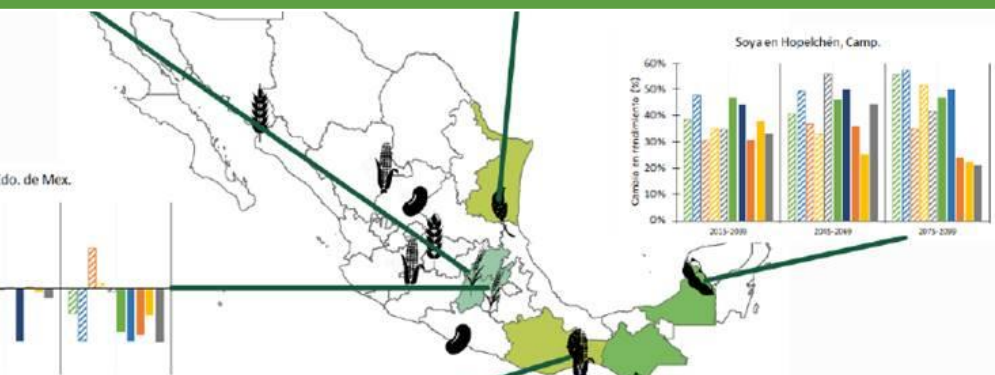


ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS POTENCIALES CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA DIVERSOS CULTIVOS AGRÍCOLAS EN MÉXICO

Reporte Final



2017

ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO



Preparado por:
Antonio R. Arce Romero
Consultor

Coordinación General de Adaptación
al Cambio Climático

Elaborado en el marco del proyecto
#86487 "Plataforma de Colaboración
sobre Cambio Climático y Crecimiento
Verde entre Canadá y México".

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, 2° piso. Col.
Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan C.p. 4210
Ciudad de México Tel. +52 (55) 54246400.

www.inecc.gob.mx

Estimación de rendimientos potenciales con escenarios de cambio climático para diversos cultivos agrícolas en México

Reporte Final

2017

Antonio R. Arce
Consultor

Elda N. Navarro
Revisión, INECC

No. de contrato: IC-2016- 083

Serie

1

Fortalecimiento de capacidades nacionales para la modelación climática

DIRECTORIO

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Antonio Molpeceres <i>Coordinador Residente del Sistema de las Naciones Unidas y Representante Residente</i>	María Amparo Martínez Arroyo <i>Directora General</i>
Katyna Argueta <i>Directora de país</i>	Ana Cecilia Conde Álvarez <i>Coordinadora General de Adaptación al Cambio Climático</i>
Gerardo Arroyo O'Grady <i>Director del Programa de Desarrollo Sustentable</i>	Jorge López Blanco <i>Director de Gestión de Riesgos y Adaptación</i>
Alejandro Ismael Monterroso Rivas <i>Coordinador de la Plataforma de Colaboración sobre cambio climático y crecimiento verde entre Canadá y México</i>	Daniel Iura González Terrazas <i>Director de Manejo de Cuencas y Adaptación</i>
Francisco Hernández Estens <i>Gerente del Programa de Desarrollo Sustentable</i>	Margarita Caso Chávez <i>Directora de Vulnerabilidad y Adaptación Ecológica</i>
Itzel Nayeli Jiménez García <i>Administradora de la Plataforma de Colaboración sobre cambio climático y crecimiento verde entre Canadá y México</i>	

Derechos Reservados © 2015

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Periférico Sur 5000, Colonia Insurgentes Cuicuilco, Delegación Coyoacán, CP. 04530, Ciudad de México

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Diseño editorial: Elsa Barreda

Se sugiere citar como:

PNUD-INECC. 2017. *Estimación de rendimientos potenciales con escenarios de cambio climático para diversos cultivos agrícolas en México*. Informe Final. Autor y responsable técnico: Antonio R. Arce Romero.

Seguimiento técnico por INECC: Elda N. Navarro Salas. Elaborado en el marco del proyecto #86487

“Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”,

Coordinador: Alejandro Monterroso Rivas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo / Instituto

Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México. 216 p.

Colaboradores:

Esta publicación fue desarrollada en el marco del proyecto #86487 “*Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México*”. El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

AGRADECIMIENTO: Al Gobierno de Canadá a través de *Environment Canada* por el apoyo financiero recibido para el desarrollo de la *Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México*, durante 2014-2017. Así mismo, al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por el apoyo prestado para el buen desarrollo de la Plataforma.

Contenido

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
REVISIÓN DE LITERATURA	13
ENFOQUE DE LA CONSULTORÍA: LA SEGURIDAD ALIMENTARIA.	13
JUSTIFICACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE CULTIVOS	18
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AGRICULTURA DE MÉXICO	23
IMPACTOS EN EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS	24
MAÍZ.	25
FRIJOL.	26
TRIGO.	26
SOYA.	26
CEBADA.	27
METODOLOGÍA	27
MODELOS BIOFÍSICOS DE CULTIVO	27
EL MODELO <i>AQUACROP</i> DE FAO	34
USO DE <i>AQUACROP</i> EN EL MUNDO	34
VARIABLES DEL MODELO <i>AQUACROP</i>	35
DESCRIPCIÓN DEL <i>SOFTWARE</i>	36
REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN	38
PROCESAMIENTO Y CALIBRACIÓN DEL MODELO	41
ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE ESTACIONES	45
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	53
ESCENARIOS DE SUELOS	54
MEDIDAS DE ADAPTACIÓN	55
RESULTADOS	58
MAÍZ	59
DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	59
REQUERIMIENTOS AMBIENTALES	60
DESARROLLO DE FENOLOGÍA	61
ESTUDIOS DE CASO	62
ATOTONILCO, JALISCO	63
JUCHITÁN DE ZARAGOZA, OAXACA	71
CUENCAMÉ, DURANGO	79
FRIJOL	87
DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	87
REQUERIMIENTOS AMBIENTALES	88
DESARROLLO DE FENOLOGÍA	89

ESTUDIOS DE CASO	90
ATOYAC DE ÁLVAREZ, GUERRERO	92
VILLA DE COS, ZACATECAS	100
TRIGO	108
DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	108
REQUERIMIENTOS AMBIENTALES	109
DESARROLLO DE FENOLOGÍA	110
ESTUDIOS DE CASO	111
TRES HERMANOS, NAVOJOA, SONORA	112
OCAMPO, GUANAJUATO	121
SOYA	129
DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	129
REQUERIMIENTOS AMBIENTALES	131
DESARROLLO DE FENOLOGÍA	132
ESTUDIOS DE CASO	134
BOLONCHÉN, HOPELCHÉN, CAMPECHE	135
MALPASO, TAPACHULA, CHIAPAS	143
SORGO	152
DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	152
REQUERIMIENTOS AMBIENTALES	153
DESARROLLO DE FENOLOGÍA	154
ESTUDIOS DE CASO	156
CIUDAD IXTEPEC, OAXACA	157
GONZÁLEZ, TAMAULIPAS	165
CEBADA	173
DESCRIPCIÓN BOTÁNICA	173
REQUERIMIENTOS AMBIENTALES	175
DESARROLLO DE FENOLOGÍA	176
ESTUDIOS DE CASO	178
SAN MIGUEL TLAIXPAN, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO	179
HUICHAPAN, HIDALGO	186
CONCLUSIONES	194
BIBLIOGRAFÍA	195
ANEXOS	205
ANEXO 1. ESTADÍSTICOS DE CALIBRACIÓN	205
ANEXO 2 PROCESO DE CONTROL DE CALIDAD	207
ANEXO 3 SUELOS	208
ANEXO 4 CARTOGRAFÍA	211
ANEXO 5 RESULTADOS MODELOS BASE	215

Índice de Figuras

Figura 1 Cascada de impactos del cambio climático en la seguridad alimentaria.....	15
Figura 2 Contribución agrícola al PIB nacional	17
Figura 3 Distribución de la superficie agrícola de riego y temporal	18
Figura 4 Producción nacional de cereales básicos de 2000-2010	19
Figura 5 Balanza comercial de maíz	20
Figura 6 Producción nacional de leguminosas de 2000-2010	21
Figura 7 Producción de oleaginosas en México de 2000-2010.....	22
Figura 8 El clima y los sistemas de cultivo	23
Figura 9 Modelo conceptual de <i>Aquacrop</i>	37
Figura 10 Esquema ilustrativo de la metodología	41
Figura 11 Interfaz de datos de entrada de <i>Aquacrop</i>	42
Figura 12 Simulación de la transpiración, la cobertura aérea y la profundidad radicular para un cultivo	44
Figura 13 Sección de producción de la interfaz de salida de <i>Aquacrop</i>	45
Figura 14 Secuencia de criterios para elección de estaciones a modelar	46
Figura 15 Diagrama del proceso de adaptación al cambio climático.....	56
Figura 16 Riqueza conocida de maíces en México.....	59
Figura 17 Distribución de las estaciones seleccionadas para maíz	63
Figura 18 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Atotonilco	64
Figura 19 Periodo de crecimiento de la estación Atotonilco	65
Figura 20 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Atotonilco	66
Figura 21 Modelo base para maíz en Atotonilco, Jal.....	67
Figura 22 Relación de rendimiento con precipitación en estación Atotonilco	68
Figura 23 Rendimiento y biomasa producida en la estación Atotonilco	69
Figura 24 Precipitación con cambio climático en Atotonilco, Jal.	69
Figura 25 Biomasa bajo cambio climático para Atotonilco, Jal.	70
Figura 26 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Atotonilco, Jal.	71
Figura 27 Medidas de adaptación para Atotonilco, Jal.....	71
Figura 28 Periodo de crecimiento de la estación Juchitán.....	72
Figura 29 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Juchitán	73
Figura 30 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Juchitán	74
Figura 31 Modelo base para maíz en Juchitán, Oax.	75
Figura 32 Relación de rendimiento con precipitación en estación Juchitán.....	76
Figura 33 Rendimiento y biomasa producida en la estación Juchitán	76
Figura 34 Precipitación con cambio climático en Juchitán, Oax.....	77
Figura 35 Biomasa bajo cambio climático para Juchitán, Oax.	78

Figura 36 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Juchitán, Oax.	78
Figura 37 Medidas de adaptación para Juchitán Oax.	79
Figura 38 Periodo de crecimiento de la estación Cuencamé.....	80
Figura 39 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Cuencamé.....	81
Figura 40 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Cuencamé.....	82
Figura 41 Modelo base para maíz en Cuencamé, Dgo.....	83
Figura 42 Relación de rendimiento con precipitación en estación Cuencamé	84
Figura 43 Rendimiento y biomasa producida en la estación Cuencamé.....	84
Figura 44 Precipitación con cambio climático en Cuencamé, Dgo.	85
Figura 45 Biomasa bajo cambio climático para Cuencamé, Dgo.	85
Figura 46 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Cuencamé, Dgo.	86
Figura 47 Medidas de adaptación para Cuencamé, Dgo.....	87
Figura 48 Características geográficas adecuadas para producción de frijol	89
Figura 49 Época de siembra de frijol de temporal.....	90
Figura 50 Esquema ilustrativo de la milpa	91
Figura 51 Distribución de las estaciones seleccionadas para frijol.....	92
Figura 52 Comportamiento intra-anual de la temperatura en Atoyac.....	93
Figura 53 Periodo de crecimiento de la estación Atoyac	94
Figura 54 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Atoyac	95
Figura 55 Modelo base para frijol en Atoyac, Gro.	96
Figura 56 Relación de rendimiento con precipitación en estación Atoyac.....	97
Figura 57 Rendimiento y biomasa producida en la estación Atoyac	97
Figura 58 Precipitación con cambio climático en Atoyac, Gro.	98
Figura 59 Biomasa bajo cambio climático en Atoyac, Gro.	98
Figura 60 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Atoyac, Gro.	99
Figura 61 Medidas de adaptación para Atoyac, Gro.	99
Figura 62 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Villa de Cos.....	101
Figura 63 Periodo de crecimiento de la estación Villa de Cos.....	101
Figura 64 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Villa de Cos.....	103
Figura 65 Modelo base para frijol en Villa de Cos, Zac.....	104
Figura 66 Relación de rendimiento con precipitación en estación Villa de Cos.....	105
Figura 67 Rendimiento y biomasa producida en la estación Villa de Cos.....	105
Figura 68 Precipitación con cambio climático en Villa de Cos, Zac.	106
Figura 69 Biomasa bajo cambio climático para Villa de Cos, Zac.....	107
Figura 70 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Villa de Cos, Zac.....	107
Figura 71 Medidas de adaptación para Villa de Cos, Zac.....	108

Figura 72 Zonas potenciales para el cultivo de trigo en México	110
Figura 73 Distribución de las estaciones seleccionadas para trigo	112
Figura 74 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Tres Hermanos	113
Figura 75 Periodo de crecimiento de la estación Tres Hermanos	114
Figura 76 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Villa de Cos	116
Figura 77 Modelo base para trigo en Navojoa, Son.	117
Figura 78 Relación de rendimiento con precipitación en estación Tres Hermanos, Navojoa.....	118
Figura 79 Rendimiento y biomasa producida en la estación Tres Hermanos, Navojoa	118
Figura 80 Precipitación con cambio climático en Tres Hermanos, Navojoa, Son.	119
Figura 81 Biomasa bajo cambio climático para Tres Hermanos, Navojoa, Son.	119
Figura 82 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Tres Hermanos, Navojoa, Son.....	120
Figura 83 Medidas de adaptación para Navojoa, Son.	121
Figura 84 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Ocampo	122
Figura 85 Periodo de crecimiento de la estación Ocampo	123
Figura 86 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Ocampo	124
Figura 87 Modelo base para trigo en Ocampo, Gto.....	125
Figura 88 Relación de rendimiento con precipitación en estación Ocampo.....	126
Figura 89 Rendimiento y biomasa producida en la estación Ocampo	126
Figura 90 Precipitación con cambio climático en Ocampo, Gto.	127
Figura 91 Biomasa bajo cambio climático para Ocampo, Gto.....	128
Figura 92 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Ocampo, Gto.	128
Figura 93 Medidas de adaptación para Ocampo, Gto.	129
Figura 94 Producción de soya Primavera-Verano, 2004-2008	130
Figura 95 Época de siembra de soya en México	133
Figura 96 Distribución de las estaciones seleccionadas para soya	135
Figura 97 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Bolonchén	137
Figura 98 Periodo de crecimiento de la estación Bolonchén	137
Figura 99 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Bolonchén	138
Figura 100 Modelo base para soya en Bolonchén, Camp.....	139
Figura 101 Relación de rendimiento con precipitación en estación Bolonchén.....	140
Figura 102 Rendimiento y biomasa producida en la estación Bolonchén	140
Figura 103 Precipitación con cambio climático en Bolonchén, Hopelchén, Camp.	141
Figura 104 Biomasa bajo cambio climático para Bolonchén, Hopelchén, Camp.	142
Figura 105 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Bolonchén, Hopelchén, Camp.....	142
Figura 106 Serie temperatura mínima de 2001-2010 de estación Malpaso.....	143
Figura 107 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Malpaso, Tapachula	144

Figura 108	Periodo de crecimiento de la estación Malpaso, Tapachula.....	145
Figura 109	Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Malpaso, Tapachula, Chis.....	147
Figura 110	Modelo base para soya en Malpaso, Tapachula	148
Figura 111	Relación de rendimiento con precipitación en estación Malpaso, Tapachula	149
Figura 112	Rendimiento y biomasa producida en la estación Malpaso, Chis.	149
Figura 113	Precipitación con cambio climático en Malpaso, Tapachula, Chis.	150
Figura 114	Biomasa bajo cambio climático para Tapachula, Chis.	151
Figura 115	Rendimiento con escenarios de cambio climático en Tapachula, Chis.....	151
Figura 116	Medidas de adaptación para Tapachula, Chis.....	152
Figura 117	Época de siembra de sorgo en México.....	155
Figura 118	Rendimientos mundiales de sorgo (2005-2015).....	156
Figura 119	Distribución de las estaciones seleccionadas para sorgo	157
Figura 120	Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Ciudad Ixtepec.....	158
Figura 121	Periodo de crecimiento de la estación Ciudad Ixtepec	158
Figura 122	Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Ciudad Ixtepec	160
Figura 123	Modelo base para sorgo en Cd. Ixtepec, Oax.	161
Figura 124	Rendimiento y biomasa producida en la estación Ciudad Ixtepec	162
Figura 125	Precipitación con cambio climático en Cd. Ixtepec, Oax.	163
Figura 126	Biomasa bajo cambio climático para Cd. Ixtepec, Oax.	163
Figura 127	Rendimiento con escenarios de cambio climático en Cd. Ixtepec, Oax.....	164
Figura 128	Medidas de adaptación para Cd. Ixtepec, Oax.	164
Figura 129	Gráfico de temperaturas máxima y mínima para González, Tamps (2000-2011)	165
Figura 130	Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación González, Tamps.	166
Figura 131	Periodo de crecimiento de la estación González, Tamps.....	167
Figura 132	Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para González, Tamps.	168
Figura 133	Modelo base para sorgo en González, Tamps.	169
Figura 134	Relación de rendimiento con precipitación en estación González, Tamps.	170
Figura 135	Rendimiento y biomasa producida en la estación González, Tamps.	170
Figura 136	Precipitación con cambio climático en González, Tamps.	171
Figura 137	Biomasa bajo cambio climático para González, Tamps.	172
Figura 138	Rendimiento con escenarios de cambio climático en González, Tamps.....	172
Figura 139	Medidas de adaptación para González, Tamps.....	173
Figura 140	Anatomía de la cebada	174
Figura 141	Etapas de desarrollo de cebada	176
Figura 142	Época de cosecha de cebada en México.....	177
Figura 143	Distribución de las estaciones seleccionadas para cebada	178

Figura 144 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación San Miguel Tlaixpan, Texcoco.....	180
Figura 145 Periodo de crecimiento de la estación San Miguel Tlaixpan, Texcoco	180
Figura 146 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para San Miguel Tlaixpan	181
Figura 147 Modelo base para cebada en San Miguel Tlaixpan, Edo. Mex	182
Figura 148 Relación de rendimiento con precipitación en estación San Miguel Tlaixpan	183
Figura 149 Rendimiento y biomasa producida en la estación San Miguel Tlaixpan	183
Figura 150 Precipitación con cambio climático en S. M. Tlaixpan, Texcoco, Edo. Mex.	184
Figura 151 Biomasa bajo cambio climático para S. M. Tlaixpan, Texcoco, Edo. Mex.	185
Figura 152 Rendimiento con escenarios de cambio climático en S. M. Tlaixpan, Texcoco, Edo. Mex.....	185
Figura 153 Medidas de adaptación en Tlaixpan, Edo. de Mex.	186
Figura 154 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Huichapan	187
Figura 155 Periodo de crecimiento de la estación Huichapan.....	188
Figura 156 Comparativo del modelo <i>Aquacrop</i> contra datos de SIAP para Huichapan.....	189
Figura 157 Modelo base para cebada en Huichapan, Hgo.	190
Figura 158 Rendimiento y biomasa producida en la estación Huichapan	191
Figura 159 Precipitación con cambio climático en Huichapan, Hgo.	191
Figura 160 Biomasa bajo cambio climático para Ocampo, Gto	192
Figura 161 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Ocampo, Gto.	193
Figura 162 Medidas de adaptación para Huichapan, Hgo.	193

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Comparativa de modelos de cultivo	31
Cuadro 2 Variables de entrada y fuente propuesta	40
Cuadro 3 Parámetros de validación de los modelos	43
Cuadro 4 Control de calidad de las estaciones.....	47
Cuadro 5 Estaciones seleccionadas para el estudio	50
Cuadro 6 Escenarios de cambio climático considerados.....	53
Cuadro 7 Medidas de adaptación para agricultura	57
Cuadro 8 Requerimientos ambientales para maíz	60
Cuadro 9 Etapas fenológicas de maíz	61
Cuadro 10 Datos de referencia de la estación Atotonilco	63
Cuadro 11 Datos de referencia de la estación Juchitán.....	72
Cuadro 12 Datos de referencia de la estación Cuencamé.....	79
Cuadro 13 Requerimientos ambientales para frijol.....	88
Cuadro 14 Etapas fenológicas de frijol.....	89
Cuadro 15 Datos de referencia de la estación Atoyac	92

Cuadro 16 Datos de referencia de la estación Villa de Cos.....	100
Cuadro 17 Requerimientos ambientales para trigo.....	109
Cuadro 18 Etapas fenológicas de trigo.....	110
Cuadro 19 Datos de referencia de la estación Atotonilco.....	112
Cuadro 20 Calendario de riego para trigo en Navojoa.....	114
Cuadro 21 Datos de referencia de la estación Ocampo.....	121
Cuadro 22 Requerimientos ambientales de soya.....	131
Cuadro 23 Etapas fenológicas para soya.....	133
Cuadro 24 Características generales de la estación Bolonchén.....	135
Cuadro 25 Datos de referencia de la estación Malpaso, Tapachula.....	143
Cuadro 26 Características agronómicas de variedades de soya para el Soconusco, Chis.....	145
Cuadro 27 Requerimientos ambientales de sorgo.....	153
Cuadro 28 Etapas fenológicas para sorgo.....	155
Cuadro 29 Características generales de la estación Ciudad Ixtepec.....	157
Cuadro 30 Datos de referencia de la estación González, Tamps.....	165
Cuadro 31 Requerimientos ambientales para cebada.....	175
Cuadro 32 Etapas fenológicas de cebada.....	177
Cuadro 33 Características generales de la estación San Miguel Tlaixpan, Texcoco.....	179
Cuadro 34 Datos de referencia de la estación Huichapan.....	186

RESUMEN

El objetivo de la presente consultoría fue “Elaborar y aplicar una metodología para estimar rendimientos futuros al considerar escenarios de cambio climático en algunos cultivos agrícolas de México (maíz, frijol, trigo y soya), mediante la aplicación de *software* reciente y especializado, así como la compilación de bases de datos para estimar el impacto del cambio climático en el rendimiento de dichos cultivos”. Adicionalmente, se modelaron cuatro medidas de adaptación.

La metodología general se basó en la aplicación de un modelo biofísico de cultivo (*Aquacrop* de la FAO) con escenarios de cambio climático. Los modelos de cultivo base tuvieron un buen ajuste (difieron en no más del 15% entre lo observado y modelado para la mayoría de los estudios de caso). Con escenarios de cambio climático se espera que la precipitación disminuya para la mayoría de las estaciones meteorológicas estudiadas, sumado a un cambio en la distribución intra anual de la misma. Dentro del desarrollo fenológico de los cultivos, el estrés hídrico fue el que mayor contribuyó a la pérdida de biomasa, especialmente en la fase de crecimiento inicial de las plantas. Algunos sitios de climas fríos podrían alcanzar una mayor biomasa beneficiándose de un aumento de la estación de crecimiento por temperatura, aunque la disponibilidad hídrica limitaría su aprovechamiento. El aumento en la concentración de dióxido de carbono podría conllevar a una mayor productividad, aunque la demanda hídrica se incrementaría para poder aprovecharla.

De los siete cultivos modelados se encontró una pérdida del rendimiento en la mayoría de los estudios de caso, especialmente en los cereales básicos como maíz, frijol y trigo. El sorgo y la cebada presentan casos donde el rendimiento aumenta o disminuye, aunque su tendencia decreciente se acentúa horizontes de tiempo lejanos; y sólo la soya proyectó ganancias en las zonas de alta precipitación. Los modelos que proyectaron impactos más negativos fueron frecuentemente el GFDL-CM3 y el HADGEM2-ES, los de impactos medios fueron el MPIECHAM-5 y el Ensamble REA, mientras que el CNRM-CM5 arrojó los impactos más positivos.

Las medidas de adaptación proyectaron resultados diferenciados entre cultivos y casos de estudio. Para las zonas secas del norte del país el aporte de agua adicional al temporal arrojó mejores resultados; no obstante, diversos estudios muestran déficit en la disponibilidad hídrica y sobre explotación de acuíferos en dicha zona; la segunda y tercera medida con mejores resultados fueron el cambio de fecha de siembra y el cambio en las características fenológicas de las variedades. En las zonas templadas la aplicación de acolchados orgánicos y el cambio en características fenológicas proyectaron mejores resultados. En zonas cálidas con altas precipitaciones la principal limitante es la fertilidad de los suelos; la aplicación de acolchados orgánicos tuvo buenos resultados. El cambio de fecha de siembra resultó ser una medida que permitió recuperar entre 5% y 20% el rendimiento impactado con cambio climático, considerando todos los estudios de caso.

La presente metodología puede ser replicada y sustenta las bases de futuros estudios.

INTRODUCCIÓN

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) es la red mundial de las Naciones Unidas para el Desarrollo que promueve el cambio y conecta a los países con los conocimientos, la experiencia y los recursos necesarios para ayudar a los pueblos a forjar una vida mejor. El PNUD está presente en 166 países, trabajando con los gobiernos y las personas para ayudarles a encontrar sus propias soluciones a los retos mundiales y nacionales del desarrollo.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es un organismo público descentralizado de la administración pública federal sectorizado en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) que tiene entre sus funciones la coordinación promoción y desarrollo, con participación de otras dependencias y entidades, de la investigación científica y tecnológica en materia de cambio climático, destacando la vulnerabilidad y adaptación.

La Plataforma de colaboración sobre cambio climático y crecimiento verde entre Canadá y México busca contribuir a la reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático, fortalecer las capacidades para la adaptación y el rastreo del financiamiento climático a través del desarrollo de información, criterios y directrices como insumos de conocimiento para los ámbitos de política, toma de decisiones e inversión pública en la materia en México. Una parte de sus acciones se centran en el análisis de los posibles impactos del cambio y la variabilidad climáticos en el país a escala regional y local, donde se considera un enfoque territorial para la evaluación de la vulnerabilidad y la adaptación de los ecosistemas y de la población al cambio climático proyectado y observado, así como en la evaluación de los eventos hidrometeorológicos extremos.

De acuerdo con los lineamientos establecidos por la Plataforma de colaboración sobre cambio climático y crecimiento verde entre Canadá y México, se establece que su objetivo es “contribuir a la reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático, fortalecer las capacidades para la adaptación y el rastreo del financiamiento climático a través del desarrollo de información, criterios y directrices como insumos de conocimiento para los ámbitos de política, toma de decisiones e inversión pública en la materia en México”.

En este sentido se solicitó una consultoría para actualizar la información sobre el impacto del cambio climático en la agricultura nacional. Particularmente se buscó elaborar y aplicar una metodología para estimar rendimientos futuros considerando escenarios de cambio climático en maíz, frijol, trigo y soya para México. El presente documento expone el desarrollo de dicha consultoría, con los antecedentes teórico metodológicos, la implementación de una metodología particular y los resultados obtenidos para los estudios de caso seleccionados.

Se presentan los resultados en términos de rendimiento, aunque también se discuten variables relevantes como los cambios en la precipitación, la biomasa y los estreses que afectan la obtención del rendimiento. Estos resultados fueron presentados ante el INECC en diferentes sesiones y se consolidó un interés para continuar con otros estudios que aporten conocimiento sobre el comportamiento de los cultivos especialmente de temporal ante el cambio climático.

