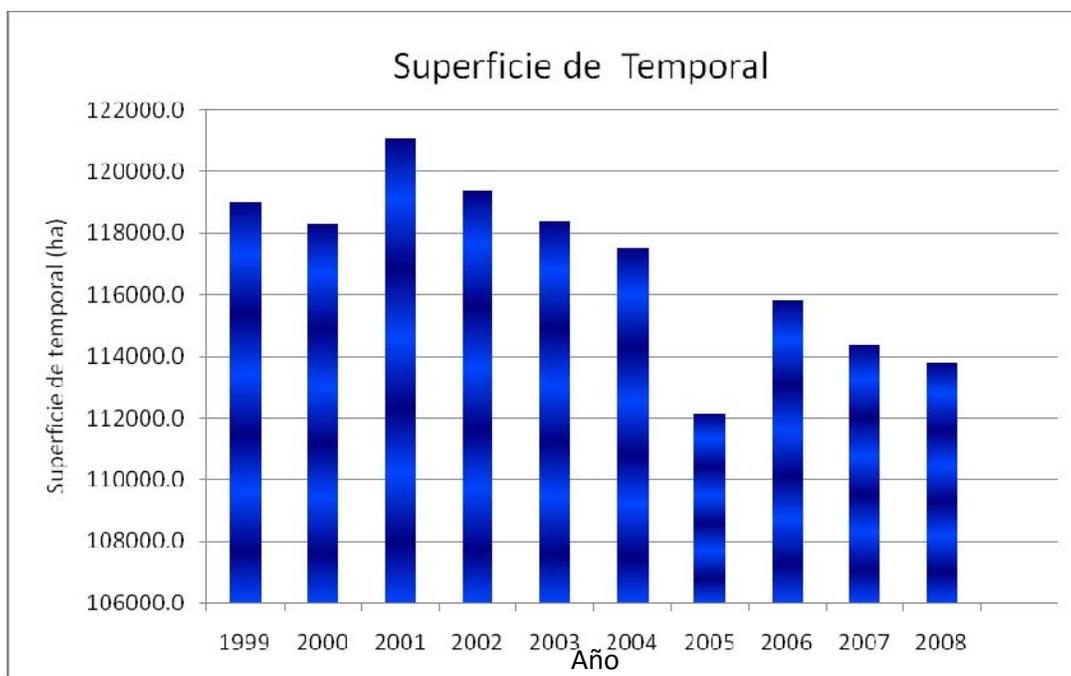
Año	Superficie Agrícola Total (ha)	Superficie sembrada con cultivo de maíz (ha)
1999	151,678	139,543
2000	150,652	138,813
2001	151,779	141,734
2002	151,460	140,042
2003	151,082	139,086
2004	151,455	138,122
2005	148,760	132,743
2006	150,606	136,459
2007	150,505	135,036
2008	150,212	134,343
Prom.	150,818	137,592

Fuente: SIAP, Anuario Estadístico 2008.

La superficie agrícola en el DDR- Toluca presentó reducciones durante el período 1999-2008. Sin embargo, esto se acentuó aun más en la superficie destinada al cultivo del maíz, ya que registró ocho años de reducción, llegando a ser la superficie sembrada significativamente menor durante la segunda mitad de este período con respecto al primero.

La agricultura de temporal es la modalidad imperante en el DDR-Toluca, ya que durante el período 1999-2008, de las 137,592.0 hectáreas sembradas en promedio con el cultivo del maíz, solamente 116,982.5 ha se sembraron en la modalidad de temporal, lo que representó 85% de la superficie (Figura 11).

Figura 11. Superficie sembrada en la modalidad de temporal, en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca, período 1999-2008.

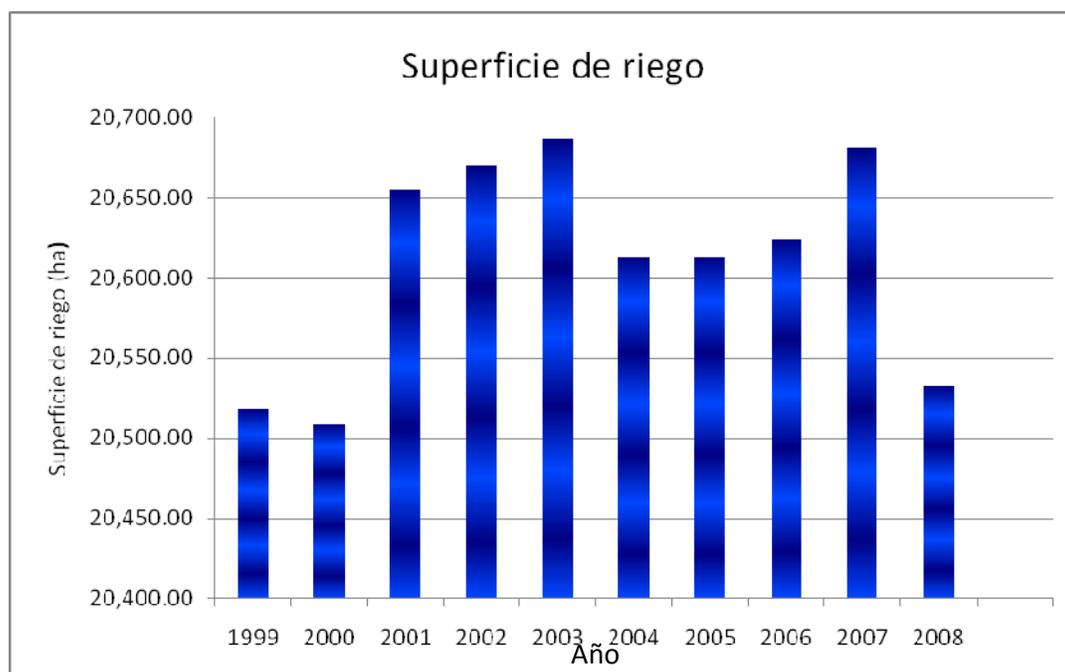


Fuente: SIAP, 2010

Durante el período 1999-2008 la superficie de temporal se redujo en promedio 4.7%, siendo la menor superficie registrada en 2005 (SIAP, 2007). La modalidad de riego ha tenido poca presencia históricamente en el distrito agrícola de Toluca. En el período 1999-2008, 137,592.0 ha fueron sembradas en promedio con maíz, de las cuales

20,610.0 fueron cultivadas bajo riego, lo cual representó 15% de superficie sembrada dentro de esta modalidad (Figura 14).

Figura 12. Superficie sembrada en la modalidad de riego, en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca, período 1999-2008



Fuente: SIAP, 2010

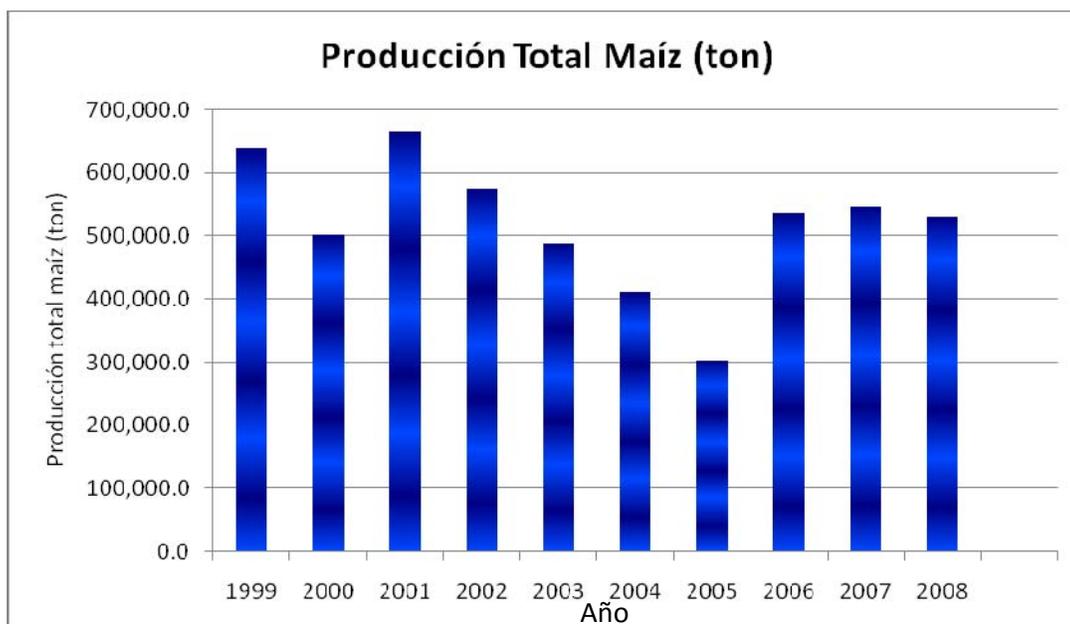
2.3 PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN EL DISTRITO AGRÍCOLA DE TOLUCA, PERÍODO 1999-2008

El DDR-Toluca ocupó el segundo lugar como mayor productor en el estado de México durante el período 1999-2008, sólo por debajo de Atlacomulco, la producción promedio anual durante este período fue de 519.420.0 ton, lo que representó 27.7% de la producción total de maíz durante este ciclo.

Durante el período 1999-2008, la producción de maíz alcanzó sus niveles más altos en la primera y última parte de este ciclo, ya que en los años intermedios la producción decayó, situándose en su nivel más bajo en el año 2005, con 302,959.0 toneladas. No obstante la evidente recuperación de la producción entre los años 2006 y 2008, la cual

superó las 500,000.0 ton, no alcanzó los niveles de producción de los años 1999 y 2001, en los cuales la producción se situó por arriba de las 600,000.0 toneladas (Figura 13).

Figura 13. Producción total de maíz en el DDR-Toluca, período 1999-2008

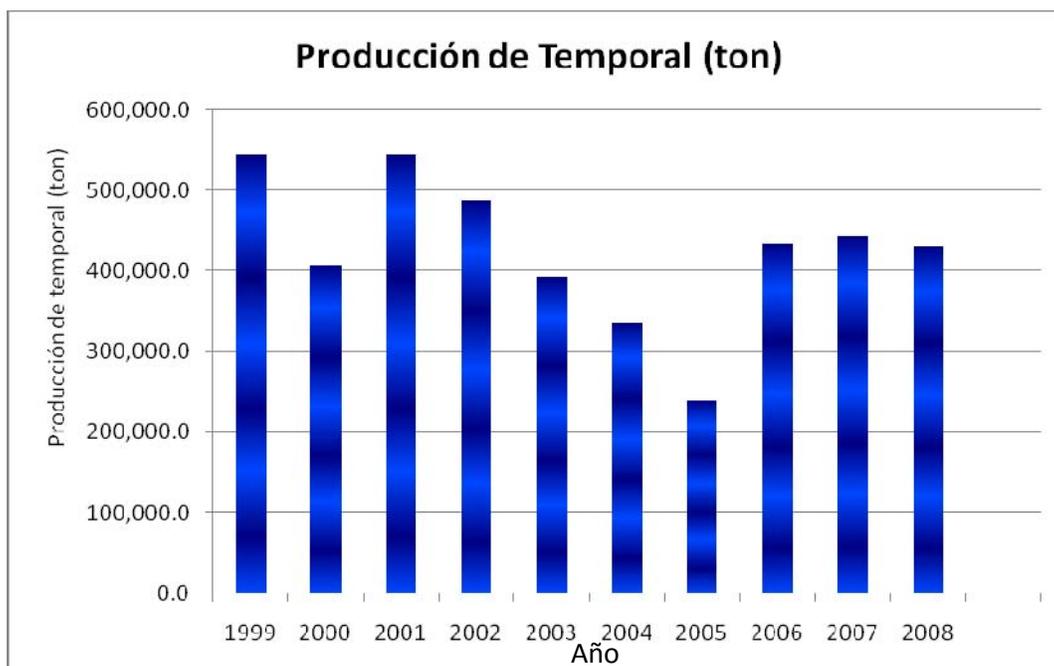


Fuente: SIAP, Anuario Estadístico 2008

Por otro lado, la producción de maíz de temporal fue la modalidad más representativa, ya que de las 519,420.0 toneladas producidas en promedio dentro de las dos modalidades, 425,942.4 toneladas fueron cosechadas en la superficie de temporal, lo cual representó 82% de la producción total del cultivo del maíz dentro de este distrito.

La producción de maíz de temporal tuvo su mayor crecimiento durante los primeros y últimos años de este período, para el año 2005 registró una baja producción, de solo 239,478.5 toneladas, lo que representó una reducción de 28.7% comparado con los datos registrados en el ciclo homólogo anterior (Figura 14). Esta acentuada reducción fue el resultado de una intensa sequía que se presentó en la mayor parte de la República Mexicana, la cual puso de manifiesto el nivel de siniestro que pueden ocasionar las variaciones climáticas dentro de la agricultura de temporal (SIAP, 2010).

Figura 14. Producción de maíz de temporal, DDR-Toluca, período 1999-2008

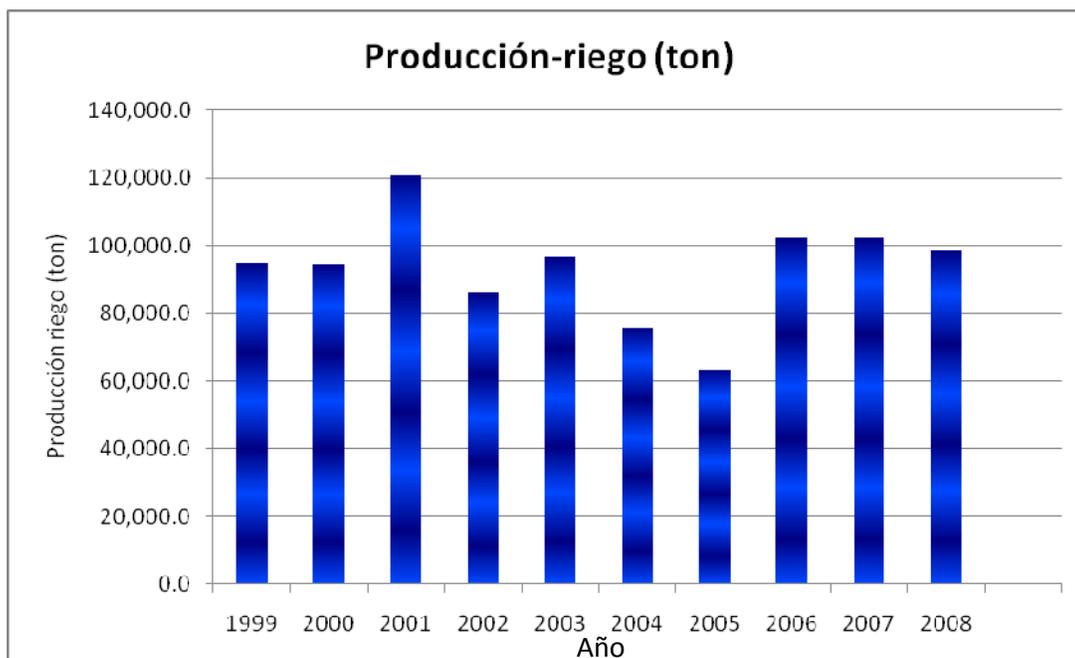


Fuente: SIAP, Anuario Estadístico 2008

Por otro lado, la modalidad de riego tiene poca representación en la producción de maíz en el distrito agrícola de Toluca. Esta modalidad produjo en promedio 93,478.7 ton durante el periodo 1999-2008, niveles de producción que denotan una mayor productividad agrícola respecto a la de temporal, ya que con 15% de la superficie destinada al cultivo del maíz dentro de la modalidad de riego, se obtuvo en promedio 18% de la producción en el distrito agrícola de Toluca.

La evolución en la producción en la modalidad de riego durante el período 1999-2008 presentó fluctuaciones, registró cuatro años con crecimiento y cinco con reducción. Sin embargo, presentó las mismas anomalías en la producción durante los mismos años que en la agricultura de temporal, con los mayores índices de producción situados durante los primeros y últimos años de este período (Figura 15).

Figura 15. Producción de maíz de riego, DDR-Toluca, periodo 1999-2008



Fuente: SIAP, Anuario Estadístico 2008

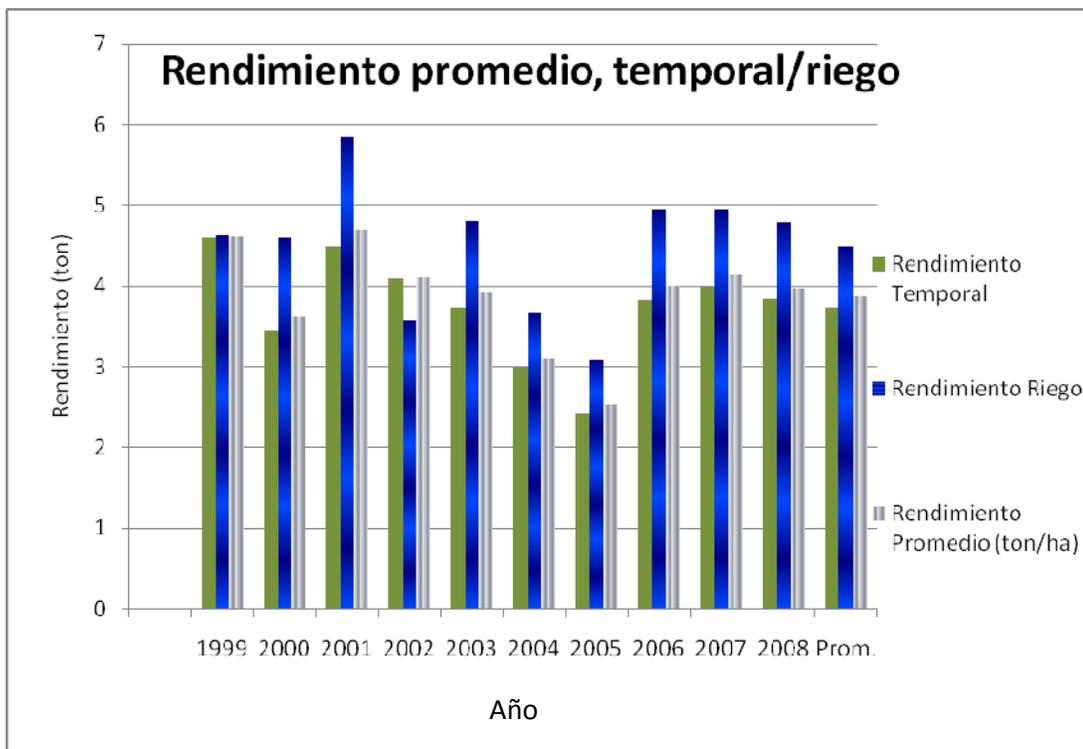
No obstante las fluctuaciones análogas que presentaron en la producción las modalidades de temporal y de riego, esta última no registró una caída tan acentuada en la producción en el año 2005, ya que con la intensa sequía ésta se redujo en 16.2%, mientras que en la modalidad de temporal la reducción fue de -28.7% (este decremento es el resultado de la comparación con el ciclo homólogo anterior, en este caso 2004). Por lo tanto, la producción de maíz en la agricultura de temporal disminuyó 12.5% más con respecto a la agricultura de riego. Esto denota que la agricultura de temporal se encuentra doblemente expuesta a la variabilidad climática.

2.4 RENDIMIENTO DEL MAÍZ EN EL DISTRITO AGRÍCOLA DE TOLUCA, PERÍODO 1999-2008.

El rendimiento promedio de maíz de riego y temporal fue de 3.87 ton/ha durante el período 1999-2008 en el distrito agrícola de Toluca, lo que representó uno de los rendimientos más elevados en la República Mexicana, situándose muy por encima del rendimiento promedio a nivel nacional, el cual se ubicó en 2.82 ton/ha. durante este mismo periodo (SIAP, 2007).

No obstante los altos rendimientos registrados durante este período en el distrito agrícola de Toluca, hubo grandes variaciones entre los ciclos agrícolas, registrándose los rendimientos más altos en los primeros años de este período, destacando principalmente el año 2001 con 4.70 toneladas por hectárea, mientras que los niveles más bajos se ubicaron durante la mitad de este ciclo, en particular en 2005 con 2.53 ton/ha. En los últimos tres años de este período se registró una recuperación en el rendimiento con respecto a los años intermedios, en que la productividad del cultivo del maíz no alcanzó los niveles de rendimiento que se registraron en los primeros años del período 1999-2008 (Figura 16).

Figura 16.- Rendimiento promedio, temporal y de riego, en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca en el periodo 1999-2008



Fuente: SIAP, Anuario Estadístico 2008

El rendimiento agrícola dentro de la agricultura de temporal presentó acentuadas fluctuaciones durante varios ciclos agrícolas en el período 1999-2008, ya que en los primeros años de este período los rendimientos sobrepasaron las cuatro toneladas por hectárea. Sin embargo, durante los años intermedios, la productividad disminuyó de

manera importante, ubicándose el rendimiento más bajo en el año 2005 con 2.42 ton/ha, lo cual representó una disminución de 19.1% con respecto al año 2004. Durante los últimos tres años del período 1999-2008, la productividad del cultivo del maíz tuvo un incremento con respecto a los años intermedios, el cual se situó por arriba de las 3.8 toneladas por hectárea. Sin embargo, los rendimientos no alcanzaron los mismos niveles que se registraron en los primeros años de este periodo.

Por otro lado, la agricultura de riego tuvo un rendimiento promedio significativamente mayor; con 4.49 ton/ha, mientras que el rendimiento promedio dentro de la agricultura de temporal fue de 3.74 ton/ha durante el periodo 1999-2008. Sin embargo, la modalidad de agricultura de riego no estuvo exenta de fluctuaciones en los rendimientos agrícolas, ya que presentó severas afectaciones en la productividad durante los años en los cuales acontecieron sequías, principalmente en el año 2005, en el cual tuvo un descenso de 16.1% con respecto al año 2004. No obstante, presentó menor reducción del rendimiento agrícola en comparación con la modalidad de temporal durante el mismo ciclo agrícola.

Los mayores rendimientos en la modalidad de riego, se registraron durante los últimos tres años del período 1999-2008, en los cuales el rendimiento promedio se ubicó en 4.9 ton. / ha, una productividad agrícola sin precedentes en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca.

CAPITULO 3. EL CULTIVO DEL MAÍZ

3.1 DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA

El maíz es una gramínea y tiene múltiples clasificaciones. Por ejemplo, es una planta monoica, es decir, lleva en cada pie de planta flores masculinas y femeninas y su taxonomía es la siguiente:

Cuadro 12. Clasificación taxonómica del maíz

Categoría	Ejemplo	Carácter distintivo
Reino	Vegetal	Planta anual
División o <i>phylum</i>	<i>Tracheophyta</i>	Sistema vascular
Sub-división	<i>Pterapsidae</i>	Producción de flores
Clase	Angiosperma	Semilla cubierta
Sub-Clase	Monocotiledóneas	Cotiledón único (<i>Escutelum</i>)
Orden	<i>Graminales</i>	Tallos con nudos prominentes
Familia	Graminae	Grano-cereal
Tribu	<i>Maydeae</i>	Flores unisexuales
Genero	<i>Zea</i>	Único
Especie	<i>Z. mays</i> <i>Z. mexicana</i> <i>Z. perennis</i>	Maíz común Teocintle anual Teocintle perenne
Raza	Más de 300 razas clasificadas; treinta en México	Adaptadas a regiones bien definidas. Ejemplos: Tuxpeño trópico, Chalqueño Mesa Central.
Variedades	Polinización libre V-7; Híbridos H-507	Clima frío; clima caliente húmedo.
Líneas Puras	T ₂	Interviene en todos los híbridos de clima caliente húmedo en México

Fuente: Reyes, 1990

3.2 CONDICIONES AGROECOLÓGICAS DEL CULTIVO DEL MAÍZ

Cuadro 13. Requerimientos agroecológicos del cultivo del maíz

Condiciones agroecológicas generales del cultivo del maíz	
Clima	A, Cs, Cf, Do, Dc
Ciclo vegetativo mínimo	80 días
Ciclo vegetativo máximo	365 días
Temperatura mínima	14° C
Temperatura óptima	25° C
Temperatura máxima	30° C
Precipitación mínima	500 mm
Precipitación óptima	800 mm
Precipitación máxima	1,500 mm
PH mínimo	5.0
PH óptimo	6.5
PH máximo	8.5

Fuente: ECROPS, 2010

3.2.1 INFLUENCIA DEL CLIMA

La naturaleza alogámica de la especie del maíz ha originado una gran variación genética, formando variedades de gran adaptación en el tiempo y el espacio. El maíz se cultiva a diferentes latitudes, desde 58° de latitud norte en Canadá y Rusia, hasta 40° de latitud sur en Argentina, y altitudes desde el nivel del mar hasta más de 3,200 msnm (Reyes, 1990). Hay información que indica que se cultiva por debajo del nivel del mar en los planos del Caspio hasta más de 3,600 msnm en la región andina de Perú (Ibíd. 1990).

A pesar de que el origen geográfico de la especie es intratropical, los datos con que se cuenta señalan que la “faja maicera mundial” está fuera de los trópicos, aproximadamente entre las latitudes 30 y 45° de latitud norte y 20° - 30° de latitud sur.

Excepto México y el sureste de Brasil, la mayor producción mundial (70%) se extiende en las latitudes del Corn Belt en Estados Unidos, Europa Central, China y Argentina. En estas regiones la acción conjunta del suelo, el clima, la planta y la tecnología es más eficiente, tanto en el volumen de producción como en rendimiento unitario por hectárea (Ibíd. 1990).

El maíz exige un clima relativamente cálido y agua en cantidades adecuadas. La mayoría de las variedades de maíz en México se cultivan en regiones de temporal, de clima caliente, y de clima subtropical húmedo, pero no se adaptan a regiones semiáridas. El granizo y las heladas afectan considerablemente al cultivo (Trillas, 1981).

La altitud y la latitud son dos factores climatológicos elementales para el desarrollo óptimo del cultivo del maíz, como se muestra a continuación:

- Altitud

En los trópicos, el maíz crece desde el nivel del mar hasta elevaciones cercanas a los 4,000 msnm (Llanos, 1984). Con la altitud a que se cultiva, se manifiesta una variación en el porte de la planta, el nivel de inserción de las mazorcas en el tallo y el tamaño de las mazorcas. A baja o media altitud sobre el nivel del mar, las plantas (normalmente de ciclo largo) pueden alcanzar alturas de tres metros, mientras que a grandes altitudes (más de 3,000 metros) las plantas (variedades de ciclo corto) apenas llegan al medio metro de altura (Ibíd. 1984).

Las variedades de ciclo largo, cultivadas en las altitudes bajas o medias, pueden dar mazorcas de 35 a 40 cm. de longitud que nacen a dos metros sobre el nivel del suelo. En cambio, en variedades de ciclo corto adaptadas a climas montañosos de gran altitud, las mazorcas nacen a 20 cm del suelo y su tamaño es inferior con respecto a las que se cultivan en altitudes bajas o medias (Llanos, 1984). El rango altitudinal en el cual el maíz presenta un óptimo desarrollo morfológico y fisiológico, se localiza entre los 300 a 2500 msnm (INEGI, 1997).

- Latitud

De la misma manera que la altitud es un factor fundamental en el desarrollo óptimo del cultivo, también lo es la latitud. Rivas (1959) menciona que la latitud del lugar en el cual se siembra algún cultivo es importante para el desarrollo óptimo de la planta, ya que de la latitud depende el fotoperíodo intrínseco que necesitan los cultivos, (Reyes, 1990).

3.2.2 TEMPERATURA

La distribución y rendimiento de los cultivos están limitados por las temperaturas extremas. La temperatura óptima y las extremas limitantes para un cultivo están relacionadas con su lugar de origen o el sitio geográfico donde evolucionó (Christiansen, 1987). Por ejemplo, las plantas de origen tropical son generalmente muy sensibles a las bajas temperaturas (hasta 5° C las más tolerantes y 15° C las más sensibles) pero, a su vez, muy resistentes al calor. Por el contrario, las especies agrícolas de zonas templadas son tolerantes al frío (inclusive a las heladas), pero son poco resistentes al calor, datos citados por Vázquez (2006).

Durante el ciclo agrícola, el maíz requiere tiempo caluroso en el día y fresco en las noches. El cultivo tiene problemas cuando la temperatura promedio es inferior a 18.9°C durante el día y 12.8°C durante la noche. En la faja maicera de Estados Unidos, las temperaturas diurnas del verano alcanzan un promedio de 21.1°C y las nocturnas 14.4°C, y un ciclo agrícola de 140 días libres de heladas. En general, la mayor producción del mundo se logra en aquellos climas en donde las temperaturas en los meses calurosos varían entre 21 y 27°C y un período libre de heladas en el ciclo variable de 120 a 180 días (Reyes, 1990).

La temperatura tomada en el suelo a 10 centímetros de profundidad debe ser como mínimo de 8-10°C para que la semilla germine. Sin embargo, y hasta que la temperatura en el suelo no es superior a los 12°C, la germinación y el crecimiento de las plantas será lento. Con temperaturas de 16-18°C, la emergencia será rápida (10-12 días). Con 20°C, el periodo de emergencia se reduce a la mitad. Al principio del ciclo vegetativo, el crecimiento del maíz depende linealmente de la temperatura en el suelo, si ésta varía

entre 15 y 27°C. Temperaturas más altas reducen la velocidad de crecimiento de las plantas (Llanos, 1984).