OBJETIVOS

El objetivo general de la consultoría fue “Elaborar y aplicar una metodología para estimar rendimientos futuros al considerar escenarios de cambio climático en algunos cultivos agrícolas de México (maíz, frijol, trigo y soya), mediante la aplicación de *software* reciente y especializado, así como la compilación de bases de datos para estimar el impacto del cambio climático en el rendimiento de dichos cultivos”¹.

Objetivos específicos

1. Compilar, ordenar y analizar estudios sobre el impacto del cambio climático en la agricultura de México para caracterizar la problemática relacionada a la pérdida de productividad agrícola.
2. Proponer una metodología para evaluar el cambio en los rendimientos potenciales agrícolas como resultado del cambio climático, considerando para ello cultivos y zonas de importancia para la seguridad alimentaria en México.
3. Aplicar la metodología en el escenario histórico para conocer la condición base de la productividad agrícola en los cultivos y zonas seleccionados.
4. Proyectar el rendimiento potencial futuro con escenarios de cambio climático, analizando la influencia de variables biofísicas como la temperatura y la precipitación sobre la producción de biomasa, estableciendo con ello una comparativa del impacto del cambio climático en los rendimientos.
5. Proponer y evaluar medidas de adaptación basadas en actividades factibles a ejecutar para conocer el posible impacto benéfico de su aplicación.
6. Compilar y analizar las variables asociadas al rendimiento potencial del escenario base y futuro, además de las medidas de mitigación, para evaluar el efecto del cambio climático en los diferentes cultivos y escenarios de manejo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Enfoque de la consultoría: la seguridad alimentaria.

La preocupación por la seguridad alimentaria, una necesidad fundamental de los seres humanos, se ha visto acrecentada en los últimos años debido a las crisis ambientales, sociales y económicas que se han registrado en todo el mundo. La aplicación de medidas enfocadas hacia asegurar los alimentos para la población no es nueva; sin embargo, fue hasta 1996 cuando se celebró la primera Cumbre Mundial sobre la Alimentación, bajo la organización de la FAO en Roma. En ella se reafirmó el derecho inalienable de toda persona a acceder a alimentos sanos y nutritivos, se urgió sobre la generación de políticas encaminadas a erradicar la pobreza y la desigualdad y se reforzó la operación de programas como PESA (Programa Especial para la Seguridad Alimentaria). De acuerdo con la Cumbre, la seguridad alimentaria se considera

¹ Objetivo general conforme a los Términos de Referencia de la consultoría

existente “cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana” [*World Food Summit* (1996) citado en FAO, 2016:1]).

Años después, en 2009, una nueva iniciativa de la FAO fue adoptada mediante la Cumbre Mundial sobre la Seguridad Alimentaria, la cual se celebró nuevamente en Roma. En ella los gobiernos declararon redoblar esfuerzos para en 2015 alcanzar el primero de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, que consiste en erradicar la pobreza y el hambre; así como las metas de las anteriores Cumbres sobre la Alimentación. En su Declaración, los participantes resaltaron que para el 2050 se espera que la población mundial supere los 9,000 millones de personas, por lo que la producción agrícola debería aumentar en un 70 % en los próximos años para hacer frente a ello. Este documento es uno de los primeros textos que reconoce claramente al cambio climático como un riesgo adicional para la seguridad alimentaria, resaltando que los pequeños agricultores serían los más afectados y que las medidas deberían comprender acciones de mitigación y adaptación mediante la conservación de los recursos genéticos (FAO, 2009).

Un texto determinante sobre la relación entre la seguridad alimentaria y el cambio climático fue provisto por la FAO en 2016. En él se señala que una de las variables utilizadas para medir el grado de acceso a los alimentos es la pobreza extrema, la cual es medida en el número de personas que perciben menos de 1.25 USD/día. En el año de 1996 un 29.7% de la población mundial se encontraba en este límite, mientras que para 2012 dicho porcentaje había disminuido a 12.7% (Banco Mundial, 2015). Respecto a México, la proporción de población con ingresos menores a 1 dólar pasó de 10.8% en 1989 a 3.5% en 2005, aunque dicha cifra no se contrapone con la inflación de los precios de los alimentos, lo cual disminuye la accesibilidad a ellos. Por su parte, la ONU contabilizó para el 2015 que al menos 836 millones de personas seguían en esa condición, además de hacer notar que el 70% de las personas más pobres que habitan en zonas rurales dependen parcial o completamente de la agricultura (FAO, 2016). Aunque porcentualmente la pobreza extrema se ha reducido, la población sigue aumentando y el número de personas afectadas continúa siendo de magnitudes alarmantes. Tan sólo en México, en el 2008, la inseguridad alimentaria afectaba al 18.2% de la población (CONEVAL, 2010).

Para entender la seguridad alimentaria la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2009) ha propuesto cuatro pilares fundamentales que la sostienen: la disponibilidad, el acceso, la utilización y la estabilidad. La siguiente Figura esquematiza los impactos del cambio climático en la seguridad alimentaria.

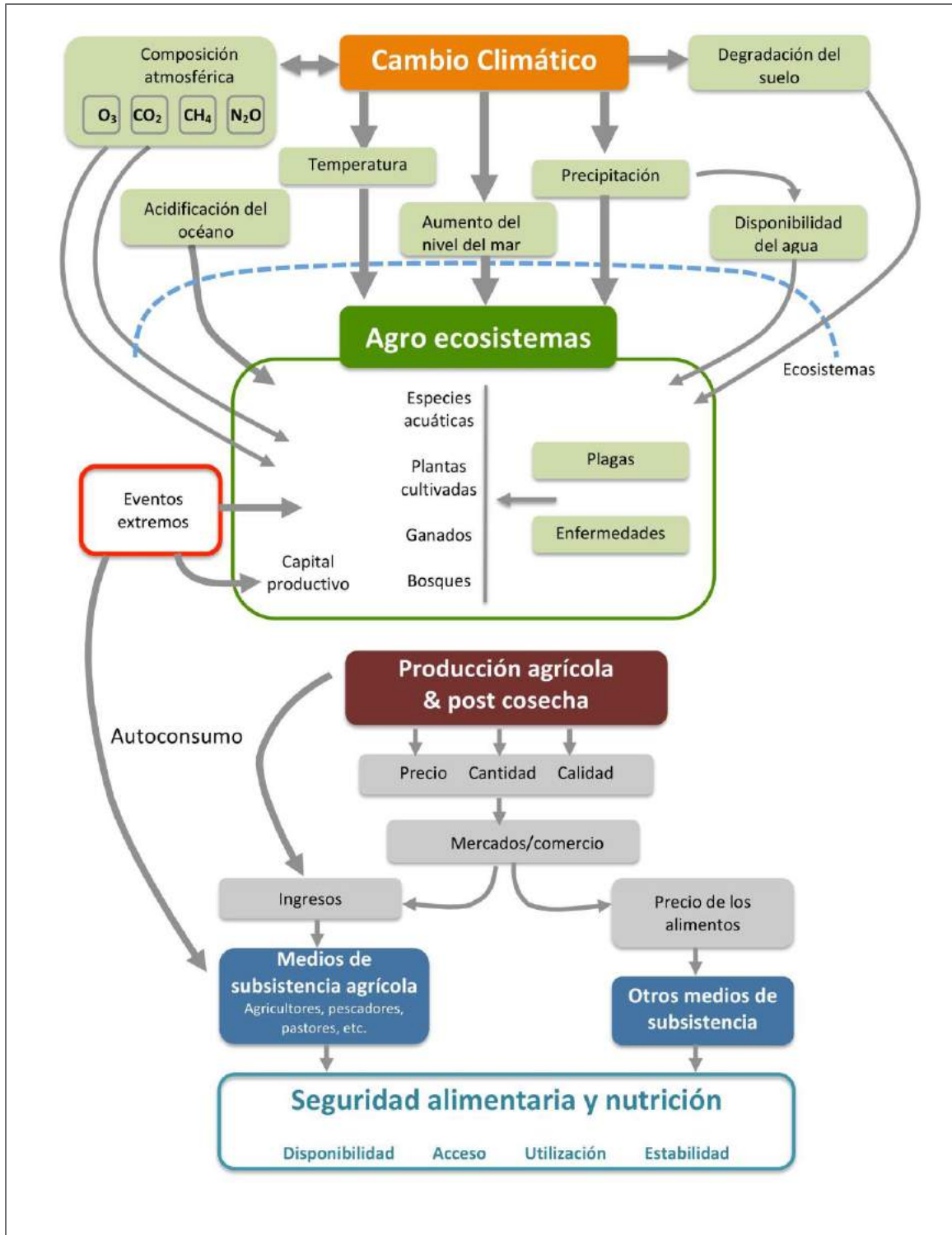


Figura 1 Cascada de impactos del cambio climático en la seguridad alimentaria.

Fuente: Traducido de FAO (2016)

De acuerdo con diversos estudios los impactos del cambio climático sobre un fenómeno complejo como lo es la seguridad alimentaria son difíciles de cuantificar, puesto que depende de muchos factores que van más allá de las condiciones biofísicas. Se sabe que existe un riesgo

tradicional en la agricultura que amenaza la seguridad alimentaria de los países, sin embargo, dicho riesgo se intensifica con la variabilidad del cambio climático, debido, principalmente, a su impacto en la producción de alimentos (FAO, 2016).

Partiendo del marco conceptual establecido por la FAO, se ha documentado con evidencias que el cambio climático afecta más allá del medio biofísico, siendo el aumento en el precio de los alimentos un ejemplo de ello. Dos de los principales factores que explican el incremento del precio de los comestibles es el crecimiento de la población y el aumento generalizado de los ingresos, lo cual conlleva a un incremento de la demanda. Puesto que la mayoría de los escenarios proyectan efectos adversos del cambio climático sobre la producción, se prevé que la oferta disminuya como consecuencia de la variabilidad agroclimática, por lo que el resultado del balance entre oferta y demanda se espera que sea un decremento de la accesibilidad a los alimentos para una gran parte de la población.

En este sentido, Nelson *et al.*, (2014) modelaron algunos impactos económicos en la agricultura como resultado del cambio climático, encontrando que para el 2050 el precio del maíz, arroz y trigo aumentará en un 87, 31 y 44% respectivamente. No obstante, para el modelado del rendimiento biofísico utilizaron una malla con una resolución espacial de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ de lado, lo cual indica que este estudio fue realizado a escalas pequeñas. En otro estudio global económico se encontró que los precios de los alimentos se incrementarían en un 19% debido a los cambios en la temperatura y la precipitación, o en un 6% aún con el efecto benéfico del dióxido de carbono en la producción (Lobell, Schlenker, & Costa-Roberts, 2011).

Un aspecto importante a resaltar en el aumento del precio de los alimentos se relaciona con el auge de los biocombustibles que han entrado a competir por granos básicos dentro del mismo mercado alimenticio (Porter *et al.*, 2014). Esto implica que los precios de los alimentos cada vez están más relacionados con los precios de los combustibles, por lo que la volatilidad del mercado de energías afectará irremediablemente al de los alimentos (FAO, 2016).

Sin embargo, el precio de los alimentos tampoco es el único factor que afecta la seguridad alimentaria, como se observa en la Figura 1. A pesar de que haya un cierto poder adquisitivo por parte de la población es indispensable que exista una disponibilidad física de los alimentos, es decir, que la balanza comercial de un país se ajuste a la demanda interna de su población en tiempo y forma. Siguiendo esta tesis, la competitividad del sector agrícola mexicano ha disminuido en su totalidad de forma paulatina durante las últimas décadas, lo que ha llevado a un decaimiento generalizado de la economía de las zonas rurales. Tan sólo en la década de los 80's la agricultura en México contribuía en un 8.96% al PIB nacional en promedio. Para el lustro de 2010 a 2015 dicha contribución fue de sólo un 3.51%, es decir, disminuyó un 5% respecto a décadas anteriores, tal como lo muestra la Figura 2. Al respecto existe un cierto consenso de que las causas detrás de esta disminución de la productividad, por la cual México ha importado grandes cantidades de alimentos, se relacionan con el aumento en la demanda para la producción de biocombustibles, aumento en los costos de producción, la variación climática y el aumento de fenómenos hidrometeorológicos extremos (Flores-Gallardo, Ojeda-Bustamante, Flores-Magdaleno, Sifuentes-Ibarra, & Mejía-Saénz, 2013).

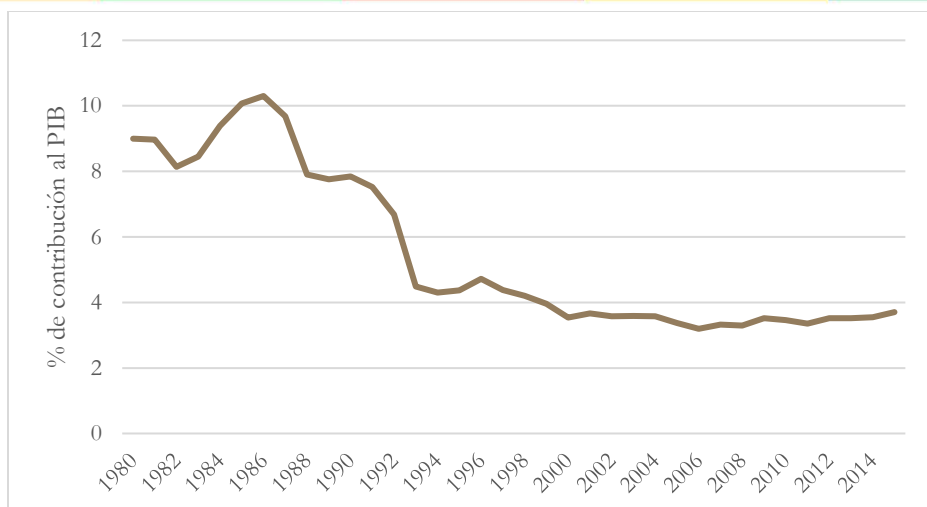


Figura 2 Contribución agrícola al PIB nacional

Fuente: Elaboración propia con datos de Banco Mundial (2015)

De este modo, sumando la incertidumbre de la seguridad alimentaria actual más la variabilidad climática esperada en los próximos años se hace necesaria y urgente la investigación de los impactos del cambio climático en la agricultura, misma que busque diseñar e implementar medidas de adaptación que se ajusten a estos cambios. En México, como en otros países, el cambio climático estará afectando mayoritariamente tres de los cuatro pilares que sostienen la seguridad alimentaria: la disponibilidad, el acceso y la estabilidad. La disponibilidad será afectada al disminuir los rendimientos agrícolas y las superficies aptas para los cultivos. El acceso será fundamentalmente afectado mediante el aumento de los precios de los alimentos, haciendo más difícil la obtención de alimentos por una parte importante de la población. Mientras que la estabilidad total será amenazada por la fragilidad de cada uno de los pilares anteriores, considerando que el cambio climático estará caracterizado por un aumento en la variabilidad climática promedio y en la frecuencia de eventos extremos. Así, el presente proyecto está enfocado en estudiar la seguridad alimentaria bajo un enfoque climático atendiendo el cuestionamiento de cómo se verá afectada la disponibilidad y la estabilidad de los alimentos en décadas futuras, con lo que se podrán implementar estudios más precisos sobre el grado de accesibilidad por parte de la población.

Una vez que se ha delimitado el alcance la presente consultoría respecto a los pilares de la seguridad alimentaria, surge el cuestionamiento sobre qué forma de agricultura representa una mayor fuente de seguridad alimentaria para la población. De acuerdo a la modalidad de suministro de agua, se reconocen principalmente dos tipos de agricultura: de temporal y de riego.

De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014 (INEGI, 2015), en México existe una superficie agrícola de 27,496,118 hectáreas. De esa área, el 80% de la superficie agrícola es utilizada para agricultura de temporal, mientras que el 20% para agricultura de riego, tal como se muestra en la Figura siguiente.

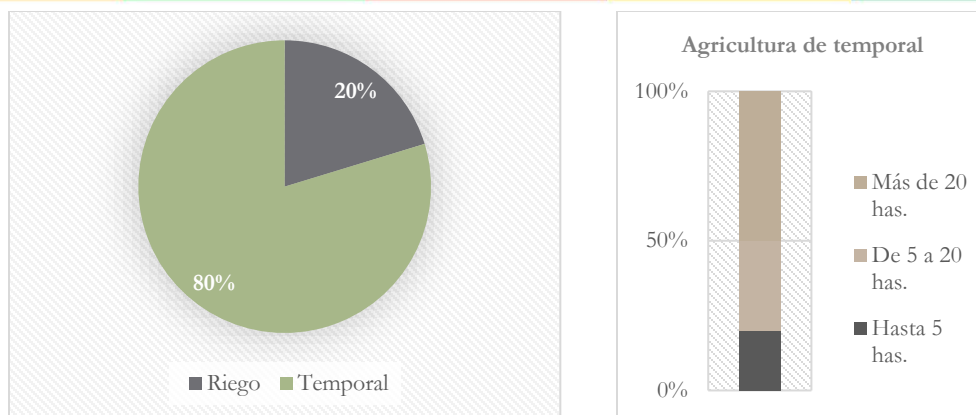


Figura 3 Distribución de la superficie agrícola de riego y temporal

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2015)

A pesar de que la agricultura de riego ocupe alrededor de un 20% de la superficie nacional, para el caso de maíz ésta produjo un 45% de la producción nacional en 2014. De las 23.3 millones de toneladas producidas, la agricultura de temporal aportó 12.6 millones, es decir, un 54%.

No obstante, la agricultura de subsistencia se prevé que sea la más vulnerable con escenarios de cambio climático (Monterroso-Rivas, Conde, Gay, Gómez-Díaz, & López, 2014). La agricultura de subsistencia se caracteriza por ser de temporal y tener al maíz como cultivo principalmente para autoconsumo, complementado generalmente con el frijol; además, sólo un 50% de los municipios que practican esta agricultura utiliza fertilizantes, menos de la quinta parte utiliza pesticidas y la tecnificación es muy baja en la mayoría de los casos

Al depender casi en su totalidad del temporal para la producción, los cambios drásticos y los eventos climáticos extremos pueden afectar los cultivos de temporal comparativamente más que aquellos de riego. Además, según el estudio desarrollado por (Gabriel Morales, 2003), el nivel de desarrollo socioeconómico de la población que vive en los 1232 municipios con agricultura de subsistencia es muy bajo. Se estima que el 70% de la población de esos municipios se relaciona directamente con las actividades primarias (Gabriel Morales, 2003).

Puesto que la vulnerabilidad depende de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa (Monterroso-Rivas *et al.*, 2014), la seguridad alimentaria se encontraría mayormente comprometida en las zonas de agricultura de temporal, con población en condiciones económicamente precarias y con capital financiero, social y natural limitado. Además, en la última Encuesta Nacional Agropecuaria se documentó que la pérdida de cultivos por causas climáticas, plagas y enfermedades ocupó el segundo lugar en la percepción por los productores con un 78% de ellos, sólo ligeramente detrás de los altos costos de los insumos y servicios con 82% (INEGI, 2015).

Justificación para la selección de cultivos

De acuerdo con los términos de referencia del contrato, los cultivos a modelar comprometidos fueron el maíz, el frijol, el trigo y la soya. La selección de estos cultivos siguió un criterio primeramente de importancia socioeconómica para México, además de que son considerados granos básicos para la alimentación humana y su uso es generalizado.

El **maíz** es el principal cereal para México considerando el volumen de la producción, la superficie sembrada y el valor de la producción. Histórica y culturalmente se encuentra

arraigado a diversos paisajes y territorios, habiéndose diversificado en más de 59 razas nativas transformado a partir de la domesticación (Turrent Fernández, Cortés Flores, Espinosa Calderón, y Mejía Andrade, 2010). Aunque su centro de origen es reconocido en Mesoamérica, actualmente las zonas áridas ocupan un lugar importante en la producción de maíz, reconociéndose la agricultura tecnificada como la principal vía; aunque sigue existiendo agricultura de temporal en algunas regiones (Arredondo-Moreno & Huber-Sannwald, 2011). A su vez, este cereal es parte de la dieta básica para la mayoría de los mexicanos, pues su consumo anual per cápita ronda los 276.9 kg, muy por encima de la avena con 1.9 kg o incluso del café con 1.3 kg (SIAP, 2015a). Por ello, a nivel nacional el maíz ocupa un sitio muy particular en lo que a producción respecta, siendo para el 2014 Sinaloa, Jalisco y Michoacán los principales estados productores con 3.6, 3.4 y 1.9 millones de toneladas respectivamente, seguidos del Estado de México con 1.8 y Guanajuato con 1.4 millones de toneladas producidas. Del total de la producción, se estima que alrededor del 60% se utiliza para alimentación humana, de los cuales una tercera parte es para autoconsumo y dos terceras partes para la población productora, el 28% tiene destino pecuario, el 8% se destina a la industria almidonera, el 3% se pierde en mermas y el 1% se usa como semilla (CEDRSSA, 2014).

En la Figura siguiente se muestra la tendencia de producción de algunos cereales en México. Los datos de maíz se encuentran proyectados en el eje secundario debido a su magnitud.

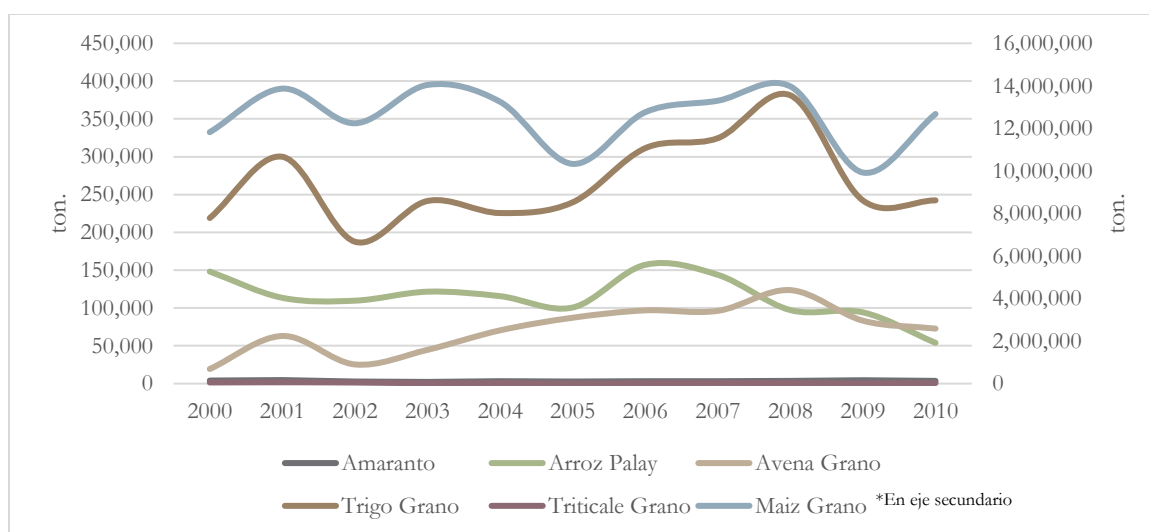


Figura 4 Producción nacional de cereales básicos de 2000-2010

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2011)

El **trigo**, aunque no representa los volúmenes producidos equiparables al maíz, es el segundo cereal con mayor importancia en México. Es utilizado para elaborar diversos alimentos, aunque se reconocen dos variantes según su destino final: el trigo cristalino y el panificable. El primero es utilizado para producir pastas y ocupa el 55.8% de la producción, mientras que el segundo es utilizado para panificación y representa el 44.2% (SIAP, 2015a). México importa trigo grano suave en el orden de las 4.5 millones de toneladas para el 2014, mientras que exporta 1.3 millones del trigo de tipo duro. A pesar de ello, México está consolidado como uno de los países exportadores de trigo duro o cristalino, ocupando el tercer puesto a nivel internacional en el 2014 (SIAP, 2015a).

Los principales estados productores de trigo históricamente han sido Sonora, Baja California y Guanajuato, seguidos de Michoacán y Sinaloa (SAGARPA-SIAP, 2012). Considerando que

la región noroeste está catalogada casi enteramente como árida, la presión por los recursos hídricos es significativa. Después de la región hidrológico-administrativa de las Aguas del Valle de México, la región Noroeste reporta el segundo grado de presión más alta sobre los recursos hídricos con 87.07% en un escenario histórico, por lo que se espera que bajo escenarios de cambio climático sea una de las zonas con mayores afectaciones en la disponibilidad de agua (Arredondo-Moreno & Huber-Sannwald, 2011).

Una situación que abarca las dimensiones de la seguridad alimentaria y plantea al maíz como un grano de alarmante atención es la dependencia comercial de México hacia otros países, como los Estados Unidos. De acuerdo con análisis de Turrent Fernández *et al.*(2010), la dependencia alimentaria de maíz, entendida como la diferencia entre las importaciones y exportaciones, ha evolucionado del 20% en el periodo de 1995-1999 a 32% del 2005-2008. Según proyecciones del mismo autor, se esperaría que para 2025 dicha dependencia alcanzará el 45 o 50% del total de maíz que se consume en México. En una estimación independiente realizada con datos oficiales, se encontró que México tuvo una dependencia de este grano del 30% para el año 2014. Considerando el consumo per cápita reportado para el 2014 y el número de habitantes censados en 2015 la demanda nacional de maíz rondó en el orden de las 33.1 toneladas. En cambio, en 2014 sólo se produjeron 23.3 millones, 10.6 en riego y 23.3 en temporal. Con ello se tuvo un déficit de 9.8 toneladas que significaron un gasto de alrededor de 1,920 millones de dólares en importación (SIAP, 2015a).

La siguiente Figura muestra las tendencias comerciales de maíz entre México y otros países. En este sentido, estudiar al maíz como cultivo prioritario con enfoque climático se vuelve indispensable, toda vez que la seguridad alimentaria se encuentra estrechamente relacionada con este cereal. Según análisis de (FIRA, 2015b), los precios internacionales de maíz durante el ciclo 2014-2015 disminuyeron a causa de una producción récord a nivel internacional, lo que desincentivó a los productores para destinar mayores esfuerzos en la producción de sus parcelas.



Figura 5 Balanza comercial de maíz

Fuente: SIAP (2015)

Por otro lado, el **frijol** es una leguminosa que también forma parte fundamental de la alimentación en México. Dentro de la categoría de legumbres secas participa con el 85.4% de la producción nacional según datos oficiales, aunque comparada con las principales legumbres su participación es de hasta un 92%. La Figura siguiente ilustra la dinámica de producción de

frijol y las principales leguminosas que se consumen en México. El consumo anual per cápita del frijol es de 10.8 kg y según la estimación extrapolada la producción actual alcanzaría para alimentar al 98% de la población (SIAP, 2015a). Los principales estados productores de frijol en México son Zacatecas, Durango y Sinaloa con 27, 15 y 12% de la producción nacional respectivamente (SIAP, 2015a).

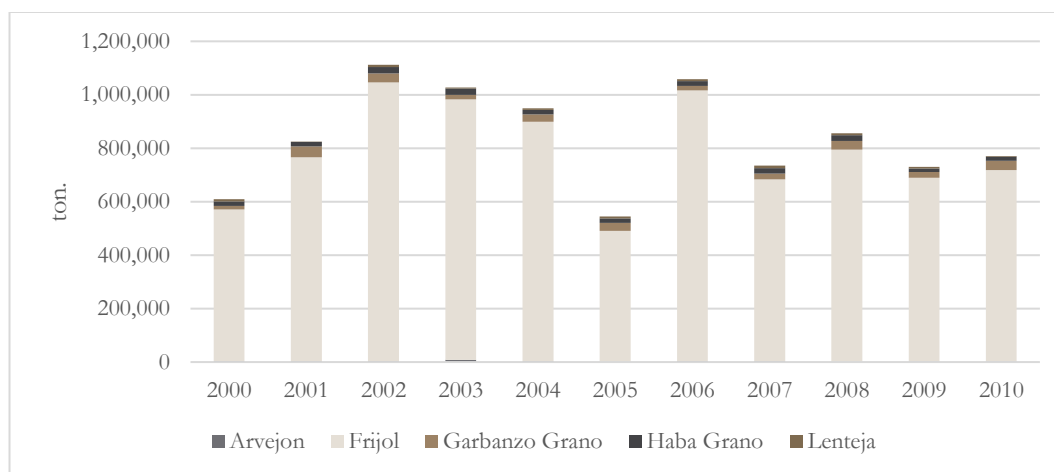


Figura 6 Producción nacional de leguminosas de 2000-2010

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2011)

Estudiar al cultivo de frijol con escenarios de cambio climático adquiere también importancia a partir de la gran participación de la agricultura de temporal para este cultivo. Del total de superficie sembrada, el 85% corresponde a cultivos de modalidad de temporal y en promedio del 2000 al 2010 el frijol bajo temporal aportó el 68% del volumen de producción nacional (SIAP, 2011).

Actualmente la **soya** es uno de los cultivos más importante, si no el más importante, dentro de la categoría de oleaginosas. Se sabe que su consumo sigue varias rutas para llegar a la alimentación humana, desde los alimentos industrializados como el tofu o los sustitutos de carne hasta la producción animal. Además, se ha empleado para la obtención de aceites y se reporta recientemente su uso en el sector de los biocombustibles². En promedio de la década de 2000 al 2010, la soya aportó el 45% en el total de producción de cultivos de oleaginosas, contra el 29% del cacahuete y el 13% del cártamo. Además es un cultivo que ha reportado un gran dinamismo y desde el 2002 ha reportado una tasa media anual de crecimiento del 22%, rivalizando en auge sólo contra la canola la cual ha tenido una aparición explosiva pero que no cuenta ni con la décima parte de la superficie sembrada por soya (SIAP, 2011). Además de sus usos en la agroindustria y la industria alimenticia, se ha documentado que la soya posee buenas características nutrimentales. Es un estudio reportado por Torres y Tovar-Palacio (2009) se compara la soya contra otros granos y alimentos de origen animal, encontrando que los contenidos de algunos aminoácidos como la lisina, isoflavinas y otros compuestos proteínicos de la soya son equiparables a aquellos obtenidos por fuentes animales.

² Visitar: <http://www.worldwildlife.org/industries/soy>

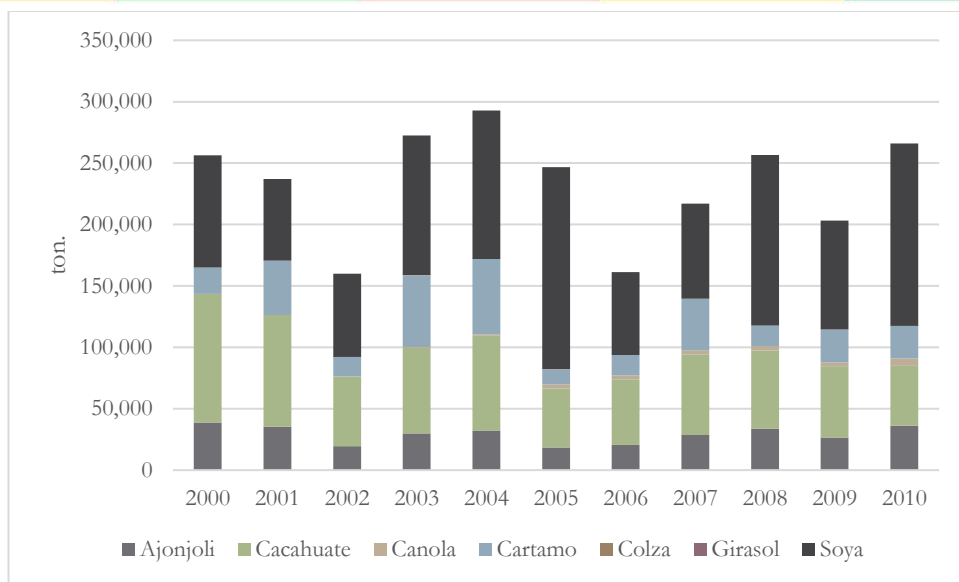


Figura 7 Producción de oleaginosas en México de 2000-2010

Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP (2011)

Los principales estados productores de soya fueron, durante la década analizada, Tamaulipas, Chiapas y San Luis Potosí aportando alrededor del 50, 19 y 11% a la producción nacional respectivamente (SAGARPA-SIAP, 2012). No obstante, México importa una cantidad considerablemente mayor de la que exporta. Tan sólo en valor del intercambio comercial, en 2014 se importaron 1968 millones de dólares, contra los 0.2 millones de dólares que se exportaron. Ello evidencia la potenciales zonas de producción o se encuentran en bajo desarrollo (García Fernández, Sánchez Muñoz, & Sánchez Tovar, 2014). En este contexto, estudiar a este cultivo con un enfoque de cambio climático proveería de información con amplia perspectiva temporal de lo que podría esperarse en las futuras décadas respecto a su evolución productiva.

La **cebada** es un cultivo con creciente importancia económica. Ha sido parte fundamental en la alimentación, la industria y la ganadería, de la cual México obtiene diversos productos que son incluso de exportación tales como la cerveza. En nuestro país este cultivo tiene el séptimo lugar en importancia y se produce en al menos 23 de los 31 estados (INIFAP, 2011b). Su desarrollo se encuentra determinado por la distribución de la precipitación durante el ciclo de producción, más que por el total de precipitación anual (INIFAP, 2011b). La evaluación del rendimiento de cebada bajo escenarios de cambio climático permite identificar los posibles cambios derivados de la incertidumbre climática futura, ello para poder proponer medidas de adaptación que se adecúen a los diversos escenarios que se visualizan.

El **sorgo** es el segundo grano con mayor superficie dedicada a su cultivo, pues se reporta que en el ciclo 2013-2014 se ubicó en el segundo lugar con 2.2 millones de hectáreas, sólo detrás del maíz blanco con 6.7 millones. Adicionalmente, es el tercer cultivo con mayor producción en volumen con 7.2 millones de toneladas, detrás del maíz blanco con 21.1 y la caña de azúcar con 49.3 millones de toneladas (INEGI, 2015).

Impactos del cambio climático en la agricultura de México

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2016) los impactos del cambio climático en la agricultura pueden ser de dos tipos: directos e indirectos. Los primeros están estrechamente relacionados con los cambios directos en las variables climáticas; mientras que los segundos, afectan a la agricultura mediante la alteración a organismos polinizadores, plagas y otros agentes. Naturalmente se han dedicado mayores esfuerzos en conocer los impactos directos, aunque cada vez más se intenta profundizar en la caracterización de las relaciones secundarias que comienzan a marcar afectaciones importantes en la producción.

Siguiendo la conceptualización de Urbano Terrón, (2002) los sistemas de cultivo se componen de cinco factores principales: el clima, el suelo, la planta cultivada, las plagas y enfermedades y las operaciones de cultivo. Dentro de este sistema el clima afecta todos y cada uno de los sistemas, aunque la mayoría de los estudios se han centrado en la relación clima-planta cultivada.

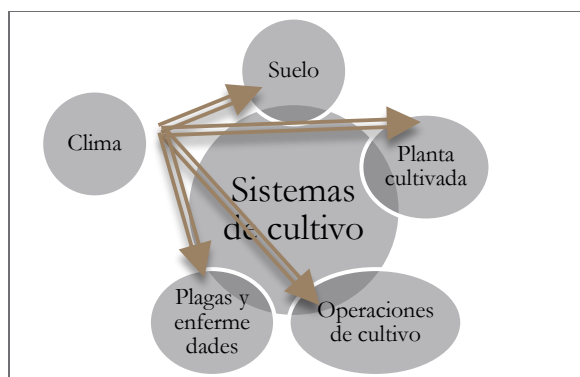


Figura 8 El clima y los sistemas de cultivo

Fuente: Adaptado de Urbano Terrón (2002).

No obstante, el cambio climático afecta a todos los componentes de los sistemas de cultivo, como se observa en la Figura 8. Los impactos del cambio climático en la agricultura de México han sido estudiados bajo dos enfoques principalmente: el cambio en la distribución natural y el cambio en los rendimientos agrícolas (Monterroso et al., 2013a). A nivel global se ha descubierto que el cambio climático incrementará la variabilidad en el rendimiento de los cultivos, de modo que la incertidumbre asociada a la producción tendrá efectos inesperados en la seguridad alimentaria (FAO, 2016).

Por su parte, Cervantes *et al.* (2014) reporta una revisión bibliográfica de los trabajos realizados a propósito de los impactos del cambio climático en México en la agricultura, donde destaca que los mayores impactos son la reducción del rendimiento y la disminución de áreas aptas para los cultivos como resultado del incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación.

Según diversos estudios realizados a escala continental, se ha descubierto que las regiones tropicales y sub tropicales son las más susceptibles al cambio climático, aun cuando el calentamiento sea comparativamente menor (FAO, 2016). Una parte de México, al encontrarse dentro de dicha zona, presenta una vulnerabilidad particularmente destacable.

Una de las principales causas en la disminución de la productividad agrícola en México se ha asociado a la disminución en la disponibilidad hídrica con escenarios de cambio climático. A

este respecto Herrera-Pantoja & Hiscock,(2015) realizaron un estudio en la cuenca del Río Querétaro encontrando que la interacción de las principales variables climáticas (temperatura y precipitación) darían como resultado una baja del 9.16% en el agua disponible como resultado de la recarga hídrica.

Impactos en el rendimiento de los cultivos

A nivel mundial diversos estudios indican que el cambio climático afectará la productividad de los principales granos básicos de forma negativa en lo general, aunque el impacto será diferenciado geográficamente. Se ha reportado que a temperaturas de 30 °C a 34 °C el rendimiento de la mayoría de los cultivos se verá sensiblemente afectado, a lo cual se deben sumar las afectaciones por los cambios en los patrones de precipitación, la presencia de ozono troposférico en los cultivos y un balance del dióxido de carbono disponible (FAO, 2016).

A nivel internacional los cereales básicos han sido el principal foco de atención al ser la base de la alimentación humana, tales como el trigo, el maíz, el arroz, la cebada, entre otros. Por su parte, Europa se ha destacado por proveer de numerosos estudios del rendimiento bajo enfoques climáticos. Vanuytrecht, Raes y Willems (2015) modelaron rendimientos de trigo de invierno, maíz, papa y remolacha azucarera al año 2050 en Bélgica, encontrando un aumento de la variabilidad del rendimiento: incrementos gracias a la elevada cantidad de CO₂ y al alongamiento del periodo de crecimiento por temperatura, y decrementos asociados al estrés hídrico. Contrario a lo que sucede en Europa, en la India la temperatura jugaría un papel limitante de acuerdo con Deb *et al.* (2014), quienes calibraron y validaron un modelo para maíz evaluando seis modelos de cambio climático bajo dos escenarios de emisiones (A2 y B2), encontrando que el rendimiento bajaría en el orden de 2 al 20 %. Por su parte, Soddu *et al.* (2013) evaluaron rendimientos de trigo en Italia del periodo 1951 - 2100 utilizando *Aquacrop*, arrojando una ligera mejora en el rendimiento gracias al incremento del CO₂, pero siendo posiblemente contrarrestada por la variabilidad de la precipitación y la subsecuente alteración de los regímenes pluviométricos.

En México se han registrado diversos acercamientos a la evaluación del rendimiento de cultivos ante la variación de las condiciones climáticas. Desde la década de los 80's el interés por conocer el potencial productivo de la tierra para los principales alimentos se ha hecho patente mediante un estudio realizado por el Sistema Alimentario Mexicano (COLPOS, 1986), el cual recopiló información de campo y generó proyecciones de rendimiento potencial a partir del estudio del clima, suelos, cultivos y régimen de agua.

Uno de los factores al que se la ha puesto énfasis en los estudios de clima y rendimiento son los fenómenos climáticos como El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés). A este respecto, se han identificado múltiples impactos de dicho fenómeno sobre la agricultura. Puntualmente en un estudio a escala nacional se detectó que El Niño afecta los rendimientos de maíz principalmente en los estados del centro y sur este de México, mientras que el efecto contrario, La Niña (o El Viejo, según el artículo) afecta la producción de frijol en el norte del país pero beneficia ligeramente la de maíz en el Estado de México (Tiscareño, Izaurre, Rosenberg, Báez González, & Salinas García, 2003).

Además de los eventos climáticos extremos, otro de los efectos que normalmente se omite en los estudios de clima-cultivo es el suelo. Para responder a estos cuestionamientos, Nikol'skii (2010) realizaron un estudio en los principales estados productores de maíz y trigo en México, encontrando que el efecto de incluir variables edáficas proyectadas con cambio climático implica un cambio de hasta 20% en las estimaciones del rendimiento. Por ello, sugieren

considerar el efecto del cambio climático no sólo en la planta, sino también en la fertilidad del suelo.

Los impactos en la disminución de los rendimientos afectarán de diversas maneras la economía y la configuración del territorio. Bajo esta tesitura, se ha reportado que uno de los efectos indirectos de la disminución de los rendimientos como consecuencia del cambio climático es la migración, de acuerdo con Feng, Krueger, & Oppenheimer (2010) encontraron una relación significativa entre el cambio climático, la pérdida de potencial productivo y la migración hacia Estados Unidos. Ellos estimaron que por cada 10% de pérdida del rendimiento la migración aumenta en un 2%, lo cual proyectado con escenarios de calentamiento global al 2080 significaría que entre 1.4 y 6.7 millones de mexicanos estarían potencialmente emigrando a causa de ese factor.

Maíz.

Se han reportado estudios que denotan la influencia de la climatología histórica sobre el rendimiento de maíz. De acuerdo con Mastachi-Loza *et al.* (2016) la climatología de la cuenca alta del Río Lerma se ha visto modificada en el periodo de 1960 al 2010. Puntualmente encontraron que existe un cambio en el patrón de precipitación que afecta la etapa de floración de maíz.

Utilizando el *software Aquacrop*, Flores-Gallardo *et al.* (2013) validaron y aplicaron modelos de rendimientos de maíz en Sinaloa para los años 2003 – 2009, logrando una buena predicción del rendimiento con 0.7 ton/ha del error cuadrado medio. Resaltan su utilidad para modelar tanto los ciclos de primavera verano como de otoño invierno, y consideran al modelo como una opción viable para evaluar la respuesta del maíz ante el clima y el riego deficitario.

En un estudio reportado por Conde *et al.* (1997) a nivel nacional se analizó al rendimiento de maíz bajo condiciones de cambio climático y se encontró que en la mayoría de los sitios los efectos serían negativos puntualmente en la fase de maduración. Además, se hace énfasis en que los impactos climáticos no sólo derivarán del cambio climático en sí, sino también a partir del incremento en los eventos climáticos extremos.

Por otro lado, en un estudio para maíz en la zona de Tlaxco, Tlaxcala, se encontró que los agricultores son especialmente vulnerables a las sequías estivales y a las heladas tempranas, eventos para los cuales se tiene muy poca capacidad de respuesta, en gran parte explicada por la falta de soporte gubernamental (Conde, 2011).

Algunos estudios han reportado que las zonas con climas templados podrían tener efectos benéficos en la fenología de los cultivos. Un estudio realizado en el Distrito de Desarrollo Rural (DDR-Toluca), Estado de México, reporta que según los escenarios de cambio climático del modelo Hadley A2 y B2, el aumento de la temperatura para el año 2050 beneficiaría al ciclo fenológico del maíz al disminuir las afectaciones por heladas; no obstante, remarca que la disminución de la precipitación imposibilitaría aprovechar el potencial térmico benéfico (Granados, Alejandro, y Rodríguez, 2013).

En un estudio reportado para maíz en el estado de Durango se sugiere que los cambios en el clima derivarían en un aumento del rendimiento en el orden de 0.3 ton/ha, como resultado de un comportamiento bimodal de la precipitación (Sánchez-Cohen *et al.*, 2012).

Bajo un enfoque de cambio climático, Ojeda-Bustamante *et al.* (2011) propuso un estudio de necesidades hídricas futuras y cambios en los ciclos fenológicos para maíz, frijol, jitomate, papa, sorgo, caña, alfalfa y mango; encontrando que la demanda hídrica de los cultivos se reducirá 13 % en el ciclo otoño invierno; 6 % para el ciclo primavera verano y se incrementará en un 7 % para los cultivos perennes. Para atender las demandas climáticas propone la utilización de variedades de ciclo más largo y la siembra prioritariamente en los meses fríos.

Frijol.

Esquivel-Arriaga (2014) utilizó el *software* EPIC para modelar rendimiento de frijol a futuro, en Durango, probando dos fechas de siembra bajo escenarios de cambio climático A2 y A1B. Conforme a los resultados obtenidos mediante un generador estocástico climático, la temperatura aumentaría en 0.85°C para ese estado y la precipitación disminuiría en 56 mm para las próximas tres décadas. Como resultado de ello, se estiman pérdidas y ganancias en el rendimiento de frijol, por lo que en promedio se seguiría obteniendo el mismo rendimiento si se mantienen las labores de cultivo convencionales.

Trigo.

El rendimiento de trigo en México ha reportado ciertos incrementos en las últimas décadas. No obstante, en un estudio realizado en los Valles de Yaqui y Mayo en Sonora y San Luis Río Colorado en Baja California, dos de las principales zonas productoras a nivel nacional, se encontró que el incremento en los rendimientos estaba relacionado con un enfriamiento de las temperaturas nocturnas del periodo vegetativo del trigo. Considerando que los escenarios de cambio climático consideran un aumento generalizado de la temperatura, la probable ganancia en el rendimiento del trigo en esa zona debería ser estudiada más a fondo (David B. Lobell *et al.*, 2005).

Por otro lado, Arredondo-Moreno & Huber-Sannwald (2011) resaltan la vulnerabilidad de la región noroeste del país, la principal productora de trigo a nivel nacional, ante el cambio climático y proponen algunas medidas de adaptación y mitigación que están centradas en la instalación de “cajas de agua” para almacenar el recurso, el cambio en las densidades de siembra o incluso el mantenimiento de la diversidad genética de las variedades.

Soya.

La soya es un cultivo que en México se ha estudiado poco con escenarios de cambio climático, aunque a nivel internacional se encuentran varias referencias. Un estudio realizado en la India utilizó datos obtenidos en un experimento físico para modelar el comportamiento del rendimiento de la soya bajo distintos escenarios de manejo. Se encontró que la estacionalidad de la precipitación fue el factor más importante para la producción, pues el rendimiento bajó hasta en un 96% cuando el inicio de las lluvias se retrasó, mientras que dicha disminución fue del 56% cuando hubo una sequía en la parte intermedia del periodo vegetativo. Adicionalmente se modeló una reducción del rendimiento de entre 20 y 35% bajo escenarios de cambio climático (Singh, Dagar, Arunachalam, Gopichandran, & Shelat, 2015).

De forma contrastante, Talacuece *et al.* (2016) condujeron un estudio en Mozambique con un modelo calibrado para los años 2009-2011 para conocer el impacto de la fertilización por dióxido de carbono en dos cultivares de soya. Encontraron que la fertilización por el aumento en el dióxido de carbono conlleva a un aumento en el rendimiento del 14 al 16% respecto a un escenario sin aumento de dicha variable.

Se ha establecido que el cambio climático tendría efectos benéficos en las latitudes medias y altas. Así, en un estudio realizado en la región de los Grandes Lagos en Estados Unidos considerando ocho escenarios de cambio climático indica que los rendimientos en la zona septentrional se verían beneficiados al aumentar hasta un 120% respecto al escenario base gracias a la fertilización del dióxido de carbono. No obstante, remarcan que en las latitudes más bajas podrían experimentarse reducciones del 25%, por lo que recomiendan atrasar las fechas de siembra (Southworth *et al.*, 2002).

El estudio de los requerimientos hídricos en la soya también ha sido un tema de interés. En Brasil un estudio realizado con el modelo SWAP arrojó que no se encontraron diferencias

significativas entre el requerimiento hídrico del escenario base y el de cambio climático modelado al año 2025 (de Melo, 2014).

Otro estudio en Estados Unidos, pero de la zona sureste, utilizó climatología a escala general y detallada para modelar los impactos del cambio climático solo, con efecto de fertilización por dióxido de carbono y con medidas de adaptación mediante un modelo de cultivo. Con un a escala regional, el rendimiento de soya podría disminuir hasta en un 49% con cambio climático y 26% con el efecto del dióxido de carbono. Con una climatología más detallada se encontraron reducciones en el rendimiento de hasta 54%. La inclusión de medidas de adaptación sólo disminuiría esa afectación al 13% aproximadamente (Carbone *et al.*, 2003).

Cebada.

Un estudio realizado en Tlaxcala por Calderón-García, Monterroso-Rivas, & Gómez-Díaz (2015) utilizó el *software Aquacrop* para modelar rendimientos de cebada con seis escenarios de cambio climático, además de estimar la relación beneficio-costos futura. Se encontró que los rendimientos futuros disminuirían del 5 al 100 % según el horizonte del tiempo; además de que la relación beneficio-costos se contraería de 1.4 a 0 unidades adimensionales, lo cual podría afectar la economía de los productores de la región.

METODOLOGÍA

El interés por estudiar los sistemas agrícolas desde un enfoque climático se ha visto acrecentado a partir de la incertidumbre en el clima reportado recientemente. Los impactos pueden ser estudiados a partir de los cambios en la distribución potencial, el balance de condiciones hídricas o el rendimiento asociado a un cultivo. El rendimiento es una variable relevante al estar directamente relacionada con el beneficio económico que pueda obtenerse a partir de un cultivo, por lo que su modelado en función de las condiciones climáticas ha tenido un auge ascendente en los últimos años (Cervantes *et al.*, 2014).

Se considera que un modelado de cultivos eficiente debe combinar un enfoque científico de entendimiento de los fenómenos con una orientación a la solución de problemas prácticos en campo (Sengar y Sengar, 2015). A partir de las necesidades de información para la toma de decisiones se han generado diversos modelos de cultivo, cada uno de ellos respondiendo a cuestionamientos específicos. Dentro de ellos se reconocen los siguientes grupos principales de acuerdo con Sengar y Sengar (2015): 1) estadísticos, 2) determinísticos, 3) estocásticos, 4) descriptivos y de 5) simulación. Dado que el rendimiento de un cultivo se relaciona directamente con el valor económico que puede reportar, muchos de los modelos predictivos se han desarrollado considerando a dicha variable como un elemento fundamental de salida. Los grupos de modelos que más se han utilizado en los últimos años son los de simulación puesto que ofrecen una herramienta analítica para el estudio de diferentes factores que afectan el desarrollo de un cultivo, además de ser especialmente útiles para proyectar impactos potenciales del cambio climático (Todorovic *et al.*, 2009).

Modelos Biofísicos de cultivo

Según lo estudiado por Urbano Terrón (2002), la mayoría de los modelos de cultivo se han centrado en la relación clima y planta, no obstante que en el sistema productivo real intervienen elementos de trascendencia como el suelo, el manejo y las interacciones biológicas. Estos

factores se han comenzado a tomar en cuenta en estudios recientes, a pesar de que sigue siendo complejo modelar las diferentes interacciones entre ellos.

De acuerdo con una revisión de Todorovic *et al.* (2009), los modelos de simulación de cultivos se pueden agrupar en tres tipos conforme al conjunto de variables predictivas que utilizan principalmente. Así, los modelos se pueden enfocar mayoritariamente en 1) carbono, 2) radiación o 3) agua.

Los modelos centrados en el carbono utilizan la fotosíntesis como el proceso fundamental a modelar, lo cual se logra a partir de la simulación del intercambio de gases en las hojas y la asimilación del carbono por las mismas. Son modelos de compleja estructura y requieren de numerosos parámetros de entrada; además, son elaborados de forma jerárquica de modo que se componen de sub modelos que integran el efecto de la radiación, la temperatura, el contenido de dióxido de carbono y la limitante de agua de forma separada, para posteriormente unirlos y obtener un resultado sobre la cantidad de biomasa producida. Un ejemplo de ellos es el modelo WOFOST (Diepen, Wolf, Keulen, & Rappoldt, 1989) o el CROPGRO (Tsuji, Hoogenboom, & Thornton, 1998).

Los modelos basados en la radiación calculan la biomasa en función directamente de la radiación solar mediante el uso de un coeficiente denominado factor de eficiencia de uso de radiación (RUE, por sus siglas en inglés). Estos modelos sintetizan los procesos de menor jerarquía en un solo coeficiente, por lo que su estructura es menos compleja que los modelos basados en carbono. A este grupo de modelos pertenecen programas como CERES (C. A. Jones & Kiniry, 1986) o EPIC (C. A. Jones *et al.*, 1991).

Los modelos fundamentados en agua parten del principio de la relación lineal que existe entre la tasa de crecimiento de biomasa y la transpiración, para lo cual utilizan un factor de productividad del agua (WP, por sus siglas en inglés). Al integrar diversos procesos en ese factor, los modelos evitan modelar sub procesos y su estructura es menos compleja para utilizar. Los modelos *Aquacrop* (Steduto, Hsiao, Raes, & Fereres, 2009), CROPWAT (Allen, 2006) y CropSyst (Stockle, Donatelli, & Nelson, 2003) pertenecen a este grupo. A continuación, se describen algunos de los modelos encontrados para simular cultivos que han sido utilizados en México y el mundo.

El modelo WOFOST (World Food Studies, por sus siglas en inglés) es un modelo generado a finales de los años 80's por el Centro de Estudios para la Alimentación Mundial en Wageningen, Holanda, en coordinación con la Agricultural University y el Centro para la Investigación Agrobiológica (CABO, por sus siglas en inglés) y retoma elementos de la escuela de modelado de cultivos de Wageningen (Diepen *et al.*, 1989). Este modelo calcula el potencial de producción en bajo tres diferentes limitantes de crecimiento: 1) Producción potencial (crecimiento únicamente limitado por temperatura y luz), 2) Producción limitada por agua (además de los parámetros anteriores, se incluye una limitante por humedad del suelo) y 3) Producción limitada por nutrientes (contando los parámetros anteriores, el crecimiento está limitado por el suministro de nitrógeno, siendo el fósforo y el potasio los macronutrientes que más limitan). El programa inicial comprende el modelado de 22 cultivos bajo 12 diferentes tipos de suelo y cuenta con 4 submodelos para ejecutar los análisis, cada uno de los cuales está interconectado para facilitar el flujo de información (Diepen *et al.*, 1989).