De acuerdo con las etapas de desarrollo, la literatura indica que los valores mínimos, máximos y óptimos son los que se indican en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Valores mínimos, máximos y óptimos en las diferentes fases fenológicas del maíz

Estadio de:	Mínima	Máxima	Óptima
Germinación	10°C	40°C	20 - 25°C
Crecimiento Vegetativo	15°C	40°C	20 - 30°C
Floración	20°C	30°C	21 - 30°C

Fuente: Reyes, 1990

La temperatura óptima para crecimiento vegetativo es: en el día, 30 – 35°C y en la noche, 25° C, es decir, días calurosos y noches frescas. Si las noches son tan calurosas como el día, la planta del maíz utiliza demasiada energía en la respiración celular nocturna (Reyes, 1990).

En general, la temperatura óptima para crecimiento, desarrollo y producción del maíz es entre 25 y 35°C para variedades tropicales y de 20 a 30°C para las templadas. Temperaturas superiores a 40°C son perjudiciales, especialmente para los órganos reproductivos (Vázquez, 2006).

Temperaturas entre 8 y 12°C retardan la germinación, dificultan la emergencia de las plántulas y exponen a la semilla a daños ocasionados por organismos en el suelo. Por otro lado, temperaturas muy altas durante la siembra pueden afectar a las plántulas o semillas si hay escasez de humedad (Reyes, 1990)

Las plantas son muy susceptibles a las altas temperaturas en los períodos de floración, dañando al polen y los estigmas. Las temperaturas de 4°C o menos, afectan a las plantas en cualquier estado de desarrollo. Cuando las temperaturas de congelamiento ocurren en las primeras fases de desarrollo (8 a 10 cm de altura de la planta), pueden recuperarse

lentamente. Si las temperaturas de congelamiento ocurren en estado lechoso los daños son severos (Ibíd. 1990).

El conocimiento de las temperaturas es fundamental para seleccionar la fecha óptima de siembra, eligiendo aquellas épocas libres de heladas en la germinación, en la floración y en la madurez del grano.

3.2.3 PLUVIOMETRÍA Y HUMEDAD

La necesidad del agua en el ciclo vegetativo del maíz varía según la variedad y la etapa fenológica. Por ello, se indica, que bajo condiciones de temporal, se pueden obtener buenos rendimientos con lluvias entre 500 y 800 mm. Bien espaciado durante el ciclo de crecimiento (Doorenbos y Kasam, 1979, datos citados por Vázquez, 2006), estos autores consideran que una precipitación distribuida de 300 mm es la mínima para obtener la producción de grano y la máxima oscila alrededor de los 1,000 mm, si bien el maíz produce altos rendimientos con mayor lluvia siempre y cuando no sufra excesos de humedad (Cuadro 15). Además, señalan que las variedades precoces necesitan menos agua que las tardías. Es importante considerar que, del agua precipitada una parte es consumida por la planta y parte se queda en el suelo o se pierde por escorrentía o evaporación (Vázquez, 2006).

Cuadro 15. Requerimientos hídricos mínimos, óptimos y máximos del maíz

Cultivo	Prec. mínima	Prec. óptima	Prec. máxima
Maíz	300 mm.	500 – 800 mm.	1,000 mm.

Fuente: Doorenbos y Kasam, (1979, datos citados por Vázquez, 2006)

Reyes (1990) calcula que, para obtener tres toneladas de grano de maíz, se requiere que la planta consuma más de 3,312 kg. de agua, cantidad que pocos suelos y regiones disponen, lo que indica que es la falta de agua uno de los factores más limitantes en la producción de maíz de temporal en México.

La planta incrementa su demanda hídrica con la evapotranspiración, debido a esto el volumen hídrico necesitado por el cultivo del maíz debe oscilar entre los 400 a 800 mm

para que se lleve a cabo el desarrollo óptimo de la planta. El total de agua usada en la evapotranspiración varía mucho según el ciclo del cultivo, el clima, la disponibilidad de agua, las características hidrodinámicas del suelo y las prácticas del manejo sistema agua-suelo-planta (Reyes, 1990). Así, Deblin (1976, datos citados por Vázquez, 2006) reporta que una hectárea de maíz transpiraría alrededor de 245 mm. de agua durante su ciclo.

Una planta de maíz en campo bajo condiciones de calor (temperatura $> 30^{\circ}$ C) y viento seco puede consumir más de dos litros de agua al día. La evapotranspiración total en días con alta demanda evaporativa puede oscilar entre 6 a 9 mm/día, cuando la demanda normal oscila entre 5 a 6 mm/día (Larson y Hanway, 1977), si hay suficiente agua disponible para evaporación y transpiración, (datos citados por Vázquez, 2006);

Estos autores indican que, bajo condiciones comunes, el agua que requiere el maíz durante el verano en la mayoría de las áreas productoras, es muy similar a lo que precipita. Por ello basta una cierta reducción de la lluvia para que se manifieste un desequilibrio hídrico según el tipo de suelo. En la profundidad del subsuelo, la planta puede extraer agua hasta 150 cm inclusive hasta los 200 cm. Los suelos profundos pueden almacenar mas allá de 25 y 30 cm de agua disponible en un perfil de 150 cm, mientras que los suelos delgados retienen menos agua en este mismo perfil, donde el maíz sólo puede remover agua entre los 50 y 100 cm de profundidad.

Bajo condiciones de campo, las raíces permanecen en una relativa mejor humedad del suelo, mientras el tallo y las hojas crecen en un medio atmosférico relativamente seco. Esto causa un permanente flujo de agua desde el suelo a través de la planta hasta la atmósfera a lo largo de un gradiente de decreciente energía potencial (corriente de transpiración). En un día base, este flujo aumenta de una a diez veces la cantidad de agua requerida en los tejidos de las plantas, de diez a cien veces la usada para la expansión de nuevas células, y de cien a mil veces la cantidad usada en la fotosíntesis (Jarvis, 1975). Debido a la alta demanda y a la importancia del agua, una planta requiere de un abasto continuo para su crecimiento, desarrollo y rendimiento potencial; cuando falta, el crecimiento es reducido y con ello, el rendimiento. La intensidad de reducción del rendimiento es dependiente del genotipo, la severidad del déficit de agua y la etapa del desarrollo del cultivo, (datos citados por Vázquez, 2006).

La escasez de agua en cualquier etapa de desarrollo de la planta puede afectar a la cosecha, pero su carencia durante la floración e inicio de llenado del grano del maíz es particularmente crítica en la producción del grano. Esta observación es importante considerando la distribución bimodal de las lluvias en gran parte de México, conocida como canícula (Vázquez, 2006). Según Mosiño (1966), al estudiar este fenómeno que llama “sequía intraestival”, establece que la causa de la sequía a medio verano obedece a cambios de circulación global atmosférica que año con año tiene lugar sobre el Golfo de México. El fenómeno en cuestión tiene una duración diferente, dependiendo del área de que se trate y el mínimo de precipitación se puede presentar en julio, agosto o septiembre (datos citados por Reyes, 1990); éstos son los meses en que el maíz sembrado entre febrero y junio llega a las etapas críticas en que la escasez de agua afecta directamente al rendimiento (Reyes, 1990).

Al maíz se le considera como uno de los cultivos más eficientes en el uso del agua para la producción de materia seca (forraje y grano) y es considerado dentro de los cereales como el más productivo (Doorenbos y Kasam, 1979). Su máxima demanda hídrica ocurre durante la fase reproductiva cuando llega a requerir diez o más mm/día (Llanos, 1984), siendo los períodos más críticos con respecto a la sequía, desde la polinización hasta al final del período de llenado de grano, (datos citados por Vázquez, 2006).

El déficit de agua, desde la aparición de la espiga hasta la fecundación, puede reducir hasta con 50% el rendimiento del grano (Larqué, 1972). Denmead y Shaw (1975) calcularon que la sequía en las etapas vegetativas, de floración y llenado del grano provoca una reducción de 25, 20 y 21% respectivamente, (datos citados por Vázquez, 2006). Por su parte, Celis y Salgado (1985) estimaron que bajo condiciones templadas la canícula por 15, 22 y 28 días en el período de polinización reduce el rendimiento en 10, 15 y 18% respectivamente.

Otro aspecto importante para la producción de maíz en México, es la precipitación total anual. Según Bassols (1977), el promedio general de lluvias en México alcanza 700-717 mm el cual es bastante bajo y sitúa al país en su conjunto en los límites de la agricultura de temporal con bajos rendimientos. Sin embargo, citar un promedio para todo el territorio mexicano, no tiene prácticamente utilidad, ya que analizando las regiones del país se advierte que el 23.1% recibe más de 1,000 mm de precipitación media anual y

un 42% con menos de 500 mm; no obstante esto, la canícula no afecta en forma simultánea a todo el país, sino que grandes extensiones del norte, noroeste, noreste, centro y sur sufren sequía absoluta y relativa; por esa razón se observan notorios contrastes entre los escasos sitios donde se precipita más de 4,500 mm al año como en algunas regiones de Chiapas, 3,500 mm en el sur de Tabasco y 2,500 mm en el sureste de Veracruz por un lado, y solamente 800 mm en Tlaxcala, 700 mm en los valles centrales de Oaxaca y centro de Sinaloa, 400 mm en Zacatecas y menos de 100 mm en Mexicali y la mayor parte de Baja California.

De los cálculos de las lluvias, se derivan estimaciones diversas para mostrar el panorama climático mexicano. Dichas estimaciones no son positivas porque las diferentes clasificaciones coinciden en que un poco más de la mitad del país se encuentra dentro de las zonas áridas (desérticas y semidesérticas) y una porción pequeña se categoriza por su clima húmedo (Reyes, 1990). Las áreas donde se puede lograr buenas cosechas deben disponer de precipitación pluvial bien distribuida y que acumulen más de 800 mm de lluvia entre los meses de mayo a noviembre (Ibíd. 1990). Dichas áreas se localizan en los estados de la República Mexicana que son los principales productores del grano, excepto Sinaloa: México, Jalisco, Chiapas, Michoacán y Veracruz.

Aun cuando el maíz se cultiva en todos los estados del país, en varios de ellos no es redituable, por lo tanto, no se debería sembrar maíz y en su lugar sembrar otro cultivo que aproveche mejor las condiciones del medio agroecológico, siempre y cuando este tenga un fin comercial y no sea de autoconsumo. Varios son los factores limitantes en la producción maicera en México, pero entre ellos, el agua es el más importante (Reyes, 1990).

3.2.4 VIENTO

Los vientos ejercen una importante influencia sobre las plantas tanto en forma directa como indirecta. El efecto directo sobre la planta puede ocasionar daños al follaje, así como calentamiento o enfriamiento, hidratación o desecación, etc. En el efecto indirecto el aire abastece de CO₂ a las hojas, y existe un intercambio de humedad, calor y otros componentes gaseosos en el aire (Vázquez, 2006).

Se ha reconocido que los fuertes vientos reducen el rendimiento de las plantas, medida como peso seco, área foliar o altura, usando diferentes tipos de cultivo (Wadsworth, 1959; Kalma y Kuiper, 1966; Miyagawa, 1970, datos citados por Vázquez, 2006); Estos autores observaron una disminución de la tasa relativa de crecimiento de las plantas, así como el área foliar total y la tasa de asimilación neta, los que se tradujo en un menor crecimiento y rendimiento. Detectaron también que hay diferencias entre los cultivos en su respuesta a la velocidad de los vientos. En general, reportan que vientos menores a 0.7 m/s provocan poca alteración en el crecimiento y rendimiento de las plantas pero, conforme se hacen más fuertes, la afectación se incrementa.

Estos mismos autores notaron también que estos cultivos sufrieron más daño cuando crecieron en suelo (arena) que en solución nutritiva. Esto lo atribuyeron a que el principal efecto del viento fue el incremento de la tasa de transpiración y que el suelo no pudo reponer el agua perdida con la variedad requerida, lo que sí sucedió con el medio líquido. Ellos concluyen, que el régimen de humedad tiene gran efecto sobre las respuestas de las plantas al viento. Con suficiente humedad, el daño es menor porque las plantas pronto se recuperan, lo que no sucede con suelo que contenga poca disponibilidad de agua (Vázquez, 2006).

Pakhurst y Pearman (1972, datos citados por Vázquez, 2006) sugieren que la sacudida que realizan los vientos a las plantas pueden provocar cavidades en los vasos conductores, lo que tiende a reducir el contenido de agua en las hojas induciendo un déficit hídrico. Este efecto es más evidente en condiciones extremas de tensión hídrica o, bien, puede inducir la reducción en la altura de las plantas tanto en leñosas como en el maíz y en el sorgo.

- **Pérdida del área foliar**

Los daños a las hojas es un efecto común que se observa en plantas expuestas a los vientos. Cuando las hojas presentan un daño, la fotosíntesis disminuye en forma proporcional a la intensidad del daño y, con ello, se abate el rendimiento. Sin embargo, daños pocos severos pueden ser compensados por un incremento en la tasa de fotosíntesis del tejido foliar remanente; esta respuesta varía entre especies (Vázquez, 2006).

Una prolongada exposición al viento induce cambios morfológicos y anatómicos de las plantas. Con plantas anuales, las hojas tienden a ser ásperas, arrugadas y menos expandidas.

Los vientos, en función de su intensidad, además de provocar ruturas al aparato foliar, también ocasionan desgarramiento en las ramas, caída de flores o frutos, e impide la fecundación. Las plantas expuestas a vientos fuertes no producen frutos.

- **El viento en relación con los cultivos**

Los vientos se comportan también como un agente de dispersión de plagas y enfermedades, de malezas y diversas especies de plantas mediante el transporte que hace las esporas, semillas, polen y otras formas productivas. Así mismo, pueden dispersar el fertilizante adicionado al voleo, a los herbicidas, insecticidas y otros productos incluyendo el agua de riego que se aplican por aspersión. Inclusive elevan la evaporación desde el agua y suelo y, desde luego, de las plantas; provocando su desecamiento con la formación de una costra superficial edáfica que luego dificulta la emergencia de la semilla. Entre más seco, caliente y rápido sople el viento, mayor será su efecto evaporativo y de secado de las plantas (Vázquez, 2006).

3.2.5 FOTOPERÍODO

El movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, la forma casi esférica de nuestro planeta, la inclinación del globo terráqueo sobre su eje polar y el desplazamiento del Sol de su centro, provocan, entre otras causas, que la duración del período luminoso (día) y el período oscuro (noche) no duren lo mismo con la excepción de la franja ecuatorial. Así tenemos que para un mismo lugar, la duración del día y la noche varían durante el año o bien para una misma fecha, la duración del día y la noche difieren en puntos distintos del globo terrestre (Vázquez, 2006).

La relación que surge de la duración del período luminoso y el período oscuro es lo que se llama fotoperíodo. Su importancia radica en que hay especies vegetales y animales que reaccionan ante esta diferencia entre el día y la noche modificando su conducta reproductiva, es decir al cambio de fotoperíodo unas entran en ciclo reproductivo y otras

no. Con base en estas respuestas, se han clasificado las especies vegetales (y animales) en plantas de día largo (las que florecen cuando el día dura más de doce horas), de día corto (aquellas que se reproducen con días cortos con luminosidad menor a doce horas diarias) y las indiferentes o neutrales (aquellas que no reaccionan a los días largos o cortos y entran en floración por edad o termoperíodo). Las plantas en realidad reaccionan, a la duración del período oscuro (noche) y no al período luminoso (día) (Vázquez, 2006).

En las plantas de invierno (trigo, lino, avena, chícharo, arveja), la floración se acelera cuando ocurren los días largos de primavera. En las plantas de verano (maíz, soya, algodón), la floración se acelera cuando se acercan los días cortos de otoño. Al primer grupo se le llaman “plantas de días largos”, al segundo grupo “plantas de días cortos” (Reyes, 1990).

Se ha encontrado que existe una aceleración en el momento de inicio de la floración conforme el período se alarga de 10 a 20 horas, independientemente de las temperaturas (Coligado y Brown, 1979). Sin embargo, existe una interacción entre el fotoperíodo y temperatura. Estos autores encontraron que la respuesta a la temperatura se incrementó conforme el fotoperíodo aumentó. Por su parte Hunter *et al.*, (1974) señaló que la pérdida de sensibilidad al fotoperíodo ocurre en temperaturas superiores a los 30°C en el cultivo del maíz durante la etapa de formación de grano, con base en esto, se enfatiza la importancia de la interacción entre estas dos variables ambientales (datos citados por Vázquez, 2006).

El efecto del fotoperíodo se manifiesta en las plantas a través del sistema de fitocromos, el cual controla muchas de las respuestas del crecimiento de las plantas, considerándose que duraciones del fotoperíodo entre once y catorce horas de luz, es mejor para el crecimiento y producción de maíz (Vázquez, 2006).

Respecto al fotoperíodo, está comprobado que la longitud del período oscuro ininterrumpido es el factor decisivo que controla la iniciación floral. Estas observaciones indican que en plantas sensibles, ni la nutrición mineral, ni la fotosíntesis, son importantes para el control del desarrollo productivo (Vázquez, 2006).

México se extiende entre los paralelos 14° 32' 45" y 32° 43' 05", así que ocupa 18° 10' 20" de latitud en el hemisferio norte y, por tanto, se presentan diferentes duraciones de fotoperiodo (Cuadro 16).

Cuadro 16. Duración del día (luminoso) en horas para la República Mexicana

Latitud	Día del mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máxima diferencia
Norte														
0°		12 horas todos los días del año												0,0
Ecuador														
15°	5	11,0	11,3	11,7	12,1	12,5	12,7	12,7	12,5	12,1	11,7	11,3	11,0	1,7
Chis	20	11,1	11,5	11,9	12,3	12,6	12,8	12,7	12,3	11,9	11,5	11,10	11,0	1,8
20°	5	10,7	11,1	11,6	12,2	12,7	13,0	13,0	12,7	12,2	11,7	11,10	10,7	2,3
	20	10,8	11,3	11,9	12,4	12,9	13,1	12,9	12,5	11,9	11,4	10,9	10,7	2,4
25°	5	10,4	10,8	11,5	12,2	12,9	13,3	13,4	13,0	12,3	11,6	10,9	10,4	2,9
	20	10,5	11,2	11,8	12,6	13,2	13,4	13,2	12,7	12,0	11,2	10,6	10,3	3,1
30°	5	10,0	10,6	11,4	12,3	13,1	13,7	13,7	13,2	12,4	11,5	10,6	10,0	3,7
B.C	20	10,2	11,0	11,8	12,7	13,5	13,8	13,6	12,9	12,0	11,1	10,3	9,9	3,9
65°	5	2,8	6,5	9,9	13,4	16,7	19,8	20,0	17,2	13,8	10,5	6,8	3,2	17,2
	20	4,5	8,4	11,6	15,1	18,3	20,4	18,8	15,6	11,6	8,1	4,3	2,0	18,4

Fuente: Major (1987, datos citados por Reyes, 1990)

Debido a que el maíz es de origen intertropical, éste es considerado una planta de día corto. Sin embargo, y como consecuencia del largo proceso de adaptación a que ha sido sometido, gran parte de las variedades cultivadas actualmente responden a la longitud del día con una amplia variación entre los tipos ecuatoriales sudamericanos, de adaptación al fotoperíodo de día corto, hasta los nórdicos adaptados a día largo (Llanos, 1984).

3.2.6 SUELO

En México existe una gran variedad de suelos en donde se cultiva maíz, desde los pedregosos y arenosos, con fuertes pendientes, infértiles y manejo complicado, hasta los fértiles y de fácil mecanización integral desde la siembra hasta la cosecha. Los mejores suelos, para altos rendimientos, son los que cuentan con una estructura granular que provee un buen drenaje y retiene agua, fértiles, de fácil manejo, bien aireados, profundos; suelos francos, arcillosos rojizos; ricos en materia orgánica, en nitrógeno, fosforo, potasio y elementos menores en cantidades balanceadas y con pH de 6 a 7 (Reyes, 1990). En caso de que el suelo carezca de ciertos elementos, presentará las siguientes condiciones: carencia de nitrógeno, fósforo, potasio, pH bajo (Bartolini, 1989).

Son escasos los suelos que poseen todos los atributos naturales que se requieren para obtener una alta productividad; sin embargo, hay suelos que con ciertas tecnologías se pueden acondicionar para su utilización en cultivos de maíz y que sean altamente redituables. No obstante, hay regiones donde no se debería de sembrar maíz, existiendo otras especies que se adaptarían mejor al medio (Reyes, 1990).

Algunas condiciones del suelo no óptimo para el cultivo del maíz son: terrenos altamente arcillosos, completamente arenosos, con fuerte pendiente (mayor de 10%), suelos humíferos, suelos salinos, salitrosos, terrenos inundables, suelos contaminados con agroquímicos o con residuos industriales o susceptibles a la contaminación (Reyes, 1990).

Por otro lado, las características que deben poseer los suelos para el desarrollo óptimo del cultivo del maíz son (Trillas, 1981):

- Suelos profundos y fértiles para que se lleve a cabo una buena cosecha.
- Textura franca, que permite un buen desarrollo del sistema radicular, con una mayor eficiencia de absorción de la humedad y de los nutrientes del suelo; además, se evitan problemas de acame o caída de plantas.

- Con estructura granular, que provee un buen drenaje y retiene agua; además, son preferibles los suelos con alto contenido de materia orgánica.
- Los tipos de suelos que presentan mayor potencialidad para este cultivo son los feozem y los vertisoles, ya que son suelos que presentan mayores aptitudes para el desarrollo de la agricultura.

3.3 FENOLOGÍA DEL MAÍZ

3.3.1 FICHA FENOLÓGICA

En condiciones favorables de suelo, temperatura, humedad, aireación, nutrición, luminosidad, ausencia de plagas, enfermedades y malezas, la planta del maíz se desarrolla desde la germinación hasta la cosecha. En algunas variedades cesa el crecimiento una semana después de floración, en otras, dos semanas (Reyes, 1990).

En los primeros estadios de crecimiento, se distingue la siembra, germinación, emergencia y plántula. La primera hoja es el escutelum o cotiledón único, que permanece bajo el suelo; la segunda hoja es el coleóptilo, el cual emerge. A partir de la tercera hoja y las restantes, las hojas son alternas con las partes siguientes: vaina, lígula y limbo (Reyes, 1990).

Con la finalidad de explicar el desarrollo y crecimiento de la planta, se describe el método propuesto por Hanway (1971, datos citados por Reyes, 1990), con un sistema numérico que se inicia desde cero, cuando comienza la emergencia, hasta diez cuando se alcanza la madurez fisiológica y/o cosecha (Cuadro 17).

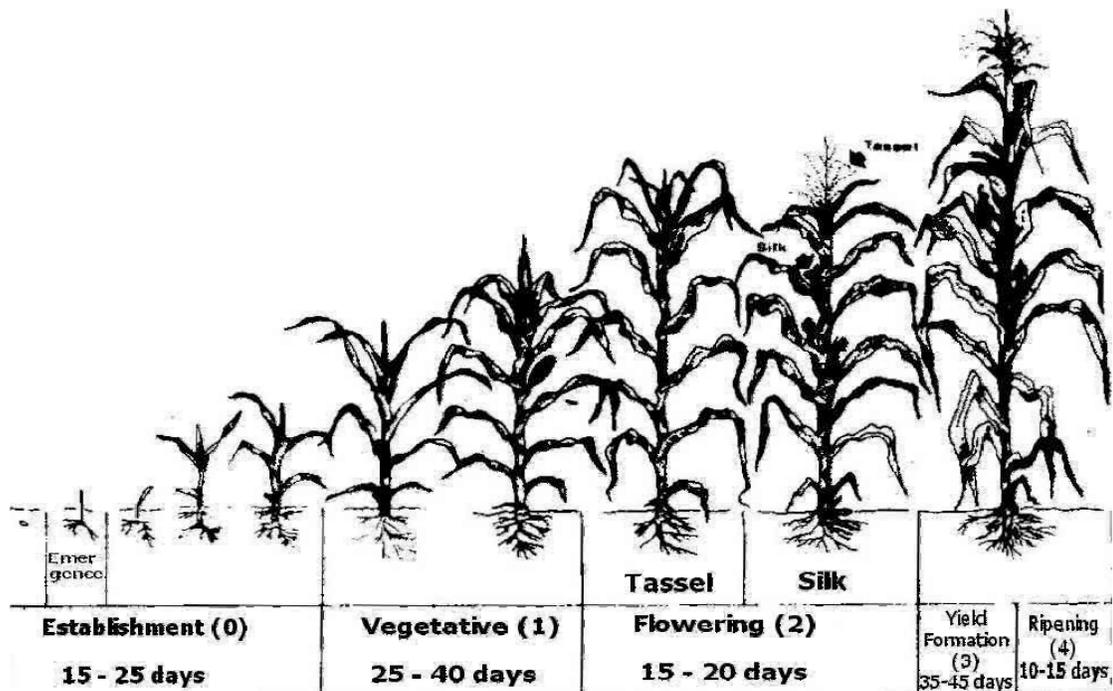
Cuadro 17. Identificación de los estadios de desarrollo del maíz, utilizando el sistema de numeración.

Crecimiento	Carácter	Designación numérica de estadio	Tiempo estimado (semanas)
Pre-emergencia	Siembra de semilla	0.0	-
Emergencia	Coleoptilo arriba del suelo	0.1	0
Dos hojas	2-3 hojas abiertas	0.5	1
Cogollo inicial	4-6 hojas emergidas	1.0	2-3
Cogollo activo	8-10 hojas emergidas	2.0	4-5
Cogollo tardío	12-14 hojas emergidas	3.0	6-7
Espiga	16 hojas emergidas	4.0	8
Jiloteo	Estilos emergiendo	5.0	66 días
	Polinización, estilos con tendencia a secarse	5.5	
Madurez	Estilos oscuros, desarrollo incipiente de granos	6.0	12 días de jiloteo
	Granos lechosos	7.0	24 días de jiloteo
	Embriones en desarrollo	8.0	36 días de jiloteo
	Estados masosos del grano	9.0	48 días de jiloteo
	Grano maduro secado	10.0	60 días de jiloteo

Fuente: Hanway (1971, datos citados por Reyes, 1990)

- Estadios de crecimiento y desarrollo del maíz (Hanway, 1971; Reyes, 1990) (Cuadro 20 y Figura 17):

1. Antes de siembra.
2. Siembra a emergencia (siembra a estadio 0)
3. Crecimiento vegetativo inicial desde emergencia hasta diferenciación floral (estadio 0 a 2.5-3)
4. Crecimiento vegetativo avanzado desde el rápido inicio de la elongación de tallo (altura de la planta de unos 50 cm) hasta el inicio del espigamiento; emergencia de la espiga o “banderilla” (estadio 2.5 a 4).
5. Espigamiento, jiloteo y polinización (estadios 4 y 5).
6. Producción de grano, desde la fecundación hasta la madurez fisiológica del grano (estadios 6 a 10).
7. Maduración de cosecha y secado del grano



Fuente: FAO (2001)

Figura 17. Fenología del maíz

3.4 VARIEDADES DEL MAÍZ

La clasificación del maíz puede ser botánica (agronómica), comercial, y estructural (textura de grano).

Variedades botánicas o agronómicas

En diferentes regiones del mundo se han clasificado maíces, disponiéndose de más de 300 razas. Reyes (1990) define a la variedad botánica un como grupo de individuos de una especie y raza con rasgos diferenciales más estrechos que aquéllos manifestados por las razas. Las variedades agronómicas son producto de la selección humana que tiende a formar grupos de plantas similares con tendencia a su explotación económica. Existen tantas variedades, tal vez como productores, en una región agrícola. Algunas las seleccionan por su precocidad, por la altura de la planta, por la selección de frutos, etcétera. El nombre común de una variedad es por su lugar de origen o son denominaciones autodescriptivas. Las variedades nativas son aquéllas que se originaron en un lugar determinado y ahí evolucionaron; las variedades criollas son las introducidas y adaptadas a las condiciones existentes del lugar en adopción, que multiplicándose libremente y por selección natural o dirigida, han logrado producciones aceptables para los agricultores.

En la actualidad, los productores siembran semillas de siete clases: variedades criollas, mejoradas, sintéticas, híbridas, generaciones avanzadas de híbridos, criollos hibridados y transgénicos (Reyes, 1990).

En México, las miles de variedades dispersas en su territorio se han agrupado en treinta razas y seis subrazas: 25 bien definidas y cinco en estudio (Cuadro 18).

Cuadro 18. Nombre de las razas de maíz en México y la altitud en metros en donde se han localizado

Razas de maíz	Altitud localizada (msnm)
<i>A. Indígenas antiguas</i>	
1. Palomero Toluqueño	2,200 – 2,800
2. Arrocillo Amarillo	1,600 – 2,000
3. Chapalote	100 – 600
4. Nal-Tel	100
<i>B. Exóticas pre-colombinas</i>	
5. Cacahuacintle	2,200 – 2,800
6. Harinoso de ocho	100
7. Olotón	2,000 – 2,400
8. Maíz dulce	1,000 – 1,500
<i>C. Mestizas prehistóricas</i>	
9. Cónico	2,200 – 2,800
10. Reventador	0 – 1,500
11. Tabloncillo	0 – 1,500
12. Tehua	600 – 1,000
13. Tepecintle	0 – 600
14. Comiteco	1,100 – 1,500
15. Jala	1,000
16. Zapalote chico	100
17. Zapalote grande	100 – 600
18. Pepitilla	1,000 – 1,700
19. Olotillo	300 – 700
20. Tuxpeño	0 – 500
21. Vandeño	0 - 500
<i>D. Modernas incipientes</i>	
22. Chalqueño	1,800 – 2,300
23. Celaya	1,200 – 1,800
24. Cónico Norteño	1,600 – 2,100
25. Bolita	900 – 1,500
<i>E. Serranas occidentales</i>	
26. Tablilla de ocho	
27. Bofo	
28. Gordo	
29. Azul	
30. Apachito	

Fuente: Reyes, 1990

Las variedades agronómicas que se siembran en el DDR-Toluca, según el Boletín de variedades recomendadas para el estado de México son: Almoloya de Juárez, Ixtlahuaca, palomero toluqueño, cóndor, gavilán y amarillo zanahoria principalmente (INIFAP, 2003).