El modelo CERES es un programa orientado a comprender los procesos y el manejo de maíz considerando un balance de agua y de nitrógeno, fue desarrollado por investigadores asociados al Departamento de Agricultura de Estados Unidos y calibrado por el Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (IFDC, por sus siglas en inglés), y ha sido posteriormente actualizado y difundido por la Universidad de Michigan (Ritchie, Godwin, Singh, & Hunt, 1990). El modelo CERES ha sido retomado como una de las entradas para complementar el

DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, en sus siglas en inglés), el cual se nutre de los componentes de CERES para conformar un módulo de planta (J. W. Jones *et al.*, 2003). Este modelo también se ha probado en México con resultados favorables, pues fue particularmente útil en el estudio reportado por Conde, Ferrer, y Liverman (2000), con el cual modelaron la respuesta en el rendimiento de maíz ante el cambio climático.

El modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, en sus siglas en inglés) fue inicialmente desarrollado como parte del Acta de Conservación de Suelo y Agua de los Estados Unidos para evaluar la relación entre la erosión eólica e hídrica del suelo y la productividad del mismo (C. A. Jones *et al.*, 1991). El modelo simula el clima, la hidrología, la temperatura del suelo, la erosión y sedimentación, el ciclo de nutrientes, el manejo y el crecimiento de diversos cultivos, por lo que está enfocado en conocer el impacto de la erosión en la productividad de los suelos (C. A. Jones *et al.*, 1991). No obstante, se ha reportado que el modelo es muy sensible a los datos de calibración del sitio, por lo que su uso se recomienda bajo precaución. Otra de las técnicas utilizadas para estimar los rendimientos agrícolas es el uso de series de algoritmos anidados, como un estudio para maíz en el estado de Durango (Sánchez-Cohen *et al.*, 2012). En este artículo utilizan, además, el modelo EPIC para estimar el impacto del clima en el rendimiento.

El modelo APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) es un *software* que permite modelar la producción de cultivos y pastos, la descomposición de los residuos, el flujo de agua y nutrientes y la erosión, además de proyectar diferentes condiciones de manejo de suelo y cultivo usando reglas condicionales. Este modelo hace énfasis en la relación del clima sobre el suelo, más que en el concepto tradicional de clima-planta. Uno de los objetivos de este modelo es proveer de sensibilidad a los modelos de cultivo, por lo que su calibración requiere de datos puntuales (McCown R.L, Hammer G.L, Hargreaves J.N.G, 1996).

El modelo CROPGRO es un modelo genérico que estuvo basado en los modelos SOYGRO, PNUTGRO y BEANGRO. Este modelo simula el proceso de fotosíntesis mediante la inclusión del carbono, la principal variable de entrada. Además, es capaz de procesar un balance completo de nitrógeno en el suelo y la planta. Una utilidad añadida en las últimas versiones consiste en diferenciar el comportamiento de la planta de acuerdo a las distintas fases fenológicas por las que pasa, además de incorporar una mejora para la evaluación de factores genotípicos y de plagas. (Tsuji *et al.*, 1998). El modelado del rendimiento de la soya ha despertado el interés internacional a partir de su auge económico. Así, se han desarrollado diversos modelos para proyectar su comportamiento bajo diversas condiciones climáticas. En un estudio realizado para Estados Unidos se utilizó el modelo SOYGRO, el cual se basa en el *software* DSSAT, y tiene la ventaja de poder modelar diferentes variables tales como el dióxido de carbono (Southworth *et al.*, 2002). Otros autores han utilizado el modelo CROPGRO-Soybean, el cual simula el comportamiento del dióxido de carbono, el agua, el nitrógeno y el suelo, haciendo posible el estudio del efecto benéfico de la primera variable en los rendimientos (Carbone *et al.*, 2003). Un estudio comparativo fue provisto por (Wolf, 2002), quien utilizó los modelos CROPGRO y SOYBEANW para modelar el rendimiento de soya bajo criterios homogéneos. Se encontró que ambos modelos predijeron bien el inicio de la madurez del grano, aunque la duración fue corta en los dos. SOYBEANW resultó ser más sensible al contenido de nitrógeno del suelo, mientras que CROPGRO fue sobre estimó la reducción del rendimiento debido al estrés hídrico.

El modelo CropSyst es una plataforma que permite análisis de cultivos en múltiples años, cultivos y tiene posibilidad de ligarse a un SIG (Todorovic *et al.*, 2009). El desarrollo del cultivo bajo este modelo considera cuatro factores limitantes: la intercepción de la radiación, el consumo de agua y nitrógeno y la temperatura. Para el cálculo de la biomasa se consideran dos

enfoques: el de radiación y el de balance hídrico, mientras que las salidas y aplicaciones son el balance de nitrógeno, agua, crecimiento del cultivo, rendimiento, residuo y descomposición, erosión hídrica del suelo y salinidad (Stockle *et al.*, 2003).

Cuadro 1 Comparativa de modelos de cultivo

Modelo	Origen	Aplicaciones con CC	Cultivos modelables	Grupo	Referencia
WOFOST V 7.1.1	Wageningen, Holanda	Sin registros	22 cultivos (la mayoría de ellos tropicales)	Carbono	(Diepen <i>et al.</i> , 1989)
	Principales variables de entrada				
	<ul style="list-style-type: none"> • Clima (En series mensuales: temperatura máxima y mínima, radiación, humedad, velocidad del viento, precipitación y número de días lluviosos) • Perfil del suelo (Distinción de la zona de raíces y el subsuelo, clase textural, máxima profundidad de raíces y presencia de agua subterráneas) • Física del suelo (características de la humedad del suelo, conductividad hidráulica, porcentaje de capacidad de campo, conductividad del suelo, fracción impermeable) • Fertilidad del suelo (consumo de N, P y K por la planta y aporte de N, P y K por fertilizante) • Datos del cultivo (materia seca inicial, esperanza de vida de las hojas, propiedades de la tasa de respiración, tasa de desarrollo fenológico, concentraciones mínimas y máximas de nutrientes en las hojas y longitud del ciclo de desarrollo) 				
Principales variables de salida					
<ul style="list-style-type: none"> • Datos de producción divididos en tres partes (producción limitada por temperatura, agua o nutrientes) • Producción potencial por temperatura (materia seca de hojas, tallos y órganos de almacenamiento, índice de área foliar, longitud de desarrollo en tiempo, profundidad de raíces, tasa de transpiración, tasa de asimilación bruta, tasa de mantenimiento de respiración y biomasa total) • Producción limitada por agua (además de las salidas anteriores, se incluye transpiración actual, tasas de evaporación, contenido de humedad del suelo, capacidad de almacenamiento en el suelo y el subsuelo) • Producción limitada por nutrientes (además de las variables anteriores, se reporta el índice de cosecha y las necesidades de fertilización). 					
CERES V2.10	USDA, Estados Unidos	Múltiples investigaciones en México y el mundo	Alrededor de 27 cultivos	Radiación	(C. A. Jones & Kiniry, 1986; Ritchie <i>et al.</i> , 1990)
	Principales variables de entrada				
	<ul style="list-style-type: none"> • Clima (temperatura, precipitación diaria, horas sol) • Suelos (clasificación edáfica, número y grosor de perfiles, pH) • Fenología de cultivo (fechas de siembra, germinación, emergencia, inicio y fin de llenado de grano, madurez fisiológica) • Fertilización • Irrigación • Coeficientes genéticos de cultivo 				
Principales variables de salida					
<ul style="list-style-type: none"> • Biomasa, número de hojas, índice de área foliar, profundidad de raíces • Peso seco (de raíces, tallos, granos y hojas) • Longitud de las raíces a diferentes niveles 					
EPIC	Acto de Conservación de Suelo y Agua de los Estados Unidos	Múltiples investigaciones en el mundo	Un solo modelo con posibilidad de ajustarse a varios cultivos	Radiación	(C. A. Jones <i>et al.</i> , 1991)
	Principales variables de entrada				
<ul style="list-style-type: none"> • Clima (precipitación diaria, nevadas, temperatura máxima y mínima, radiación solar, viento, humedad relativa) 					

	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrología (escurrimientos • Manejo del cultivo (fertilización, irrigación, drenaje artificial, labranza • Fenología del cultivo (fechas de siembra 				
	Principales variables de salida <ul style="list-style-type: none"> • Biomasa producida • Componentes de la biomasa producida • Requerimientos de irrigación 				
APSIM	Agricultural Production Systems Research Unit, Toowoomba, Australia	Sin registros	8 cultivos, con algoritmos de otros autores	Radiación	(McCown R.L., Hammer G.L., Hargreaves J.N.G, 1996)
	Principales variables de entrada <ul style="list-style-type: none"> • Clima (precipitación, radiación) • Manejo (fertilización en cantidad y calidad, labranza o irrigación) • Suelo (nitrógeno, propiedades físicas del suelo., factor de crecimiento de raíces, carbono orgánico) • Cultivo (elegir el cultivo a modelar, definición de fechas de siembra y cosecha) 				
	Principales variables de salida <ul style="list-style-type: none"> • Erosión • Crecimiento del cultivo en biomasa • Disponibilidad de agua en el suelo • Características del nitrógeno del suelo 				
CROPGRO	Universidad de Florida, Estados Unidos	Sin registros	8 principales cultivos, la mayoría leguminosas	Carbono	(Tsuji <i>et al.</i> , 1998)
	Principales variables de entrada <ul style="list-style-type: none"> • Clima (precipitación, temperatura, radiación, evaporación del suelo) • Cultivo (tasa de expansión foliar, tipo cultivar, fechas de siembra y cosecha, densidad de siembra, superficie de cosecha) • Suelo (distribución de la humedad en los perfiles del suelo, carbono orgánico, saturación) • Sitio (elevación, profundidad de la capa superior del suelo, pendiente en porcentaje y grados) 				
	Principales variables de salida <ul style="list-style-type: none"> • Características de las raíces (densidad, longitud) • Crecimiento diario foliar (fotosíntesis por hoja cada hora y absorción de la radiación) • Evapotranspiración • Balance de carbono • Fijación y consumo de nitrógeno • Movilización de nitrógeno y carbohidratos, senescencia y madurez 				
CropSyst V4.0	Washington State University, Estados Unidos	Múltiples investigaciones en el mundo	Principales cereales y leguminosas	Agua	(Stockle <i>et al.</i> , 2003)
	Principales variables de entrada <ul style="list-style-type: none"> • Sitio (latitud, longitud, modelos de evapotranspiración, intensidad de la lluvia, viento) 				

	<ul style="list-style-type: none"> • Agua (precipitación, irrigación, escurrimientos, intercepción, infiltración, redistribución de agua en el perfil, percolación, transpiración y evaporación). • Nitrógeno (transformación, fijación simbiótica, demanda y consumo de nitrógeno; sorción de amonio) • Fenología (grados días de desarrollo, índice de área foliar, días a la madurez, cosecha, fertilización de nitrógeno, calendarización del riego) • Suelo (capacidad de intercambio catiónico, pH, volatilización de amonio, número de curva, parámetros de erosión, número y espesor de horizontes, textura) 				
	Principales variables de salida <ul style="list-style-type: none"> • Traspiración potencial y limitada • Crecimiento de biomasa potencial y limitada • Rendimiento potencial y limitado 				
CROPWAT	FAO, Roma, Italia	Múltiples investigaciones en el mundo	Cereales y leguminosas	Agua	(Allen, 2006)
	Principales variables de entrada <ul style="list-style-type: none"> • Clima (precipitación, temperatura, latitud, longitud, evapotranspiración) • Patrón de cultivo • Suelo • Criterio de calendarización 				
	Principales variables de salida <ul style="list-style-type: none"> • Evapotranspiración • Requerimientos hídricos diarios • Cálculo de láminas de riego 				
Aquacrop V5.0	FAO, Roma, Italia	Múltiples investigaciones en México y el mundo	Cereales y leguminosas	Agua	(Steduto <i>et al.</i> , 2009)
	Principales variables de entrada <ul style="list-style-type: none"> • Clima (temperatura máxima y mínima, evapotranspiración, precipitación y concentración de dióxido de carbono) • Cultivo (días a la germinación, madurez y senescencia, densidad de siembra, índice de cosecha, máxima cobertura, máxima profundidad de raíces, estreses) • Suelo (profundidad y número de horizontes, capacidad de almacenamiento de agua, número de curva) • Manejo (presencia, porcentaje y tipo de acolchado, fertilización, presencia y profundidad de surcos) 				
	Principales variables de salida <ul style="list-style-type: none"> • Biomasa potencial y producida • Rendimiento potencial y producido • Balances hídricos del suelo • Estreses asociados a temperatura y disponibilidad de humedad 				

Fuente: Elaboración propia con base en los modelos citados

Los criterios para la selección de modelos fueron considerados de la siguiente manera, en orden descendiente.

1. Aplicabilidad (ajuste del modelo para el objetivo del presente estudio, que consiste en la evaluación del rendimiento de cultivos de diferentes familias)
2. Sensibilidad climática (modelo que esté basado en la relación agua-producción y que responda ante escenarios de cambio climático)
3. Confiabilidad en México (modelo que haya sido probado en México con buenos resultados)
4. Accesibilidad (modelo disponible para uso público, de desarrolladores con reconocido prestigio y de fácil acceso)
5. Actualización (modelo de conceptualización recientemente)

Siguiendo los criterios arriba enmarcados, y mediante un ejercicio de evaluación multicriterio, se decidió utilizar el *software Aquacrop* por las siguientes razones:

1. Es un modelo que responde los interrogantes de la presente investigación, las cuales se centran en obtener rendimientos potenciales de granos
2. Tiene un importante enfoque hacia el agua, por lo que en estudios de cambio climático se espera que sea sensible a los cambios.
3. Se ha utilizado ampliamente en México con resultados aceptables en términos de ajuste.
4. El *software* es de disponibilidad pública, además de que su uso es intuitivo y de fácil manejo.
5. Dentro de los modelos estudiados, es el más reciente y se aprecia una actualización recurrente.

A pesar de la multitud de enfoques para evaluar y estimar el rendimiento, el modelo *Aquacrop* de la FAO (Steduto *et al.*, 2009) ha demostrado arrojar resultados aceptables en términos de sencillez, robustez y precisión en un contexto tanto nacional como internacional (Calderón-García *et al.*, 2015; Flores-Gallardo *et al.*, 2013; Heng, Hsiao, Evett, Howell, & Steduto, 2009; Soddu *et al.*, 2013).

Al ser un modelo basado en el balance hídrico la cantidad de datos de entrada es menor en comparación con modelos como WOFOST o *CropSyst*, lo que hace a *Aquacrop* más accesible sin perder su capacidad predictiva (Todorovic *et al.*, 2009).

El modelo *Aquacrop* de FAO

Uso de *Aquacrop* en el mundo

Se han realizado diversos estudios a nivel internacional, los cuales han validado el *software Aquacrop*. Andarzian *et al.* (2011) evaluó la habilidad del modelo *Aquacrop* para simular el rendimiento del trigo en Irán bajo diferentes escenarios de irrigación. El modelo fue capaz de simular correctamente el contenido agua en el suelo en la zona de raíces, además de la producción de grano y biomasa, los cuales arrojaron un error cuadrado medio con raíz

normalizada de menos del 10% con respecto a datos reales obtenidos en campo. Puesto que encontraron que los mayores rendimientos se obtuvieron con escenarios de riego, se considera necesaria la evaluación de la disponibilidad hídrica futura considerando escenarios de cambio climático.

En un estudio realizado en Etiopía, Araya, Habtu, Hadgu, *et al.*, (2010) encontraron que el modelo *Aquacrop* fue válido para simular la biomasa de cebada en diferentes fechas de siembra durante los años 2006, 2008 y 2009 modelados, además de que lo recomiendan también para evaluar estrategias de irrigación. Otro estudio realizado en Estados Unidos, validando *Aquacrop* para maíz, se encontró que el algoritmo fue capaz de simular correctamente la progresión de la acumulación de grano y forraje en un rango que va del 0.96 al 0.99 (Mebane, Day, Hamlett, Watson, & Roth, 2013). Asimismo García, Riaño, y Magnitskiy (2015) calibraron y ejecutaron *Aquacrop* para maíz en tres sitios de Colombia, encontrando un buen ajuste de lo modelado con lo observado.

En un contexto enfocado a los suelos, Bird *et al.* (2015) modelaron rendimientos de tomate de riego en Túnez y trigo de temporal en Italia con *Aquacrop* para un horizonte del 2040 al 2070; reportaron un decremento del rendimiento de trigo en texturas arcillosas del 64% y un decremento del 17 % del rendimiento de tomate bajo condiciones de irrigación actual, por lo que proponen cambios en las fechas de siembra, adaptación cultivos a los suelos e implementación de mantillo como medidas de adaptación. Cultivos no comestibles, tales como el algodón, también son analizados debido a su importancia económica. Un estudio del rendimiento de algodón realizado con *Aquacrop* en Grecia bajo ocho escenarios de cambio climático arrojó que la mayoría de los modelos coinciden en un incremento de los rendimientos para finales de siglo a causa de incrementos ligeros en la temperatura, especialmente en el noroeste del país (Voloudakis *et al.*, 2015).

Variables del modelo *Aquacrop*

El modelado del rendimiento en el ambiente *Aquacrop* sigue una serie de pasos que implican estimar la productividad de biomasa a partir de la disponibilidad de agua a lo largo del ciclo fenológico del cultivo. Para ello, el programa se divide en los siguientes pasos de procesamiento (Steduto *et al.*, 2009).

1. **Balance de agua - suelo.** Se realiza un balance entre las entradas y salidas de agua en el suelo, partiendo de las condiciones iniciales y del régimen hídrico.
2. **Determinación del desarrollo del cultivo.** Se separa el desarrollo de la cobertura aérea del desarrollo de las raíces. Se considera la fenología de cada cultivo.
3. **Estimación de la transpiración del cultivo.** Se calcula la cantidad de agua que es transpirada por la planta, incluyendo el desarrollo inicial de la cobertura aérea.
4. **Estimación de la biomasa aérea.** Se obtiene la cantidad de biomasa acumulada por la planta. La productividad del agua es normalizada para una determinada concentración de CO₂ y para la demanda evaporativa de la atmósfera.
5. **Separación de biomasa-rendimiento.** Mediante el índice de Cultivo se separa el rendimiento neto del total de biomasa producida.

La información de entrada requerida por el programa puede clasificarse en cinco grupos, de acuerdo con los objetivos del presente estudio: 1) La información climática como temperatura, precipitación o evapotranspiración del sitio donde se desee modelar el rendimiento; 2) La

información fenológica, fisiológica y agronómica del cultivo de interés; 3) Datos del manejo agronómico del sitio donde se modele el rendimiento, prácticas agrícolas o régimen de riego; 4) Condiciones edáficas del suelo; 5) Condiciones iniciales del sitio, referentes a la cantidad de humedad base.

Cabe señalar que el modelo *Aquacrop* tiene ciertas limitaciones. A este respecto, Heng *et al.* (2009) validó y evaluó la eficiencia del modelo de *Aquacrop* mediante la comparación de los resultados que generó el modelo y los datos obtenidos en campo en tres sitios diferentes. El modelo mostró una buena correlación con los datos de campo en condiciones donde el cultivo no estaba bajo estrés hídrico y en donde se encontró poco estrés, pero en condiciones con severo estrés los resultados no fueron satisfactorios. Coincidentemente, Ahmadi, Mosallaeepour, Kamgar-Haghighi, y Sepaskhah (2015) utilizaron *Aquacrop* para modelar rendimientos de maíz con diferentes manejos de riego y hallaron que los resultados fueron satisfactorios en los casos donde el cultivo no sufrió de déficit de agua, mientras que en donde si mostró déficit los resultados fueron pobres e insuficientes.

Aquacrop está diseñado principalmente para profesionales tales como aquellos que trabajan para los servicios de extensión, organismos gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y diversos tipos de asociaciones de agricultores. También es de interés para científicos y con fines didácticos, como una herramienta de capacitación y educación relacionados con el papel del agua en la determinación de la productividad de los cultivos (FAO, 2016).

Descripción del *software*

El modelo *Aquacrop* fue desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO a partir de numerosas colaboraciones con investigadores de diferentes países. *Aquacrop* trabaja bajo la ecuación propuesta por Doorenbos & Kassam (1979), la cual considera al rendimiento de biomasa en función del agua disponible.

El principal insumo teórico fue aportado por un artículo publicado por Steduto *et al.* (2009), en el cual se desarrolla la ecuación central de relación entre la biomasa y el agua. El modelo *Aquacrop* está orientado al uso del agua en los diferentes procesos del cultivo, lo cual se conoce como “*water driven*” según la clasificación de modelos propuesta por Todorovic *et al.* (2009). El uso de este enfoque implica que la biomasa tendrá una relación relativamente estrecha con el agua suministrada al sistema de cultivo, por lo que se espera que el modelo sea sensible a los cambios hídricos que se implementen. Este enfoque resulta especialmente útil bajo escenarios de cambio climático, pues permite que la reducción de la precipitación se vea mejor reflejada en el comportamiento de los cultivos.

Bajo el enfoque metodológico definido en el artículo, el modelo de cultivo según (Steduto *et al.*, 2009) se define como:

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_y \left[\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right]$$

Donde Y_x y Y_a son el rendimiento máximo y actual respectivamente; ET_x y ET_a son la evapotranspiración máxima y actual; mientras que K_y es un factor proporcional entre la pérdida relativa de rendimiento y la reducción relativa en evapotranspiración. De acuerdo con la ecuación inicial, la evapotranspiración es la variable más importante de la cual se parte para estimar los rendimientos agrícolas.

La función para estimar la producción de biomasa parte de la siguiente ecuación:

$$B = WP * \sum Tr$$

Donde B es la biomasa calculada en función de la sumatoria de Tr (traspiración del cultivo) y un parámetro WP denominado productividad del agua, le cual tiende a ser una constante para ciertas condiciones climáticas dadas. El balance hídrico y el cálculo de la transpiración del cultivo se realiza de forma diaria en el modelo *Aquacrop*.

De esta forma, el crecimiento de un cultivo bajo ciertas características se realiza en 4 principales pasos consecutivos.

1. Separación de la evapotranspiración en transpiración del cultivo y evaporación del suelo.
2. Desarrollo de un modelo de crecimiento foliar ligado a la transpiración del cultivo
3. Obtención del rendimiento estimado en función de la biomasa producida y el índice de cosecha
4. Segregación de los efectos del estrés hídrico en cuatro componentes: crecimiento y senescencia foliar, tasa de transpiración e índice de cosecha.

Operativamente, estos pasos se han traducido en el siguiente flujo programado en el ambiente *Aquacrop*, el cual se muestra en la siguiente figura.

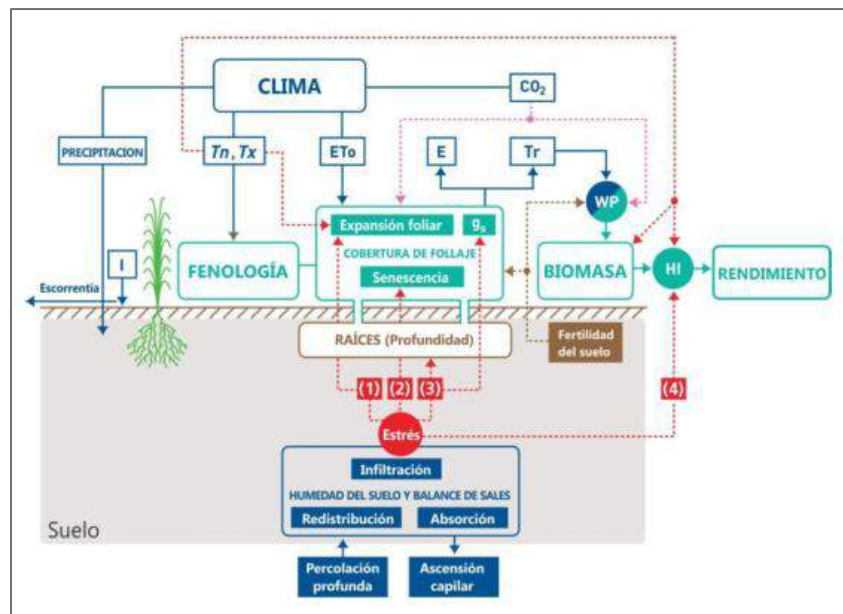


Figura 9 Modelo conceptual de *Aquacrop*

Fuente: Tomado de Steduto, Theodore C., Fereres, & Raes, (2012)

Las variables primarias de las que se parte para modelar los procesos de crecimiento del cultivo se dividen en cuatro componentes: clima, cultivo, manejo y suelo. El manejo puede ser entendido como una extensión de las características del cultivo, aunque contiene información que puede variar en diferentes sitios de cultivo.

Como se ha documentado anteriormente, el modelo conceptual de *Aquacrop* combina una sencillez en su programación con la robustez de un modelo de cultivo complejo (Steduto et al., 2009; Todorovic et al., 2009).

Requerimientos de información

Para modelar el rendimiento de un cultivo se requieren al menos cuatro módulos de entrada: Clima, Cultivo, Manejo y Suelo. A continuación, se describen algunas características propias de cada grupo de variables y la fuente de información propuesta para la presente consultoría.

Variables Climáticas.

Cuatro variables meteorológicas conforman el módulo de clima para el *software Aquacrop*: temperatura, precipitación, evapotranspiración y concentración de dióxido de carbono. La temperatura se divide a su vez en máxima y mínima, mientras que la precipitación se mide únicamente en la cantidad de agua precipitada por día o mes medida en mm (lámina precipitada). Para compilar la información climática base se propone retomar el estudio de López (2016) para extraer la información de las variables climáticas primarias (precipitación media mensual, temperatura promedio máxima y mínima mensual). El periodo a analizar comprenderá de los años 1990 al 2013 para la mayoría de las estaciones seleccionadas, quedando algunas fuera de este periodo por limitantes de información. Las estaciones que no hayan sido previamente tratadas por (López, 2016) seguirán un proceso de control de calidad y homogeneización antes de ser tratadas en el *software Aquacrop*.

La evapotranspiración potencial podrá ser previamente procesada de acuerdo con la metodología señalada por Penman y modificada por la FAO (Allen, 2006), la cual ha sido ampliamente utilizada y recomendada por diversos autores (Djaman et al., 2015; Gómez-Díaz & Monterroso-Rivas, 2010). Para cumplir con este cometido existen diversas herramientas informáticas que calculan la evapotranspiración, de las cuales se podrán hacer uso en la presente consultoría. Una de ellas es el programa ETo Calculator de la FAO, el cual calcula la evapotranspiración de referencia mediante el método de Penman modificado (Raes & Munoz, 2009).

La concentración de dióxido de carbono es proporcionada por default en el programa *Aquacrop* para un escenario base y para diversos RCP's.

Variables del Cultivo.

El módulo de cultivo incluye los siguientes procesos: fenología, cobertura del dosel, profundidad de raíces, transpiración del cultivo, evaporación del suelo, producción de biomasa y rendimiento cosechable.

La fenología denota los periodos de desarrollo del cultivo y bajo la programación de *Aquacrop* pueden estar medidos en días de calendario juliano o Grados Días Acumulados. Considerando éste último parámetro se habilita la posibilidad de considerar la temperatura como limitante de la producción arriba o abajo de ciertos umbrales definidos por cada cultivo. Los Grados Días acumulados se calculan siguiendo la metodología de McMaster y Wilhelm, aunque modifican el parámetro de temperatura mínima (Steduto *et al.*, 2012). Debido a que existen numerosas diferencias genéticas entre variedades de una misma especie, estos parámetros deberán ser calibrados en el sitio particular de estudio.

El desarrollo del dosel guarda una relación muy importante con el agua transpirada y, por tanto, con la biomasa producida. El modelo *Aquacrop* considera este parámetro como porcentaje y no como índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), lo cual simplifica posteriores cálculos. Para el cálculo del crecimiento de la cobertura se utiliza una ecuación dinámica en el tiempo que utiliza una tasa de crecimiento del dosel como insumo primordial en la primera mitad del crecimiento del cultivo. No obstante, para la segunda mitad la ecuación considera además la cobertura máxima del dosel, de modo que existe un límite bajo el cual el

cultivo se desarrolla. La cobertura máxima e inicial son calibradas por el usuario, aunque existen diversos estudios que han coincidido en valores cercanos para cada cultivo. La senescencia de la cobertura aérea de la planta en *Aquacrop* está caracterizada por un coeficiente empírico de disminución del dosel (Steduto *et al.*, 2012).

Los procesos relacionados a la absorción de agua por parte de las raíces se determinan definiendo la profundidad efectiva y un patrón de extracción de agua que se encuentra en función de cada cultivo; mientras que la transpiración del cultivo por unidad de superficie del suelo depende de la fracción de la superficie del suelo cubierta por el dosel (Steduto *et al.*, 2012). La evaporación del suelo tiene estrecha relación con la cobertura del dosel, por lo que a menor cobertura habrá mayor evaporación.

La producción de biomasa parte del cálculo de la productividad del agua (WP, por sus siglas en inglés) y se ha normalizado para diversos cultivos, reportándose que su valor puede ser relativamente constante sin limitantes de nutrientes. Se ha reportado que en la mayoría de las especies de cultivos, la WP aumenta a medida que se incrementa la concentración de CO₂ (Steduto *et al.*, 2012). En ambiente *Aquacrop*, este parámetro se determina a partir de la ruta metabólica que siguen la mayoría de los cultivos alimenticios, los cuales pueden ser C3 o C4. El rendimiento final aprovechable se obtiene al particionar la biomasa producida en rendimiento aprovechable mediante el índice de cosecha (HI, por sus siglas en inglés). Se ha documentado que para los cultivos de granos o frutos el incremento en biomasa después de la polinización está estrechamente relacionado con el aumento en el rendimiento final. Se han generado tablas de referencia para la mayoría de los cultivos, aunque este parámetro puede ser ajustado localmente de acuerdo a la variedad del cultivo de la que se trate.

Variables de Manejo

Aquacrop comprende dos categorías de prácticas de manejo: el manejo de riego y el manejo de campo, limitado a actividades agronómicas (Steduto *et al.*, 2012). Debido al enfoque del presente estudio respecto a modelar los cultivos en régimen de temporal, la categoría de manejo que se modificará será la de campo.

Dentro de las prácticas de manejo de campo se diferencian tres factores: (i) fertilidad del suelo; (ii) acolchado del suelo para reducir la evaporación; y (iii) uso de surcos para controlar la escorrentía superficial. El parámetro de fertilidad del suelo no se simula directamente en *Aquacrop*, sino que se consideran en función de un factor limitante de la productividad máxima. El acolchado evitará mayor evaporación en la medida en que cubra mayor parte de la superficie con materiales orgánicos o sintéticos, lo cual también es modelado en el *software*. La consideración de surcos o bordes se modela para prevenir la escorrentía e inducir a toda el agua lluvia o de riego a infiltrarse en el suelo (Steduto *et al.*, 2012). Estas características se podrán obtener a partir de fuentes bibliográficas y referencias *in situ*, pues dependen del manejo local del que se haga del cultivo.

Variables de Suelo

Las principales variables edáficas que se utilizan en *Aquacrop* son las características de los horizontes, el número de curva y las características de la capa freática.

Para cada horizonte es posible definir el contenido de humedad del suelo en el punto de saturación, la capacidad de campo, el punto de marchitamiento permanente y la conductividad hidráulica en el punto de saturación. Al determinar el balance hídrico, *Aquacrop* también implementa el equilibrio de sales.

Para determinar los parámetros edáficos de cada estación, se podrá recurrir a la información proveniente de la capa de Edafología Serie II del INEGI, así como a los perfiles agrícolas

reportados también por INEGI (2005). Se propone utilizar la clasificación oficial de categorías texturales para definir el régimen de humedad del suelo, el cual se encuentra disponible en los archivos predeterminados del programa *Aquacrop* con ayuda del triángulo de texturas edáficas. Una vez determinada la textura del sitio de interés, se propone a ajustar los parámetros como profundidad y número de horizontes mediante funciones de pedo transferencia definidas por la bibliografía (Steduto et al., 2012).

El siguiente cuadro presenta las variables y la fuente de información propuesta para modelar los cultivos de interés de la presente consultoría.

Cuadro 2 Variables de entrada y fuente propuesta

Grupo	Parámetro	Unidad de medida	Fuente propuesta
Clima	Temperatura máxima y mínima	°C	Estudio reportado por (López, 2016)
	Precipitación	Mm	Estudio reportado por (López, 2016)
	Evapotranspiración	Mm	Cálculo con ecuación de Penman-FAO (Allen, 2006)
	Concentración de CO ₂	Ppm	Default <i>Aquacrop</i>
Cultivo	Fecha de siembra	Día juliano	Bibliografía ³
	Días a la germinación, máxima cobertura, senescencia y madurez	Número de días o GDD ⁴	Bibliografía
	Densidad y modalidad de siembra	Plantas/hectárea	Bibliografía
	Cobertura inicial y máxima del dosel	%	Bibliografía
	Profundidad máxima de raíces y duración en alcanzarla	Metros y días	Bibliografía
	Índice de cosecha	%	Bibliografía
Manejo	Limitantes en fertilización	% de afectación	Bibliografía
	Presencia y características de acolchado	% de cobertura	Bibliografía
	Presencia y características de surcado	Altura de bordos en cm.	Bibliografía
Suelo	Grosor y características hídricas de los horizontes	M, mm/M y mm/día	Cartas INEGI ⁵

³ La bibliografía incluirá: artículos científicos, libros, reportes técnicos, tesis y referencias de experimentos in situ

⁴ GDD: Grados Días de Desarrollo

⁵ Cartas de suelo de INEGI escala 1: 50 000 y Conjunto de datos vectoriales de perfiles de suelo escala 1: 250 000

Número de curva y capacidad evaporativa del suelo	Adimensional y mm	Cartas INEGI
Características de capas restrictivas y capas freáticas	M	Cartas INEGI

Fuente: Elaboración propia con base en las fuentes citadas

Los grupos de variables de clima y suelo son relativamente estables en términos de fuentes de información, puesto que para el clima se han reportado estaciones con validación estadística (López, 2016) y los suelos tienen referencias cartográficas con reconocimiento oficial (INEGI, 2005). No obstante, para las variables propias del cultivo y el manejo se recurrirá a diversas fuentes de información debido a su carácter divergente y específico para cada región.

Tal como ha sido planteado en el Plan de Trabajo de la consultoría, para esta fase también se recurrirá a la revisión de expertos en un cultivo determinado a fin de calibrar con mayor eficacia los modelos predictivos.

Procesamiento y calibración del modelo

Para evaluar el impacto del cambio climático sobre el rendimiento de los cultivos seleccionados, la metodología se dividirá en dos fases. La primera se centrará en calibrar el modelo de cultivo con los años del escenario base o histórico, que abarcarán del año 2000 al 2010 en promedio. La segunda fase consistirá en incluir los escenarios de cambio climático, una vez que el modelo base haya sido calibrado.



Figura 10 Esquema ilustrativo de la metodología

Fuente: Elaboración propia

Una vez que la información de clima, cultivo, manejo y suelo haya sido recopilada en formato *Aquacrop* para los estudios de caso seleccionados, se procederá a ejecutar el proceso de calibración. Para ilustrar el módulo principal de *Aquacrop* en la Figura 2 se muestra un ejemplo de la interfaz de usuario.

El módulo central de control se compone de dos grandes secciones: *Environment and Crop* y *Simulation*. En la primera se encuentran anidados los módulos de información recopilados anteriormente, como el clima, cultivo, manejo, suelo, irrigación y agua subterránea. Estos dos últimos módulos no se considerarán para todos los cultivos de la presente consultoría puesto que se intenta modelar cultivos bajo régimen de temporal. No obstante, para el caso del sorgo o la soya podrán incluirse de acuerdo con el manejo local que se haga del cultivo en las zonas seleccionadas para el estudio.

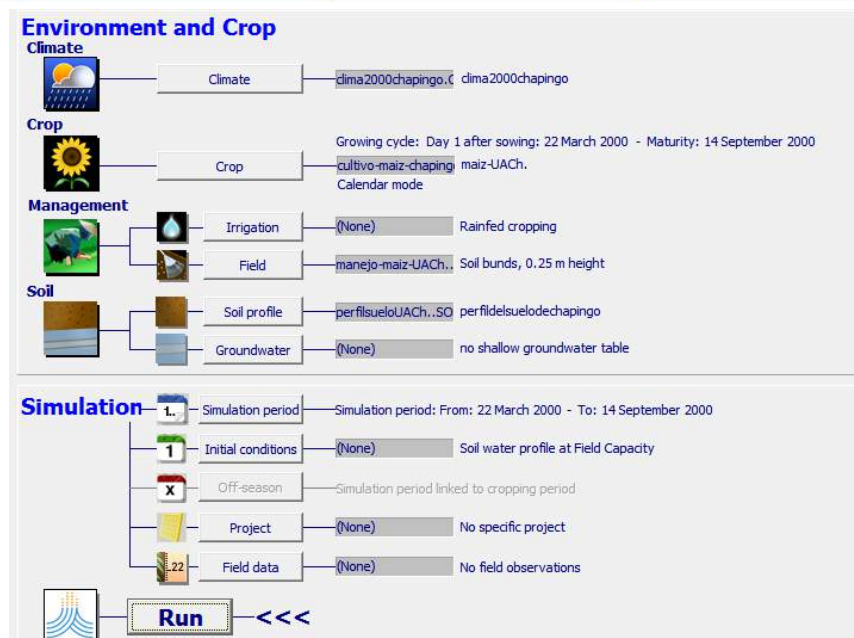


Figura 11 Interfaz de datos de entrada de *Aquacrop*

Fuente: Captura de pantalla propia del *software Aquacrop*

Para modelar un cultivo con años sucesivos se recurrirá al módulo de programación que se encuentra disponible en el *software* de *Aquacrop* denominado “Project”, al cual se le indicará un proceso recurrente para modelar un año tras otro. Una vez cargada la información biofísica y programada la recurrencia de años, se procederá a ejecutar el modelo mediante el comando “Run”.

Como resultado de la ejecución del *software* se tienen diversas variables de salida, mismas que se encuentran organizadas en módulos. En el proceso se obtienen parámetros que simulan el desarrollo de la cobertura aérea, la profundidad radicular, el balance hídrico y la producción de biomasa traducida en rendimiento de materia seca.

Una vez obtenidos los resultados de la primera ejecución del *software*, se iniciará el proceso de calibración-validación. Este proceso es imprescindible dentro del modelado de cultivos pues mediante él se ajusta la tendencia del rendimiento modelado a los datos observados que se encuentren disponibles. Múltiples investigaciones detallan los parámetros del modelo que pueden modificarse a fin de contar con un mayor ajuste local (Abendinpour, Sarangi, Rajput, & Singh, 2014; Steduto et al., 2009; Todorovic et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2015).

La calibración de los modelos predictivos se propone realizar mediante la comparación de los rendimientos modelados contra los reportados por instancias oficiales o centros de investigación. Para ello se recurrirá a los registros del rendimiento histórico de los cultivos analizados en este estudio, los cuales se encuentran disponibles a partir del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014). Además, se buscará establecer colaboración con centros de investigación tales como INIFAP, CIMMYT o Universidades que desarrollen proyectos aplicados a los cultivos de interés y que puedan proveer de experiencia para calibrar los modelos predictivos de esta consultoría.

Una herramienta extensamente utilizada para calibrar los modelos de cultivo son los indicadores estadísticos de concordancia. Aunque existen diversos indicadores estadísticos disponibles para evaluar el rendimiento de un modelo, cada uno tiene sus propias fortalezas y

debilidades. Ello implica que el uso de un ensamble de diferentes indicadores es necesario para evaluar el rendimiento del modelo (Legates & McCabe, 1999; Willmott, 1984).

Los parámetros que han sido utilizados para evaluar los modelos predictivos de cultivo se resumen en el cuadro 2. Una descripción detallada de cómo calcularlos se encuentra en el Anexo 1 del presente documento.

Diversos estudios han reportado el uso de estos parámetros, ya sea por separado o en conjunto. (Deb, Shrestha, & Babel, 2014b) utilizaron el error cuadrático medio, el Coeficiente de determinación y el Error medio absoluto. En la guía oficial del programa *Aquacrop* se describen los cinco primeros parámetros y se destaca el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio normalizado como indicadores eficientes (Steduto et al., 2009).

Cuadro 3 Parámetros de validación de los modelos

Parámetro	Significado
Coeficiente R ²	Coeficiente de determinación
RMSE	Error cuadrático medio
NRMSE	Error cuadrático medio normalizado
EF (Nash-Sutcliffe)	Coeficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe
d (Willmott)	Índice de acuerdo de Willmott
Promedio observado vs Promedio estimado	Promedio de los rendimientos observados y modelados.
Coeficiente de correlación con precipitación	Coeficiente que relaciona al rendimiento en función de la precipitación.

Fuente: Elaboración propia con información de Steduto et al. (2009)

El uso de los parámetros estadísticos que analizan la tendencia por cada año (cinco primeros parámetros) asume que los datos observados se corresponden inequívocamente con la realidad. No obstante, la información disponible a partir del SIAP-SAGARPA es un reflejo de diversos factores que no son necesariamente biofísicos.

Puesto que el presente estudio se enfoca en modelar el rendimiento en un contexto biofísico, el uso estricto de los indicadores de tendencia por año puede no ser el adecuado puesto que los datos de validación provienen de otro contexto más complejo. Ante esta situación se propone utilizar el indicador del promedio observado vs estimado, ya que se trata de un parámetro más general que evita forzar el ajuste de un modelo biofísico a datos que responden a diferentes factores.

En los casos donde se pueda acceder a información recolectada *in situ* bajo experimentos biofísicos, mediante la colaboración con centros de investigación, el uso de los parámetros estadísticos que analizan los rendimientos anualmente tendrá una justificación.

Análisis de resultados

Una vez que se haya finiquitado el proceso de calibración del modelo y el indicador seleccionado haya sido cubierto, se considerará al modelo validado y se procederá a registrar los resultados para su posterior análisis.

Las variables de salida se encuentran agrupadas en conjuntos de acuerdo con su naturaleza. A priori, se agrupan en variables de clima-suelo-agua, perfil de agua en el suelo, salinidad del

suelo, balance hídrico y producción. Los primeros grupos presentan gráficas explicativas donde es posible visualizar variables como la transpiración, la cobertura del dosel o la humedad del suelo a lo largo del ciclo de crecimiento de cultivo. En la Figura 3 se aprecia un ejemplo del resultado que arroja el programa *Aquacrop*. La primera barra se refiere a la transpiración, la segunda a la cobertura aérea y la tercera a la profundidad radicular.

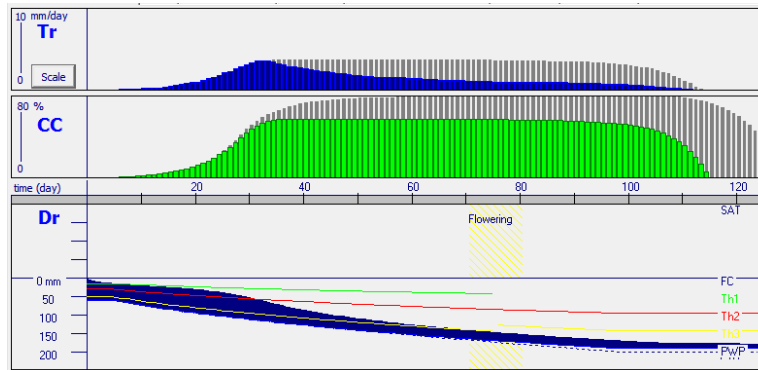


Figura 12 Simulación de la transpiración, la cobertura aérea y la profundidad radicular para un cultivo

Fuente: Captura de pantalla propia del *software Aquacrop*

Los módulos de perfil de agua en el suelo, salinidad y balance hídrico ofrecen variables que denotan el comportamiento de variables explicativas del rendimiento. Finalmente, en la sección de producción se encuentran las variables de salida que expresan la producción en términos de biomasa y en rendimiento final. La Figura 4 proporciona un ejemplo de salida con los parámetros de producción.

Un parámetro de importancia es la biomasa potencial, la cual es reportada en ton/ha e implica asumir una producción sin limitantes de ninguna índole. Este dato sugiere que bajo ciertas condiciones excepcionales la productividad de un sitio determinado podría ser mejor, por lo que estos resultados podrían ser tomados como referencia para medidas de adaptación.

La biomasa producida es el resultado del proceso de modelación del crecimiento del cultivo y es la variable inmediata anterior al rendimiento en materia seca. El rendimiento neto es la variable más importante para el presente estudio, por lo que será el principal parámetro a analizar con escenarios de cambio climático.

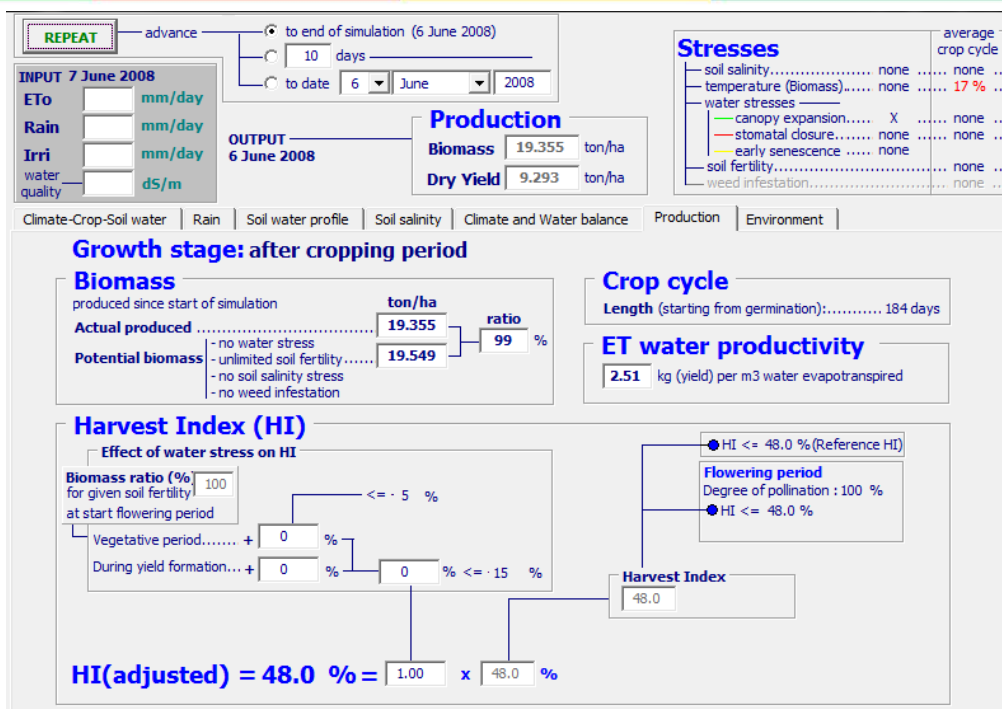


Figura 13 Sección de producción de la interfaz de salida de *Aquacrop*

Fuente: Captura de pantalla propia del *software Aquacrop*

Además de las salidas arriba mencionadas, *Aquacrop* provee de otras variables de importancia para explicar el resultado obtenido como los estreses y la productividad del agua final. Los estreses se dividen en térmico e hídrico, éste último con modalidad de expansión de cobertura, cierre estomatal y senescencia temprana, dependiendo del proceso que tenga mayor impacto en la pérdida del rendimiento.

Para el escenario base o histórico se considerarán variables primarias como temperatura y precipitación del ciclo de crecimiento para caracterizar el comportamiento de la producción en un estudio de caso particular. Además, se recuperarán los parámetros de estreses para poder explicar la relación entre las variables de entrada y el rendimiento.

Bajo escenarios de cambio climático se propone realizar un análisis comparativo entre el escenario base y los distintos escenarios futuros con las siguientes variables: precipitación del ciclo de crecimiento (mm), rendimiento (ton/ha), biomasa producida y potencial (ton/ha), productividad del agua (kg/m^3), estreses hídricos y térmico. Las variables antes mencionadas serán el resultado de ejecutar el modelo *Aquacrop* con los datos de la climatología base y la de cambio climático, cuyo proceso se explica en párrafos anteriores. De este modo, la forma de incorporar y analizar los escenarios de cambio climático será a manera de comparativa multi temporal.

Crterios para la selección de estaciones

Para la selección de las estaciones meteorológicas a considerar para el modelado del rendimiento se consideraron distintos criterios. En base a la revisión realizada sobre el tema de seguridad alimentaria, se buscó que el presente estudio tuviera criterio primeramente climático para conocer los impactos que el cambio climático podría traer a algunos cultivos; sin embargo, se consideró un enfoque socioeconómico al elegir las estaciones dando prioridad

a los municipios más vulnerables al cambio climático y que practicaran la agricultura de temporal. De este modo se propone una priorización de criterios que podrán ser integrados en un Sistema de Información Geográfica para discriminar y elegir las estaciones meteorológicas a modelar.

En la actualidad existen diversas zonificaciones agroecológicas realizadas para México considerando distintos cultivos agrícolas. Una parte importante de ellas han sido realizadas con enfoque local y de toma de decisiones prácticas focalizadas, por lo que su objetivo será complementario al propósito del presente estudio, más no coincidente. En cambio, se priorizarán aquellas zonificaciones que han sido realizadas con enfoque nacional y biofísico, puesto que se asume que han observado las distintas condiciones donde se desarrolla la agricultura en México y han diseccionado al territorio en partes acordes con ello.

La Figura siguiente muestra la secuencia de criterios propuesta para seleccionar las estaciones a modelar.

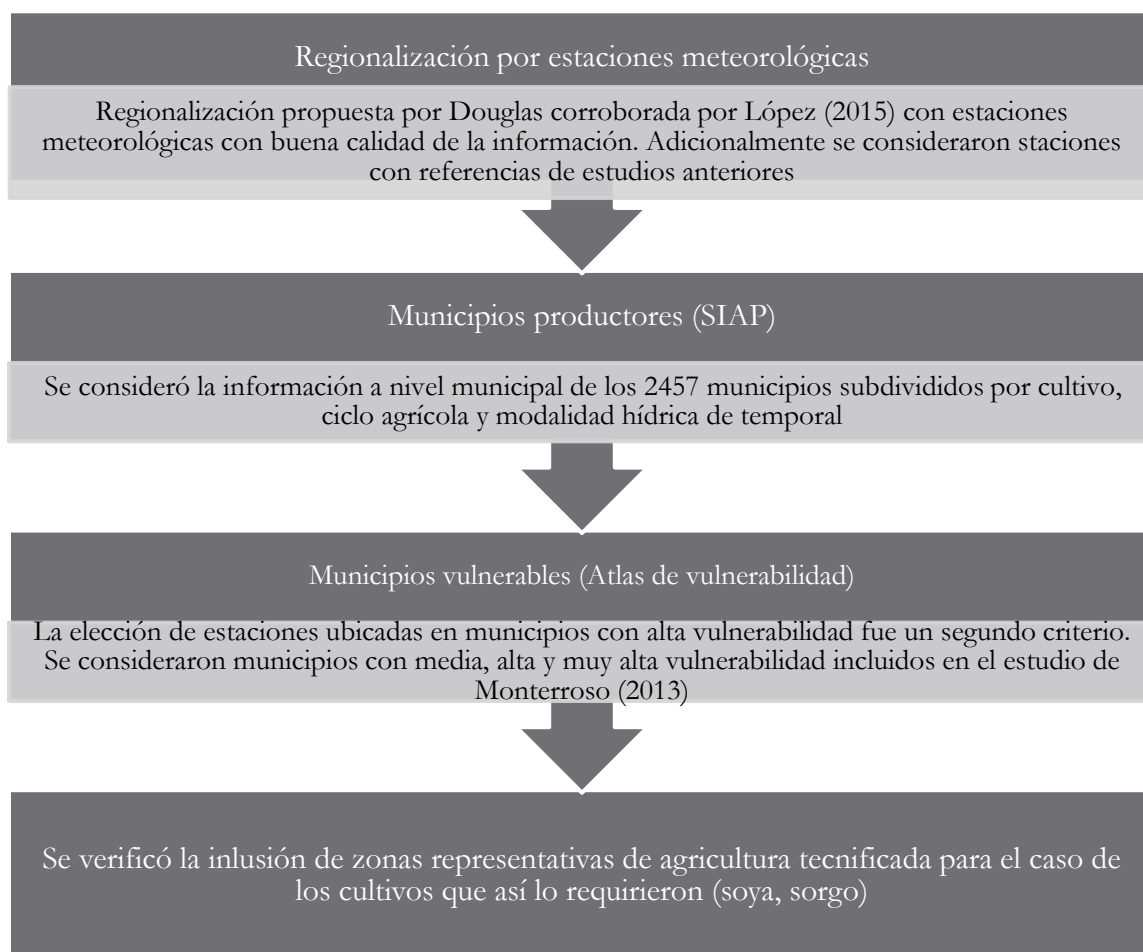


Figura 14 Secuencia de criterios para elección de estaciones a modelar

Fuente: Elaboración propia

Primeramente se incorporó el criterio climático de regionalización propuesto por Douglas (1993) revisado por la consultora Fanny López (López, 2016). A partir de dos regionalizaciones climáticas, se obtuvo la información climática de 295 estaciones, mismas que se utilizaron para diversos análisis. El trabajo de verificación de la regionalización comprendió

el uso de métodos estadísticos basados en el concepto de *clústers* para corroborar la consistencia de las zonas establecidas por (Douglas, 1993). Se agrupo un total de 175 estaciones climatológicas distribuidas en el país, de las cuales 174 quedaron funcionales para precipitación y 164 para temperatura. En seguida, se aplicó un control de calidad a las estaciones que fueron seleccionadas con esa zonificación, el cual consistió en dos fases: una revisión general y un control de calidad con el programa RClimDex. En el siguiente cuadro se aprecian los pasos y elementos considerados para el control de calidad.

Cuadro 4 Control de calidad de las estaciones

Revisión	Inspección ocular: comportamiento de series de datos.
	Registros con por lo menos el 80% del total de datos.
	Series lo más actuales posibles.
Control de Calidad RClimDex	$T_{max} \leq T_{min}$ y valores de precipitación negativos.
	Identificación de <i>outliers</i> con $\pm 4\sigma$ para temperatura.
	<i>Outliers</i> basados en excedencia de rango intercuartílico.
	Control de valores iguales consecutivos.
	Valores fuera de rango basados en límites fijos.
	Diferencia interdiaria basada en valores de umbral fijo.