Variedades comerciales

Desde el punto de vista de compra-venta, este cereal se clasifica de la siguiente manera: maíz blanco, amarillo, mezclado y pinto.

Variedades estructurales o de textura de grano

El maíz puede dividirse en varios tipos (razas o grupos), en función de calidad, cantidad y patrón de composición del endospermo; éstos son: maíz dentado, cristalino, amiláceo, dulce y palomero. González (1995), menciona que las siguientes son subespecies o variedades botánicas: maíz dentado (*Zea mays indentata*), maíz cristalino (*Zea mays indurata*), maíz harinoso (*Zea mays amilaceo*), maíz dulce (*Zea mays saccharata*), maíz palomero (*Zea mays everta*) y maíz tunicado (*Zea mays tunicata*).

CAPITULO 4. ESCENARIO BASE Y MODELOS DE CAMBIO CLIMATICO (ECHAM y HADLEY)

4.1 INTRODUCCIÓN A LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

4.1.1 Escenarios de Cambio Climático

Escenario

El IPCC (2007) define a un escenario como una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo. Estos escenarios pueden ser climáticos y no climáticos como se explica a continuación:

1. Escenarios no climáticos

El objetivo de los escenarios no climáticos es describir cambios socioeconómicos, de uso de la tierra y ambientales, así como caracterizar la sensibilidad de los sistemas al cambio climático, su vulnerabilidad y su capacidad de adaptación. Éstos se dividen en escenarios socioeconómicos, ambientales y de cambio en el uso de la tierra y la cobertura vegetal, estos tres tipos de escenarios no climáticos poseen las siguientes características (IPCC, 2001):

Escenarios socioeconómicos

Se han utilizado más extensamente para proyectar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y para evaluar la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación al clima. Se identifican varios temas o campos diferentes, como la población o la actividad económica, así como factores de fondo como la estructura de gobierno, los valores sociales, y las pautas del cambio tecnológico. Los escenarios permiten establecer la vulnerabilidad socioeconómica de referencia, anterior al cambio climático.

Escenarios de cambio en el uso de la tierra y la cobertura vegetal

El cambio en el uso de la tierra y la cobertura vegetal (CUT-CV) comprende varios procesos que son fundamentales para la estimación del cambio climático y sus impactos. En primer lugar, el CUT-CV influye en los flujos de carbono y las emisiones de GEI, que alteran directamente la composición atmosférica. Segundo, el CUT-CV modifica las características de la superficie terrestre e, indirectamente, los procesos climáticos. Tercero, la modificación y conversión de la cobertura vegetal pueden alterar las propiedades de los ecosistemas y su vulnerabilidad al Cambio Climático. Por último, muchas de las opciones y estrategias para mitigar las emisiones de GEI comprenden prácticas relacionadas con la superficie vegetal y prácticas modificadas del uso de la tierra. Se ha construido una diversidad de escenarios CUT-CV, la mayoría, sin embargo, no tratan explícitamente las cuestiones de cambio climático, sino que centran su atención en otras cuestiones, por ejemplo, la seguridad alimentaria y el ciclo del carbono. Los modelos de evaluación integrada son actualmente los instrumentos más adecuados para elaborar escenarios CUT-CV.

Escenarios ambientales

Se refieren a cambios en los factores ambientales distintos del clima que se producirán en el futuro, independientemente del Cambio Climático. Dado que estos factores pueden cumplir funciones importantes en la modificación de los impactos del futuro cambio climático, los escenarios deben mostrar las posibles condiciones ambientales futuras, como la composición atmosférica (por ejemplo, dióxido de carbono CO₂, ozono troposférico, compuestos de acidificación, y radiación ultravioleta-B); la disponibilidad, el uso y la calidad del agua, así como la contaminación marina.

2. Escenarios climáticos

Con base en las evaluaciones de los impactos se han empleado tres tipos de escenarios climáticos (IPCC, 2001):

Escenarios incrementales

Estos son simples incrementos arbitrarios de las variables climáticas básicas. Los escenarios pueden ofrecer una asistencia valiosa para la sensibilidad del sistema al clima.

Escenarios analógicos

La representación analógica de un clima que ha cambiado a partir de los registros anteriores o de otras regiones puede ser difícil de identificar y casi no se aplica, aunque algunas veces puede proporcionar detalles útiles de los impactos de las condiciones climáticas fuera de la gama de la actualidad.

Escenarios del clima basados en modelos

Los escenarios más comunes emplean resultados de Modelos de Circulación General (MCG) y por lo general se construyen ajustando un clima de referencia (normalmente basado en observaciones regionales del clima durante un período de referencia en función del cambio absoluto o proporcional entre los climas simulados presentes y futuros. La gran mayoría de los escenarios representan cambios en el clima medio; algunos escenarios recientes han incorporado cambios en la variabilidad y en los sucesos climáticos extremos, que pueden tener impactos en algunos sistemas.

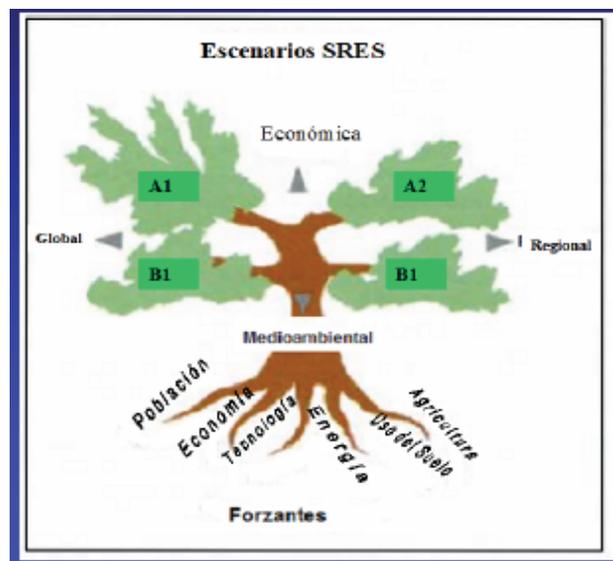
4.1.2 Escenarios de emisiones

En 1990 y 1992, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) desarrolló varios escenarios de emisiones a largo plazo. Esos escenarios se han utilizado para el análisis de un posible cambio climático, de sus repercusiones y de las opciones para mitigar dicho cambio. En 1995 se evaluaron los escenarios del IPCC de 1992. En dicha evaluación se recomendó tener en cuenta los cambios (desde 1992) en cuanto a la comprensión tanto de las fuerzas que rigen las emisiones como de las metodologías. Estos cambios conciernen, por ejemplo, a la intensidad en carbono del suministro de energía, a la desigualdad de ingresos entre los países desarrollados y los países en desarrollo, y a las emisiones de azufre. En consecuencia, en su reunión

plenaria de 1996 el IPCC decidió llevar a cabo un nuevo conjunto de escenarios. Estos escenarios son los que se aplican en la presente investigación.

Debido a que las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de muy complejos sistemas dinámicos, determinado por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico. Su evolución futura es muy incierta. Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del Cambio Climático y, en particular, para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota (OMM, PNUMA, 2000).

En los Informes Especiales sobre los Escenarios de Emisiones publicados por el IPCC (IEEE o SRES, por sus siglas en inglés) los escenarios están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas originantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes (Figura 18).



Fuente: IPCC, 2001

Figura 18. Escenarios de emisiones.

Los escenarios de emisiones se basan en los supuestos de que existe una orientación mundial hacia lo regional, global, ambiental, así como de un bajo o alto desarrollo económico. Esto depende del escenario de emisión del que se trate. Estos cuatro escenarios de emisiones parten de los siguientes supuestos (IPCC, 2001):

- Escenarios con un mayor énfasis global

A1 supone:

El escenario A1 describe a un mundo futuro con un muy rápido crecimiento económico, una población que alcanza su punto máximo a mediados de siglo y decrece posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficaces. Los principales problemas son las convergencias entre las regiones, el desarrollo de la capacidad y un aumento de las interacciones culturales y sociales, con una importante reducción de las diferencias regionales en el ingreso per cápita.

El conjunto del escenario A1 se desarrolla en tres grupos que muestran las direcciones alternativas de cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos en A1 se distinguen por un énfasis en las tecnologías: con alto coeficiente en combustibles fósiles (A1F1), fuentes de energía no derivada de combustibles fósiles (A1T) y un equilibrio de todas las fuentes (A1B) en donde se define el “equilibrio” como la no dependencia de un tipo de energía en particular, o la aplicación de niveles parecidos de mejora a todas las fuentes de energía y tecnologías para usos finales.

B1 supone:

El escenario B1 describe un mundo convergente y con la misma población mundial, que alcanza su punto máximo a la mitad de siglo y disminuye posteriormente, tal y como sucede en el escenario A1, pero muestra un cambio rápido en las estructuras económicas, hacia una economía de servicios e información, con reducciones en las tecnologías con un alto coeficiente de materiales y la incorporación de tecnologías limpias y que utilizan eficientemente los recursos. Este escenario hace hincapié en encontrar soluciones globales a las cuestiones de sostenibilidad económica, social y

ambiental, incluidos un mejoramiento en términos de equidad, pero sin contar con iniciativas climáticas adicionales.

- Escenarios con un mayor énfasis regional

A2 supone:

El escenario 2 es heterogéneo, el principal problema es la independencia y conservación de las identidades locales. Las pautas de fecundidad en todas las regiones convergen muy lentamente, lo que produce un aumento constante de población. El desarrollo económico se encuentra orientado principalmente hacia las regiones y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico se encuentran más fragmentados y son más lentos que en otros escenarios.

B2 supone:

El escenario B2 describe una situación en donde se pone énfasis en las soluciones locales para la sostenibilidad económica, social y ambiental. Indica un mundo en donde la población mundial aumenta constantemente, aunque a un ritmo menor que en A2, con niveles intermedios de desarrollo económico, y un cambio tecnológico más lento y más diverso que en A1 y B1. El escenario también se orienta a la protección ambiental y la equidad social, pero se centra en la situación local y regional.

- Principales características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios

Las cuatro líneas evolutivas cualitativas proporcionan cuatro conjuntos de escenarios denominados “familias”: A1, A2, B1 y B2. En total, seis equipos de modernizadores han desarrollado cuarenta escenarios IEEE. Dentro de cada familia y grupo de escenarios, algunos de ellos comparten supuestos “armonizados” sobre la población mundial, el producto interior bruto y la energía final. Éstos están marcados con los grupos de letras “HS”, en el caso de los escenarios armonizados, y con “OS” para los escenarios que exploran las incertidumbres asociadas a las fuerzas determinantes más allá de los escenarios armonizados. Se indica también el número de escenarios

desarrollados en cada categoría. Para cada uno de los seis grupos de escenarios se ofrece un escenario ilustrativo (que será siempre armonizado) (Figura 19).

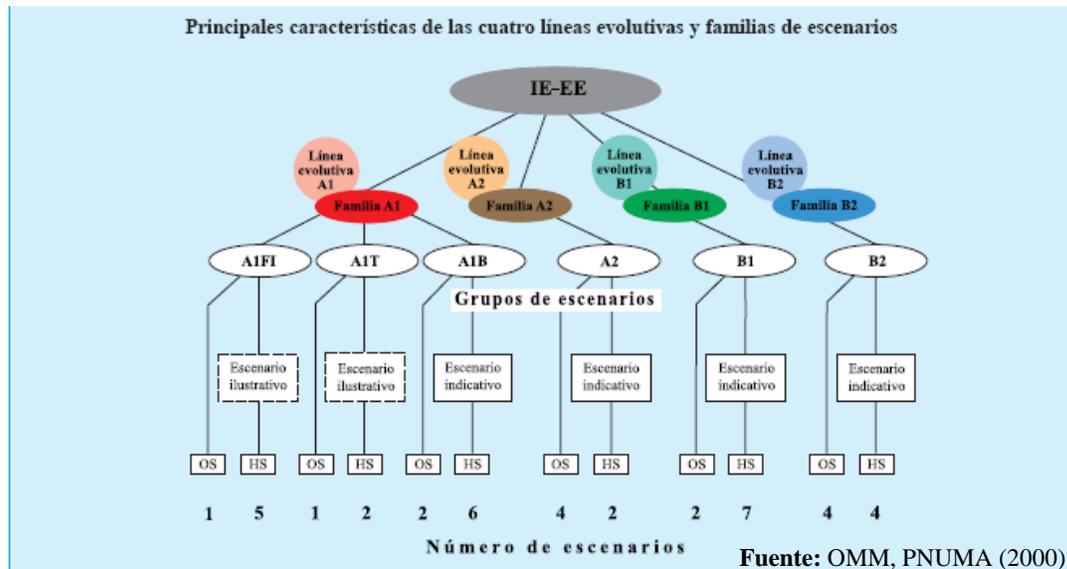


Figura 19. Principales características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios.

- Proyecciones en los niveles de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en los diversos escenarios de emisiones (horizonte 2100)

Hasta hace poco más de mil años, la Tierra había mantenido niveles de concentración de CO₂ en la atmósfera por debajo de los 300 ppm. A partir del inicio de la revolución industrial los niveles CO₂ en la atmósfera se han incrementado notablemente hasta llegar a unas 379 ppm en el año 2005. Las familias de escenarios IEEE proyectan diferentes niveles de concentraciones de CO₂ para el año 2100, dependiendo del escenario que se trate. Sin embargo, se proyecta que en el escenario más optimista las emisiones de CO₂ alcanzarán las 550 ppm, lo cual significa que la Tierra experimentará por lo menos una duplicidad en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera con respecto al período pre-industrial (Figura 20).

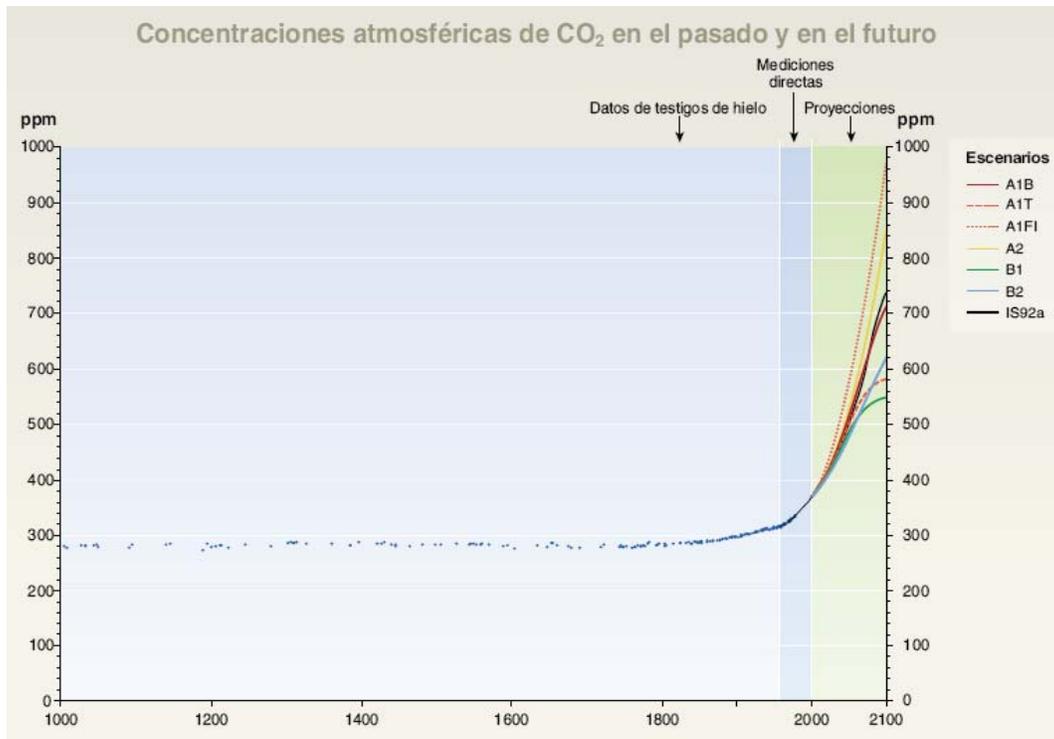


Figura 20. Concentraciones atmosféricas de CO₂ en el pasado y en el futuro.

4.1.3 Modelos de Circulación General (MCG)

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG) son algoritmos matemáticos que intentan simular el sistema climático de la Tierra. Estos modelos se encuentran en el extremo superior de la jerarquía de modelos del clima, son acoplados (atmósfera-océano y suelo) y predicen cambios de las variables en un mayor tiempo.

Los MCG utilizan las mismas ecuaciones de movimiento que un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT), siendo su propósito simular numéricamente cambios en el clima como resultado de cambios lentos en algunas condiciones de frontera (tales como la constante solar) o parámetros físicos (tal como la concentración de los gases de efecto invernadero). Los MCG corren para mayor tiempo, en el orden de años; tiempo suficiente para aprender sobre el clima en un sentido estadístico (es decir la media y la variabilidad) (OMS, 2010).

Los MCG con mayor aplicación a nivel mundial provienen de siete Centros de Predicción del Clima y Cambio Climático, y sus principales características son las siguientes:

Cuadro 19. Características generales de los Modelos de Circulación General (MCG)

Centro	País	Acrónimo	Modelo	Resolución	Escenarios
Max Planck Institute fur Meteorologie	Alemania	MPIfM	ECHAM4/O PYC3	T42	A2, B2
Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Inglaterra	HCCPR	HADCM3	3.75° * 2.5°	A1F1, A2, B1, B2
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	Australia	CSIRO	CSIRO-Mk2	R21	A1, A2, B1, B2
National Centre for Atmospheric Research	E.U.A	NCAR	NCAR-CSM NCAR-PCM	T42 T42	A2, A1B, A2, B2
Canadian Center for Climate Modeling and Analysis	Canadá	CCCma	CGCM2	T32	A2, B2
Center for Climate System Research (CCSR) National Center for Environmental Studies (NIES)	Japón/ E.U.A	CCSR/NI ES	CCSR/NIES AGCM + CCSR OGCM	T21	A1, A1F1, A1T, A2, B1, B2
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	E.U.A	GFDL	R30	R30	A2, B2

Fuente: IPCC, 2010

4.1.4 Modelos de Circulación General aplicados a la República Mexicana

El Centro de Ciencias de la Atmósfera, con la finalidad de desarrollar los escenarios de cambio climático para México, tanto en la variable de temperatura como de precipitación, optó por los modelos HADLEY (elaborado en el Hadley Centre usando la segunda versión del UK Met. Office's Unified Model; Mitchel *et al*, 1999), ECHAM (German Climate Research Center /Hamburg Model #4, Roeckner, 1992) y GFDL (US Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; Manabe *et al*, 1991), (Conde, 2003).

Estos Modelos de Circulación General (MCG) fueron seleccionados porque representan mejor el clima esperado regional, además de que están siendo usados por otros países localizados en la misma región geográfica que México (CCA, 2010).

Las principales fuentes de incertidumbre en los escenarios de cambio climático aplicados México son: a) incertidumbre en las emisiones futuras de gases de efecto invernadero, b) incertidumbres en la variabilidad natural, y c) incertidumbres asociadas a los modelos climáticos (CCA, 2010).

Los escenarios representan los promedios de períodos de treinta años (2011 a 2040, 2041 a 2070) usualmente llamados escenarios al 2020 y 2050. Esto reduce los efectos de la variabilidad natural esperada.

4.2 ESCENARIO BASE 1950-2000

Para la elaboración del escenario base se usaron cincuenta años de datos climatológicos. Con esta información se llevó a cabo el cálculo del promedio anual de las variables precipitación, temperatura media, mínima y máxima del período 1950-2000 con datos obtenidos a través del portal en internet del Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM).

4.2.1 Comportamiento de la temperatura media

Durante la segunda mitad del siglo XX, la temperatura media en el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca osciló entre los 13.5 y 16.5°C. La temperatura media mas baja en la región occidente con 13.5°C, en los municipios de Toluca y Zinacantepec

principalmente, debido a que las geoformas con mayor elevación se encuentran en esta área, con 3,000 m.s.n.m.

Por otro lado, la temperatura media de 14.5 °C se localizó en la mayor parte del área en estudio, al norte, centro y oriente, debido a que en gran extensión del territorio existe una vasta área que se caracteriza por tener grandes planicies, a la cual se le denomina “Valle de Toluca”, con una altitud entre los 2,500 y 3,000 m.s.n.m. Gran parte de esta planicie se encuentra destinada a la agricultura tanto de riego como de temporal (Figura 21).

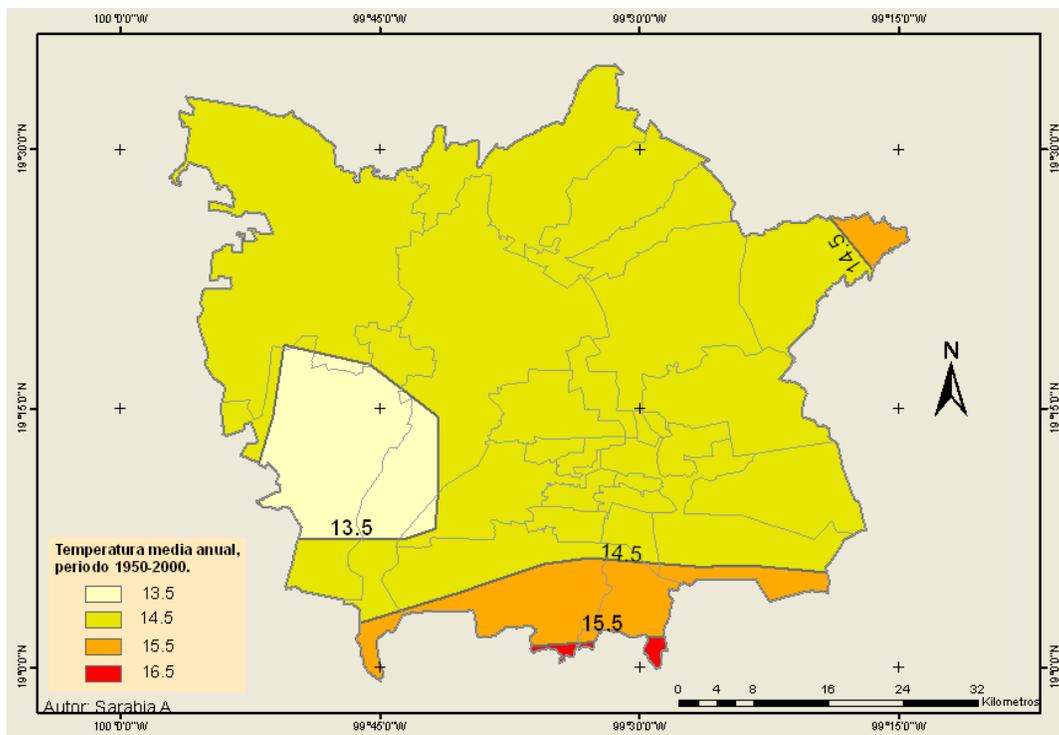


Figura 21. Temperatura media anual (isotermas) 1950-2000.

Las temperaturas medias con características más cálidas se situaron entre los 15.5 y 16.5° C. Las regiones con 15.5° C, se localizaron en la porción sur; y en una pequeña área al noreste de este distrito agrícola, la temperatura media tiene características más cálidas respecto a las existentes en la mayor parte del territorio, que es consecuencia de un descenso altitudinal, entre los 2,000 y 2,500 m.s.n.m. Esta temperatura se localiza en los municipios de Tenango del Valle, Joquicingo y Tianguistenco en la porción sur, y Huixquilican en el extremo noreste.

La temperatura media más cálida de 16.5°C, ocupó la porción sur de los municipios de Tenango del Valle y Joquicingo, colindantes con el distrito agrícola de Coatepec Harinas, dicha temperatura se debe a un marcado descenso altitudinal de esta área con respecto al resto de los municipios que pertenecen al distrito de Toluca (Figura 29).

Los requerimientos del cultivo del maíz tiene tres valores: óptimo, mínimo y máximo. Estos no son homogéneos sino que fluctúan según el subperíodo fenológico. Los requerimientos óptimos de temperatura son de 20° a 30° C, exceptuando la fase de germinación, que es de 20 a 25° C. Los valores mínimos fluctúan entre 10 y 20° C y los máximos entre 30 y 40° C.

4.2.2 Comportamiento de la temperatura mínima

El comportamiento de la temperatura mínima en el DDR-Toluca durante el período 1950-2000 se ubicó entre los 5.7 y 8.4°C durante el ciclo agrícola primavera-verano, correspondiente a los meses de mayo a octubre, estos valores térmicos se encontraron por debajo de los parámetros óptimos de temperatura requeridos por el cultivo del maíz en sus diferentes estadios fenológicos, ya que desde la fecha de siembra hasta la madurez, el promedio mensual de la temperatura mínima registrada en el área en estudio fue inferior al umbral térmico requerido por este cereal (Cuadro 20).

Cuadro 20. Escenario base de la temperatura mínima (°C), *versus* requerimiento mínimo térmico por fase fenológica en el DDR-Toluca.

Fase Fenológica	Germinación	Crecimiento vegetativo	Floración	Formación de fruto	Madurez
Meses	May	Jun-Jul	Ago	Ago-Sep	Oct
Escenario base 1950-2000	7.2	8.4	8	7.8	5.7
Requerimiento mínimo de la fase fenológica	10	15	20	20	20

Fuente: Elaboración propia, con datos del Centro de Investigación Agrícola, Morelia, Mich, 1983 (requerimiento mínimo), y CCA, 2010 (escenario base).

Debido a que las temperaturas mínimas registradas en el DDR-Toluca durante el período 1950-2000 fueron inferiores a las requeridas por el cultivo del maíz en sus diferentes subperíodos fenológicos, este cereal tuvo dificultades para llevar a cabo su óptimo desarrollo, ya que las temperaturas inferiores a los umbrales óptimos mínimos retardan el crecimiento de la planta, lo cual repercute directamente en el tamaño del grano y de la mazorca.

4.2.3 Comportamiento de la temperatura máxima

La temperatura máxima en el área en estudio durante el período 1950-2000 osciló entre los 19 y 22.5°C durante el ciclo agrícola primavera-verano, estos valores térmicos se encontraron dentro o muy cercanos a los parámetros térmicos óptimos requeridos por el cultivo del maíz en sus diferentes fases fenológicas, por lo que las temperaturas máximas promedio registradas en el DDR-Toluca no representaron ningún obstáculo para que se llevara a cabo un apropiado desarrollo fenológico de este cereal (Cuadro 21).

Cuadro 21. Escenario base de la temperatura máxima (°C), *versus* requerimiento óptimo térmico por fase fenológica en el DDR-Toluca.

Fase Fenológica	Germinación	Crecimiento vegetativo	Floración	Formación de fruto	Madurez
Meses	May	Jun-Jul	Ago	Ago-Sep	Oct
Escenario base 1950-2000	22.5	19.9	19.4	19.2	19.1
Requerimiento óptimo por fase fenológica	20-25	20-30	20-30	20-30	20-30

Fuente: Elaboración propia, con datos del Centro de Investigación Agrícola, Morelia, Mich, 1983 (requerimiento óptimo), y CCA, 2010 (escenario base).

4.2.4 Comportamiento de la precipitación

La distribución espacial de la precipitación promedio anual durante el período 1950-2000 en el DDR-Toluca, osciló de 850 a 1,250 mm anuales. La región con los niveles más bajos de precipitación se localizó en el noroeste del distrito, con un promedio de 850 mm, pues es el área que posee los rangos altitudinales de menor elevación. Otra región que presentó valores bajos fue el centro, centro-occidente y centro-norte del distrito agrícola de Toluca con una precipitación promedio de 950 mm. Estas dos regiones cubrieron alrededor de 50% del DDR, mismas que poseen rangos óptimos de precipitación para el cultivo del maíz.

En la porción sur, sur-oeste y en la región noreste se registraron 1,050 mm anuales en promedio. Estas áreas coinciden con estructuras geomorfológicas elevadas como el Cerro la Calera, con una altitud de 3,740 m.s.n.m.

La precipitación promedio más elevada se situó entre los 1,150 y 1,250 mm. Las regiones en las cuales se presentaron los valores de precipitación de 1,150 mm se localizaron en el sureste y en el extremo suroeste del distrito; esta acumulación es el resultado de las grandes elevaciones existentes en estas áreas, dentro de las cuales se localiza el Nevado de Toluca con una altitud de 4,680 m, y el Cerro la Corona con una elevación superior a los 3,000 m.s.n.m. Por otro lado la isoyeta de 1,250 mm se localizó en el extremo sureste del DDR-Toluca, en donde se ubica la Sierra de las Cruces, la cual tiene una altitud superior a los 3,000 m.s.n.m. y forma parte del Sistema Volcánico Transversal (Figura 22).

Las áreas con alto rendimiento por hectárea deben disponer de precipitación pluvial bien distribuida y que acumulen más de 800 mm de lluvia de mayo a noviembre (Reyes, 1990). En el DDR-Toluca el mayor rendimiento obtenido durante el ciclo 1999-2008 en la agricultura de temporal fue de 4.60 ton/ha, en 1999, ya que los niveles en la cantidad y periodicidad de las precipitaciones fueron idóneas para el desarrollo óptimo del cultivo, en el ciclo primavera-verano. Según datos del SIAP, en el año 2008, 90% de la producción de maíz se llevó a cabo en este ciclo agrícola, mismo que generalmente inicia entre el 1° y 31 de mayo.

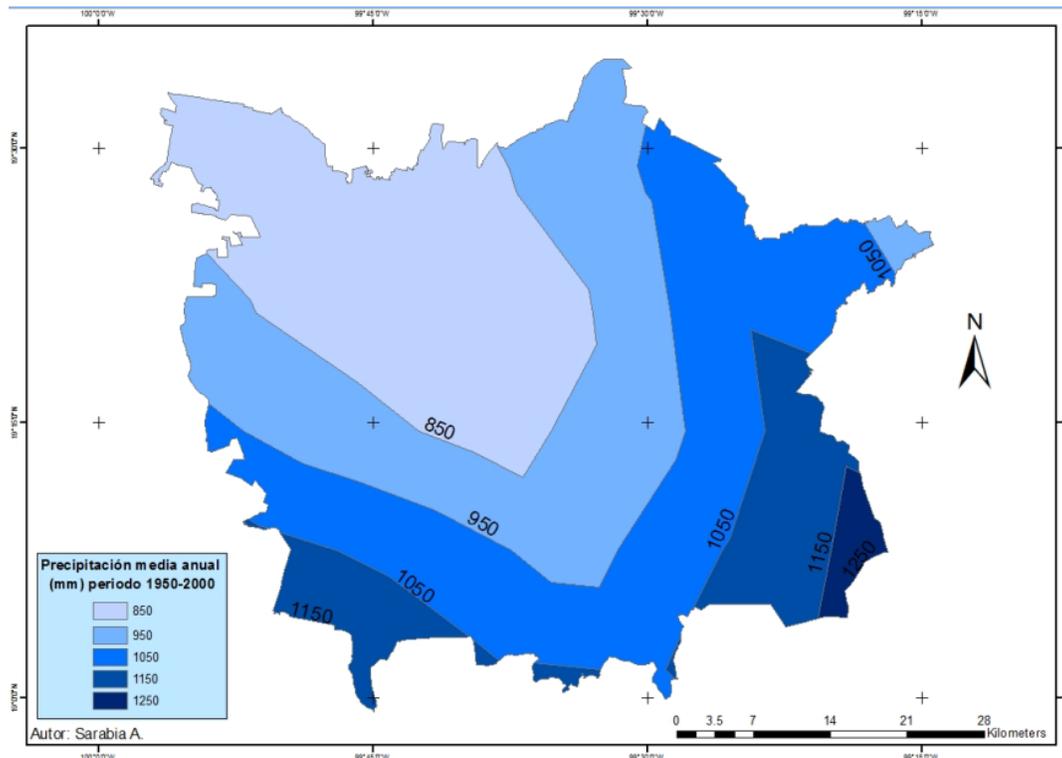


Figura 22. Precipitación media anual (isoyetas) 1950-2000.

Los mayores rendimientos de temporal se localizaron en áreas aledañas a la estación 15203 Calixtlahuaca, ubicada a los 19° 20' de Latitud Norte y 99° 41' de Longitud Oeste, y localizada al noroeste del municipio de Toluca. La cantidad de precipitación que se presentó de mayo a noviembre tuvo una buena distribución con respecto a la cantidad de agua que requiere el cultivo durante el período de germinación, crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y maduración. Entre mayo y noviembre de 1999, la precipitación registró 753 mm, muy cerca del nivel recomendable de precipitación que es 800 mm, lo que permitió un desarrollo óptimo en el cultivo del maíz (Cuadro 22).

Cuadro 22. Distribución de la precipitación durante mayo - noviembre de 1999, en la estación 15203 (Calixtlahuaca), municipio de Toluca.

	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Total
Precipitación (mm)	70	140	127	248	104	38	26	753

Fuente: INIFAP, 2008

Según Llanos (1984), durante la etapa de germinación y desarrollo vegetativo (duración aproximada de sesenta días), se recomienda que la planta reciba alrededor de 215 milímetros de agua para su óptimo desarrollo en sus dos primeras fases de crecimiento; estos requerimientos se cumplieron en el año 1999 durante mayo, junio y parte de julio en la estación de Calixtlahuaca, ya que la cantidad precipitada en estos meses sumó 220 mm. Durante la etapa de floración y maduración (después de sesenta días de la nacencia), se recomienda que la planta reciba por lo menos entre 400 y 600 mm hasta el final del ciclo agrícola (Cuadro 23), estos requerimientos también fueron cubiertos en la estación de Calixtlahuaca, ya que durante la etapa de floración y maduración correspondientes a los meses entre julio a noviembre hubo una precipitación de 563 mm. Debido a que la precipitación tuvo una distribución muy similar a la que marcan los requerimientos hídricos óptimos para el desarrollo del cultivo del maíz, en 1999 se alcanzaron los niveles más altos de rendimiento en las superficies de temporal durante el período 1999-2008.

Cuadro 23. Requerimientos hídricos del maíz.

Subperíodos fenológicos	Requerimientos hídricos (milímetros)			Tiempo estimado (días)
	Mínimo	Óptimo	Máximo	
Total ciclo vegetativo	400-500	500-800	1000	
1. Germinación		45		15 – 25
2. Crecimiento vegetativo		170		25 – 40
3. Floración		220		15 – 20
4. Formación de fruto: estado lechoso y masoso		215		35 – 45
5. Madurez		90		10 - 15

Fuente: Flores *et al.*, (2004)

Las normales climatológicas durante el período 1950-2000 reportaron 916.3 mm de precipitación de mayo a noviembre, lo que significa que los niveles hídricos requeridos fueron satisfactorios para la planta, el cual se cita como de 800 mm.

En el escenario base se registró que en la mayor parte del ciclo agrícola primavera-verano se sobrepasaron los requerimientos hídricos. En la etapa de germinación y desarrollo vegetativo (duración aproximada de sesenta días desde la nacencia), la precipitación en las normales climáticas reportó 253.2 mm, lo cual sobrepasó en 38.2

mm los requerimientos hídricos durante estas fases del desarrollo de la planta. Por otro lado, durante la etapa de floración y maduración (después de sesenta días de la nacencia), se reportó 663.1 mm de precipitación entre julio y agosto, lo cual rebasó en 63.1 mm la cantidad de agua recomendada durante esta etapa. Sin embargo, como el cultivo del maíz tiene una resistencia hasta los 1,000 mm de agua durante un ciclo agrícola, este ligero exceso de agua en el cultivo del maíz no representó una gran problemática para la producción y rendimiento durante el período 1950-2000 (Figura 23).

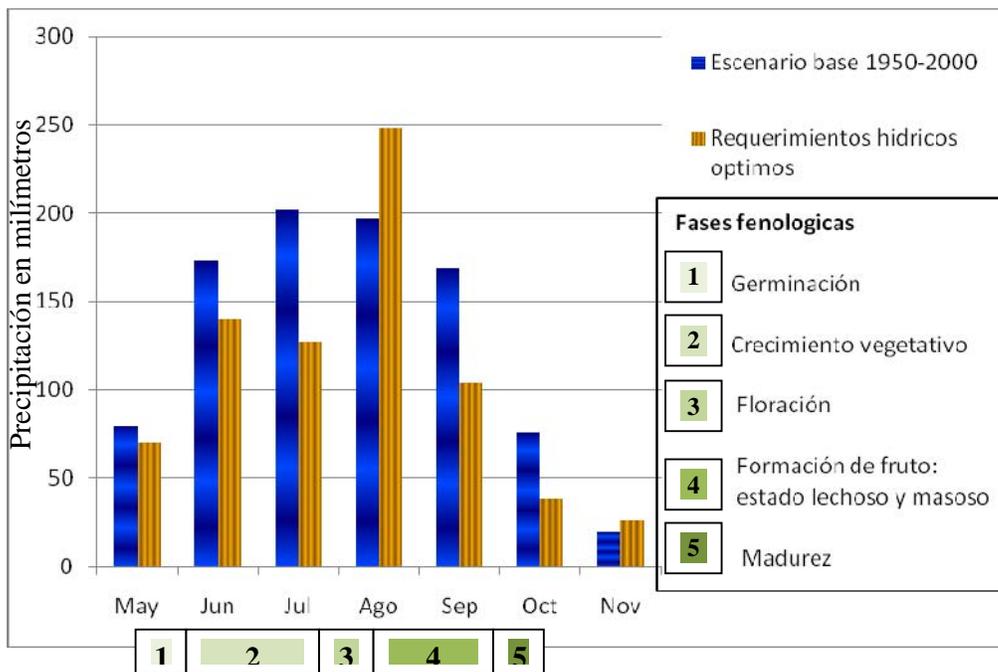


Figura 23. Requerimientos hídricos óptimos (datos de referencia, estación climatológica de Calixtlahuaca) con respecto al escenario base.

El área en estudio y el estado de México contaron durante el período mencionado con las condiciones pluviométricas favorables para el cultivo del maíz. Debido a esto, el estado de México siempre ha destacado en la producción de este grano a nivel nacional, situándose en 2008 como el tercer mayor productor en la República Mexicana con un rendimiento de 3.74 ton/ha en el DDR-Toluca dentro de la modalidad de temporal, cuando el promedio nacional se ubicó en 2.36 ton/ha durante ese mismo año.

4.3 RESULTADOS DEL MODELO HADLEY (HORIZONTE 2050)

4.3.1 Rangos proyectados en la temperatura media, mínima y máxima en los escenarios de emisiones A2 y B2, y análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.

- **Escenario B2**

- *Anomalías proyectadas en la temperatura media*

Dentro del escenario B2 del modelo HADCM3 se proyecta un aumento mínimo en la temperatura en el DDR-Toluca. No se estima un cambio importante en la distribución espacial de las temperaturas medias anuales, de la misma forma que en el escenario base se proyectan cuatro regiones con una temperatura media anual entre los 13.5 y 16.5°C, con una distribución espacial casi idéntica con respecto a las normales climáticas del período 1950-2000 (Figura 24).

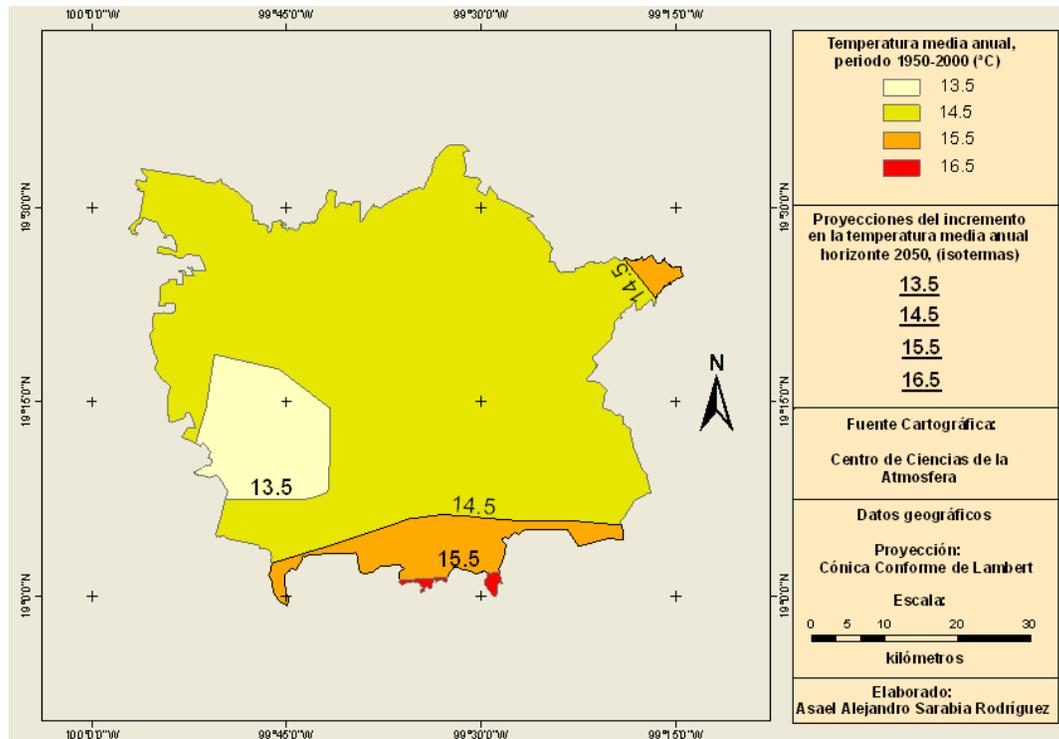


Figura 24. Incremento de la temperatura media anual, según modelo Hadley (escenario B2), horizonte 2050.

- *Anomalías proyectadas en la temperatura mínima*

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), en el escenario B2 se proyecta un aumento de la temperatura mínima en el ciclo agrícola primavera-verano de 2.2°C en promedio, para el año 2050. Este incremento presentaría diferentes anomalías de un mes a otro (Figura 25), debido a esto el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse beneficiado o perjudicado dependiendo de la etapa de desarrollo fenológico de la planta en que se presenten los mayores incrementos de la temperatura.

En general, la fecha de siembra se realiza entre el 1° y el 31 de mayo, en el distrito agrícola de Toluca, así que en este mes se desarrolla regularmente la fase fenológica de germinación en el área en estudio. Los requerimientos óptimos de temperatura en esta fase fenológica es de 20 a 25°C, y una mínima de 10°C; en las normales climáticas del periodo 1950-2000 se registró una temperatura mínima promedio de 7.2°C en mayo; durante este mismo mes la anomalía esperada en el escenario B2 del modelo Hadley marca un ascenso en la temperatura de 3°C, por lo que para el año 2050 la temperatura mínima se ubicaría en los 10.2°C durante mayo dentro de este escenario, este aumento térmico beneficiara al cultivo del maíz porque se encontraría dentro del umbral mínimo requerido por este cereal en esta etapa fenológica.

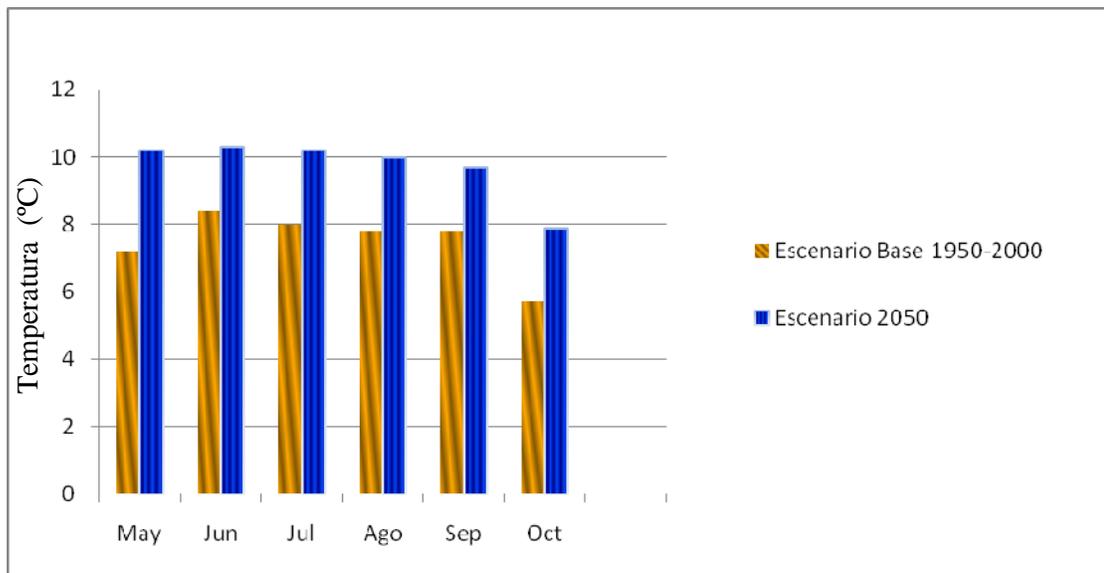


Figura 25. Escenario base 1950-2000 *versus* proyección de la temperatura mínima mensual, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.

El crecimiento vegetativo se desarrolla principalmente en junio y julio en el DDR-Toluca. Dentro del escenario base 1950-2000 se obtuvo que la temperatura mínima registrada durante junio y julio se ubicó entre los 8.4 y 8°C respectivamente, temperaturas que fueron poco favorables para el desarrollo de la planta en esta fase fenológica, ya que la temperatura mínima recomendable es de 15°C. Aunque las proyecciones del escenario B2 estiman un incremento en la temperatura mínima promedio en junio y julio de 10.3 y 10.2°C respectivamente, este incremento térmico no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros óptimos recomendados.

La fase fenológica de floración se lleva a cabo principalmente en agosto. En esta etapa fenológica, la temperatura óptima es de 20 a 30°C (Flores *et al.*, 2000), y las proyecciones del escenario B2 marcan un aumento de la temperatura mínima promedio a 10°C. Por tal motivo, aun cuando hay un aumento de temperatura de 2.2°C con respecto a normales climáticas, este incremento no sería suficiente para encontrarse cerca de los niveles óptimos térmicos en esta fase fenológica.

La formación de fruto, tanto en su estado lechoso y masoso, es la fase fenológica que requiere un mayor número de días para desarrollarse (entre 35 y 45 días); en el distrito agrícola de Toluca, este estadio fenológico se lleva a cabo en agosto y septiembre; durante la fase de formación de fruto los requerimientos térmicos óptimos son de 20 a 30°C, aun cuando existe un aumento de temperatura en agosto y septiembre con 10 y 9.7°C respectivamente, estos valores no se encontrarían cerca de los niveles óptimos térmicos.

La fase fenológica de madurez se lleva a cabo entre diez y quince días, en octubre en el DDR-Toluca. Los requerimientos óptimos dentro de esta fase se ubican entre los 20 y 30°C. Sin embargo, aun cuando se proyecta un incremento de temperatura de 2.2°C para el año 2050, situándose en 7.9°C, este aumento aún se encontrará lejos de los niveles óptimos térmicos (Figura 26).

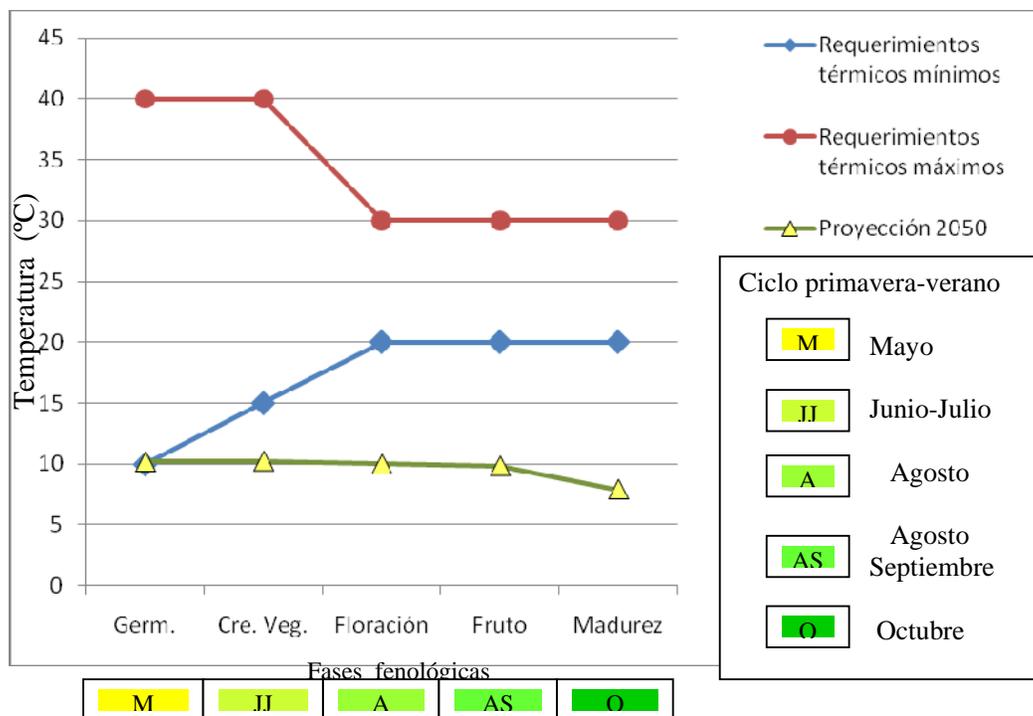


Figura 26. Requerimientos térmicos óptimos *versus* proyección de la temperatura mínima en los subperíodos fenológicos, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.

No obstante que el incremento de la temperatura proyectado en este escenario no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros térmicos recomendados en las fases fenológicas de crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez. Este aumento en la temperatura mejoraría las condiciones térmicas para que se lleve a cabo un mejor desarrollo de este cereal durante estos estadios fenológicos.

- *Anomalías proyectadas en la temperatura máxima*

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), en el escenario B2 se proyecta un incremento de la temperatura máxima en el ciclo agrícola primavera-verano de 2.3°C en promedio, para el año 2050. Este incremento presentaría diferentes anomalías de un mes a otro (Figura 27), debido a esto el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse beneficiado o perjudicado dependiendo de la etapa de desarrollo fenológico de la planta en que se presenten los mayores incrementos de la temperatura.

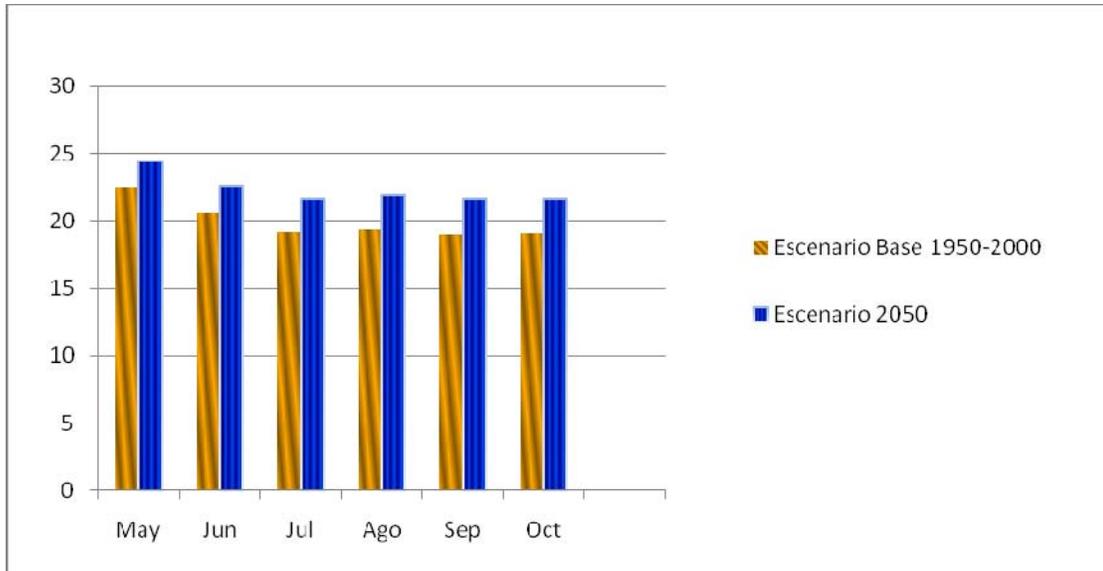


Figura 27. Escenario base 1950-2000 *versus* proyección de la temperatura máxima mensual, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.

La fecha de siembra en el DDR-Toluca se lleva a cabo entre el 1° y 31 de mayo, mes en el cual se proyecta un incremento de 1.9°C con respecto al escenario base, con lo cual la temperatura máxima promedio se elevaría a 24.4°C. Este aumento favorecería de gran manera al desarrollo de la planta en el estadio fenológico de germinación, ya que se encontraría dentro de los rangos óptimos de temperatura citados para este cultivo, los cuales se sitúan entre los 20 y 25°C, y muy por encima de los requerimientos mínimos térmicos los cuales se ubican en los 10°C.

El crecimiento vegetativo se desarrolla principalmente en junio y julio en el DDR-Toluca. Dentro del escenario base 1950-2000 se registró que las temperaturas máximas durante estos meses oscilaron entre los 20.6 y 19.2°C respectivamente, estas temperaturas promedio mensuales se ubicaron muy cerca de los umbrales óptimos citados para este cereal en esta fase fenológica, ya que el parámetro térmico recomendado es entre 20 y 30°C. Sin embargo, con las proyecciones del escenario B2 se calcula que habría un incremento en la temperatura media en junio y julio de 22.6 y 21.7°C respectivamente, incremento térmico que situaría a las temperaturas máximas por encima del umbral térmico óptimo que demanda el cultivo durante esta fase fenológica. Debido a esto el cultivo del maíz se vería favorecido de manera importante durante el crecimiento vegetativo.

La fase fenológica de floración se desarrolla principalmente en agosto, mes en que la temperatura óptima es de 20 a 30°C (Flores *et al.*, 2000). Las proyecciones en este escenario marcan un aumento de la temperatura máxima a 21.9°C. Este aumento de 2.5°C con respecto a las normales climáticas, mejoraría notablemente las condiciones térmicas para el cultivo en esta fase fenológica, ya que la temperatura se encontraría dentro de los parámetros térmicos óptimos.

Durante la formación del fruto los requerimientos térmicos óptimos son de 20 a 30°C. El incremento proyectado en la temperatura en los meses de agosto y septiembre; con 21.9 y 21.7°C respectivamente, mejoraría notablemente el desarrollo en la formación del fruto en el cultivo del maíz.

El subperíodo fenológico de madurez se desarrolla principalmente en octubre en el DDR-Toluca, mes en el cual los requerimientos óptimos oscilan entre 20 y 30°C. En este escenario se espera un incremento térmico de 2.6°C, con lo cual la temperatura máxima mensual se ubicaría en 21.7°C, lo que conllevaría un mejoramiento en las condiciones térmicas en esta etapa fenológica (Figura 28).

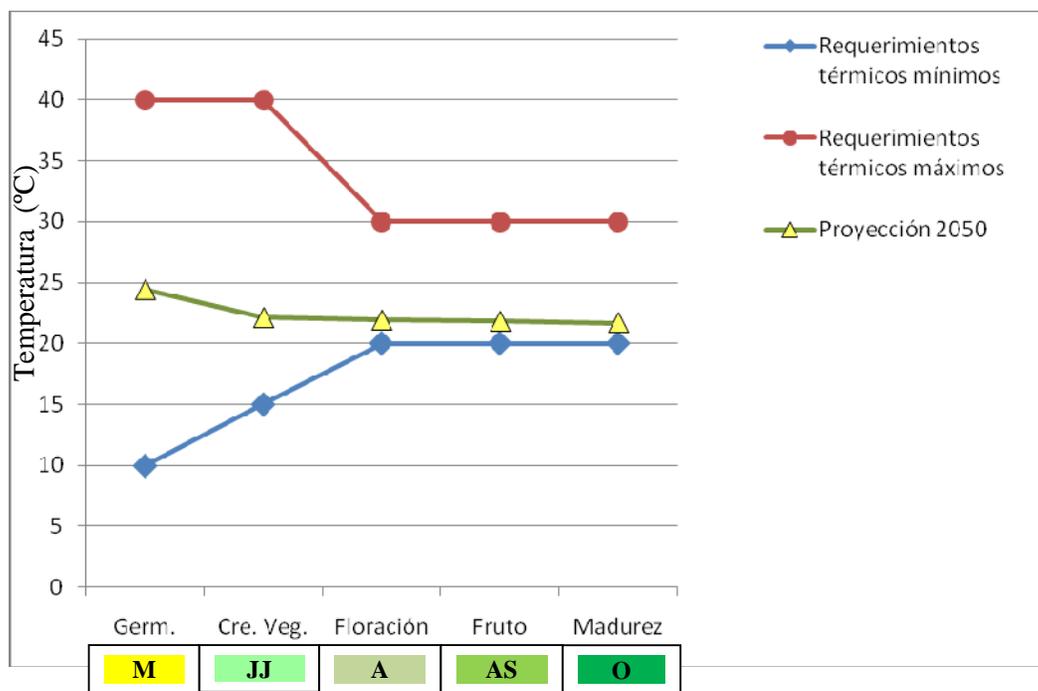


Figura 28. Requerimientos térmicos óptimos *versus* proyección de la temperatura máxima en las fases fenológicas, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.

El incremento proyectado en las temperatura máximas mensuales en el ciclo agrícola primavera-verano en el área en estudio, favorecerían notablemente las condiciones térmicas en todas las fases fenológicas del cultivo del maíz, ya que estos valores se encontrarían dentro de los parámetros térmicos óptimos citados para este cereal.

- **Escenario A2**

- *Anomalías proyectadas en la temperatura media*

En el modelo HADCM3, escenario A2, se proyecta un cambio significativo en la distribución de las temperaturas medias anuales en el DDR-Toluca, a diferencia del escenario base, en éste se proyectan tres regiones con diferentes temperaturas medias, las cuales se sitúan entre los 14.5 y 16.5°C. Esta disminución en los rangos de las temperaturas medias responde a que los modelos de circulación general de la atmósfera no toman en cuenta la geomorfología existente en la superficie terrestre. Debido a esto, la temperatura media anual que se ubicó en los 13.5°C en las normales climáticas del período 1950-2000, desaparece en el escenario A2.