Fuente: Elaboración propia con datos de López (2016)

Como resultado de dicho control de calidad, las 295 estaciones iniciales se depuraron y sólo 202 quedaron después de la primera fase. Aplicando el control de calidad con RClimDex, sólo 146 estaciones quedaron disponibles para su estudio (López, 2016). No obstante, es necesario recordar que la metodología para la selección de dichas estaciones en la consultoría de la Dra. Fanny obedeció al objetivo de analizar eventos climáticos extremos observados de temperaturas extremas y eventos de precipitación, que permitan relacionar la ocurrencia de dichos eventos extremos con desastres registrados y su tendencia bajo escenarios de cambio climático (López, 2016).

De las 146 estaciones disponibles, sólo 103 están disponibles para temperatura y precipitación debido a que los filtros para la variable temperatura son más estrictos. Considerando esas 103 estaciones reportadas por López (2016), se procedió a eliminar aquellas que no contaran con información hasta, al menos, el año 2010. Esto debido a que la metodología establecida requiere la validación del modelo de cultivo con datos de rendimiento observado. En este sentido, los datos de rendimiento oficiales abarcan el periodo del 2000 al 2010, siendo indispensable que las estaciones a modelar cubrieran dicho periodo. De las estaciones depuradas con la metodología de la Dra. Fanny y viables para el presente estudio, sólo 70 quedaron disponibles.

La ubicación de ciertos cultivos en México, principalmente el maíz, depende del clima a escalas mayores. La propuesta inicial de la consultoría incluyó el estudio del maíz bajo tres regímenes

climáticos: maíz de climas tropicales, templados y áridos. Por ello, la zonificación inicial partió de ubicar tres grupos de climas que definen patrones de cultivo. Se utilizó la carta de climas de Köppen modificado por García, la cual fue agrupada en tres clases, climas cálidos [(A)C, A(c), Af, Am, Aw, Ax], climas secos [BS, Bso, BW] y climas templados [Ca y Cb]. De las 70 estaciones disponibles, alrededor de la mitad se ubicó en climas secos (que abarcan diferentes clasificaciones climáticas). Asimismo, de ese total sólo 33 corresponden a climas cálidos, mientras que para los climas templados sólo se tuvieron 5 estaciones disponibles.

Los estudios de vulnerabilidad de los municipios al cambio climático propuestos por Monterroso-Rivas *et al.* (2014) fueron el segundo insumo que se consideró para seleccionar estaciones. La vulnerabilidad en dicho estudio retoma la definición del IPCC quien la define como “el grado de susceptibilidad o incapacidad de un sistema para afrontar los efectos negativos del cambio climático” (Monterroso et al., 2013b). Para construir el índice de vulnerabilidad se utilizó un conjunto de variables que fueron agrupadas de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\text{Vulnerabilidad} = f[(\text{exposición} + \text{sensibilidad}) - \text{capacidad de adaptación}]$$

Las variables que integran el factor de exposición se refieren al aumento de eventos extremos, los problemas ambientales y los cambios en la temperatura y precipitación futuros. El factor de sensibilidad se avoca a la pobreza de la población, las deficiencias en salud y en las malas condiciones del sector primario. Para balancear la ecuación, la capacidad adaptativa considera al capital humano, social financiero y natural con que los territorios cuentan para afrontar los impactos. En total se incluyeron 38 variables para definir el índice de vulnerabilidad para cada municipio (Monterroso et al., 2013b). Considerando el total de estaciones depuradas y validadas por López (2016), sólo 2 se sobrepusieron en algún municipio con muy alta o alta vulnerabilidad al cambio climático. Considerando una vulnerabilidad media, alta y muy alta, 32 estaciones estuvieron presentes.

El tercer criterio para seleccionar las estaciones fue una zonificación agrícola basada en la presencia del cultivo. En México el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) es el encargado de hacer operativo el Sistema Nacional de Información del Sector Agroalimentario y Pesquero, el cual contiene información sobre estadísticas y tendencias de los principales productos agropecuarios y pesqueros del país. Entre otra información, cuentan con una base de datos de los municipios productores de cada cultivo subdivididos por ciclo productivo y una caracterización de la agricultura de temporal y de riego. Aunado a la zonificación, los reportes de producción contienen información sobre los rendimientos obtenidos en cada municipio por lo que también serán utilizados en la posterior calibración de los modelos de cultivo. Por otro lado, la Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (ASERCA) se encarga de promover la producción y comercialización de productos agrícolas mexicanos, por lo que cuenta con información espacial sobre la producción. El mapa dinámico del Centro de Información de Mercados Agropecuarios (CIMA) contiene información sobre los predios que han sido apoyados por ASERCA por cultivo y ciclo agrícola. Como subproducto cuentan con una zonificación de los sitios con características similares que producen un cultivo determinado; aunque cabe mencionar que ASERCA se avoca a la agricultura tecnificada, por lo que el uso de su información en el presente estudio se limitará a los cultivos industriales como el sorgo y la soya.

Para el caso del maíz, las estaciones depuradas por López (2016) se sobrepusieron en 32 número para los municipios de temporal de maíz en México. Para el frijol, 41 estaciones se encuentran dentro de la clasificación de municipios productores de temporal o temporal y riego. Respecto al trigo, sólo 18 estaciones estuvieron dentro de los municipios productores. Puesto que la propuesta inicial de la presente consultoría se basa en modelar cultivos bajo diferentes condiciones climáticas ubicados en sitios donde la especie esté preferentemente en condiciones de temporal y en municipios con algún grado de vulnerabilidad al cambio climático, se decidió ampliar la selección de estaciones a partir de otras fuentes. Dichas fuentes incluyeron referencias bibliográficas y la primera depuración de estaciones de la consultora Fanny. A continuación, se presenta una descripción de la bibliografía consultada para compilar la lista extensa de estaciones.

Las estaciones reportadas por Conde *et al.* (2000) para maíz con el modelo CERES no son viables para este estudio debido a que las series de datos climáticos sólo llegan hasta el 1990, mientras que para el presente proyecto se requerirán estaciones con datos hasta el 2010 por motivos de calibración y disponibilidad de datos de rendimiento. En dicho estudio se hace énfasis en cuatro zonas de producción de maíz: el estado de Jalisco, el centro del Estado de México, el sur de Puebla y el centro de Veracruz. Se consideró el criterio de los estados con mayor producción, aunque también se incluyeron estaciones con baja productividad bajo la hipótesis de que se trata de cultivos de temporal.

En otro estudio sobre potencial productivo de maíz en Oaxaca, se encontró que los Valles Centrales tendrían un importante potencial en diversos municipios, de entre los que se destacan Ocotlán, Ejutla y Zimatlán. Una estación meteorológica de éste último municipio se destaca al reportar datos climáticos hasta el 2011 y contar con al menos el 80% de datos, por lo que dicha estación se consideró candidata para el presente estudio (Ruíz Vega, 1998). Por otro lado, Flores-Gallardo *et al.* (2013) simularon el rendimiento de maíz en el norte de Sinaloa, puntualmente en el Distrito de Riego 075; aunque el tipo de agricultura que se practica en dicha zona es de riego, por lo que para el presente estudio se debatirá su uso.

Respecto al frijol se encontró que Esquivel-Arriaga (2014) realizó un estudio en el sur de Durango y utilizaron 8 estaciones meteorológicas, las cuales abarcan datos hasta el 2009. Se considera que esta región puede ser especialmente importante debido a la documentación con la que ya se cuenta.

Una vez compilada una nueva lista de estaciones, se procedió a analizar la correspondencia con los municipios vulnerables definidos por Monterroso-Rivas *et al.* (2014), así como la inclusión en zonas de producción de los cultivos bajo regímenes de temporal. La elección de las estaciones finales no se realizó de manera rígida, por lo que se observaron factores de forma indirecta, tales como el nivel del rendimiento del municipio o la balanza de consumo.

El siguiente cuadro presenta las estaciones propuestas. Para cada ciclo de cultivo se propusieron dos estaciones, con la finalidad de tener diversidad en la elección final. Las estaciones resaltadas en verde indican la propuesta definitiva.

Cuadro 5 Estaciones seleccionadas para el estudio

Cultivo	Sub división	Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Maíz ⁶	Templado	Atotonilco, Jalisco ⁷	14017	Media	Depuradas por López (2015)	Balance positivo ⁸ de 98 mil ton. Rendimientos de 7.35 ton/ha
		Chapingo, Edo de Méx.	15170	Baja	Bibliografía	Balance negativo de 33 mil ton. Rendimientos de 3.09 ton/ha.
	Tropical o Cálido	Juchitán de Zaragoza, Oaxaca	20048	Alta	Depuradas por López (2015)	Balance de producción negativo (11 mil toneladas). Rendimiento de 900 kg/ha
		Villa Flores, Chiapas	7175	Media	Depuradas por López (2015)	Balance positivo con 82 mil ton. Rendimientos de 3.9 ton/ha. Se encuentra cerca de una plataforma CIMMYT.
	Árido	Cuencamé, Durango	10012	Baja	Primer filtro de López (2015)	Balance neutro con 766 ton a favor. Rendimientos bajos (1.75 ton/ha)
		El Fuerte, Sin.	25023	Media	Depuradas por López (2015)	Balance negativo con 18 mil ton. Rendimientos de 2 a 3 ton/ha)
Frijol ⁶	Altura	Villa de Cos, Zacatecas	32059	Baja	Bibliografía	Cerca de Fresnillo, municipio vulnerable (media). Rendimientos de 0.5 ton/ha.
		Villa de Arriaga, S.L.P.	24100	Baja	Bibliografía	Rendimientos de 0.5 ton/ha. Cerca de plataforma CIMMYT.
	Baja altura	Atoyac (DGE), Guerrero	12161	Alta	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 0.7 ton/ha.

⁶ Cultivos comprometidos en el contrato de la consultoría

⁷ Los renglones resaltados en color indican que esa estación fue seleccionada como prioritaria para su estudio

⁸ El balance de producción fue obtenido a partir de CONABIO

		Villa Flores (SMN), Chiapas	7175	Media	Depuradas por López (2015)	Rendimientos de 0.8 ton/ha.
Trigo ⁶	Primavera	Zamora, Michoacán	16031	Media	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 5.4 ton/ha en OI. Cerca de Tangancicuaro, con rendimientos de 3.02 ton/ha en PV.
		Ocampo, Guanajuato	11050	Media	Bibliografía	Rendimientos de 1.3 ton/ha con manejo de temporal
		Texcoco (DGE), Edo. Mex.	15125	Baja	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 2.6 ton/ha. Cerca de CIMMYT.
	Otoño	Tres hermanos, Navojoa, Sonora	26102	Baja	Depuradas por López (2015)	Cerca de municipio vulnerable (media). Rendimientos de 6.1 ton/ha
		Celaya, Guanajuato	11009	Baja	Bibliografía	Cerca de municipio vulnerable (media)
Soya ⁶	Primavera	El Mante, Tamps.	28012	Media	Depuradas por López (2015)	Rendimientos de 1.25 ton/ha
		Bolonchén, Campeche	4001	Media	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 1.82 ton/ha
		Malpaso, Tapachula, Chis	7191	Muy alta	Bibliografía	Rendimiento con referencia. 1.9 ton/ha.
	Otoño	San Fernando, Tamps.	28086	Media	Bibliografía	Rendimientos de 1.25 ton/ha
Sorgo ⁹	Primavera	Irapuato, Guanajuato	11028	Baja	Bibliografía	Cerca de municipio vulnerable (media). Rendimientos de 6.7 ton/ha.
		Ciudad Ixtepec, Oaxaca	20039	Media	Depuradas por López (2015)	Rendimientos de 1.9 ton/ha.
	Otoño	San Pedro, Rosamorada, Nayarit	18032	Media	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 4.7 ton/ha.
		González, Tamps.	28035	Media	Bibliografía	Rendimientos de 1.5 ton/ha.

⁹ Cultivos propuestos adicionales al contrato

Cebada ⁹	Primavera	Calpulalpan, Tlax.	29035	Media	Bibliografía	Rendimientos de 2.5 ton/ha.
		Huichapan, Hidalgo	13012	Baja	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 0.80 ton/ha.
		San Miguel Tlaixpan, Edo. De Mex.	15101	Baja	Bibliografía	Rendimientos de 2.2 ton/ha. Cercana a estación Texcoco.
		Celaya, Gto.	11009	Baja	Bibliografía	Rendimientos de 5.2 ton/ha
		San José de Iturbide, Guanajuato	11066	Media	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 4.5 ton/ha. Referencia a San Miguel de Allende para cultivo en OI.

Fuente: Elaboración propia

Aunado a los criterios enmarcados líneas arriba, se consideró especialmente útil la información disponible a partir de bibliografía especializada y la opinión de expertos en cada cultivo, así como de instituciones y actores involucrados en el medio agropecuario. Tal es el caso de la SAGARPA o el INIFAP, quienes han realizado históricamente diversos estudios en los cultivos de interés del presente estudio. Su consideración podrá ayudar a crear sinergias importantes para contribuir a mejorar el conocimiento actual y futuro del comportamiento de los principales alimentos de los mexicanos.

Además de la caracterización de instancias oficiales gubernamentales, existe una zonificación agroecológica que fue propuesta atendiendo metodologías multi criterio. En ella se detalla una zonificación con enfoque de aptitud, donde se analiza el impacto del cambio climático en la distribución potencial del maíz a nivel nacional (Monterroso Rivas, Conde Álvarez, Rosales Dorantes, Gómez Díaz, & Gay García, 2011). Por otro lado, para el maíz se ha propuesto una zonificación de tipo altitudinal la cual clasifica al país en cinco rangos según el INIFAP-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, sin embargo se trata de un estudio de aptitud potencial y no hace mención de estaciones (Ruiz-Corral *et al.*, 2011). Estas zonificaciones en función de criterios de superficie podrán ser útiles en un futuro para caracterizar mejor los impactos del cambio climático, en conjunto con el presente estudio del cambio en el rendimiento.

Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático utilizados en la presente consultoría fueron establecidos en coordinación con el INECC y con el visto bueno de la Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México.

Los escenarios consideraron cinco modelos, dos concentraciones de forzamiento radiativo y tres horizontes de tiempo, dando un total de 28 escenarios. Este universo de escenarios es uno de los más utilizados para estudios de impacto del cambio climático en México. En la siguiente tabla se aprecian los modelos y las combinaciones utilizadas.

Cuadro 6 Escenarios de cambio climático considerados

Modelo	RCP	Horizonte
HADGEM2_ES	4.5	2015-2039
	8.5	2045-2069
		2075-2099
GFDL-CM3	4.5	2015-2039
	8.5	2045-2069
		2075-2099
MPIECHAM-5	4.5	2015-2039
	8.5	2045-2069
		2075-2099
CNRM-CM5	4.5	2015-2039
	8.5	2045-2069

		2075-2099
Ensamble REA	4.5	2015-2039
	8.5	2075-2099

Fuente: Elaboración propia

Escenarios de suelos

El cambio climático afecta la productividad agrícola de diversas formas, aunque hasta la fecha la mayoría de los estudios se han centrado en el impacto a la distribución y al cambio en los rendimientos (Cervantes *et al.*, 2014). Sin embargo, el aumento en la temperatura del suelo puede producir cambios en la estructura y productividad del mismo que pueden llegar a ocasionar pérdidas de la productividad y las funciones naturales del suelo.

Recientemente se han conjuntado esfuerzos para analizar el impacto del cambio climático en los suelos, principalmente sobre el cambio en el régimen de humedad, el carbono orgánico del suelo, el cambio en la temperatura del suelo, entre otros. Estos estudios hacen posible a evaluar el impacto del cambio climático sobre la producción agrícola de manera más completa, pues los modelos de cultivo pueden ser actualizados con las variables de suelos impactadas por los escenarios de cambio climático, además de las ya normalmente consideradas precipitación y temperatura.

Las variables disponibles con escenarios de cambio climático que son reportadas por “Servicios de consultoría para la evaluación del potencial productivo de los suelos de México que considere cambio climático” y por la consultoría “Evaluación integrada de la sensibilidad al cambio climático sobre los suelos y el potencial productivo agrícola” son las siguientes.

- Erosión hídrica
- Carbono Orgánico del Suelo
- Régimen de humedad y balance de humedad
- Régimen de temperaturas
- Evapotranspiración
- Productividad Primaria Neta

La erosión hídrica impacta en la pérdida de suelo por acción de la lluvia, en conjunto con otros factores. Un impacto inmediato es en la disminución de la profundidad del suelo. Generalmente la capa de suelo que se pierde por erosión hídrica corresponde a los horizontes superiores, los cuales contienen materia orgánica necesaria para el buen funcionamiento de la capacidad productiva del suelo. Por ello, la erosión hídrica impacta tanto en la profundidad como en la fertilidad de los suelos.

Para considerar la erosión hídrica de los suelos dentro del modelado de cultivo se procedió a recuperar la información generada por la consultoría “Servicios de consultoría para la evaluación del potencial productivo de los suelos de México que considere cambio climático”. Para determinar la erosión asociada a una estación se estableció un búfer de 15 km alrededor de la misma. Dentro del búfer se encontraron polígonos con diversos valores de erosión, por lo que fue necesaria una depuración considerando el criterio de área. Los polígonos con mayor superficie dentro del búfer se consideraron representativos hasta que sumaron el 85% del área. Con los polígonos depurados se realizó un promedio de la erosión existente dentro de los mismos. Considerando la densidad aparente de cada suelo se calculó la pérdida de suelo por erosión hídrica de forma laminar y se restó de forma acumulativa a la profundidad inicial. Los

datos de densidad aparente de acuerdo a las clases texturales fueron recuperados del Soil Survey Staff del USDA (USDA, 2015).

Después de un análisis que incluyó todos los estudios de caso trabajados en la consultoría, se obtuvieron los resultados denotados en el Anexo. La erosión hídrica no varió significativamente entre los modelos y los RCP's para los casos de estudio considerados en la presente consultoría. En cambio, si hubo diferencias notorias entre horizontes de tiempo.

Medidas de adaptación

México es un país vulnerable a los efectos del cambio climático. Para responder a la vulnerabilidad, son necesarias acciones basadas en un diagnóstico actual y futuro de dicha vulnerabilidad. Para medir la vulnerabilidad se recomienda la metodología del IPCC del 2007 (en función de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa).

La exposición está en función de las variaciones climáticas observadas y modeladas mediante escenarios de cambio climático y se refiere al tipo y grado o naturaleza, en los cuales un sistema está expuesta a las variaciones climáticas significativas (IPCC, 2007). La sensibilidad parte de un análisis de la problemática actual ambiental social y otras bajo un periodo base y proyectada para ciertos sectores de importancia; hace referencia al grado en que un sistema resulta afectado, positiva o negativamente, por la variabilidad o el cambio climático. Mientras que la capacidad adaptativa engloba los recursos humanos, financieros, institucionales, de conocimiento, entre otros que pueden impactar positivamente el proceso de adaptación.

Dentro de los trabajos realizados en la presente consultoría se atendieron los dos primeros factores de la vulnerabilidad: la exposición y la sensibilidad del rendimiento de algunos cultivos ante escenarios de cambio climático. La exposición fue analizada mediante la comparación entre la climatología histórica y la de 28 escenarios de cambio climático para los estudios de caso seleccionados en 6 cultivos. La variable objetivo fue la precipitación puesto que determina en mayor medida el rendimiento de un cultivo de temporal. La sensibilidad de los cultivos bajo escenarios de cambio climático se atendió mediante el modelado del rendimiento en el programa *Aquacrop*. Con ello se obtuvieron razones de cambio para las cuales fueron propuestas las medidas de adaptación. No se consideró la capacidad adaptativa puesto que el enfoque de la presente consultoría fue de carácter biofísico, aunque no se excluye una posterior complementación.

Una vez evaluada la vulnerabilidad es posible proponer y evaluar diferentes alternativas de adaptación a partir de múltiples enfoques.

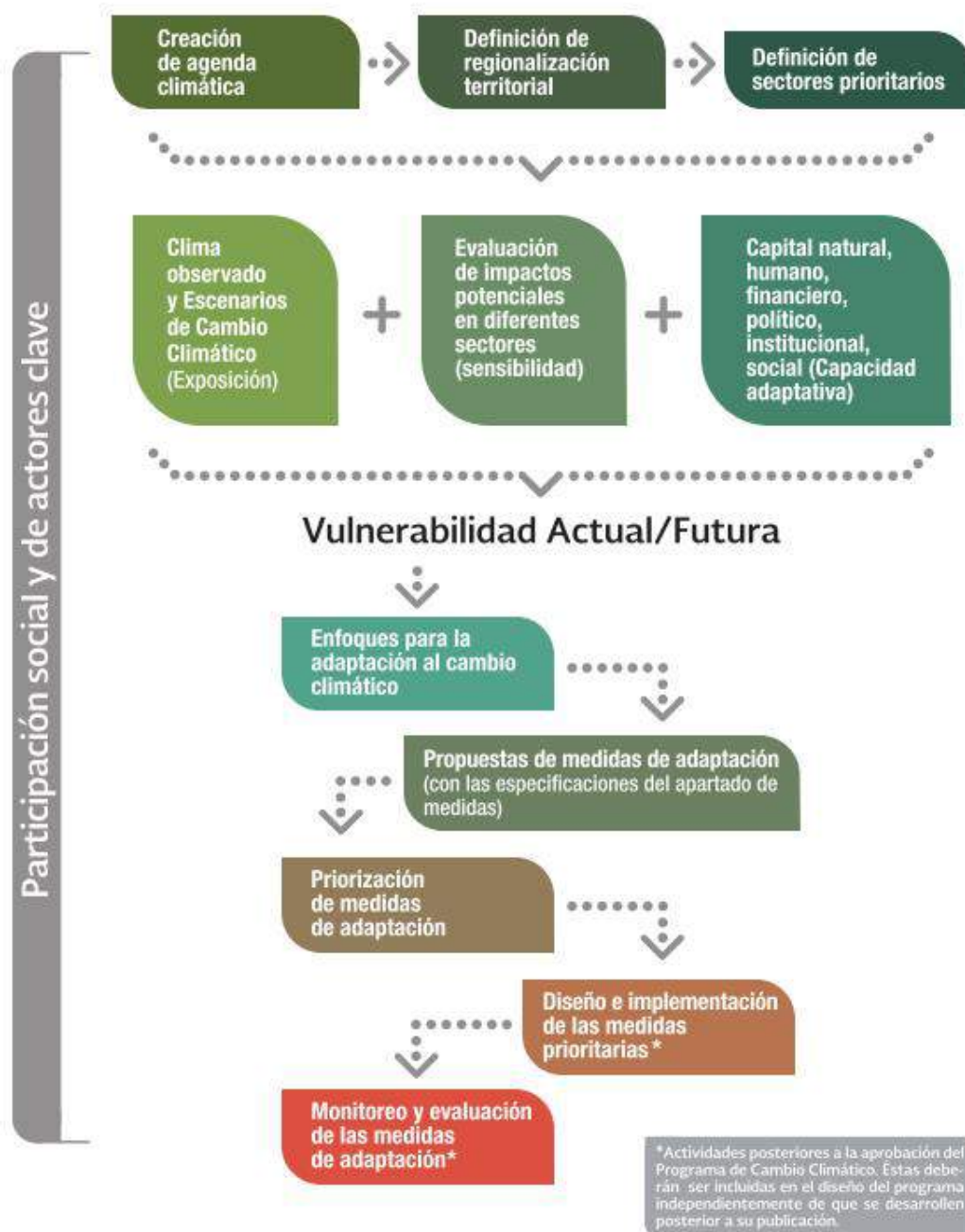


Figura 15 Diagrama del proceso de adaptación al cambio climático

Fuente: Tomado de (SEMARNAT-INECC, 2015).

Con base en SEMARNAT-INECC (2015) en nuestro país se han implementado diversos enfoques de adaptación, destacando los siguientes:

- Adaptación social ante el cambio climático
- Adaptación basada en ecosistemas
- Adaptación basada en comunidades humanas
- Reducción de riesgos y desastres

- Adaptación de la infraestructura estratégica y de los sistemas productivos.

De acuerdo a las condiciones de la consultoría “Estimación de rendimientos potenciales con escenarios de cambio climático para diversos cultivos agrícolas en México”, el tipo de adaptación propuesta se centrará en un enfoque de Adaptación de la infraestructura estratégica y de los ecosistemas productivos, particularmente en el agrícola.

Las medidas de adaptación propuestas deber tener las siguientes características.

- Factibles. Política, financiera, legal, técnica, social e institucionalmente factibles.
- Presupuestadas. Medibles y trazables financieramente
- Sinérgicas. Que contemplen beneficios de adaptación-mitigación.
- Cobeneficios. Adicionalidad positiva de las medidas en términos sociales, ambientales, económicos, etc.
- Alineadas. En armonía con la Ley, la Estrategia Nacional, el Programa Especial y otras disposiciones sobre cambio climático aplicables a México.
- Evaluables. Considerar una línea base y mecanismos para el seguimiento.
- Equidad. Enfoque de equidad de género.
- Credibilidad. Con sustento científico y aceptación cultural y social.
- No arrepentimiento. Verificar que la implementación de una acción en un sitio no tenga repercusiones negativas en otro.
- Reversibilidad. Planteamiento de medidas no duras y flexibles, especialmente en ecosistemas.
- Barreras. Considerar barreras legales, tecnológicas, económicas, sociales e institucionales.

Las medidas de adaptación que serán propuestas y evaluadas para enfrentar los efectos del cambio climático en el rendimiento de algunos cultivos en México retoman varios de los factores aplicables en la lista anterior y se basan en medidas que han sido contrastadas y probadas en diferentes casos con resultados exitosos.

Dentro de las medidas propuestas para adaptación en la agricultura se encuentra una diversidad que parte de diferentes cultivos, manejos, condiciones económicas y magnitud de la vulnerabilidad. La siguiente tabla presenta una serie de medidas de adaptación compiladas para efecto de evaluación del rendimiento de los cultivos contemplados en la consultoría. Fue diseñada con referencia a medidas de adaptación reportadas en fuentes científicas e institucionales.

Cuadro 7 Medidas de adaptación para agricultura

Medida	Acción específica a modelar	Impacto a atender	Plazo de ejecución	Alcance geográfico

Ajuste del periodo vegetativo	Cambio de la fecha de siembra	Inicio tardío de lluvias	Ajuste cada ciclo de cultivo (1 año)	Área de influencia climática (variable)
Incremento de la materia orgánica del suelo	Incremento de acolchado orgánico	Pérdida de la fertilidad y de la capacidad de retención de agua	Ajuste cada ciclo de cultivo (1 año)	Área de influencia climática (variable)
Inclusión de variedades precoces	Disminución de la fenología	Periodos de crecimiento reducidos	Prueba de varios ciclos productivos	Regional
Inclusión de variedades resistentes a sequía	Cambio en los coeficientes de estrés del cultivo	Baja productividad del agua	Prueba de varios ciclos productivos	Regional
Riego	Inclusión de láminas de riego	Disminución de la precipitación	Sujeto a disponibilidad	Local (parcela)
Configuración del terreno para retención de agua	Bordos	Pérdida de agua por escorrentía	Ajuste cada ciclo de cultivo (1 año)	Local (parcela)

Fuente: Elaboración propia con base en SEMARNAT-INECC (2015)

Es importante destacar que el programa *Aquacrop* es reconocido como una herramienta viable para explorar, proponer y evaluar medidas de adaptación particularmente en la agricultura de temporal, puesto que trabaja con un enfoque climático que habilita la interacción de escenarios de cambio climático con el modelado biofísico buscado (FAO - GIZ, 2012).