La temperatura media más baja que se proyecta es de 14.5°C, de la misma manera que en el escenario base esta temperatura cubriría la mayor parte del territorio del DDR-Toluca. La temperatura media de 15.5°C, ocuparía una mayor superficie dentro del área en estudio y se distribuiría en la región noroeste del distrito agrícola, en los municipios de Almoloya de Juárez y Temoaya. Así mismo, contendría una mayor superficie en la región noreste en el municipio de Huixquilucan y, finalmente, también tendría una redistribución espacial en la porción sur del territorio en los municipios de Tianguistenco y Tenango del Valle principalmente.

La temperatura media más cálida de 16.5°C, se proyecta que aumentaría su superficie en el DDR-Toluca, aunque no de manera significativa, y solamente se distribuiría en pequeñas porciones de la región sur del área de estudio en los municipios de Joquicingo y Tenango del Valle (Figura 29).

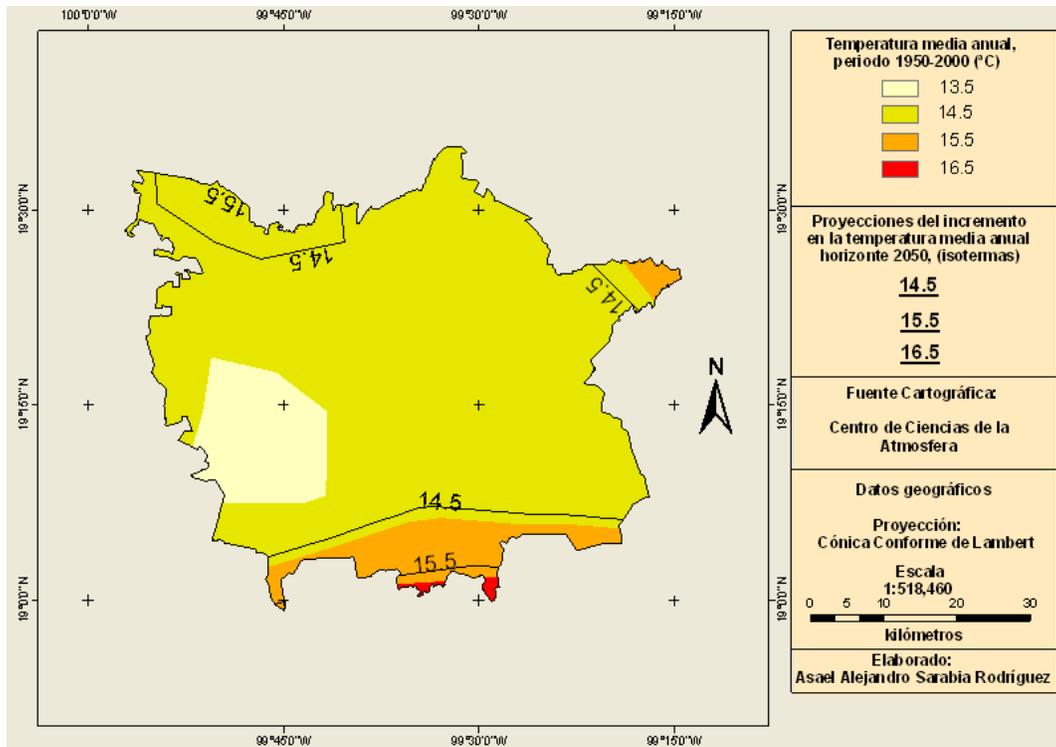


Figura 29. Incremento de la temperatura media anual, según modelo Hadley (escenario A2), horizonte 2050.

- *Anomalías proyectadas en la temperatura mínima*

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), en el escenario A2 se espera un aumento de la temperatura mínima promedio de 2.5°C entre mayo y octubre, presentándose los mayores incrementos durante el invierno. Los valores de las temperaturas mínimas proyectadas para el ciclo agrícola primavera-verano dentro de este escenario, son muy similares a los resultados obtenidos en el escenario B2 de este mismo modelo, con tan sólo una diferencia de 0.3°C. Este incremento de temperatura presentaría diferentes niveles de fluctuaciones de un mes a otro y como consecuencia de esto la producción de maíz podría crecer o descender dependiendo en que fase fenológica se presenten los mayores incrementos en la temperatura (Figura 30).

La fecha de siembra en el distrito agrícola de Toluca se lleva a cabo entre el 1° y 31 de mayo cuando el maíz se encuentra en el estadio fenológico de germinación. En este escenario se proyecta un incremento de 2.9°C con respecto al escenario base, con lo cual la temperatura mínima en promedio durante este mes se elevaría a 10.1°C Este aumento

favorecería al desarrollo de la planta, ya que este valor térmico se ubicaría por encima del umbral térmico mínimo citado para el cultivo del maíz, el cual se sitúa en 10°C.

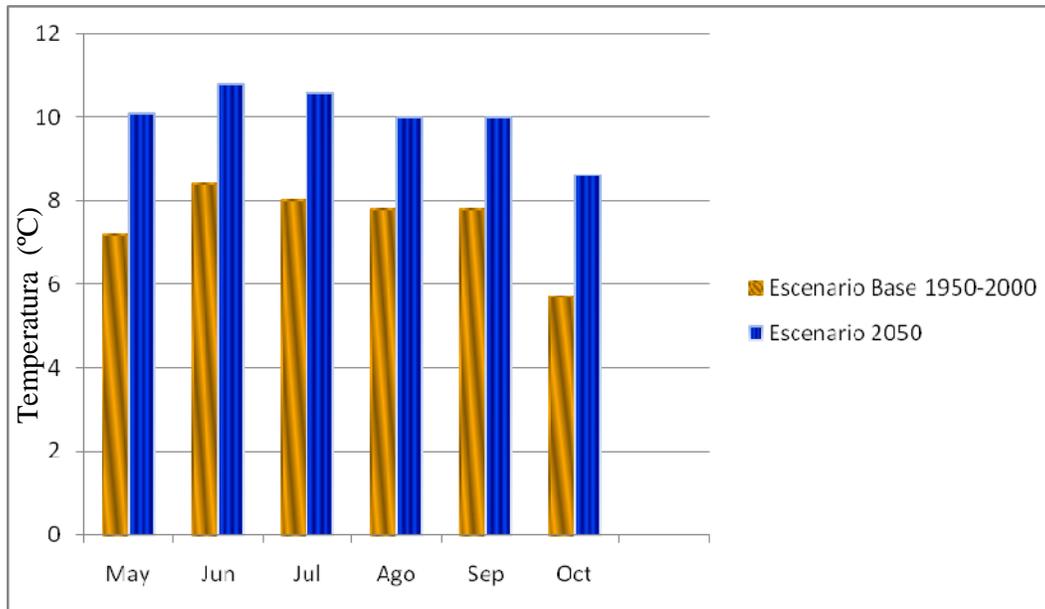


Figura 30. Escenario base 1950-2000 *versus* temperatura mínima mensual, modelo Hadley (Escenario A2).

El segundo subperíodo fenológico, que corresponde al crecimiento vegetativo, se desarrolla en junio y julio, en los cuales se espera un aumento en la temperatura de 2.4 y 2.6°C respectivamente para el año 2050. Con estos incrementos, la temperatura mínima mensual se situaría en los 10.8°C para junio, y 10.6°C para julio, estos ascensos favorecerán cultivo, ya que las temperaturas medias se encontrarían dentro de los requerimientos óptimos de este cereal en esta fase fenológica. Este incremento térmico no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros óptimos recomendados.

La fase fenológica de floración se desarrolla en agosto, mes en que la temperatura óptima es de 20 a 30°C (Flores *et al.*, 2000), y las proyecciones del escenario A2 marcan un aumento de la temperatura mínima a 10°C. Por tal motivo, aun cuando hay un aumento de temperatura de 2.2°C con respecto a las normales climáticas, este incremento no sería suficiente para encontrarse por encima del umbral térmico mínimo requerido en esta fase fenológica.

Durante el penúltimo subperíodo fenológico, en la cual se lleva a cabo la formación del fruto, tanto en su estado lechoso y masoso, el cultivo del maíz requiere un mayor número de días para desarrollarse, entre 35 y 45 días. En el distrito agrícola de Toluca, esta fase fenológica se lleva a cabo en agosto y septiembre. Durante la fase de formación de fruto los requerimientos térmicos óptimos son de 20 a 30°C, aun cuando existe un aumento de temperatura en agosto y septiembre de 2.2°C para ambos meses. Estos valores no se encontrarían cerca de los niveles óptimos térmicos requeridos por el cultivo del maíz en este subperíodo fenológico.

La madurez se desarrolla entre diez y quince días, correspondiente a octubre en el DDR-Toluca. Los requerimientos óptimos de esta fase son entre los 20 y 30°C. Sin embargo, aun cuando se proyecta un incremento de la temperatura mínima de 2.9°C para el año 2050, aproximadamente en los 8.6°C, este aumento aun se encontraría lejos de los niveles óptimos térmicos (Figura 31).

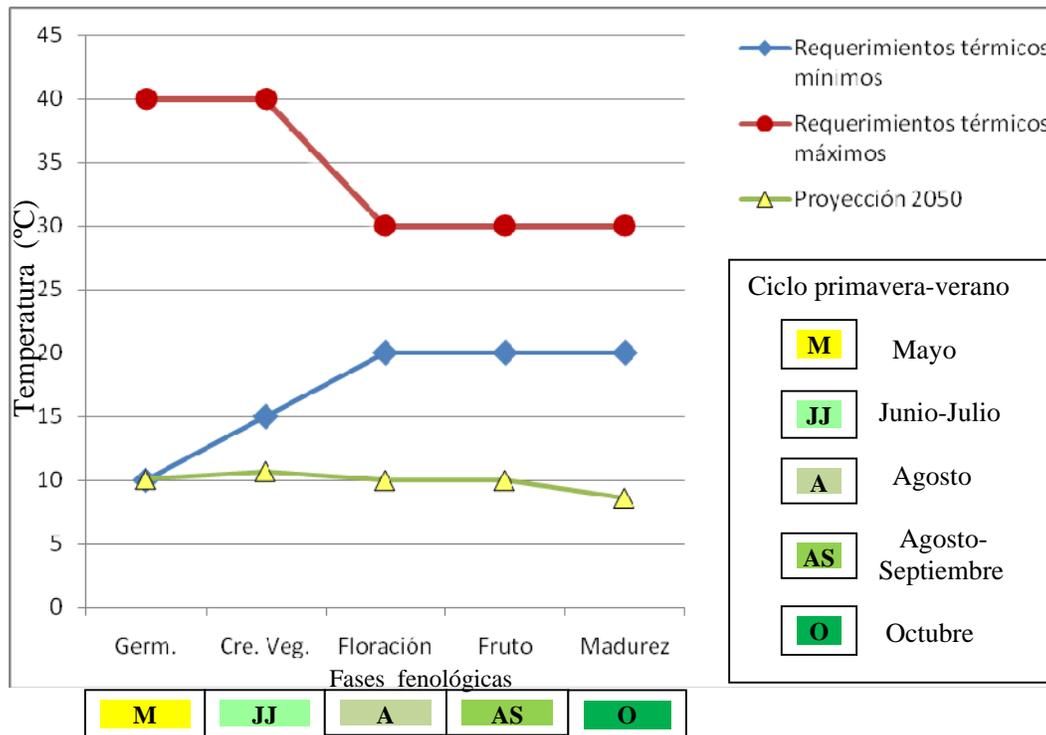


Figura 31. Requerimientos térmicos óptimos *versus* proyección de la temperatura mínima en las fases fenológicas, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050.

Las anomalías esperadas en la temperatura mínima promedio del modelo HADCM3, en los escenarios B2 y A2, estiman que el incremento térmico proyectado para el ciclo agrícola primavera-verano en el área en estudio, no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros térmicos recomendados en las fases fenológicas de crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez. Sin embargo, este aumento en la temperatura mejoraría las condiciones térmicas para que se lleve a cabo un mejor desarrollo de este cereal durante estos estadios fenológicos.

- *Anomalías proyectadas en la temperatura máxima*

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), se proyecta en el escenario A2 un incremento de la temperatura máxima en el ciclo agrícola primavera-verano de 2.8°C en promedio, para el año 2050. Este incremento presentaría diferentes anomalías de un mes a otro (Figura 32), debido a esto el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse beneficiado o perjudicado dependiendo de la etapa de desarrollo fenológico de la planta en que se presenten los mayores incrementos de la temperatura.

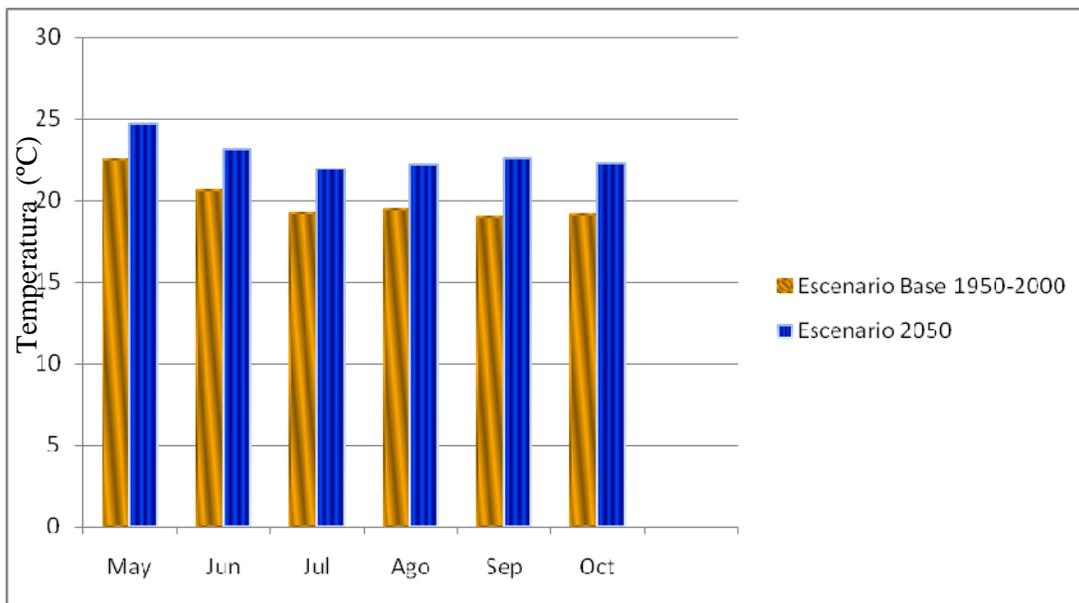


Figura 32. Escenario base 1950-2000 *versus* proyección de la temperatura máxima mensual, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050.

La fecha de siembra en el área en estudio se lleva a cabo entre el 1° y 31 de mayo, mes en el cual se estima un incremento de 2.2°C con respecto al escenario base, con lo cual la temperatura máxima promedio se elevaría a 24.7°C. Este aumento favorecería considerablemente al desarrollo de la planta en la fase fenológica de germinación, ya que se encontraría dentro de los rangos óptimos de temperatura citados para este cultivo, los cuales se sitúan entre los 20 y 25°C, y muy por encima de los requerimientos mínimos térmicos los cuales se ubican en los 10°C.

El crecimiento vegetativo se desarrolla principalmente en junio y julio en el DDR-Toluca. Dentro del escenario base 1950-2000 se registró que las temperaturas máximas durante estos meses oscilaron entre los 20.6 y 19.2°C respectivamente, estas temperaturas promedio mensuales se ubicaron muy cerca de los umbrales óptimos citados para este cereal en esta fase fenológica, ya que el parámetro térmico recomendado es entre 20 y 30°C. Sin embargo, con las proyecciones del escenario A2 se estima que habría un incremento en la temperatura media en junio y julio de 23.1 y 21.9°C respectivamente, incremento térmico que situaría a las temperaturas máximas dentro de los parámetros térmicos óptimos que demanda el cultivo durante esta fase fenológica. Debido a esto el cultivo del maíz se vería favorecido de manera importante durante el crecimiento vegetativo.

La fase fenológica de floración se desarrolla principalmente en agosto, mes en que la temperatura óptima es de 20 a 30°C (Flores *et al.*, 2000). Las proyecciones en este escenario marcan un aumento de la temperatura máxima promedio a 22.2°C. Este aumento de 2.8°C con respecto a las normales climáticas, mejoraría notablemente las condiciones térmicas para el cultivo en esta fase fenológica, ya que la temperatura se encontraría dentro de los parámetros óptimos térmicos.

Durante la formación del fruto los requerimientos térmicos óptimos son de 20 a 30°C. El incremento proyectado en la temperatura en los meses de agosto y septiembre; con 22.2 y 22.6°C respectivamente, mejoraría notablemente el desarrollo en la formación del fruto en el cultivo del maíz.

El subperíodo fenológico de madurez se desarrolla principalmente en octubre en el DDR-Toluca, mes en el cual los requerimientos óptimos oscilan entre 20 y 30°C. En

este escenario se espera un incremento térmico de 3.2°C, con lo cual la temperatura máxima mensual se ubicaría en 22.3°C, lo que conllevaría un mejoramiento en las condiciones térmicas en esta etapa fenológica (Figura 33).

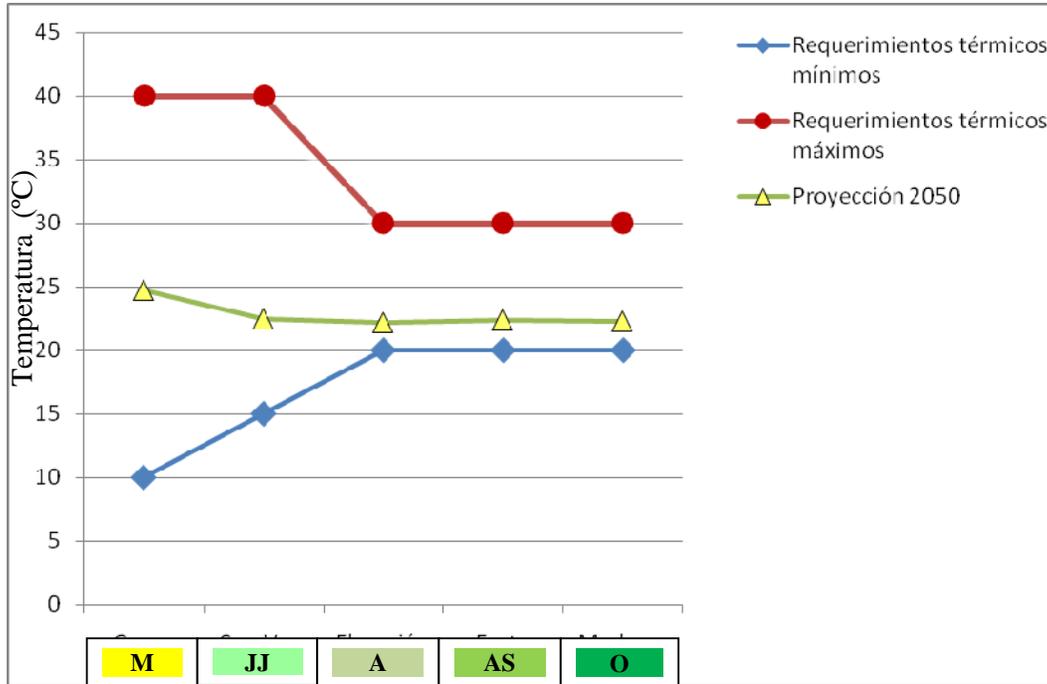


Figura 33. Requerimientos térmicos óptimos *versus* proyección de la temperatura máxima en las fases fenológicas, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050.

La anomalía térmica proyectada en la temperatura máxima en el ciclo agrícola primavera-verano en el modelo HADCM3, escenarios B2 y A2, favorecería notablemente las condiciones térmicas en todas las fases fenológicas del cultivo del maíz, ya que estos valores se encontrarían dentro de los parámetros térmicos óptimos citados para este cereal.

4.3.2 Rangos proyectados en la precipitación media en los escenarios de emisiones A2 y B2, y análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.

- **Escenario B2**

En el escenario B2, se proyectan los mismos valores en la precipitación media anual que en el escenario base, los cuales fueron entre los 850 y 1,250 mm; sin embargo, habría una redistribución espacial de la precipitación media en la mayor parte del distrito agrícola de Toluca.

La redistribución espacial proyectada de la precipitación media en la isoyeta de 850 mm, modificaría el volumen hídrico precipitado en algunas regiones de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca y Temoaya principalmente. La redistribución de la isoyeta de 800 mm comprendería una mayor superficie con respecto al escenario base y se recorrería hacia el oriente y sur del distrito agrícola.

La isoyeta de 950 mm también presentaría un desplazamiento espacial muy similar a la proyectada en el rango de los 850 mm, ya que también tendría una mayor extensión hacia el oriente y sur del área de estudio. Este cambio de distribución espacial modificaría la cantidad de agua precipitada en algunas regiones de los municipios de Zinacantepec, Tenango del Valle, Texcalyacac, Lerma y Otzolotepec.

La precipitación media de 1,050 mm, tendría una reducción espacial en la región sur del distrito agrícola, lo que modificaría de manera descendente el volumen hídrico precipitado en algunas regiones de los municipios de Toluca y Tenango del Valle. Esta misma isoyeta, en la porción occidental del DDR-Toluca, modificaría el volumen de agua precipitada en algunas áreas de los municipios de Tianguistenco, Xalatlaco y Ocoyoacac.

La proyección de la precipitación media de 1,150 mm, presenta un desplazamiento hacia norte en la región sur-oeste del distrito agrícola, lo que incrementaría el volumen pluviométrico en algunas zonas de los municipios de Zinacantepec, Toluca y Tenango del Valle. Esta misma isoyeta tendría un pequeño desplazamiento hacia el poniente,

modificando la cantidad de agua precipitada de manera descendente en unas pequeñas regiones de los municipios de Tianguistenco y Xalatlaco (Figura 34).

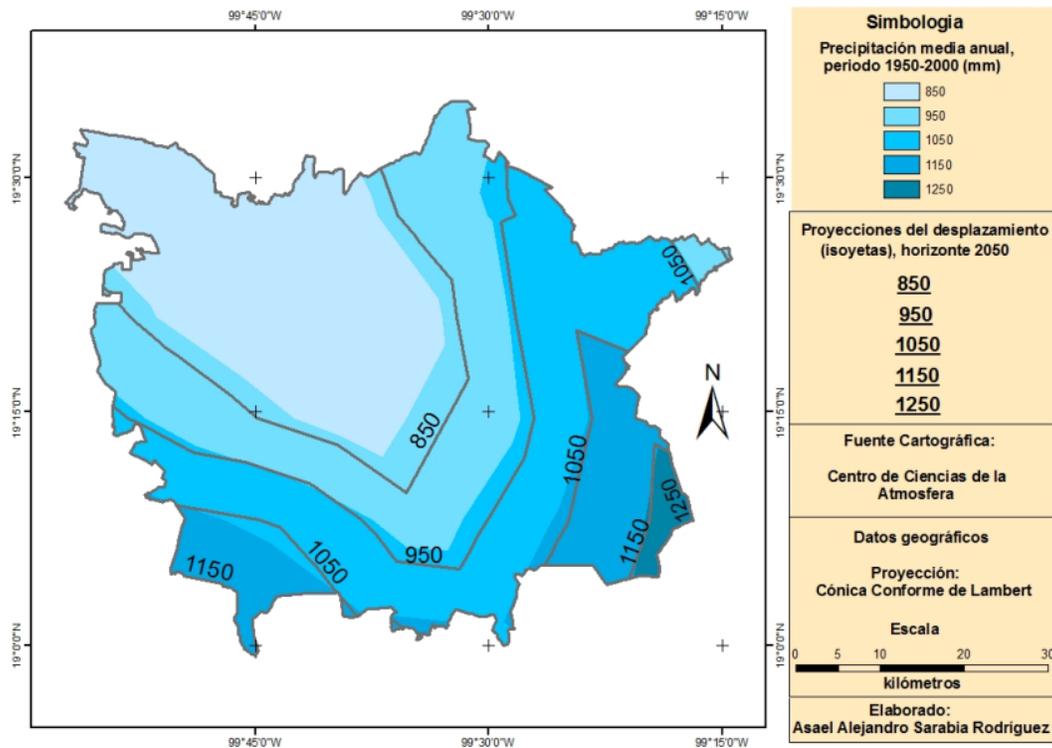


Figura 34. Precipitación media anual (isoyetas), modelo Hadley (escenario B2), horizonte 2050.

En el escenario B2 se espera un descenso en la precipitación de 1% en el ciclo agrícola primavera-verano, lo que significaría una disminución de solamente 9 mm para 2050, la cantidad de volumen hídrico precipitado presentaría fluctuaciones positivas y negativas de un mes a otro (Figura 35). Debido a esto, el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse favorecido o afectado, dependiendo en qué etapa del desarrollo fenológico de la planta se presenten los mayores incrementos o decrementos pluviométricos.

Durante la primera fase fenológica del cultivo del maíz, la cual se desarrolla en el mes de mayo en el DDR-Toluca, se espera un incremento de 10.6% en la precipitación durante este mes, con lo cual se situaría en 88.5 mm Este aumento en el volumen hídrico afectaría al desarrollo de la planta en esta fase fenológica, ya que los niveles óptimos hídricos durante esta fase se sitúan en los 45 mm. Sin embargo, la afectación

que podría presentar la planta dentro de este escenario sería de manera poco acentuada, porque este aumento de 8.5 mm en mayo no representaría un incremento significativo con el cual la planta pudiera tener serias afectaciones.

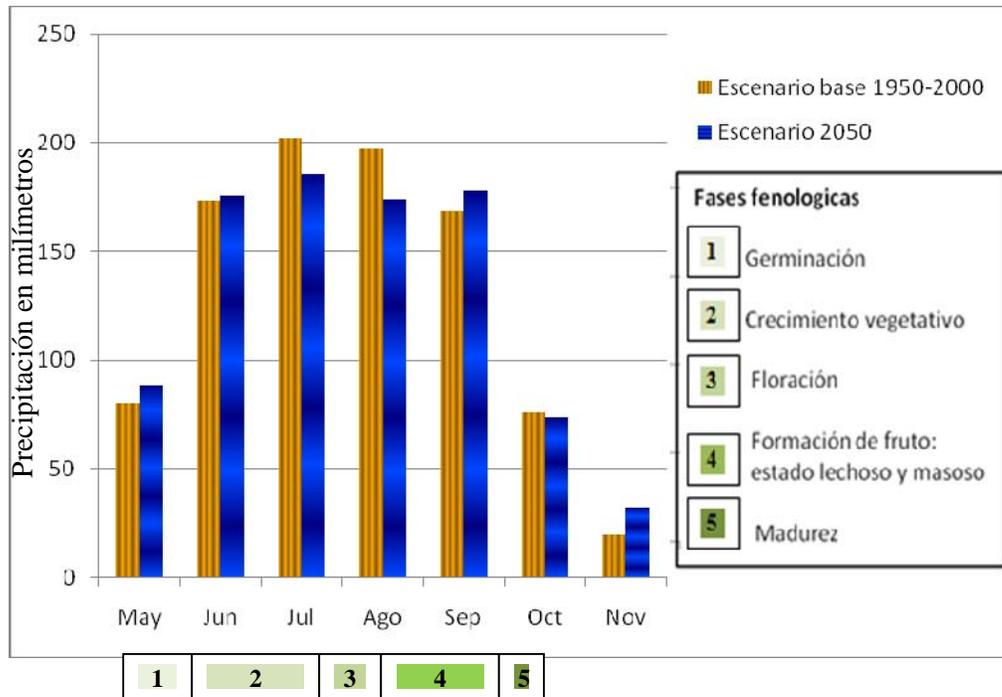


Figura 35. Escenario base 1950-2000 *versus* proyección de la precipitación media mensual, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.

La segunda fase fenológica en la cual se lleva a cabo el crecimiento vegetativo se desarrolla en junio y parte de julio en el DDR-Toluca. Dentro del escenario base 1950-2000 se registró que los niveles pluviométricos medios durante estos meses se situaron entre 173.2 y 202.0 mm respectivamente. En el escenario B2 se estima que para junio habría un ligero aumento pluviométrico de 175.8 mm. En contraste, para julio, la precipitación disminuiría -8.1%, con lo cual los niveles pluviométricos se situarían en 185.7 mm durante este mes. Estos cambios esperados en la precipitación pluvial serían ligeramente desfavorables para el cultivo en junio, pero para julio el descenso de los niveles pluviométricos serían positivos para este cereal, ya que parte de esta etapa fenológica se desarrolla en este mes. Estos cambios proyectados no tendrán un efecto negativo en la producción del maíz ya que se encontrarían muy cerca de los niveles requeridos marcados para el óptimo crecimiento vegetativo.

La fase fenológica de floración se desarrolla principalmente en agosto. En este estadio, el requerimiento óptimo es de 220 mm (Flores *et al.*, 2000). Las precipitaciones esperadas según el escenario B2 marcan un descenso de 23.3 mm en este mes con respecto al escenario base, con lo cual los niveles pluviométricos se situarían en 173.8 mm, por tanto, el cultivo del maíz presentaría afectación en esta etapa fenológica por la disminución.