Una vez que se han propuesto una serie de medidas de adaptación, se deberán seguir una serie de pasos para priorizarlas y enfocar así los recursos a la atención oportuna de las más importantes (Scholze, 2013).

Todo proceso de adaptación al cambio climático deberá cubrir una fase de consulta y participación social con la cual se buscará comunicar y retroalimentar a los diferentes actores involucrados con la finalidad de validar y fortalecer las medidas de adaptación implementadas (SEMARNAT-INECC, 2015). Esta fase implica un trabajo de implementación de las medidas de adaptación que en la presente consultoría no abarcará.

RESULTADOS

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos en la presente consultoría, ordenados por cultivo y por estudio de caso. Para cada cultivo se describen sus características botánicas, la descripción de los requerimientos ambientales y las características fenológicas de forma general. En consiguiente se enlistan los estudios de caso considerando la climatología, el suelo, cultivo y manejo para cada sitio estudiado.

Asimismo, para cada estudio de caso se presenta el modelo base, un análisis de la biomasa histórica y su correspondiente afectación por estreses. Finalmente se analiza el impacto del

cambio climático en la cantidad y distribución de la precipitación, le biomasa y el rendimiento como punto culminante del estudio. De forma adicional se presentan las medidas de adaptación en los casos donde así aplique. Para consultar resultados resumidos, consultar los Anexos 4 y 5.

MAÍZ

Descripción botánica

El maíz es el cereal más importante para la alimentación mexicana y lo ha sido durante un largo periodo de tiempo debido a su centro de origen y la interacción económica y social con los pueblos. Las actuales variedades de maíz que se cultivan en México se generaron a partir del “teocintle”, el cual es reconocido como su ancestro silvestre que se remonta hasta 10 mil años atrás (ASERCA, 2013), aunque se reconoce que no es sino hasta al año 3000 a.C. cuando ocurrió la domesticación en cuatro zonas de México. El centro del origen del maíz es reconocido en la región de Mesoamérica que comprende el centro y sur de México hasta América Central (CONABIO, 2008).

El maíz pertenece a la familia *Poaceae* que es conocida también como gramínea. La subfamilia es la *Panicoideae*, mientras que la tribu es la *Maydeae*. El nombre científico es *Zea mays* (OECD, 2003). Se ha reportado que en México se encuentran distribuidas al menos 60 razas de maíz que fueron obtenidas a partir de las cruces de teocintles, la interacción con el clima y la diversificación de las prácticas agrícolas.



Figura 16 Riqueza conocida de maíces en México

Fuente: (CONABIO, 2008)

De acuerdo con la información reportada por CONABIO, al menos el 79% de los sitios con presencia de maíces nativos tiene de una a cuatro razas. Se ha documentado que algunas razas como los Cónicos y Tuxpeños, son ampliamente sembradas en México, mientras que otras como el Tepecintle y Jala, se encuentran en regiones restringidas y en pequeñas cantidades.

Además, existe una fuerte presión comercial para el uso de semillas mejoradas con diferentes paquetes tecnológicos que ha enfocado la atención de los agricultores hacia esas semillas.

El ciclo de vida del maíz, así como de varias gramíneas, es anual. El tallo es de porte robusto sin ramificaciones y puede alcanzar los 4 metros de altura para algunas variedades (CIBIOGEM, 1997).

La inflorescencia del maíz es monoica por lo que presenta las partes masculina y femenina separadas dentro de la misma planta. La inflorescencia masculina se conforma de una panícula que puede contener de 20 a 25 millones de granos de polen. La inflorescencia femenina contiene de 800 a 1000 granos ordenados en estructuras tipo espádices ubicados a los lados del tallo (CIBIOGEM, 1997). La polinización de las plantas se realiza con ayuda del viento, que transporta el polen de una planta a otra (polinización cruzada). El polen de la panícula masculina, arrastrado por el viento (polinización anemófila), cae sobre los estilos, donde germina y avanza hasta llegar al ovario; cada ovario fecundado crece hasta transformarse en un grano de maíz (SAGARPA-SIAP, 2016).

Las hojas son lanceoladas, alternas y paralelinervas. Las raíces son fasciculadas y en ocasiones presentan nudos que sobresalen del suelo (CIBIOGEM, 1997).

Requerimientos ambientales

De acuerdo con Sys, Van Ranst, Debaveye, y Beernaert (1993), el maíz tolera condiciones ambientales diversas pero no así las heladas. Las condiciones de temperatura extremas deben ubicarse entre los 14 y 40°C, lo que implica que valores abajo o arriba de esos valores no son tolerables para la planta. Por otro lado, OECD (2003) mencionan que el maíz no puede sobrevivir a temperaturas por debajo de los 0°C por más de 8 horas en las primeras etapas de desarrollo vegetativo.

A su vez, SAGARPA-SIAP (2016) mencionan que el maíz requiere mucha agua (5 mm diarios en promedio). Además, los requerimientos hídricos serán diferentes en cada etapa, aunque la floración es la etapa más crítica. Además, se ha establecido que para la siembra se requiere una temperatura del suelo de al menos 12°C, mientras que para la germinación se necesitan de 15 a 20°C (*Ibid.*, 2016).

A continuación, se muestra una tabla de requerimientos ambientales para el desarrollo del maíz.

Cuadro 8 Requerimientos ambientales para maíz

Variable	Referencia	Grado de aptitud			
		Alta	Moderada	Ligera	Nula
Precipitación del ciclo de crecimiento (mm)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	750-900	400-750	>1600	-
			900-1600	300-400	<300
Precipitación del anual (mm)	(FAO, 2007b)	600-1200	1200-1800	>1800	-
			400-600		<400
Temperatura media (°C)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	22-26	18-22	14-16	<14
			26-35	35-40	>40
	(FAO, 2007b)	18-33	10-18	-	<10
			33-47		>47

	(SAGARPA-SIAP, 2016)	25-30	>30	8-25	<8
Humedad relativa (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	42- >80	36-42	30-36	<30
Pendiente (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	0-2	2-4	4-6	>6
Profundidad del suelo (cm)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>75	50-75	20-50	<20
	(FAO, 2007b)	>150	50-150	20-50	<20
pH del suelo	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	6.2-7.8	5.5-6.2 7.8-8.2	5.2-5.5 8.2-8.5	<5.2 >8.5
	(CIBIOGEM, 1997)	6-7	-	>7 <6	-
	(FAO, 2007b)	5-7	7-8.5 4.5-5	-	<4.5 >8.5

Fuente: Elaboración propia con datos de referencias citadas

De acuerdo con CIBIOGEM, (1997) el maíz se adapta a diversos tipos de suelos, aunque se desarrolla bien en suelos profundos, ricos en materia orgánica y con buen drenaje. El maíz es particularmente adaptable a los ligeramente ácidos (SAGARPA-SIAP, 2016).

Desarrollo de fenología

El ciclo de crecimiento del maíz varía en función de las condiciones ambientales, las prácticas agrícolas y el potencial genético de cada individuo. No obstante, se reconocen ciertos rangos dentro de los cuales se desarrolla de manera normal.

Para diversos sitios donde se cultiva maíz en el ciclo de primavera verano se ha reportado que la siembra se realiza en el mes de mayo. Sin embargo, con base en SAGARPA-SIAP (2015) un 14% de los agricultores del país siembran en mayo, un 33% en junio y un 31% en julio considerando un cultivo de temporal. Las diferencias pueden deberse principalmente a las diferencias de condiciones climáticas en los estados del país, puesto que el periodo de crecimiento abarca fechas heterogéneas dependientes de cada sitio.

A nivel general se han clasificado a las etapas fenológicas en dos grupos: la etapa vegetativa y la reproductiva. La primera etapa tiene como objetivo producir la biomasa necesaria para asegurar el correcto funcionamiento fotosintético de la planta, mientras que la segunda se aboca a producir el grano desde la etapa de fecundación hasta la del llenado.

A continuación, se presenta un cuadro con dos referencias fenológicas para un ciclo largo y uno corto encontradas para México.

Cuadro 9 Etapas fenológicas de maíz

Etapas/Referencia	Ortiz, 1994 ¹⁰	(CIBIO GEM, 1997) ¹¹	Descripción
Germinación	15	9	Es visible el cuello de la primera hoja
Máxima cobertura	50	-	Se alcanza la máxima cobertura del suelo
Máxima profundidad radical	70	-	Las raíces alcanzan su máxima profundidad
Floración	90	57	Antesis o floración masculina. El polen se comienza a arrojar
Duración de la floración	20	-	Tiempo de fecundación
Inicio de madurez	110	71	<i>E</i> tapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede ver el embrión.
Senescencia	150	-	Inicio del declive de la actividad fotosintética
Madurez	180	112	Madurez fisiológica. La humedad de grano es de alrededor del 35%.

Fuente: Elaboración propia con base en Ortiz (1994) y CIBIOGEM (1997)

Debido a las condiciones heterogéneas en clima, manejo y variedad genética de México es absolutamente necesario evaluar las condiciones locales para el establecimiento y desarrollo del cultivo de maíz. Después de la madurez es posible proceder a la cosecha a partir de los meses de noviembre hasta enero. Para la agricultura de temporal en el ciclo primavera verano el 28% de la cosecha en México se realiza en noviembre, el 30% en diciembre y el 22% en enero (SAGARPA-SIAP, 2015). La cosecha, o “pizca”, se realiza de forma manual para la mayoría de la agricultura de baja tecnificación.

Los rendimientos reportados según Sys *et al.* (1993) van de 0.5 a 1.5 ton/ha en condiciones de manejo de temporal y poca tecnificación. En cambio, para manejos comerciales los rangos varían de 6 a 9 ton/ha.

Estudios de caso

El maíz es el principal cereal para México considerando el volumen de la producción, la superficie sembrada y el valor de la producción. La diversidad de agroecosistemas es tal que da motivo a que existan múltiples variedades, manejos y usos para el maíz a lo largo del territorio. La presente consultoría se abocó a estudiar tres casos de estudio repartidos en tres estados diferentes, considerando en importancia decreciente el criterio de presencia del cultivo, la estacionalidad de la producción, la vulnerabilidad del municipio y la cercanía a instituciones de investigación.

Considerando la metodología para elegir las estaciones a modelar, se eligieron tres estaciones ubicadas en municipios con diferentes tipos de climas (cálido, seco y templado). La siguiente figura muestra la distribución de las estaciones seleccionadas para efectuar el modelado del rendimiento.

¹⁰ Considerando un cultivo de maíz de temporal de largo periodo de crecimiento

¹¹ Considerando condiciones de un rango de temperaturas que oscilen de 22 a 33°C. Los autores remarcan que, para sitios más fríos, los días se amplían.



Figura 17 Distribución de las estaciones seleccionadas para maíz

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2008)

Para caso de estudio se realizó una revisión sobre la calidad de las series climáticas. Para ello se retomó la metodología utilizada por López (2016), la cual incluye un control de calidad bajo dos metodologías (método de desviaciones estándar y rangos intercuartílicos) y una prueba de homogeneidad con el programa RHtestV4. La importancia del control de calidad para el proceso de modelado reside en la confiabilidad de los datos para obtener resultados congruentes en el programa *Aquacrop*. Una vez efectuada la revisión climática se procedió a recopilar información paisajística y fenológica para cada caso de estudio. Con la información obtenida se calibraron los modelos de cultivo en el programa *Aquacrop* con ayuda de los datos observados por el SIAP. En los siguientes apartados se presentan los resultados correspondientes a cada estación modelada.

Atotonilco, Jalisco

La estación Atotonilco se encuentra en el municipio del mismo nombre, en el estado de Jalisco. Perteneció al Centro de Apoyo al Desarrollo Rural (CADER) de Atotonilco el Alto, que a su vez pertenece al Distrito de Desarrollo Rural (DDR) denominado La Barca. Por sus condiciones climáticas y tecnológicas se encuentra ubicada en una región con importante producción de maíz bajo riego, aunque también se lleva a cabo la producción de temporal. El cuadro 3 contiene información general sobre la estación.

Cuadro 10 Datos de referencia de la estación Atotonilco

Estación	ID ¹²	Vulnerabilidad ¹³	Fuente/referencia ¹⁴	Observaciones
----------	------------------	------------------------------	---------------------------------	---------------

¹² Número asignado por el Servicio Meteorológico Nacional para identificación

¹³ Vulnerabilidad del municipio conforme al Atlas de Vulnerabilidad al Cambio Climático

¹⁴ Origen de la propuesta de la estación, considerando el control de calidad climático

Atotonilco, Jalisco	14017	Media	Depuradas por López (2015)	Balace positivo productivo de 98 mil ton. Rendimientos de 7.35 ton/ha
---------------------	-------	-------	----------------------------	---

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación Atotonilco tiene como coordenadas geográficas 20.55° latitud norte y -102.51° longitud oeste, se ubica a una altura de 1600 msnm sobre una meseta basáltica con montañas, dentro de la subprovincia fisiográfica de los Altos de Jalisco (INEGI, 2010b).

Climatología

Como resultado del control de calidad con el programa RClimdex, se registraron cambios en la base de datos climáticos depurada por López (2016). No obstante, la temperatura no fue homogeneizada por lo que se llevó a cabo el proceso en el programa RH4test.

Dentro del proceso de control de calidad, la temperatura máxima presentó un “*change point*” o salto, el cual correspondió al mes de agosto de 2009, lo cual corresponde a un valor de MEI que se encuentra dentro del rango de la categoría de ENSO (El Niño Southern Oscillation) de moderado a fuerte, por lo cual la serie no fue homogeneizada. En cambio, la temperatura mínima presentó dos saltos, uno en junio del 1982 y otro en septiembre del 2000. Para el primer salto se encontró una coincidencia con un valor alto del MEI, por lo que la serie no fue homogeneizada. Para el segundo salto no se correspondió con ningún valor MEI extremo, por lo que se decidió revisar con las estaciones cercanas (estación 14090 La Yerbabuena, Jal). El comportamiento de salto se repitió para la zona, por lo que se no procedió a homogeneizar la serie para este periodo. En el Anexo 1 se encuentran las gráficas de cada variable como resultado del control de calidad. La estación presenta un rango de temperatura de 16 a 22°C anuales. La temperatura máxima presenta un máximo en los meses de abril a junio, aunque el pico de máxima es en mayo (Figura 2); no obstante, existe una mayor variación histórica en junio. Los meses más fríos respecto a la temperatura máxima son diciembre y enero. Por otro lado, la temperatura mínima presenta los valores más bajos de diciembre a febrero, aunque su variación es mayor con respecto a los meses intermedios del año. La mayor diferencia de la temperatura se presenta en la estación de invierno. La Figura 2 presenta los estadísticos históricos de la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha). En el eje “x” se observan los meses del 1 al 12, mientras que el eje “y” corresponde a los valores de temperatura en °C (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

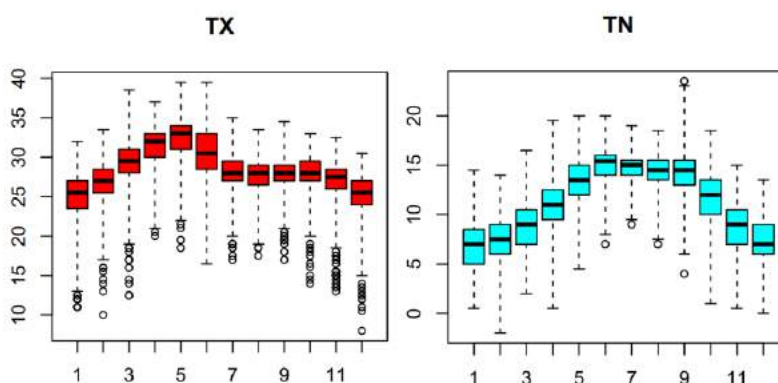


Figura 18 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Atotonilco

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

La precipitación anual histórica presenta un rango que va de 800 a 1000 mm anuales. Por las características de precipitación, la región es considerada con buen potencial productivo para la siembra de maíz. La evapotranspiración alcanza un máximo de 190 mm/mes en el mes de mayo, mientras que en los meses de diciembre y enero llega a 98 y 105 mm/mes respectivamente. En este sentido, el inicio del periodo de crecimiento se presenta a partir del mes de junio, mientras que el inicio del periodo húmedo se observa en julio. El periodo de crecimiento comienza el 26 de mayo, dura 146 días y termina el 18 de octubre; mientras que el periodo húmedo comienza el 10 de junio, dura 113 días y termina el 30 de septiembre. Los meses húmedos climáticamente hablando, donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración son julio y agosto. El fin del periodo húmedo se da en el mes de septiembre, así como el fin del periodo de crecimiento. En la Figura 3 se presenta el periodo de crecimiento de la estación.

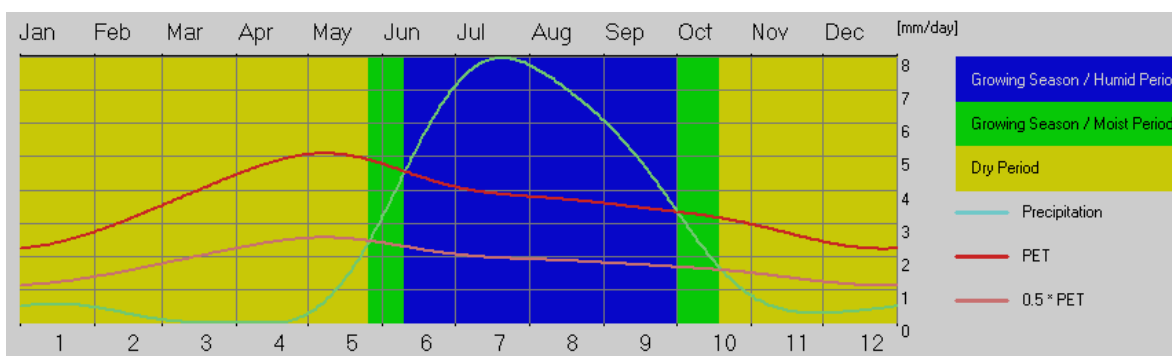


Figura 19 Periodo de crecimiento de la estación Atotonilco

Fuente: Elaboración propia con *software LocClim*

De acuerdo con INEGI, el municipio donde se ubica la estación presenta dos climas predominantes, el de tipo (A) Ca(wo)(w)(e) g semicálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad y el Cb(w1) (w)(i) g templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media por lo que las condiciones climáticas hacen propicia la siembra de maíz en esta región al presentar condiciones favorables de humedad en el desarrollo vegetativo del cultivo.

Cultivo, manejo y suelo

El maíz es considerado uno de los principales cultivos en la región Ciénega Chapala, Jalisco; en donde se ubica el municipio de Atotonilco el Alto. Esta región es considerada como de mayor potencial productivo en el estado, dado a su topografía de valle (Soltero *et al.*, 2011).

De acuerdo con SAGARPA-SIAP (2015), el 49.6 % de los agricultores del estado de Jalisco siembran el maíz de temporal durante el mes de junio y un 35.6% en el mes de julio; esto coincide con lo mencionado por Soltero *et al.* (2011) en el cual recomienda sembrar durante el mes de junio y la primera semana de julio en la región.

La densidad de plantas para esta región es de 70 000 a 90 000 semillas por hectárea (Soltero, Garay, & Ruiz, 2010), con un rendimiento promedio de 7.6 y 9 ton/ha en el ciclo primavera-verano (SAGARPA 2006 citado por Soltero *et al.*, 2010).

Carrera (2013) menciona que la raza dominante en la región de la Ciénega Chapala es la de Mesa central (*Zea mays* L *ssp* parviglumis Iltis & Dudley), son plantas que se distinguen por ser robustas con 3.5 m de altura, y un crecimiento tardío de 80 a 120 días a la floración (CONABIO, 2016b). Por ello, el ciclo total del maíz es de 150 días aproximadamente, lo que equivaldría a 5 meses.

En el municipio de Atotonilco el Alto, dominan tres tipos de suelos: Phaeozem 51.95%, Vertisol 34.57% y Luvisol 11.58% (INEGI, 2009b). De acuerdo a INEGI (2004), los suelos phaeozem

son de profundidad muy variable y de una capa superficial oscura, utilizados principalmente para la agricultura por ser ricos en materia orgánica y nutrientes, de ahí que los rendimientos de hortalizas y granos son altos, mientras que los suelos vertisoles, son suelos con una marcada estación seca y otra lluviosa, con alto contenido de arcillas; por último los suelos luvisoles son de profundidad no más de 10 cm de color rojo a pardo, susceptibles a la erosión.

Modelo base

El modelo de *Aquacrop* para maíz en la estación Atotonilco tuvo un buen ajuste a los datos reportados por el SIAP en promedio. El promedio de rendimientos de los años 2000 al 2011 para el municipio de Atotonilco fue de 7.22 ton/ha bajo un manejo de temporal en ciclo primavera verano según SIAP. El modelo *Aquacrop* proyectó un rendimiento de 6.58 ton/ha en promedio para los mismos años, lo que implica una diferencia de 640 kg/ha, es decir, menos del 10% de diferencia.

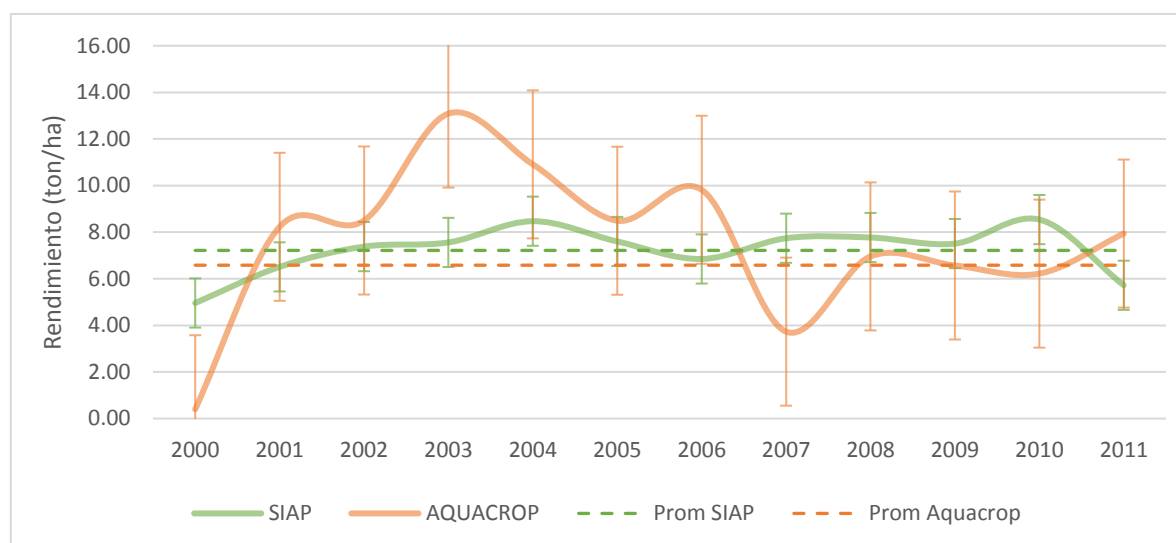


Figura 20 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Atotonilco

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

De acuerdo con los datos registrados en el proyecto Desinventar, en los años 2003 y 2007 se registraron eventos de inundaciones; ambos acontecimientos tuvieron como causa lluvias que inclusive derivaron en el desbordamiento de ríos.

En la figura siguiente se presentan los rendimientos observados por el SIAP en comparación con el modelado por *Aquacrop* como escenario base para la estación de Atotonilco. Para mayor referencia, las líneas corresponden a los rendimientos (eje izquierdo), mientras que las barras presentan la precipitación anual (eje derecho).

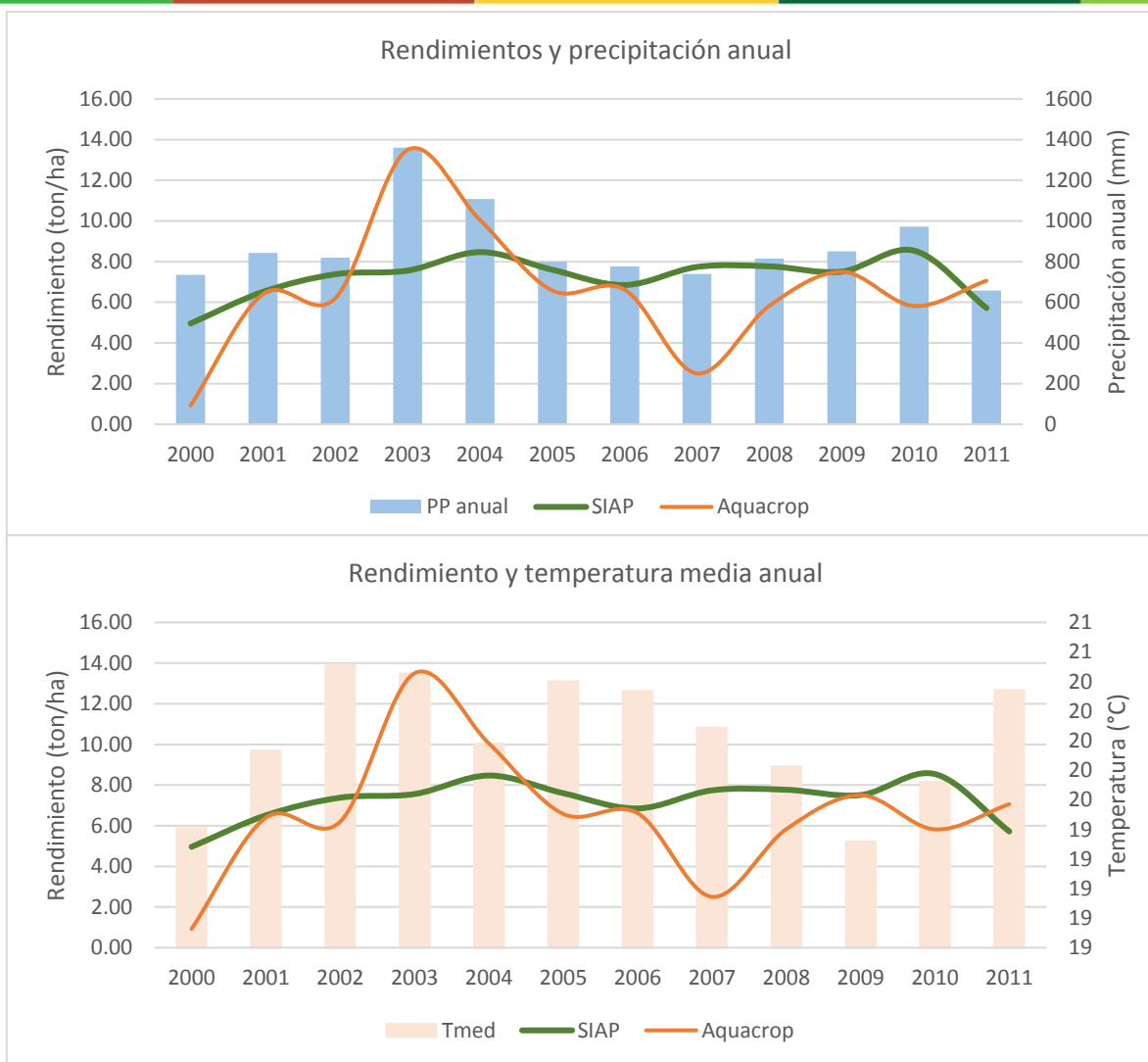


Figura 21 Modelo base para maíz en Atotonilco, Jal.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

De este modo, el rendimiento reportado por el SIAP para el municipio es de 7.2 ton/ha con manejo de temporal en el ciclo primavera-verano, mientras que el rendimiento modelado por *Aquacrop* fue de 6.37 ton/ha durante un periodo de años de 11 años (2000-2011).