Durante la formación del fruto, tanto en su estado lechoso y masoso, el cultivo del maíz requiere un mayor número de días para desarrollarse, entre 35 y 45 días. Esta fase fenológica se lleva a cabo en agosto y septiembre. Durante la fase de formación de fruto los requerimientos hídricos óptimos son de 215 mm. En el escenario B2 se estima un aumento de la precipitación en septiembre de 9.3 mm con respecto al escenario base, con lo cual se precipitarían 177.9 mm. En contraste, en agosto habría un descenso en la precipitación pluvial de 23.3 mm, con lo cual el volumen hídrico precipitado en este mes sería de 173.8 mm. No obstante, el aumento pluviométrico de agosto, así como el descenso en septiembre, no tendrían un efecto negativo significativo en el cultivo del maíz durante esta etapa fenológica, ya que el volumen precipitado se encontraría cerca de los niveles hídricos óptimos.

La madurez se desarrolla entre diez y quince días, durante el mes de octubre, con requerimientos óptimos de 90 mm. En el escenario B2 se proyecta un descenso de la precipitación pluvial de 2.4 mm con respecto al escenario base. Por tanto, la precipitación media del mes sería de 73.4 mm, este decremento no afectará al cultivo del maíz, ya que se encontraría muy próximo a los niveles de precipitación pluvial registrados en el período 1950-2000 (Figura 36).

Según Reyes (1990), los requerimientos hídricos óptimos para el cultivo del maíz en México durante un ciclo agrícola deben ser de 800 mm, teniendo como tolerancia máxima 1000 mm. Dentro de este escenario se proyecta que para el ciclo agrícola primavera-verano habría una precipitación de 907.3 mm, lo que representaría una reducción de 9 mm con respecto al escenario base durante el mismo ciclo. Por tal motivo, en este escenario el cultivo del maíz se encontraría más cerca de los requerimientos hídricos óptimos, con lo cual existirían mejores condiciones hídricas para el óptimo desarrollo del cereal.

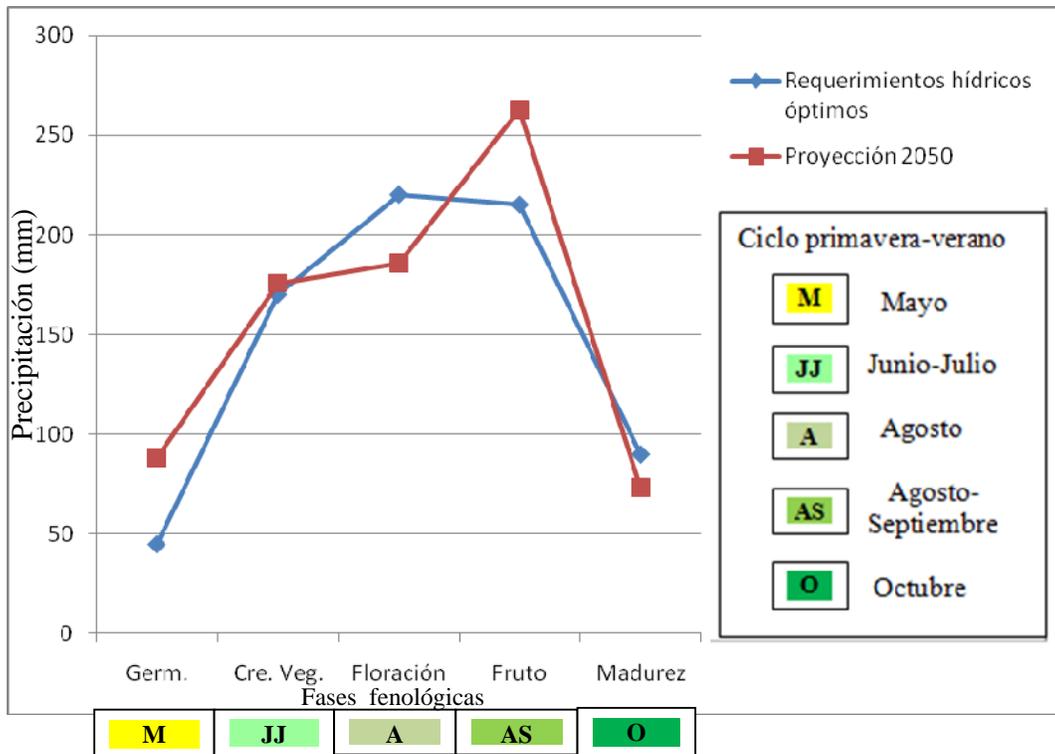


Figura 36. Requerimientos hídricos óptimos *versus* proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo Hadley (Escenario B2), horizonte 2050.

- **Escenario A2**

El escenario A2 reporta un cambio significativo en los valores de la precipitación media anual. Se proyectan áreas con 750 mm, lo que representaría un marcado descenso en el volumen hídrico. Las isoyetas dentro de este escenario oscilarían entre los 750 y 1,250 mm.

La distribución espacial de la isoyeta de 750 mm, se ubicará en áreas en las cuales durante el período 1950-2000 se registraron 850 mm anuales, ubicadas al noroeste del distrito agrícola de Toluca. Los municipios que presentarían esta reducción serían Almoloya de Juárez en su porción norte y oriente, y Toluca en su porción noroeste.

La redistribución espacial estimada de la precipitación media de 850 mm, se modificaría en su totalidad en algunos municipios como Mexicaltzingo, San Mateo Atenco y Chapultepec, los que registraron 950 mm en el período 1950-2000, lo anterior representará un descenso importante en la precipitación media anual. Los municipios

Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Toluca, Temoaya y Calimaya también proyectan disminución pluvial; la redistribución de la isoyeta de 850 mm tendría una mayor extensión espacial con respecto al escenario base, esta se recorrería hacia el oriente y sur, y comprendería alrededor del 27% de la superficie del DDR-Toluca.

El área de 950 mm, también tendría una redistribución espacial muy similar a la proyectada en el rango de los 850 mm, ya que ésta también tendría una mayor extensión hacia el oriente y sur del área en estudio. Este cambio proyectado afectará algunas regiones de los municipios de Zinacantepec, Tenango del Valle, Texcalyacac, Almoloya del Río y Capulhuac principalmente.

La precipitación media de 1,050 mm, tendrá una distribución espacial semejante en la región sureste del distrito agrícola con respecto al escenario base. En cuanto a la distribución espacial, ésta comprenderá una mayor superficie al occidente. Se verán modificadas las láminas de precipitación en algunos municipios como Tianguistenco, Xalatlaco y Ocoyoacac, principalmente.

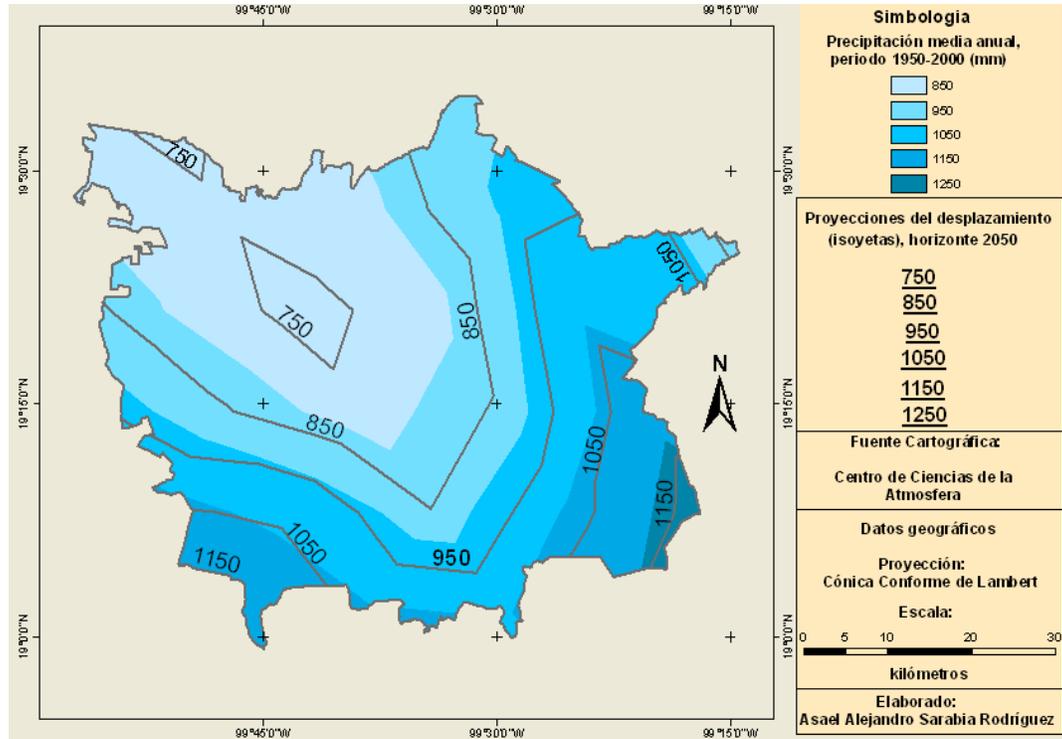


Figura 37. Precipitación media anual (isoyetas), modelo Hadley (escenario A2), horizonte 2050.

La isoyeta de 1,150 mm, comprendería una superficie muy similar al escenario base; en la región oriente del DDR-Toluca se presentarían cambios en la cantidad de agua precipitada de manera descendente en algunas regiones de los municipios de Tianguistenco y Xalatlaco (Figura 37).

Dentro de este escenario se espera un descenso en la precipitación pluvial de 2.9% en el ciclo agrícola primavera-verano, lo que significará una disminución de 26.3 mm para el año 2050. La precipitación presentaría fluctuaciones positivas y negativas de un mes a otro (Figura 38), lo cual podría afectar al cultivo del maíz.

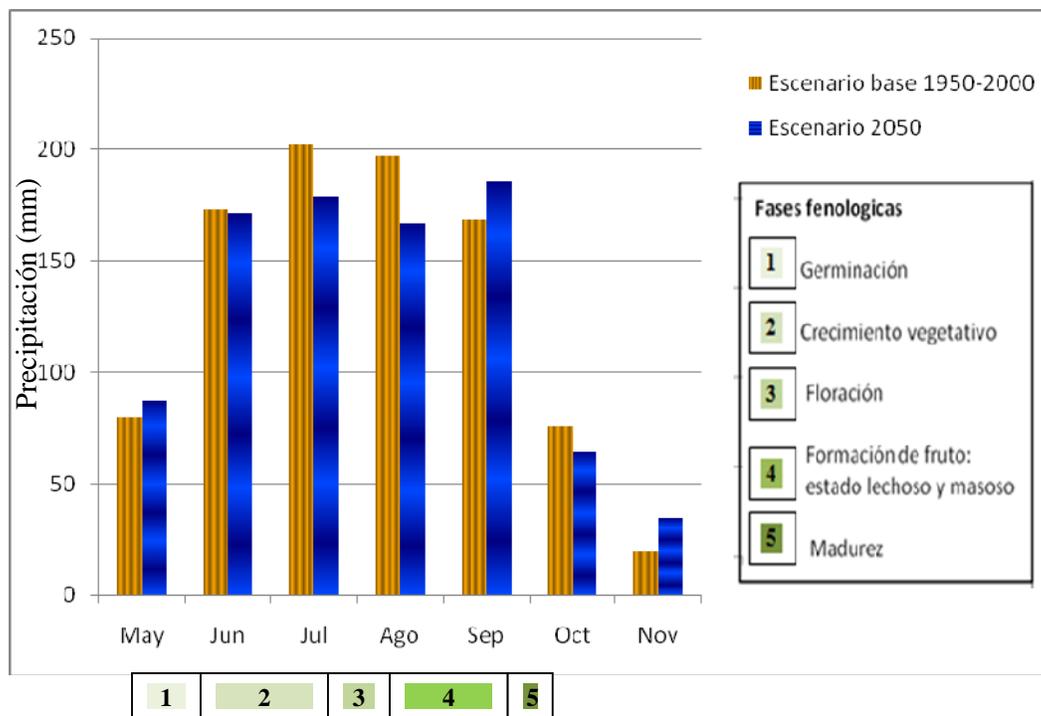


Figura 38. Escenario base 1950-2000 *versus* precipitación media mensual, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050.

La fase fenológica de germinación se desarrolla generalmente en mayo en el DDR-Toluca, bajo este escenario se espera un incremento de 9.2%, lo que representaría 87.4 mm a diferencia de los 80 mm en promedio registrados en el escenario base. Este aumento afectaría al desarrollo de la planta, ya que los requerimientos óptimos hídricos durante esta fase son de 45 mm.

El crecimiento vegetativo generalmente se presenta en junio y parte de julio; el escenario base 1950-2000 registró 173.2 y 202 mm respectivamente, mientras que para el escenario A2 se estima que para junio existiría un ligero descenso pluviométrico de 171.4 mm, y para julio habría un acentuado descenso en la precipitación de 22%, con lo cual los niveles pluviométricos se situarían en 179.1 mm durante este mes. Estos cambios esperados serían desfavorables para el cultivo en junio, pero para julio el descenso de los niveles pluviométricos serían positivos para este cereal, ya que los niveles de la precipitación pluvial registrados en el escenario base fueron superiores a los volúmenes hídricos que necesita la planta durante esta fase fenológica. Debido a esto, las anomalías esperadas no tendrán un efecto negativo durante el crecimiento vegetativo, ya que los cambios estimados en los niveles de precipitación pluvial se encontrarían más próximos a los niveles hídricos óptimos.

La floración se desarrolla principalmente en agosto. En esta fase, los requerimientos hídricos óptimos son de 220 mm (Flores *et al.*, 2000). Las incertidumbres en este escenario marcan un descenso de la precipitación media de 29.9 mm en este mes con respecto al escenario base, con lo cual el nivel de la precipitación pluvial se situaría en 167.2 mm; el cultivo del maíz, por lo tanto, presentará afectaciones durante esta etapa fenológica.

En la formación del fruto, el cultivo del maíz requiere mayor número de días para desarrollarse, de 35 y 45 días. Esta fase fenológica se desarrolla en septiembre y una parte de agosto, y sus requerimientos hídricos óptimos son de 215 mm. En este escenario se espera un aumento de la precipitación en septiembre de 17.2 mm con respecto al escenario base, con lo cual se esperan 185.8 mm. En contraste, en agosto habría un gran descenso de 29.9 mm. Con este decremento el volumen hídrico precipitado registraría 167.2 mm. Como consecuencia del ascenso de los niveles pluviométricos en septiembre, así como el decremento esperado en agosto, el cultivo del maíz presentaría efectos negativos durante la etapa de formación de fruto, ya que el volumen precipitado no sería suficiente para cumplir con los requerimientos hídricos óptimos durante esta fase fenológica.

La madurez en el maíz se lleva a cabo en octubre, con requerimientos de 90 mm. En este escenario, la anomalía esperada presentaría un descenso de la precipitación pluvial

de 11.3 mm, con lo cual la precipitación media durante este mes se situaría en 64.5 mm. Este decremento afectaría el desarrollo del maíz en esta fase fenológica (Figura 39).

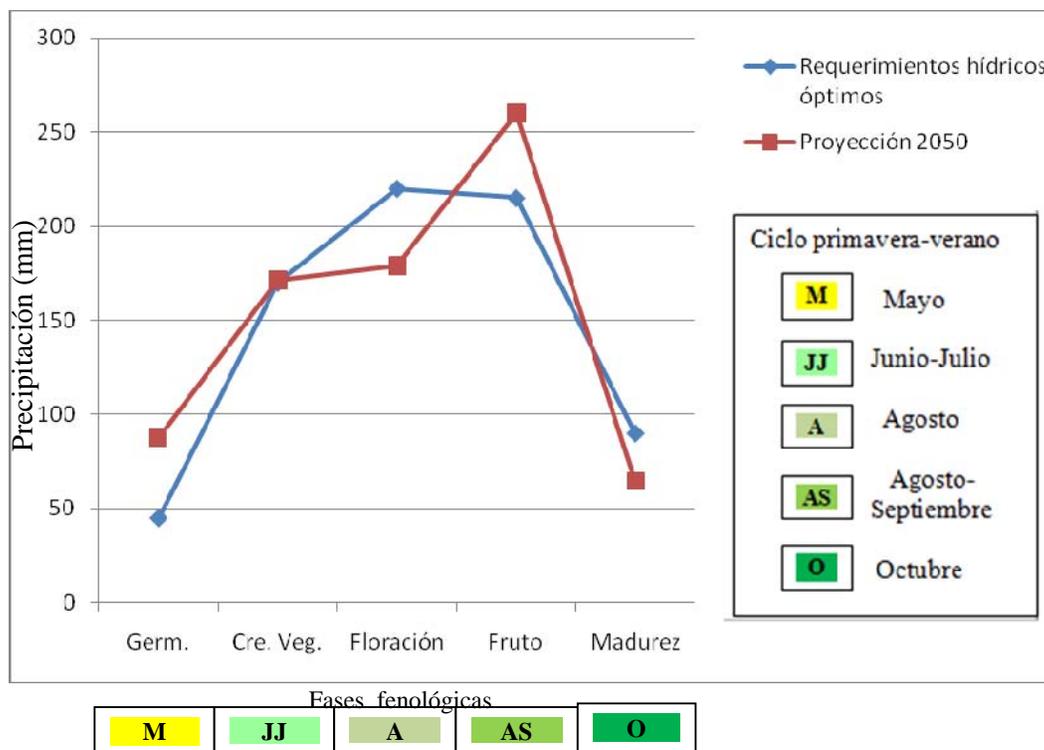


Figura 39. Requerimientos hídricos óptimos *versus* proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo Hadley (Escenario A2), horizonte 2050.

Según Reyes (1990), los niveles hídricos óptimos para el cultivo del maíz en México durante un ciclo agrícola son de 800 mm, teniendo como tolerancia máxima 1000 mm. Dentro de este escenario se estima que para el ciclo agrícola primavera-verano habría una precipitación de 890 mm, lo que representaría una reducción de 26.3 mm con respecto al escenario base durante el mismo ciclo. Por tal motivo, en este escenario el cultivo se encontraría más cerca de los requerimientos óptimos. Sin embargo, el cultivo presentaría problemas de escasez de agua en la fase fenológica de floración, así como excedente agua en la etapa de formación de fruto, lo cual podría provocar que el cultivo de maíz no se desarrolle dentro de los requerimientos hídricos óptimos durante estos dos subperíodos fenológicos.

4.4 RESULTADOS DEL MODELO ECHAM (HORIZONTE 2050)

4.4.1 Rangos proyectados en la temperatura media en el escenario A2, y anomalía esperada en la temperatura mínima, media y máxima en el escenario B2, así como el análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.

- **Escenario B2**

- *Anomalías proyectadas en la temperatura media*

Dentro del modelo ECHAM (escenario B2), se proyecta un cambio significativo en la distribución espacial de las temperaturas medias anuales en el DDR-Toluca. A diferencia del escenario base, en este escenario solamente se proyectan tres regiones con diferentes temperaturas medias, las cuales oscilan entre 14.5 y 16.5°C.

La temperatura media más gélida proyectada será de 14.5°C, la cual comprendería más de 50% de la superficie del área en estudio. Sin embargo, la distribución espacial de esta variable se vería reducida en las regiones sur, noreste y noroeste. La temperatura media de 15.5°C, comprendería una mayor superficie dentro del DDR-Toluca, al distribuirse en la región noroeste del distrito agrícola, en los municipios de Almoloya de Juárez y Temoaya, así como una mayor superficie al noreste en el municipio de Huixquilucan. Finalmente, también ocupará la porción sur del territorio, en los municipios de Tianguistenco, Tenango del Valle, Texcalyacac, Joquicingo y Toluca.

La temperatura media más cálida se estima que se ubicaría en 16.5°C, aumento que no sería significativo ya que solamente se localizaría en pequeñas porciones al sur del área en estudio, en los municipios de Joquicingo y Tenango del Valle (Figura 40).

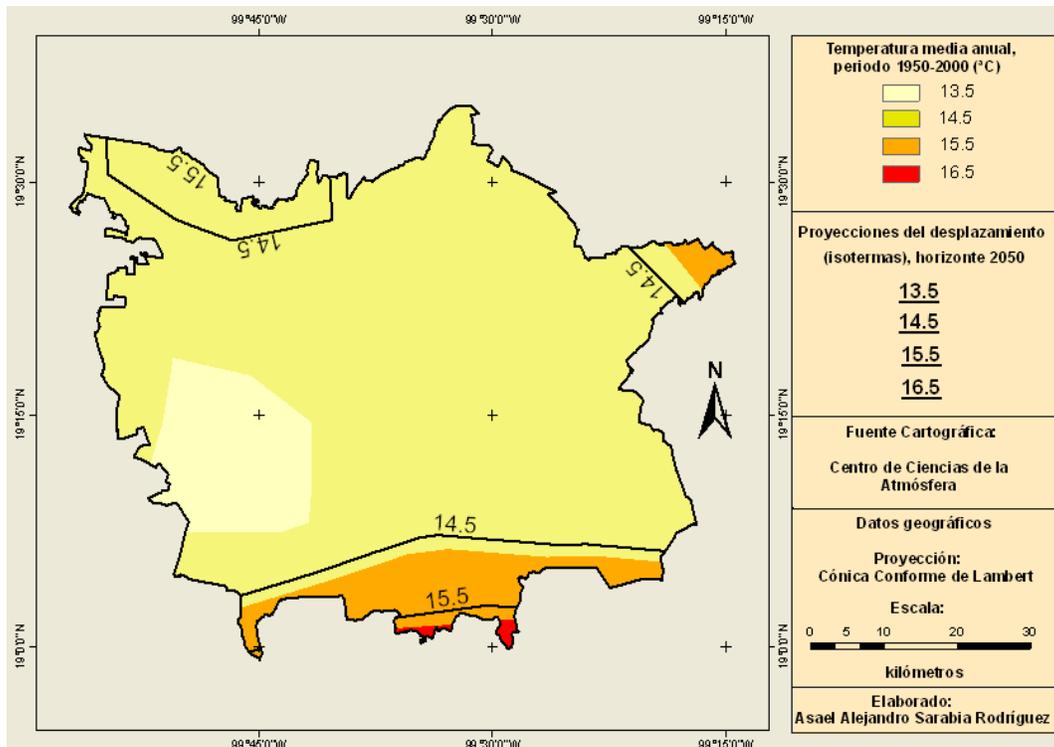


Figura 40. Incremento de la temperatura media anual, según modelo ECHAM (escenario B2), horizonte 2050.

- *Anomalías proyectadas en la temperatura mínima*

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), en el escenario B2 se proyecta un aumento de la temperatura mínima en el ciclo agrícola primavera-verano de 2.4°C en promedio, para el año 2050. Este incremento presentaría diferentes anomalías de un mes a otro (Figura 41), debido a esto el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse beneficiado o perjudicado dependiendo en que etapa de desarrollo fenológico se presenten los mayores incrementos de la temperatura.

La fecha de siembra se lleva a cabo en mayo, mes en el que el cultivo del maíz se encuentra en germinación. En el escenario B2 se proyecta un incremento de 2.8°C con respecto al escenario base, con lo cual la temperatura mínima durante este mes se elevaría a 10°C. Este aumento favorecerá el desarrollo de la planta, ya que se encontraría dentro del umbral térmico mínimo requerido por este cereal durante esta fase fenológica.

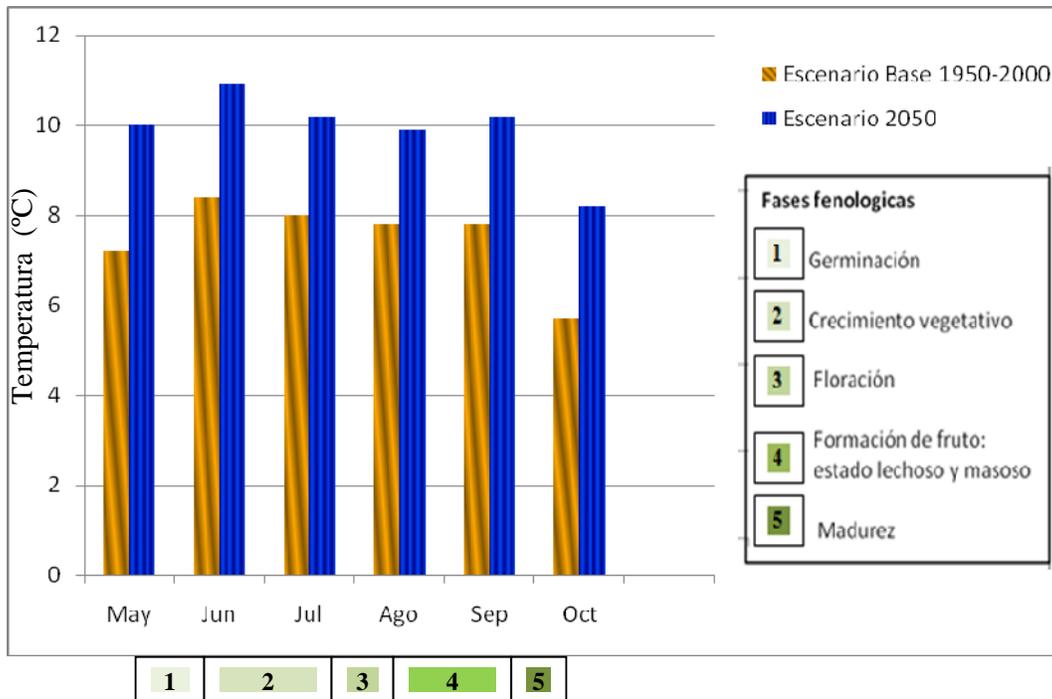


Figura 41. Escenario base 1950-2000 *versus* temperatura mínima mensual, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050.

El crecimiento vegetativo se desarrolla en junio y julio, meses en los que se proyecta un aumento en la temperatura de 2.5 y 2.2°C respectivamente, con estos incrementos la temperatura mínima promedio ascendería a 10.9°C en junio, y 10.2°C en julio. Sin embargo, este ascenso térmico no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros óptimos de temperatura durante este estadio fenológico.

El tercer subperíodo fenológico se desarrolla en agosto, mes en que la temperatura óptima es de 20 a 30°C (Flores *et al.*, 2004). Las proyecciones de este escenario marcan un aumento de la temperatura mínima de 9.9°C. Por tal motivo, aun cuando habría un incremento en la temperatura de 2.1°C con respecto a normales climáticas, este aumento no sería suficiente para encontrarse cerca de los niveles óptimos térmicos.

Durante la formación del fruto, el cultivo del maíz requiere un mayor número de días para desarrollarse, entre 35 y 45 días. Esta fase fenológica se lleva a cabo en agosto y septiembre, estadio durante el cual los requerimientos térmicos óptimos son de 20 a 30°C. No obstante que se proyecta un aumento de temperatura en los meses de agosto y

septiembre, con 9.9 y 10.2°C respectivamente, éstos valores no se encontrarían cerca de los niveles óptimos térmicos requeridos por este cereal.

La fase fenológica de madurez se desarrolla en octubre en el DDR-Toluca, mes en que los requerimientos óptimos se ubican entre los 20 y 30°C. Sin embargo, aun cuando se proyecta un incremento de temperatura de 2.4°C para el año 2050, situándose en 8.2°C, este aumento aún se encontraría lejos de los niveles óptimos térmicos citados para el cultivo del maíz (Figura 42).

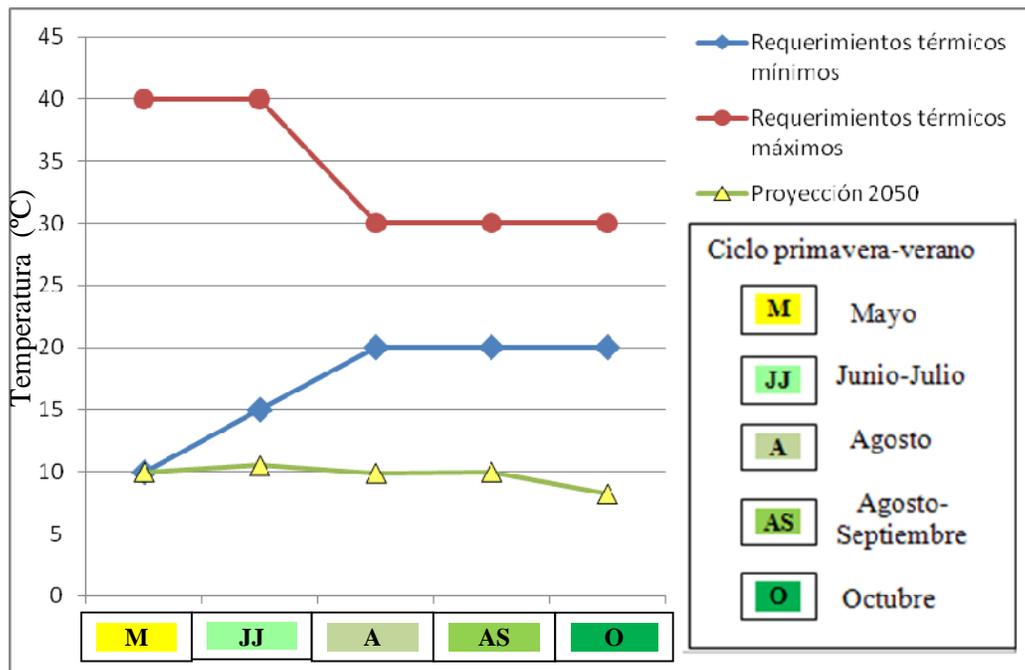


Figura 42. Requerimientos térmicos óptimos *versus* proyección de la temperatura mínima en las fases fenológicas, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050.

Las anomalías esperadas en la temperatura mínima promedio en el escenario B2, estiman que el incremento térmico proyectado para el ciclo agrícola primavera-verano en el área en estudio, no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros térmicos recomendados en las fases fenológicas de crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez. Sin embargo, este aumento en la temperatura mejoraría las condiciones térmicas para que se lleve a cabo un mejor desarrollo de este cereal durante estos estadios fenológicos.

- *Anomalías proyectadas en la temperatura máxima*

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), se estima que en el escenario B2 se presentaría un incremento de la temperatura máxima en el ciclo agrícola primavera-verano de 2.2°C en promedio, para el año 2050. Este incremento presentaría diferentes anomalías de un mes a otro (Figura 43), debido a esto el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse beneficiado o perjudicado dependiendo de la etapa de desarrollo fenológico de la planta en que se presenten los mayores incrementos de la temperatura.

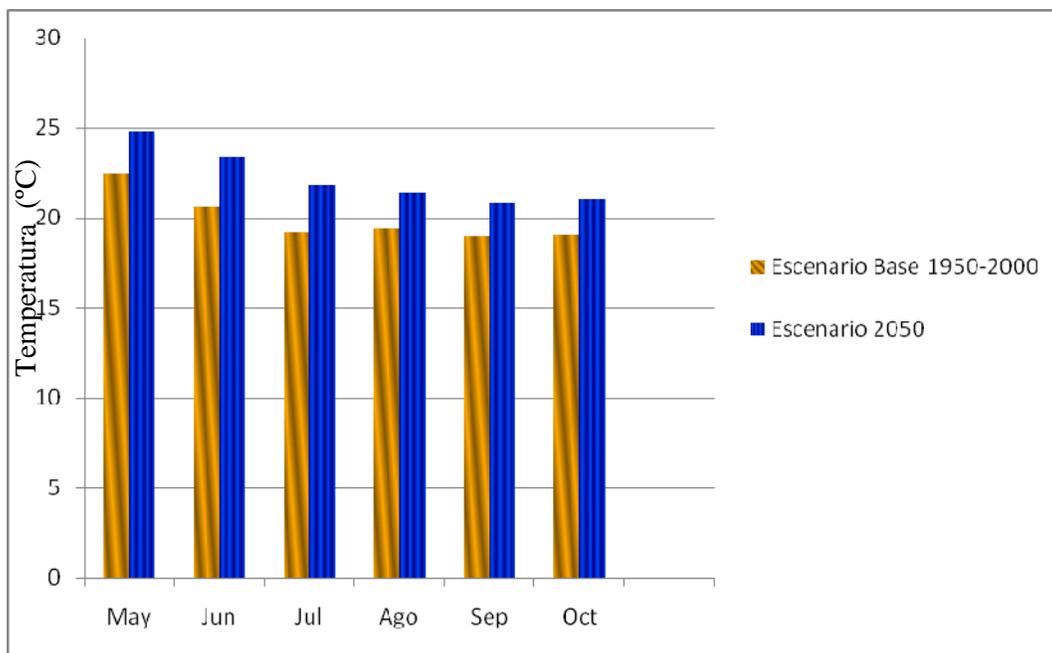


Figura 43. Escenario base 1950-2000 *versus* proyección de la temperatura máxima mensual, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050.

La fecha de siembra en el área en estudio se lleva a cabo entre el 1° y 31 de mayo, mes en el cual se proyecta un incremento de 2.3°C con respecto al escenario base, con lo cual la temperatura máxima promedio se elevaría a 24.8°C. Este aumento favorecería considerablemente al desarrollo de la planta en la fase fenológica de germinación, ya que se encontraría dentro de los rangos óptimos de temperatura requeridos para este cultivo, los cuales se sitúan entre los 20 y 25°C, y muy por encima de los requerimientos mínimos térmicos los cuales se ubican en los 10°C.

El segundo subperíodo fenológico se desarrolla principalmente en junio y julio en el área en estudio. Las proyecciones del escenario B2 estiman que habría un incremento en la temperatura máxima en junio y julio de 23.4 y 21.8°C respectivamente, incremento térmico que situaría a las temperaturas máximas promedio dentro de los parámetros térmicos óptimos que demanda el cultivo durante esta fase fenológica.

La fase fenológica de floración se desarrolla principalmente en agosto, mes en que la temperatura óptima es de 20 a 30°C (Flores *et al.*, 2000). Las proyecciones en este escenario marcan un aumento de la temperatura máxima promedio a 21.4°C. Este aumento de 2°C con respecto a las normales climáticas, mejoraría notablemente las condiciones térmicas para el cultivo en esta fase fenológica, ya que la temperatura se encontraría dentro de los parámetros óptimos térmicos.

Durante la formación del fruto los requerimientos térmicos óptimos son de 20 a 30°C. El incremento proyectado en la temperatura en los meses de agosto y septiembre; con 21.4 y 20.8°C respectivamente, mejoraría notablemente el desarrollo en la formación del fruto en el cultivo del maíz.

El subperíodo fenológico de madurez se desarrolla principalmente en octubre en el área en estudio, mes en el cual los requerimientos óptimos oscilan entre 20 y 30°C. En este escenario se espera un incremento térmico de 2°C, con lo cual la temperatura máxima mensual se ubicaría en 21.1°C, lo que conllevaría un mejoramiento en las condiciones térmicas en esta etapa fenológica (Figura 44).

La anomalía térmica proyectada en la temperatura máxima en el ciclo agrícola primavera-verano en el modelo ECHAM, escenarios B2 y A2, favorecería notablemente las condiciones térmicas en todas las fases fenológicas del cultivo del maíz, ya que estos valores se encontrarían dentro de los parámetros térmicos óptimos requeridos por este cereal.

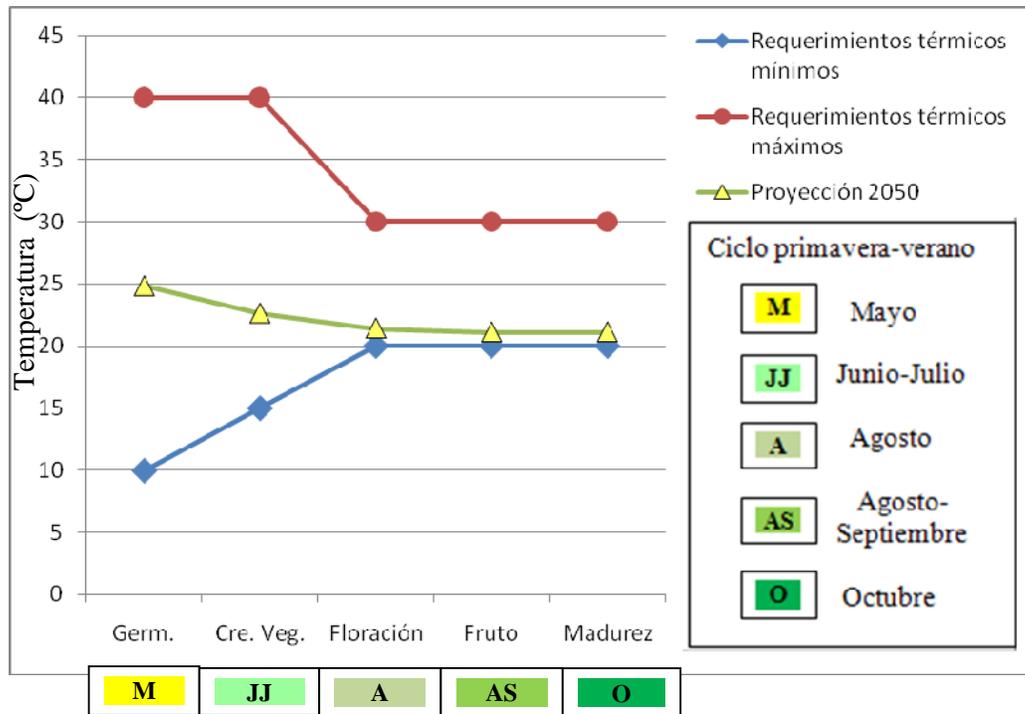


Figura 44. Requerimientos térmicos óptimos *versus* proyección de la temperatura máxima en las fases fenológicas, modelo ECHAM, (Escenario B2), horizonte 2050.

- **Escenario A2**

- *Anomalías proyectadas en la temperatura media*

En el modelo ECHAM, escenario A2, se proyecta un cambio significativo en la distribución de las temperaturas medias anuales en el DDR-Toluca. A diferencia de las normales climáticas, en este escenario solamente se diferencian tres regiones, las cuales oscilan entre 14.5 y 16.5°C (Figura 45).

La temperatura media más gélida que se proyecta es de 14.5°C, de la misma manera que en el escenario base esta temperatura cubriría la mayor parte de la superficie del distrito agrícola de Toluca. Sin embargo, la distribución espacial de esta temperatura se vería disminuida en las regiones sur, noreste y noroeste.

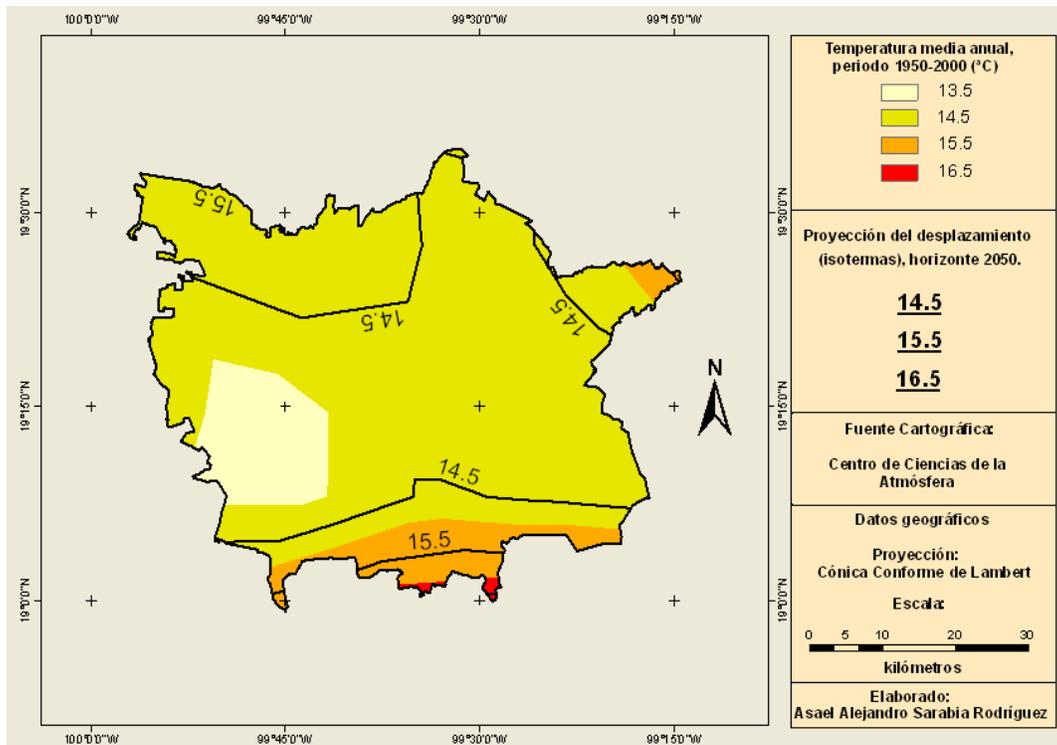


Figura 45. Incremento de la temperatura media anual, según modelo ECHAM (escenario A2), horizonte 2050.

El área de 15.5°C, se proyecta que comprendería una superficie considerablemente mayor dentro del área en estudio. Esta temperatura media se distribuiría en la región noroeste del distrito agrícola, en los municipios de Almoloya de Juárez, Toluca y Temoaya y abarcaría una mayor superficie en la región noreste, comprendiendo casi en su totalidad al municipio de Huixquilucan, y también tendría una redistribución espacial importante en la porción sur del territorio, incrementando la temperatura en más de 50% de la superficie en los municipios de Tianguistenco, Tenango del Valle, Joquicingo, Texcalyacac y Rayón .

La temperatura media más cálida se ubicaría en los 16.5°C, con el cual se estima que aumentará su superficie en el DDR-Toluca, aunque no de manera significativa, y solamente se distribuiría en pequeñas porciones de la región sur del área en estudio en los municipios de Joquicingo y Tenango del Valle.

4.4.2 Rangos proyectados en la precipitación media en los escenarios de emisiones B2 y A2, y análisis mensual correspondiente al ciclo agrícola primavera-verano.

- **Escenario B2**

Los cambios en la distribución espacial de la precipitación del modelo de circulación general de la atmósfera ECHAM, proyectan rangos de precipitación media entre los 850 y 1,050 mm, lo que implicaría la desaparición de la isoyeta de 1,250 mm y la reducción de precipitación en diversas áreas del DDR-Toluca.

Las áreas con precipitación media de 850 mm presentaría modificaciones, pues comprendería nuevas zonas agrícolas hacia el oriente y occidente y ocuparía alrededor de 25% del área en estudio, además de parte de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Temoaya, Oztoltepec y San Mateo Atenco.

Respecto a la zona con 950 mm, se estima que ocupará una superficie mayor hacia el noreste y occidente. Este cambio de distribución espacial modificaría la cantidad de agua precipitada en grandes áreas de los municipios de Oztoltepec, Xonacatlán y Lerma y, en menor proporción, en Ocoyoacac, Capulhuac, Atizapán y Zinacantepec.

La isoyeta ubicada en los 1,050 mm, se estima que ocuparía una mayor superficie en las regiones suroeste y sureste, y tendrá una reducción espacial en la porción norte del DDR-Toluca. Esto modificaría los volúmenes hídricos de manera descendente en algunas regiones de los municipios como Toluca, Tenango del Valle, Ocoyoacac, Tianguistenco y Huixquilucan. La isoyeta de 1,050 mm desplazaría por completo las áreas que en la normal reportan 1,250 mm, modificando los volúmenes hídricos precipitados en algunas regiones agrícolas de los municipios de Xalatlaco y Tianguistenco (Figura 46).

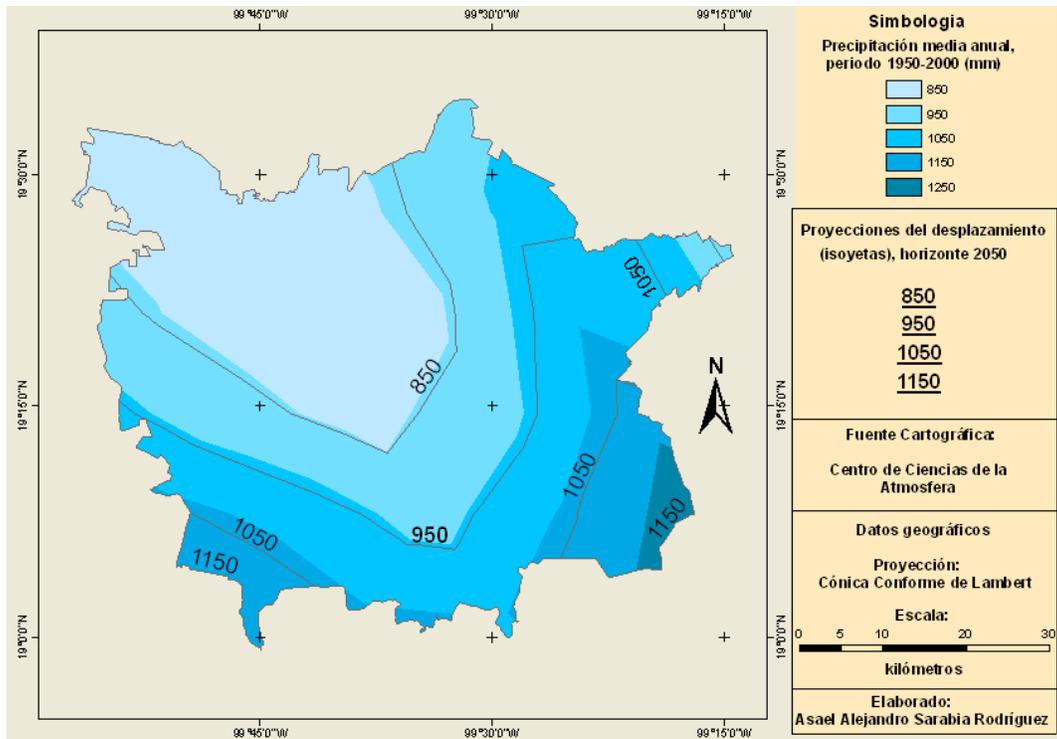


Figura 46. Precipitación media anual, ECHAM (escenario B2), horizonte 2050.

En este escenario se proyecta un descenso en la precipitación pluvial de 1.1% en el ciclo agrícola primavera-verano, lo que significaría una disminución de 9.3 mm. La cantidad de precipitación pluvial presentaría fluctuaciones positivas y negativas de un mes a otro (Figura 47). Como consecuencia de esto, el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse favorecido o afectado, dependiendo la fase fenológica de la planta.

En la fase de germinación se estima un decremento de 5.7% en la precipitación, con lo cual se situaría en 75.4 mm, a diferencia de los 80 mm en promedio registrados en el escenario base. Este descenso en la precipitación pluvial beneficiaría al desarrollo de la planta en esta fase fenológica, ya que este se encontraría mas próximo a los niveles óptimos hídricos, los cuales se sitúan en los 45 mm. Sin embargo, este decremento en la precipitación no sería suficiente para que el cultivo contara con los recursos hídricos idóneos para su óptimo desarrollo.

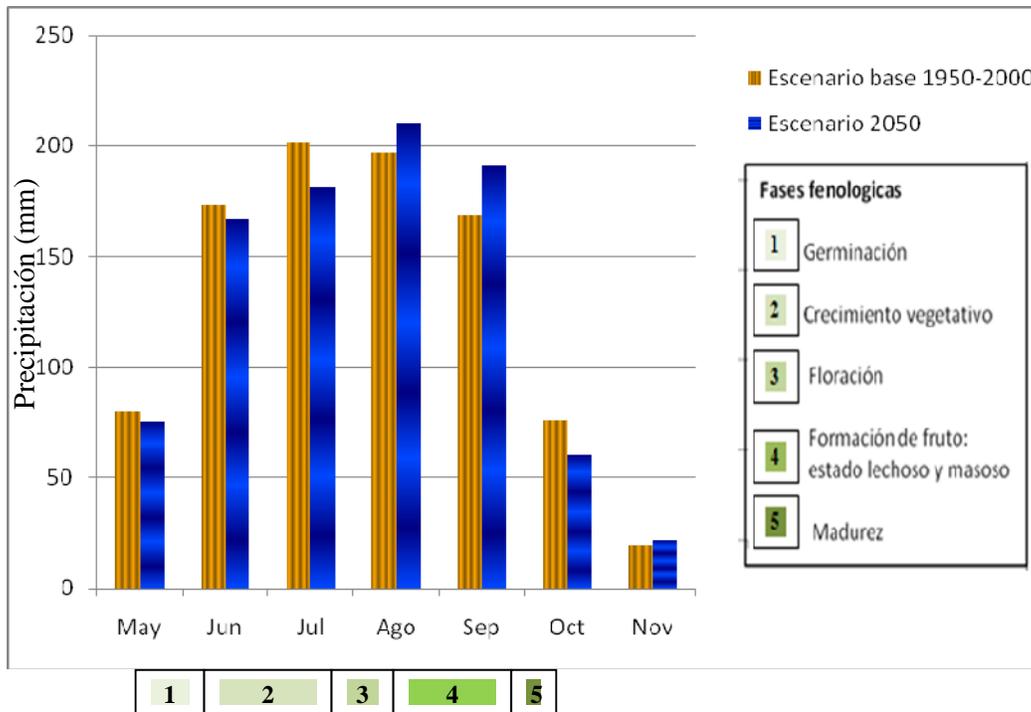


Figura 47. Escenario base 1950-2000 *versus* precipitación media mensual, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050.

El crecimiento vegetativo se lleva a cabo en junio y parte de julio, época en que el escenario base 1950-2000 reporta 173.2 y 202 mm respectivamente. En este escenario se proyecta que para junio existiría un descenso pluviométrico, con lo cual el promedio de precipitación mensual se ubicaría en 167 mm, y para julio habría un acentuado descenso en la precipitación de 20.8%, con lo cual los niveles pluviométricos serían de 181.2 mm. Estos cambios proyectados no tendrían un efecto negativo durante el crecimiento vegetativo, ya que se encontrarían dentro de los niveles hídricos óptimos.

El subperíodo fenológico de floración se desarrolla principalmente en agosto, etapa en que el nivel hídrico óptimo se sitúa en 220 mm (Flores *et al.*, 2004), Las proyecciones en este escenario marcan un ascenso de la precipitación media de 13.5 mm, con lo cual el nivel de la precipitación pluvial se situaría en 210.6 mm, este aumento en el volumen hídrico mejoraría las condiciones para el cultivo del maíz durante esta fase fenológica, ya que se encontraría muy cerca del valor hídrico óptimo en el estadio fenológico de floración.

En la formación del fruto los requerimientos hídricos óptimos son de 215 mm. En este escenario se proyecta un aumento de la precipitación en septiembre y agosto, de 22.5 y 13.5 mm respectivamente, con lo cual la precipitación media anual proyectada se situaría en 210.6 mm para agosto y 191.1 mm para septiembre. Como consecuencia, el cultivo del maíz presentaría efectos negativos durante la etapa de formación de fruto, ya que el volumen precipitado estaría muy por encima de los requerimientos hídricos óptimos durante esta fase fenológica.

En la madurez, los requerimientos óptimos se ubican en los 90 mm. En este escenario se proyecta un descenso de la precipitación pluvial de 15.7 mm, con lo cual la precipitación media durante este mes se situaría en los 60.1 mm. Este decremento afectaría de manera mesurada al desarrollo del cultivo del maíz en esta fase fenológica, ya que se encontraría apartado de los niveles hídricos óptimos requeridos en el subperíodo fenológico de madurez (Figura 48).

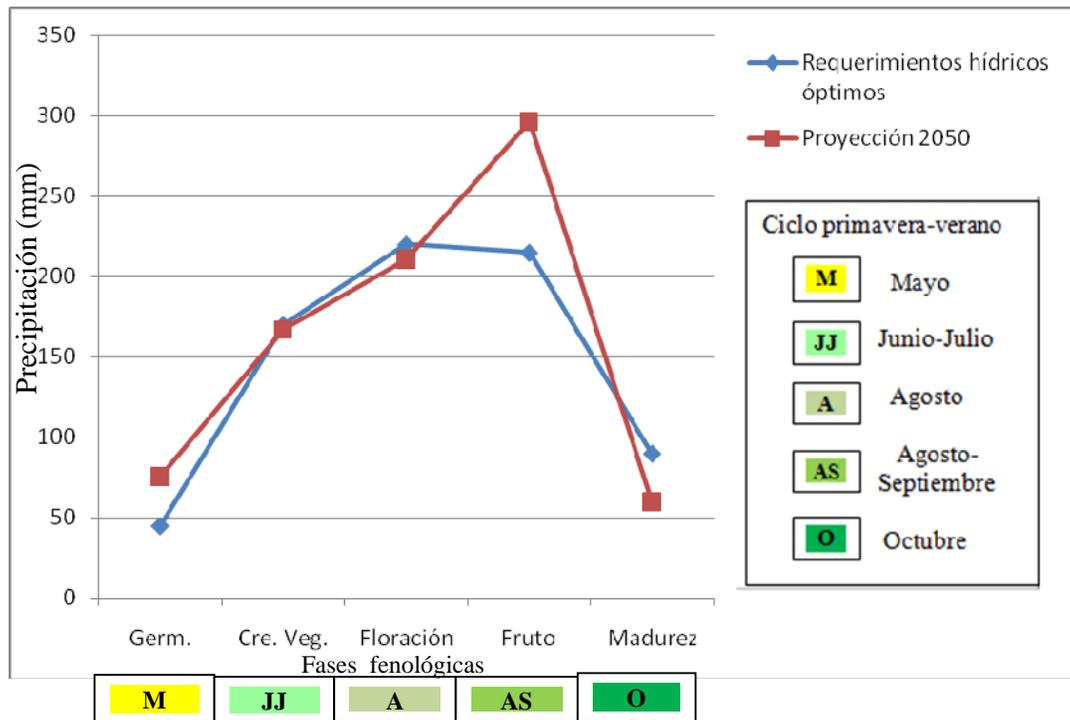


Figura 48. Requerimientos hídricos óptimos *versus* proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo ECHAM (Escenario B2), horizonte 2050.

Según Reyes (1990), los niveles hídricos óptimos para el cultivo del maíz en México durante un ciclo agrícola son de 800 mm, teniendo como tolerancia máxima 1000 mm. dentro de este escenario, se proyecta que para el ciclo agrícola primavera-verano habría una precipitación de 907 mm en el DDR-Toluca, lo que significaría un decremento de 9.3 mm con respecto a las normales climáticas durante el mismo ciclo. Por tal motivo, en este escenario el cultivo del maíz se encontraría ligeramente más cercano a los requerimientos hídricos óptimos. Sin embargo, el cultivo presentaría problemas de escasez de agua en la fase fenológica de madurez, así como excedente agua en la etapa de formación de fruto, lo cual podría provocar que el cultivo no se desarrolle dentro de los requerimientos hídricos óptimos durante estos dos subperíodos fenológicos

- **Escenario A2**

Los cambios en la distribución espacial de la precipitación en el escenario A2, proyecta un volumen hídrico precipitado entre los 850 y 1,050 mm, de la misma manera que en el escenario B2 del modelo ECHAM estima la desaparición de la isoyeta de 1,250 mm dentro de la región, y una reducción pluviométrica en diversas áreas agrícolas en el DDR-Toluca.

La proyección en la redistribución espacial de la isoyeta de 850 mm, suscitaría un declive en los volúmenes hídricos precipitados en algunas regiones del DDR-Toluca. este descenso en la precipitación comprendería una gran superficie de los municipios de Mexicaltzingo, San Mateo Atenco y Metepec, modificando los niveles pluviométricos en casi 50% de la superficie de estos municipios. La redistribución de la isoyeta de 850 mm comprendería una mayor superficie con respecto al escenario base, que se recorrería hacia el oriente comprendiendo áreas de los municipios de Temoaya, Otzoltepec y Xonacatlán. Por otro lado, esta misma isoyeta presentaría una redistribución espacial en la porción sur modificando los índices pluviométricos en los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec y Toluca.

La isoyeta situada en los 950 mm, se estima que tendría una redistribución espacial considerablemente mayor con respecto al resto de los valores pluviométricos existentes en el área de estudio, y comprendería una superficie significativamente mayor hacia el noreste y occidente, así como en la porción sur. Este cambio de distribución espacial

modificaría la cantidad de agua precipitada en grandes regiones de los municipios de Xonacatlán, Lerma, Huixquilucan, Capulhuac, Atizapán, Almoloya del Río y Texcalyacac y, en algunas porciones de Ocoyoacac, Otzolotepec, Calimaya, Toluca y Zinacantepec, principalmente.

La isoyeta ubicada en los 1,050 mm, se espera que comprenda una superficie considerablemente menor con respecto al escenario base, aunque este nivel pluviométrico cubriría una mayor extensión en las regiones suroeste y sureste, presentaría una importante reducción espacial en la porción norte y este del distrito agrícola de Toluca, lo que modificaría los volúmenes hídricos precipitados de manera descendente en algunas regiones de los municipios como Toluca, Tenango del Valle, Ocoyoacac, Tianguistenco y Xalatlaco.

Los mayores niveles de precipitación se ubicarían en 1,150 mm. Se estima que habría una gran disminución espacial de estos niveles pluviométricos en el DDR-Toluca, por lo que solamente se distribuiría en algunas regiones de los municipios de Zinacantepec, Toluca, Tianguistenco, Xalatlaco y Ocoyoacac (Figura 49).

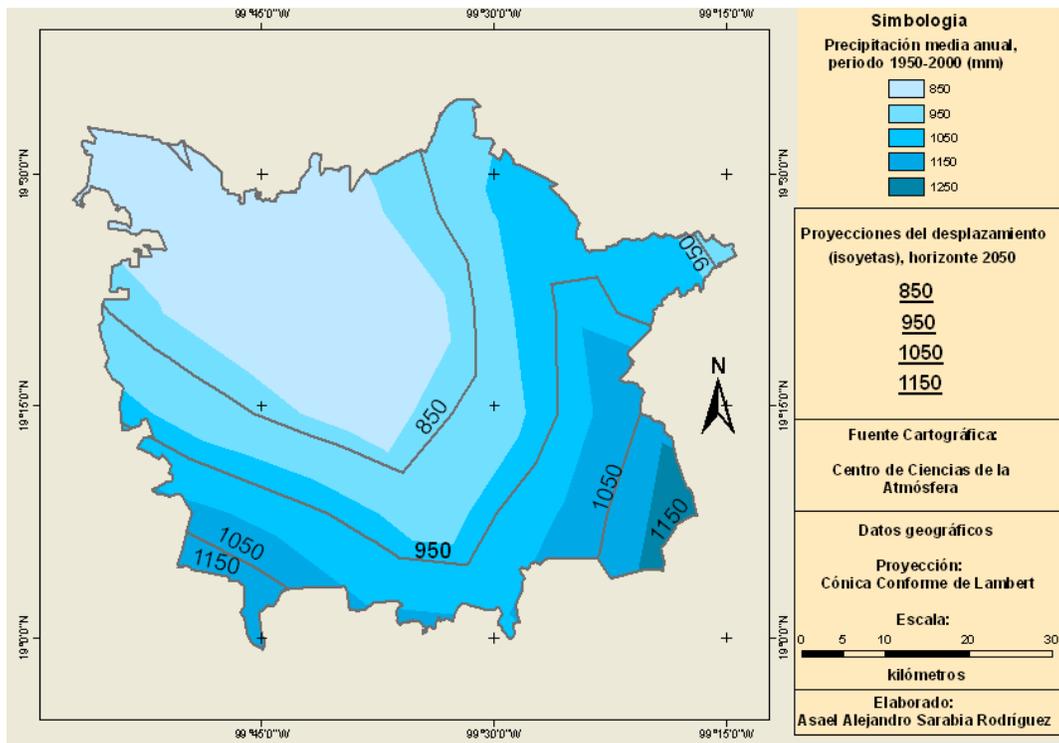


Figura 49. Precipitación media anual, ECHAM (escenario A2), horizonte 2050.

En el escenario A2 se proyecta un descenso en la precipitación de 2.9% en el ciclo agrícola primavera-verano, lo que representaría una disminución de 26.4 mm. Los niveles pluviométricos presentarían fluctuaciones positivas y negativas de un mes a otro (Figura 50). Como consecuencia de esto, el desarrollo fenológico del cultivo del maíz puede verse favorecido o afectado, dependiendo en qué etapa del desarrollo fenológico de la planta se presenten los mayores incrementos o decrementos en la precipitación.

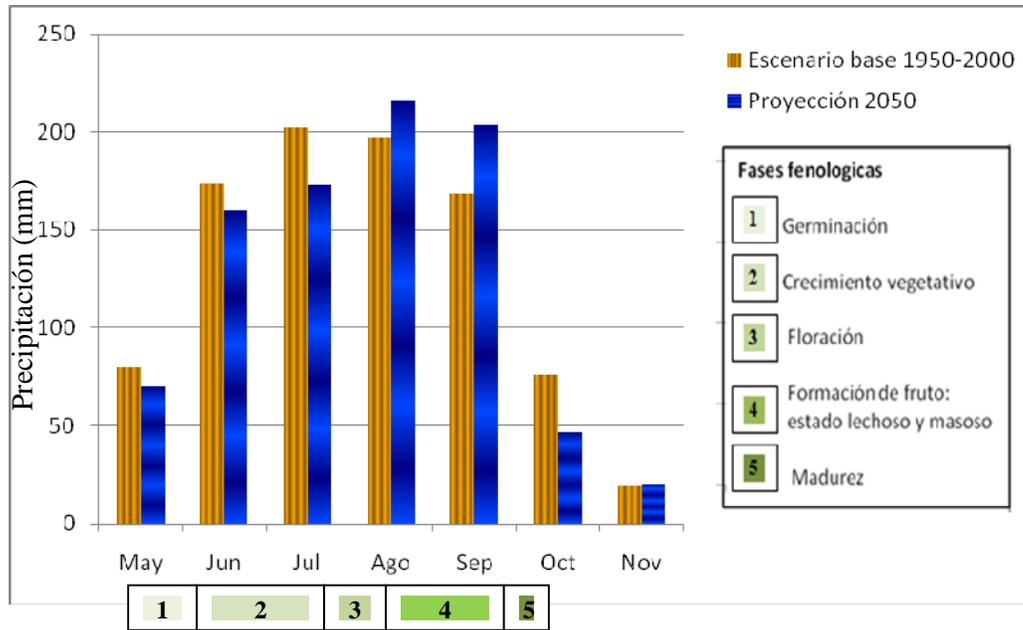


Figura 50. Escenario base 1950-2000 *versus* precipitación media mensual, modelo ECHAM (Escenario A2), horizonte 2050.

La germinación se lleva a cabo en mayo, mes en el que se proyecta un decremento de 12.4% en la precipitación, con lo cual se situaría en 70.1 mm a diferencia de los 80 mm en promedio registrados en el escenario base. Este decremento en la precipitación pluvial beneficiaría al desarrollo de la planta en esta fase fenológica, ya que este se encontraría más cercano a los niveles óptimos hídricos requeridos durante este estadio fenológico, los cuales se sitúan en 45 mm. Sin embargo, este decremento en la precipitación no sería suficiente para que el cultivo contara con los recursos hídricos idóneos para su óptimo desarrollo dentro de esta fase fenológica.

El crecimiento vegetativo se lleva a cabo en junio y parte de julio en el área en estudio. Dentro del escenario base 1950-2000 se registró que la precipitación pluvial media

durante estos meses osciló entre 173.2 y 202 mm respectivamente. En este escenario se proyecta que para junio y julio habría un decremento en la precipitación pluvial de 160 y 173.1 mm respectivamente. Estos cambios proyectados favorecerían al desarrollo de la planta durante el crecimiento vegetativo, ya que estos valores pluviométricos se encontrarían muy próximos a los niveles hídricos óptimos durante esta etapa fenológica.

La floración se desarrolla principalmente en agosto, subperíodo fenológico en el que el nivel hídrico óptimo es de 220 mm (Flores *et al.*, 2000). Las proyecciones en este escenario marcan un ascenso en la precipitación media de 19.1 mm, con lo cual el nivel de la precipitación pluvial se situaría en 216.2 mm; con este incremento proyectado el cultivo del maíz se vería significativamente favorecido durante este estadio fenológico, ya que se encontraría a sólo 3.8 mm de los niveles pluviométricos óptimos.

La formación de fruto se desarrolla en agosto y septiembre, fase durante la cual los requerimientos hídricos óptimos son de 215 mm. En este escenario se proyecta un aumento de la precipitación en agosto y septiembre de 19.1 y 34.7 mm respectivamente, con lo cual la precipitación media anual proyectada sería de 216.2 mm para agosto y 203.3 mm para septiembre. Como consecuencia del ascenso de los niveles pluviométricos en estos meses, el cultivo del maíz presentaría efectos negativos durante la etapa de formación de fruto, ya que el volumen precipitado estaría muy por encima de los requerimientos hídricos óptimos durante esta fase fenológica, con lo cual la planta podría sufrir de *stress* hídrico.

La madurez se desarrolla principalmente en octubre, en el cual los requerimientos óptimos son de 90 mm. En este escenario se proyecta una acentuada caída en los niveles pluviométricos de 29 mm, con lo cual la precipitación media durante este mes se situaría en los 46.8 mm. Este decremento perjudicaría de manera significativa el desarrollo del maíz en esta fase fenológica, ya que se encontraría considerablemente apartado de los niveles hídricos óptimos requeridos por el cultivo del maíz en este subperíodo fenológico (Figura 51).

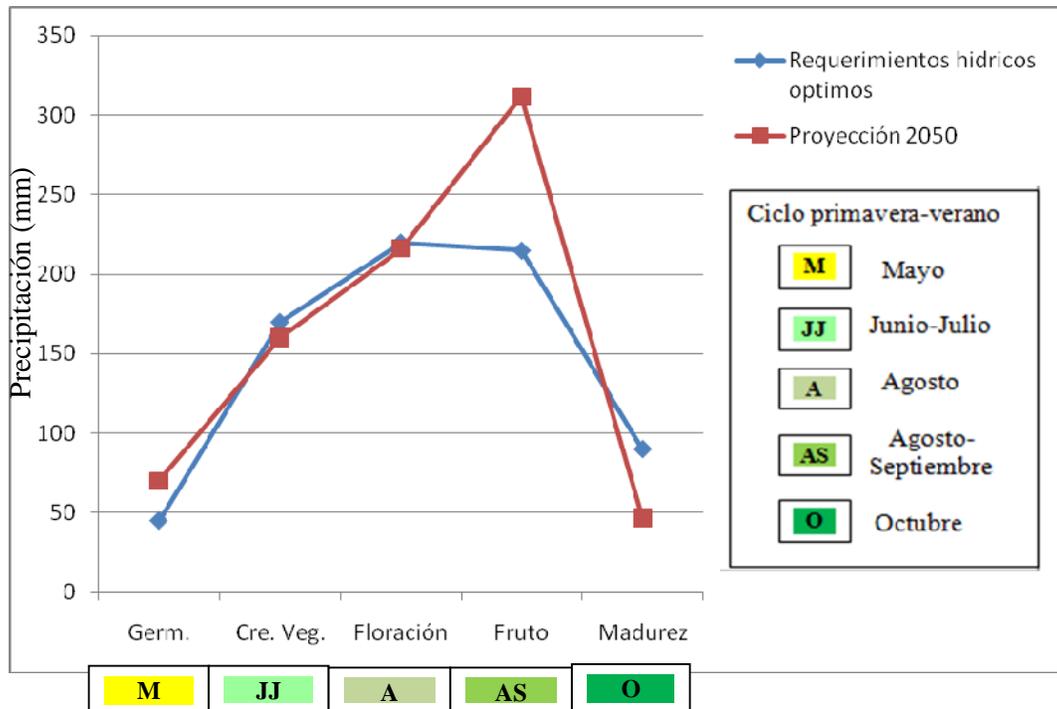


Figura 51. Requerimientos hídricos óptimos *versus* proyección de la precipitación en los subperíodos fenológicos, modelo ECHAM (Escenario A2), horizonte 2050.

Los niveles hídricos óptimos para el cultivo del maíz en México durante un ciclo agrícola son de 800 mm. Dentro de este escenario se proyecta que para el ciclo agrícola primavera-verano habría una precipitación de 889 mm en el DDR-Toluca, lo que significaría un decremento de 26.4 mm con respecto al escenario base. Por tal motivo, en este escenario el cultivo del maíz se encontraría más cercano a los requerimientos hídricos óptimos, en cuanto a la cantidad de agua precipitada durante el ciclo agrícola. Sin embargo, el cultivo presentaría problemas de escasez de agua en la fase fenológica de madurez, así como un excedente agua en la etapa de germinación y formación de fruto. Este último estadio fenológico presentaría un considerable incremento en los niveles hídricos, lo cual podría propiciar la aparición de plagas o enfermedades.

CONCLUSIONES

El Centro Occidente de México se caracteriza por ser una de las regiones con mayor producción de granos básicos en la República Mexicana. Dentro de esta demarcación el estado de México es uno de los más destacados productores de maíz, se ha distinguido históricamente por destinar gran parte de su superficie agrícola a este cultivo. Dentro de la entidad el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca ha sido uno de los más importantes en la producción de este cereal en los últimos años.

Las unidades edáficas en el DDR-Toluca son andosoles, fluvisoles, regosoles, luvisoles, cambisoles, planosoles, feozem y vertisoles; estos dos últimos son los más aptos para el desarrollo de la agricultura, y ocupan más de la mitad de la superficie del distrito. Debido a la existencia de suelos en su mayoría aptos para el desarrollo de la agricultura, así como un relieve poco accidentado en la mayor parte del territorio, aunado al buen manejo de técnicas agrícolas, el cultivo del maíz ha tenido altos rendimientos dentro de este distrito agrícola.

El clima predominante en la zona en estudio es templado, aproximadamente en 80% de su superficie, con temperatura media anual que varía entre 10 y 14° C; las precipitaciones oscilan entre 800 y 1,100 mm. No obstante que los requerimientos óptimos térmicos del cultivo del maíz son más elevados que los existentes en el DDR-Toluca, el cultivo del maíz ha tenido una alta productividad, ya que el volumen pluviométrico promedio se encuentra dentro de los niveles hídricos óptimos y presenta una distribución favorable para el buen desarrollo del cultivo.

Las condiciones climatológicas, edafológicas y geomorfológicas han permitido que el distrito agrícola de Toluca ocupe 44.2% de la superficie destinado a uso de suelo agrícola, seguido por la superficie forestal y pecuaria, que abarcan aproximadamente 28.8% y 11.5% respectivamente. Estas tres coberturas ocuparon casi 85% de la superficie del distrito.

El DDR-Toluca es eminentemente una región maicera, lo que se hace evidente cuando se analiza la superficie promedio destinada al cultivo del maíz durante los últimos diez

años (período 1999-2008). Del total de la superficie agrícola del distrito, 91.2% fue ocupada por este cereal.

La modalidad agrícola imperante en el DDR-Toluca es de temporal, ya que durante el período 1999-2008, este tipo de agricultura representó 85% de la superficie sembrada en este período. La agricultura de temporal se caracteriza por la carencia de riego, semillas mejoradas y maquinaria agrícola, lo que conlleva que el cultivo se encuentre en completa exposición a las variaciones climáticas. No obstante a estar expuesto a las adversidades del clima, en los últimos años (1999-2008) ocupó el segundo lugar en producción de maíz en el Estado de México, aportando 28.2% en promedio de la producción total durante ese período.

La agricultura de temporal en el DDR-Toluca destacó en el período 1999-2008 por registrar rendimientos superiores a la media nacional dentro de esta modalidad, reportando un promedio de 3.74 ton/ha entre los años 1999 y 2008, mientras que la media nacional fue de 2.82 ton/ha. Esto se debe a que las condiciones físicas han sido favorables para el desarrollo del cultivo.

El rango altitudinal en el cual el maíz presenta un óptimo desarrollo morfológico y fisiológico, se localiza entre los 300 a 2500 msnm. No obstante que un gran número de regiones maiceras en el DDR-Toluca se ubican en los 2,500 msnm, existen otras que sobrepasan esta altitud. Como consecuencia de esto el cultivo se encuentra más propenso a la ocurrencia de heladas, lo que puede provocar que exista un descenso en el rendimiento, calidad y producción de este cereal.

Las proyecciones en el incremento o decremento de la temperatura y precipitación media anual para el horizonte 2050, se basan en los Escenarios de Emisiones publicados por el IPCC (IEEE o SRES, por sus siglas en inglés), agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando una serie de elementos como: demografía, economía y tecnología, junto con las emisiones de GEI resultantes. En la presente investigación fueron aplicados los escenarios B2 y A2, ya que en el primer caso se proyecta un ligero ascenso en las emisiones de GEI de 620 ppm (resultado de políticas enfocadas al desarrollo sustentable), mientras que en el segundo

se estima un considerable incremento en las emisiones de GEI de 850 ppm, resultado de escasas o nulas políticas ambientales para disminuir la emanación de GEI.

Los modelos de circulación general de la atmósfera aplicados en la presente investigación son HADLEY y ECHAM, que fueron seleccionados por representar mejor el clima esperado regional.

El comportamiento de la temperatura mínima en el DDR-Toluca durante el período 1950-2000 se ubicó entre los 5.7 y 8.4°C durante el ciclo agrícola primavera-verano, correspondiente a los meses de mayo a octubre, estos valores térmicos se encontraron por debajo de los parámetros óptimos de temperatura requeridos por el cultivo del maíz en sus diferentes estadios fenológicos, ya que desde la fecha de siembra hasta la madurez, el promedio mensual de la temperatura mínima registrada en el área en estudio fue inferior al umbral térmico requerido por este cereal.

La temperatura máxima en el área en estudio durante el período 1950-2000 osciló entre los 19 y 22.5°C durante el ciclo agrícola primavera-verano, estos valores térmicos se encontraron dentro o muy cercanos a los parámetros térmicos óptimos requeridos por el cultivo del maíz en sus diferentes fases fenológicas, por lo que las temperaturas máximas promedio registradas en el DDR-Toluca no representaron ningún obstáculo para que se llevara a cabo un apropiado desarrollo fenológico de este cereal.

Los requerimientos hídricos de este grano varían dependiendo del tipo de variedad. Las áreas donde se pueden lograr buenas cosechas deben disponer de precipitación pluvial bien distribuida y que acumulen más de 800 mm entre mayo y noviembre, sin sobrepasar los 1,000 mm de precipitación ya que es su nivel máximo de tolerancia. El distrito agrícola de Toluca, durante el período 1950-2000 dispuso de una precipitación pluvial idónea para el cultivo del maíz, la cual fue de 916 mm.

La precipitación pluvial durante este período se encontró ligeramente por encima de los niveles óptimos pluviométricos en cada una de las fases fenológicas. En la etapa de germinación y desarrollo vegetativo, se promedió en las normales climáticas 253.2 mm de precipitación, lo cual sobrepasó en 38.2 mm los requerimientos hídricos durante estas fases del desarrollo de la planta. Por otro lado, durante la etapa de floración y

maduración (después de sesenta días de la nacencia), se promedió en el escenario base 663.1 mm de precipitación entre los meses de julio y agosto, lo cual rebasó en 63.1 mm la cantidad de agua recomendada durante esta etapa. Los volúmenes pluviométricos se situaron ligeramente por arriba de los niveles óptimos, lo que no perjudica al desarrollo de la planta, ya que se debe considerar que el agua precipitada una parte es consumida por la planta y otra se queda en el suelo o se pierde por escorrentía o evaporación. Estos niveles pluviométricos permitieron que el DDR-Toluca fuera uno de los distritos con mayor producción de maíz en el Estado de México.

Modelo Hadley (horizonte 2050)

Escenario B2

Los niveles pluviométricos proyectados para el ciclo agrícola primavera-verano se situarían en 907.3 mm, lo que representaría una reducción de 9 mm, con respecto al escenario base durante el mismo ciclo. Por tal motivo, en este escenario el cultivo del maíz se encontraría más cerca de los requerimientos hídricos óptimos, los cuales se sitúan en 800 mm. Sin embargo, se proyecta que este cultivo podría presentar problemas de escasez de agua en la fase fenológica de floración, y un exceso hídrico en el estadio fenológico de formación del fruto. No obstante el cambio estimado en la distribución anual de la precipitación, éste no afectaría de manera considerable al cultivo del maíz, ya que no presentaría significativos cambios en los volúmenes de precipitación pluvial.

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), en el escenario B2 se proyecta un aumento de la temperatura mínima en el ciclo agrícola primavera-verano de 2.2°C en promedio, para el año 2050. Las anomalías esperadas en la temperatura mínima promedio estiman que el incremento térmico proyectado en el área en estudio, no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros térmicos recomendados en las fases fenológicas de crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez. Sin embargo, este aumento en la temperatura mejoraría las condiciones térmicas para que se lleve a cabo un mejor desarrollo de este cereal durante estos estadios fenológicos.

Por otro lado, las proyecciones en la anomalía de la temperatura máxima estiman un ascenso térmico de 2.3°C en el ciclo agrícola primavera-verano, lo que favorecería notablemente las condiciones térmicas en todas las fases fenológicas del cultivo del maíz, ya que estos valores se encontrarían dentro de los parámetros térmicos óptimos citados para este cereal.

Escenario A2

La precipitación dentro de este escenario proyecta que para el ciclo agrícola primavera-verano habría una precipitación de 890 mm, lo que representaría una reducción de 26.3 mm con respecto al escenario base. Como consecuencia de esto, el cultivo del maíz se encontraría más cerca de los requerimientos hídricos óptimos. Sin embargo, el cultivo presentaría problemas de escasez de agua en la fase fenológica de floración, así como excedente agua en la etapa de formación de fruto, lo cual podría provocar que el cultivo de maíz no se desarrolle dentro de los requerimientos hídricos óptimos durante estos dos subperíodos fenológicos.

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), en el escenario A2 se espera un aumento de la temperatura mínima promedio de 2.5°C entre mayo y octubre, presentándose los mayores incrementos durante el invierno. Las anomalías esperadas en la temperatura mínima promedio estiman que el incremento térmico proyectado en el área en estudio, no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros térmicos recomendados en las fases fenológicas de crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez. Sin embargo, este aumento en la temperatura mejoraría las condiciones térmicas para que se lleve a cabo un mejor desarrollo de este cereal durante estos estadios fenológicos.

Por otro lado, el incremento térmico estimado en la temperatura máxima para el ciclo agrícola primavera-verano en el DDR-Toluca, favorecería notablemente las condiciones térmicas en todas las fases fenológicas del cultivo del maíz, ya que estos valores se encontrarían dentro de los parámetros térmicos óptimos citados para este cereal.

Modelo ECHAM (horizonte 2050)

Escenario B2

Los niveles pluviométricos estimados para el ciclo agrícola primavera-verano se situarían en los 907 mm en el DDR-Toluca, lo que representaría un decremento de 9.3 mm con respecto a las normales climáticas durante el mismo ciclo. Por tal motivo, en este escenario, el cultivo del maíz tendría condiciones hídricas ligeramente más próximas a los parámetros hídricos óptimos. Sin embargo, el cultivo presentaría problemas de escasez de agua en la fase fenológica de madurez, así como excedente de agua en la etapa de formación de fruto, lo cual podría provocar que el cultivo de maíz no se desarrolle dentro de los requerimientos hídricos óptimos durante estos dos subperíodos fenológicos.

Según el Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2010), en el escenario B2 se proyecta un aumento de la temperatura mínima en el ciclo agrícola primavera-verano de 2.4°C en promedio, para el año 2050. Las anomalías esperadas en la temperatura mínima estiman que el incremento térmico proyectado en el área en estudio, no sería suficiente para que el cultivo del maíz se encontrara dentro de los parámetros térmicos recomendados en las fases fenológicas de crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez. Sin embargo, este aumento en la temperatura mejoraría las condiciones térmicas para que se lleve a cabo un mejor desarrollo de este cereal durante estos estadios fenológicos.

Por otro lado, el aumento térmico proyectado en la temperatura máxima de 2.2°C en el ciclo agrícola primavera-verano en promedio, mejoraría notablemente las condiciones térmicas en todas las fases fenológicas del cultivo del maíz, ya que estos valores se encontrarían dentro de los parámetros térmicos óptimos requeridos por este cereal.

Escenario A2

Los volúmenes de precipitación pluvial dentro de este escenario estiman que para el ciclo agrícola primavera-verano habría una precipitación de 889 mm en el DDR-Toluca, lo que significaría un decremento de 26.4 mm con respecto al escenario base. Como

consecuencia de esto, el cultivo del maíz se encontraría más próximo a los parámetros hídricos óptimos. Sin embargo, el cultivo presentaría problemas de escasez de agua en la fase fenológica de madurez, así como un excedente de agua en la etapa de germinación y formación de fruto. Este último estadio fenológico presentaría un considerable incremento de los niveles hídricos, lo cual podría propiciar que el cultivo de maíz padeciera problemas de plagas y enfermedades.

Consideraciones finales

Aunque el comportamiento de las variables precipitación y temperatura representan dos elementos muy importantes para que se lleve a cabo el óptimo desarrollo fenológico del cultivo del maíz, no son determinantes, ya que el déficit de agua ocasionado por fenómenos como la sequía pueden reducir de manera acentuada la producción de este cereal. No obstante que en el distrito agrícola de Toluca no hubo registros de ocurrencia del fenómeno de sequía intraestival durante los últimos 50 años, no se encuentra eximido del fenómeno de la sequía que acontece con cierta periodicidad en México, ya que el DDR-Toluca ha presentado marcados descensos en su producción agrícola debido a este fenómeno, como en el año 2005 en el cual la producción de maíz tuvo un acentuado descenso de 44.8% con respecto al promedio registrado en el área en estudio durante el período 1999-2008, como consecuencia de una sequía que tuvo lugar en gran parte del territorio nacional.

También habría que considerar que con el aumento de la temperatura inherente al cambio climático, factores del clima como la evapotranspiración representarán una mayor importancia, ya que con el ascenso térmico puede incrementarse la demanda evaporativa entre 6 a 9 mm/día cuando la demanda normal oscila entre 5 a 6 mm/día. Como consecuencia de este ascenso en la temperatura, el cultivo del maíz requerirá una mayor cantidad agua, modificando los requerimientos hídricos óptimos.

Es necesario señalar que la presente investigación puede ser complementada con la aplicación del modelo CROPWAT, ya que los cambios esperados en el comportamiento de las diferentes variables climatológicas que modificarán las condiciones en el desarrollo fenológico de los cultivos, son calculados por este modelo, el cual estima los posibles incrementos o decrementos en los rendimientos de un gran número de cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

Bartolini, R. (1989), *El maíz*, Ed. Mundi-Prensa, España.

Bassols, B. A. (1977), *Los recursos naturales de México (teoría, conocimiento y uso)*. Ed. Nuestro Tiempo, México.

Bolaños, J. y Edmeades, G. (1993), Síntesis de Resultados experimentales del PRM. 1992. *CIMMYT. 4 (1993)*: 251-261- El Batán, México.

Celis, J. F. y L. G. Salgado (1985), *Agrociencia 1(1)*, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.

CMNUCC (1992), Convenio del Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 1992, Organización de las Naciones Unidas, New York, E.U.A.

Flores, M., Araujo, R., y Betancourt (2004) “Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático”. Gay C. [compilador]. *México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los Estudios de la vulnerabilidad del país*. INE-UNAM-US Study Program, México.

García, E., Vidal, R y Hernández, M. (1989). “*Las Regiones Climáticas de México*”. A. García (ed.), *Atlas Nacional de México*, Instituto de Geografía, México: UNAM, vol. 2, cap. IV, núm. 10, mapa esc. 1: 12,000,000.

Gay, C., Conde C., Ferrer R. Gay. y Araujo, R. (2004) *Impactos del cambio climático en la agricultura en México*, Ed. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, págs 227-238, México.

González, A. (1995), *El maíz y su conservación*. Ed. Trillas, México.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1995), *Anuario Estadístico del Estado de México*, INEGI, México.

INEGI (1997), *El maíz en el Estado de México*, INEGI, México.

INEGI (2000), *Anuario Estadístico del Estado de México*, INEGI, México.

INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2008), *Estadísticas climatológicas básicas del Estado de México (período 1961-2003)*, SAGARPA, México.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2001), *Tercer Informe de Evaluación, Cambio climático 2001; La base científica*, Grupo Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático, Ginebra, Suiza.

IPCC (2007), *Summary for Policymakers. In: Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Liverman, D., and O'Brien, K. (1996) *Climate Variability, Climate Change and Social Vulnerability in the Semi-Arid Tropics*, University of Cambridge, UK.

Llanos, C.M. (1984), *El maíz, su cultivo y aprovechamiento*, Ed. Mundi-Prensa, España.

Martínez F.J. (2003) "ABC del Cambio Climático: Impactos y Acciones en México", INE, Semarnat, México.

Martínez, J. y Fernández, B. compiladores (2004) "*Cambio climático: una visión desde México*" Ed. INE, Semarnat, México.

Orozco, H. M., Sanabria, B. y Colín, O. (1999), *Análisis socioeconómico y territorial de los ejidos y su relación con la actividad agrícola. Distrito de Desarrollo Rural I Toluca (Una aproximación de lo regional a lo local)*, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

Orozco, H., Peña, V., Franco, R. y Pineda, N. (2004), *Atlas Agrario Ejidal del Estado de México*, Universidad Autónoma del Estado de México , Toluca, México.

Orozco, H., Sánchez, S., Peña, V. y Tapia, Q. (2009), *La otra imagen del alto Lerma, Paradigma ejidal de la globalización*, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Reyes, C.P. (1990), *El maíz y su cultivo*, Ed. A.G. T. Editor S.A, México.

SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1990), *Guía para cultivar maíz en el Estado de México*, SARH, Chapingo, México.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2007), *Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2012*, Sagarpa, México.

SIAP (2008), *Anuario estadístico 2008*, Sagarpa, México.

SIAP (2009), *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (Siacon) 1980-2008*, Sagarpa (CD-ROM), México.

Soria, R.J., Mejía, Á.C., Fernández, O.Y. y González H.E. (2004), *Sistema de información del uso actual de suelo, Estado de México*”, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (CD-ROM), Zinacantepec, Estado de México, México.

Trillas (1981), *Manuales para la educación agropecuaria; El maíz*, Ed. Trillas, México.

Vázquez, G. J. (2006), *Ecofisiología del maíz*. Universidad Autónoma de Chiapas, México.

Vidal, R. (2005), *Las regiones climáticas de México, Temas Selectos de Geografía de México*, Instituto de Geografía, UNAM, México, 212 pp.

Warman, E. (1982), *El cultivo del maíz en México: diversidad, limitaciones y alternativas*, Ed. Centro de Ecodesarrollo, México.

Páginas electrónicas

CICS, Canadian Institute for Climate Studies, <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/>, Consulta 20 de Septiembre de 2010.

CCA, Centro de Ciencias de la Atmosfera, <http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/> Consulta 3 de Junio de 2010.

Conabio, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2009). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, *Carta de Hidrografía*, Consulta 15 de Enero de 2010.

Conabio (2009). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, *Carta de Climas*, Consulta 15 de Enero de 2010.

Conabio (2009). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, *Carta de Edafología*, Consulta 15 de Enero de 2010.

Componentes de la mazorca, <http://dibujosfotosimagenes.blogspot.com>

INE, Instituto Nacional de Ecología, http://cambio_climatico.ine.gob.mx/index.html Consulta 14 de Diciembre de 2009.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2010) Sistema de descarga del continuo de elevaciones mexicano, *Carta de geomorfología*, <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&c=910>, Consulta 22 de febrero de 2010.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2010), "The IPCC data distribution centre". http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_TAR/index.html, Consulta 3 de Junio de 2010.

Martínez, B., Conde, C., Sánchez, O., Estrada, F., Fernández, A., Zavala, J. y Gay, C. (2008). *Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación*. [Documento en línea]. Disponible internet http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74.

OMM, Organización Meteorológica Mundial (2000), *Informe Especial del IPCC; Escenarios de emisiones* <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>.

OMM, Organización Meteorológica Mundial (2010), *Modelos de Circulación General (MCG)* <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd50/escenarios/cap3.pdf> Consulta 2 de Junio de 2010.

Semarnat, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Cambio Climático, www.semarnat.gob.mx/Pages/inicio.aspx Consulta 5 de Enero de 2010.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, www.siap.gob.mx/ Consulta 8 de Marzo de 2010.