El error medio cuadrático de ambos rendimientos fue de 2.86 ton/ha, por otra parte, la correlación del rendimiento por el SIAP y la lluvia fue de 0.50, en cambio la correlación con el rendimiento de *Aquacrop* fue más alta (0.80) con la precipitación. Ello implicará que el modelo *Aquacrop* será más sensible a los cambios en la precipitación. En la Figura 5 se muestra la dispersión de puntos comparando la precipitación contra el rendimiento para los datos del SIAP y los generados por *Aquacrop*.

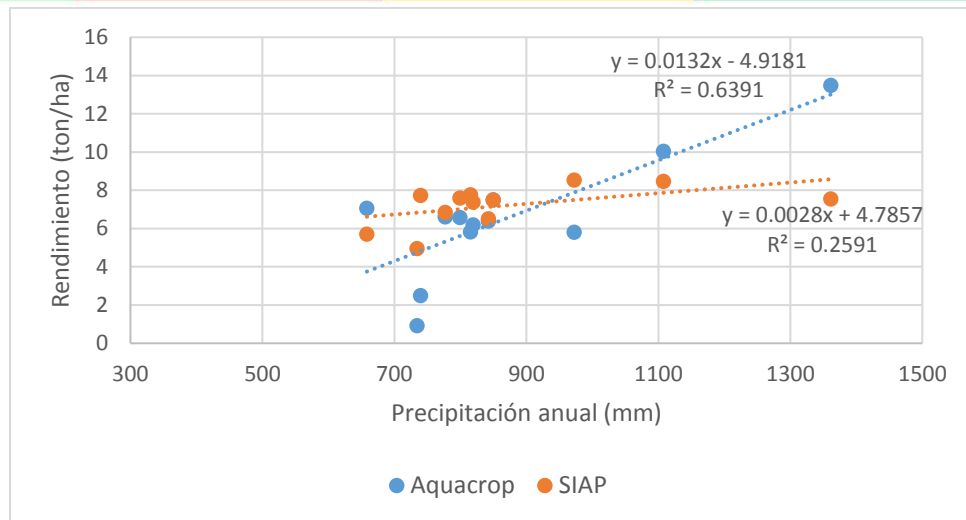


Figura 22 Relación de rendimiento con precipitación en estación Atotonilco

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El *software Aquacrop* procesa el rendimiento mediante un balance hídrico, un cálculo de la biomasa producida y una partición de la misma mediante un índice de cosecha. En promedio considerando un periodo de tiempo del 1996 al 2011 la producción de biomasa fue de 13.68 ton/ha. No obstante, el programa *Aquacrop* también calcula la biomasa potencial que podría alcanzarse si no se tuvieran ninguna limitante en fertilidad, humedad, plagas y otros efectos sobre el cultivo. El promedio de biomasa potencial fue de 33.45 ton/ha, es decir 19.7 ton/ha más que la producida.

En la Figura 6 se presenta un gráfico que muestra la biomasa producida (calculada pro *Aquacrop*) y la biomasa potencial (eje izquierdo, en líneas). Puesto que el modelo fue sensible a la precipitación, las barras (eje derecho) esquematizan la lluvia que se registró únicamente durante el periodo de crecimiento del cultivo.

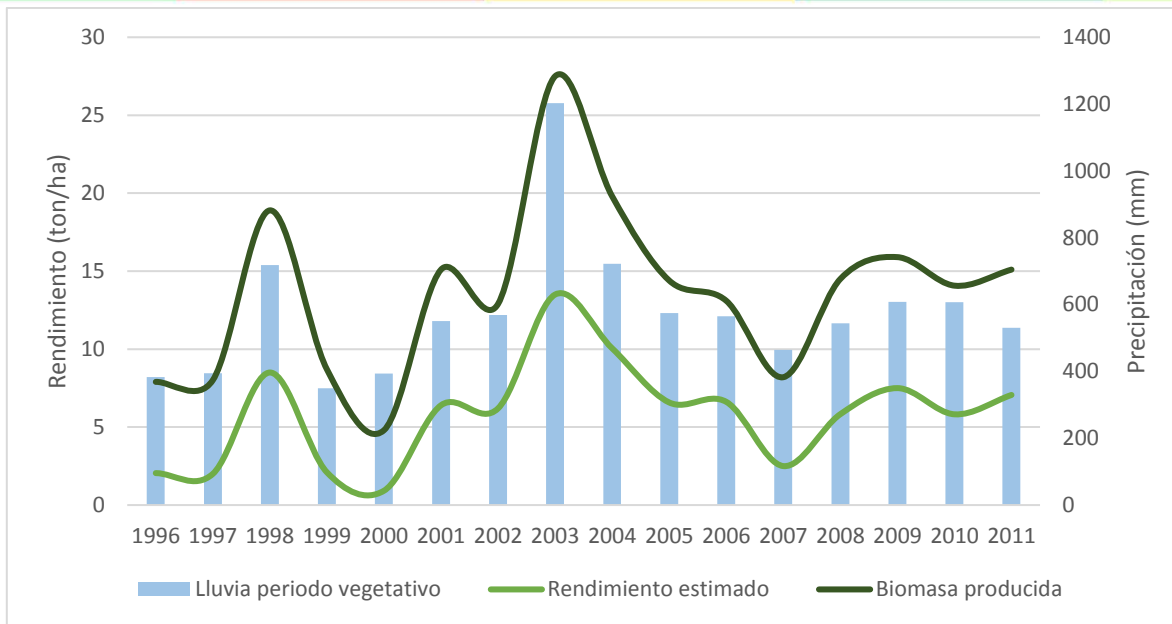


Figura 23 Rendimiento y biomasa producida en la estación Atotonilco

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Cabe mencionar que el modelo fue sensible ante la disminución de la precipitación que significó el año Niño de 1997. En dicho año, el rendimiento cayó un 34% respecto al promedio, lo que implicó 3.85 ton/ha menos.

Escenarios de cambio climático

La época de lluvia del escenario base, reportada por el Servicio Meteorológico Nacional, es marcada por cuatro meses julio-septiembre, con una precipitación promedio de 200 mm en el municipio, la cual se puede percibir por la línea negra continua de la siguiente gráfica.

Por otra parte los escenarios con cambio climático muestran una conducta similar al escenario base, no obstante, los escenarios no proyectan en su totalidad un aumento en la precipitación, sin embargo los escenarios del RCP 4.5 identificados por una línea gris continua proyectan menos diferencia a la precipitación histórica, situación opuesta a los escenarios del RCP 8.5 representado por la línea gris discontinua, donde se percibe una disminución en la precipitación, durante los meses que involucran la época de lluvia considerada.

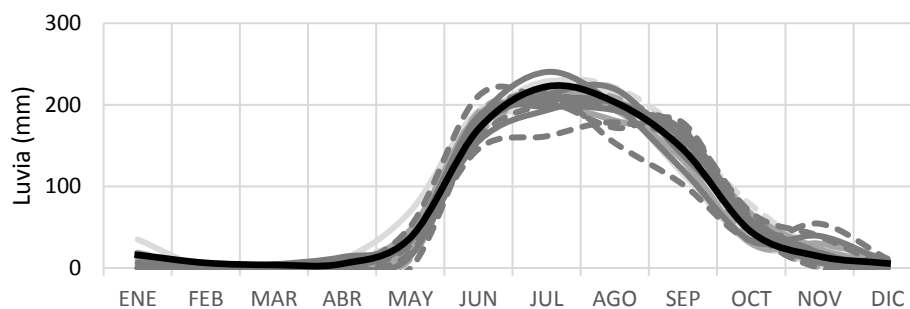


Figura 24 Precipitación con cambio climático en Atotonilco, Jal.

Fuente: Elaboración propia

El rendimiento de biomasa proyectado por el escenario base fue de 5.85 ton/ha, sin embargo, bajo condiciones de cambio climático, este rendimiento experimenta diferentes cambios en ambos RCP. En el horizonte cercano los modelos del RCP 4.5 tienden a disminuir, mientras que el RCP 8.5 ofrece un incremento en el rendimiento; al pasar al horizonte medio (2045-2069) esta situación se invierte favoreciendo al RCP 4.5, sin embargo, a partir de este horizonte el RCP 8.5 manifiesta una tendencia en picada con rendimiento de hasta 1 ton/ha para el horizonte lejano (2075-2099).

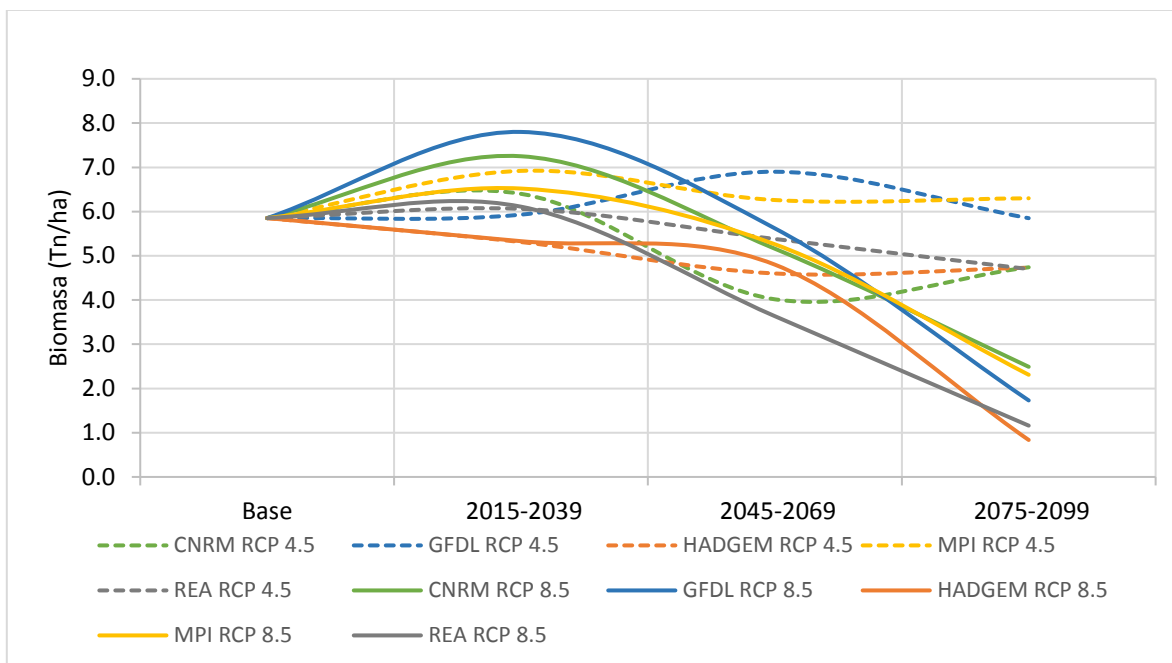


Figura 25 Biomasa bajo cambio climático para Atotonilco, Jal.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento de maíz para el municipio de Atotonilco bajo condiciones de cambio climático seguirá siendo favorecedor durante el horizonte cercano (2015-2039), con escenarios que prevén un incremento de hasta 33%, por otro lado, en el horizonte medio (2045-2099) el rendimiento disminuye, teniendo un cambio negativo en la mayoría de los escenarios en promedio de -20%. Por lo que respecta al horizonte lejano (2075-2099), los rendimientos proyectan un cambio aún más negativo, algunos de los escenarios proyectan hasta un -80% en el rendimiento.

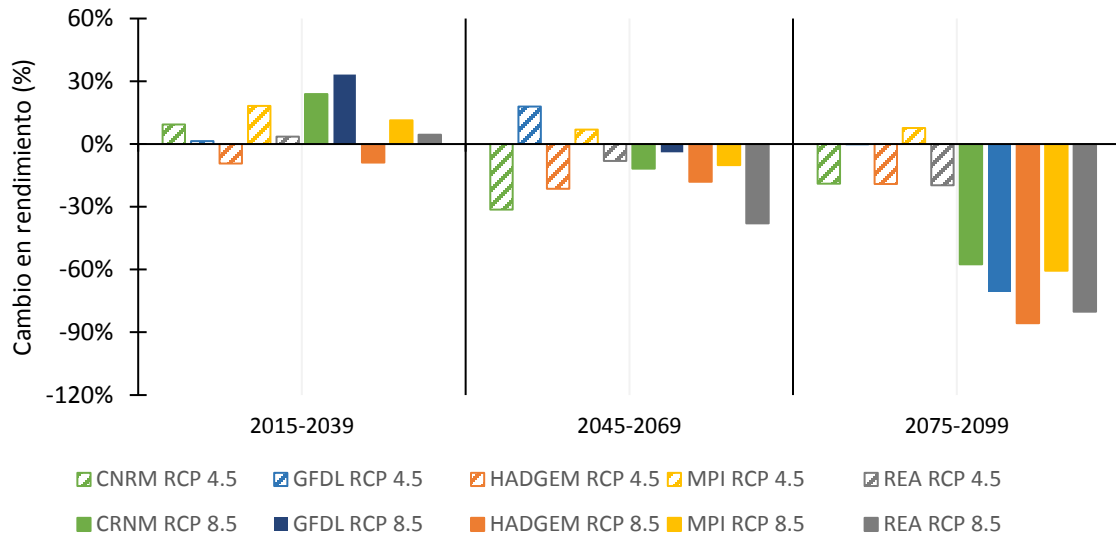


Figura 26 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Atotonilco, Jal.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Se aplicaron cuatro medidas de adaptación, de las cuales dos tuvieron una respuesta favorable con un cambio en el rendimiento del 50 % en promedio, tal es el caso de la medida de fenología y el riego, sin embargo, las medidas de cambio de fecha de siembra y acolchado también podrían ser consideradas para beneficiar un aumento en el rendimiento.

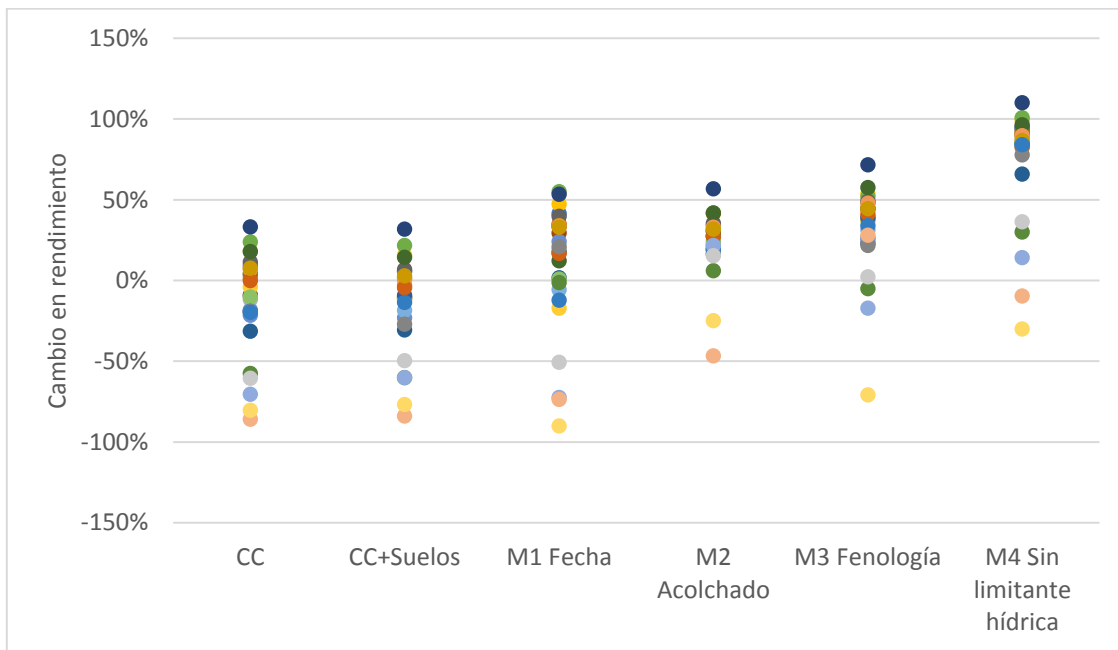


Figura 27 Medidas de adaptación para Atotonilco, Jal.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Juchitán de Zaragoza, Oaxaca

La estación de Juchitán se encuentra en el sur del estado de Oaxaca, en la vertiente del pacífico. Pertenece al municipio de Juchitán de Zaragoza, el cual se encuentra dentro del CADER de

Juchitán. A su vez, la región productora se agrupa dentro del DDR “Istmo”. La producción de maíz en la región se realiza bajo un manejo de temporal con bajos insumos y se espera que bajo escenarios de cambio climático la vulnerabilidad del municipio se incremente. La estación asociada a esta zona presenta las siguientes características.

Cuadro 11 Datos de referencia de la estación Juchitán

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Juchitán de Zaragoza, Oaxaca	20048	Alta	Depuradas por López (2015)	Balace de producción negativo (11 mil toneladas). Rendimiento de 900 kg/ha

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación climática de Juchitán se encuentra en los 16.44° latitud norte y -95.02° longitud oeste, a 30 msnm. La topografía dominante de la zona donde se encuentra la estación son las llanuras costeras, en la subprovincia fisiográfica de la llanura del Istmo.

Climatología

La depuración de (López, 2016) arrojó como resultado ciertos cambios en las bases de datos climáticas. Estos cambios fueron el resultado del proceso de control de calidad y homogeneización de los datos. En el Anexo 1 se encuentran las gráficas de la temperatura y precipitación de los últimos años, datos con los cuales fue modelado el rendimiento del cultivo de maíz.

La precipitación normal de un año en Juchitán va de 800 a 1200 mm anuales. Los meses con mayor precipitación son de junio a septiembre, lo cual coincide con la región de precipitación del Istmo. La evapotranspiración es mayor en los meses de marzo a agosto, ubicándose por encima de los 160 mm mensuales. En función de la precipitación y la evapotranspiración es posible determinar que el inicio del periodo húmedo se da a finales del mes de mayo, mientras que el inicio del periodo húmedo es en junio. Se registran cuatro meses con humedad climática disponible hasta septiembre, cuando termina el periodo húmedo. El periodo de crecimiento finiquita en octubre. A continuación, se presenta un diagrama que muestra la distribución de la precipitación durante el año, así como la intersección con la evapotranspiración lo que marca un periodo húmedo que va de junio a septiembre.

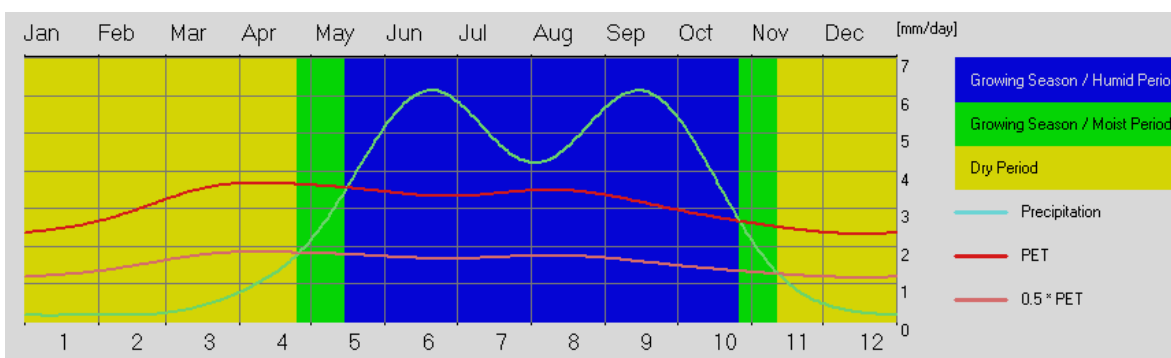


Figura 28 Periodo de crecimiento de la estación Juchitán

Fuente: Captura de pantalla en el software *CliCom*

El comportamiento de la temperatura tiene un máximo en el mes de mayo y un mínimo en los meses de diciembre y enero. La temperatura máxima se alcanza en el mes de mayo, mientras que

la temperatura mínima ocurre en los meses de enero y febrero. Existe una mayor variabilidad en la temperatura mínima en los meses de mayor frío, aunque la diferencia entre temperaturas cálidas y frías disminuye a mitad de año. En la siguiente gráfica se muestra la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) con sus respectivas escalas. (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

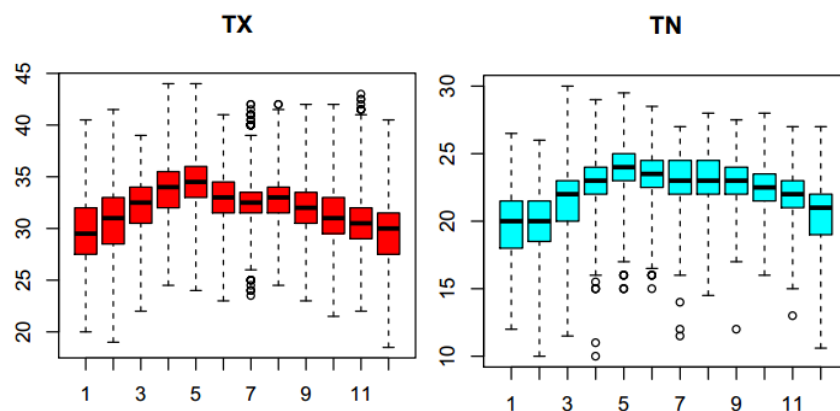


Figura 29 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Juchitán

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

El municipio de Juchitán presenta un clima de tipo cálido seco o “Cálido subhúmedo con lluvias en verano menos húmedo” [Awo(w)igw] de acuerdo con la carta de climas de Koppen modificada por García. Una fracción muy pequeña del municipio presenta clima cálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad media, pero no es significativo.

Cultivo, manejo y suelo

En el Istmo y particularmente en el municipio de Juchitán, el maíz ha tenido una importancia destacable en la producción, consumo y la diversificación en los usos. Inclusive se ha reportado que en el municipio de Juchitán de Zaragoza se dedica un día para celebrar el Día del Maíz (Juchitán, 2016).

El maíz de temporal en el municipio de Juchitán se siembra en los meses de junio y julio principalmente, lo cual coincide con la fecha de siembra de la mayor parte del estado de Oaxaca. El 50% de los productores siembran en junio y el 25% en julio, de acuerdo con datos de SAGARPA-SIAP (2015). Esto coincide con el inicio del periodo húmedo y con el inicio de las lluvias en la región.

Para la región del centro de Oaxaca se ha indicado que la densidad de siembra varía de 50 a 55 mil plantas por hectárea (*Ibid*, 2015).

La variedad predominante en el Distrito del Istmo y particularmente en la zona de Juchitán es el Zapalote chico (Cuevas, 2011). Esta variedad tiene la característica de alcanzar de 1.5 a 2.3 metros, los días a la floración van de 42 a 50 días y la madurez se alcanza de 85 a 95 días después de la siembra, lo cual la coloca como una variedad precoz (*Ibid*, 2011).

Se ha caracterizado que los rendimientos de la variedad Zapalote pueden variar en promedio de 1.73 a 2.97 ton/ha (Cabrera-Toledo, Carballo-Carballo, & Aragón-Cuevas, 2015).

Dentro de las características particulares que se han identificado en este maíz es su potencial hídrico bajo sequía; su resistencia al viento, al acame, al calor, a enfermedades foliares y al gusano cogollero (CONABIO, 2016a).

Los suelos predominantes en el municipio son Vertisol (20.89%), Phaeozem (16.39%), Arenosol (7.29%) de acuerdo con (INEGI, 2010a). Los suelos de tipo vertisol, se caracterizan por su alto contenido de arcilla, cuando este se humedece se expande formando superficies de deslizamiento llamadas *facetas*, por otra parte, son suelos duros los cuales llegan a dificultar la labranza, sin embargo, la erosión es baja en ellos. En cambio, los phaeozem se identifican por su alto contenido de materia orgánica, solo si se encuentran en zona de valle suelen ser profundos. Los suelos arenosol se ubican principalmente en el sureste de México, se caracterizan por una alta permeabilidad aunque no son buenos para la *retención* de agua y el almacenamiento de nutrientes (INEGI, 2004).

De acuerdo con los perfiles de suelo reportados por (INEGI, 2005), la textura predominante de las zonas agrícolas es de tipo fino, ubicándose en la categoría de textura franca o franca limosa.

Modelo base

El modelo de *Aquacrop* ajustado para el escenario base se maíz en la estación de Juchitán se presenta en la siguiente figura. En promedio, el rendimiento reportado por el SIAP para el municipio de Juchitán con manejo de temporal del ciclo primavera verano es de 0.99 ton/ha. El modelo *Aquacrop* proyectó 1.34 ton/ha para los 11 años modelados (2000-2011), lo cual expresa una diferencia de 350 kg/ha de diferencia entre el modelo y lo observado.

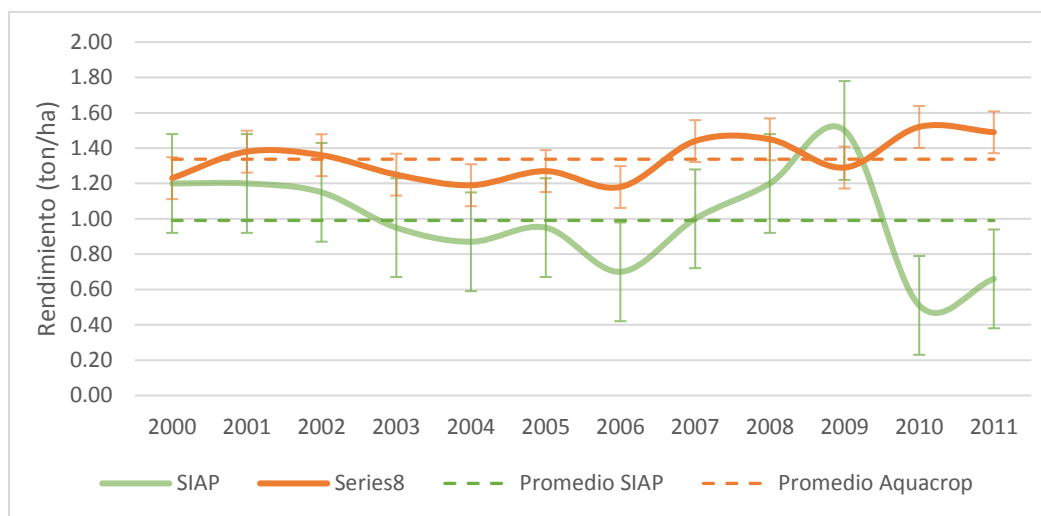


Figura 30 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Juchitán

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

A continuación, se presentan dos gráficas que comparan los rendimientos modelados y observados con la precipitación anual y la temperatura media anual. Para mayor referencia, las líneas corresponden a los rendimientos (eje izquierdo), mientras que las barras presentan la precipitación anual (eje derecho).

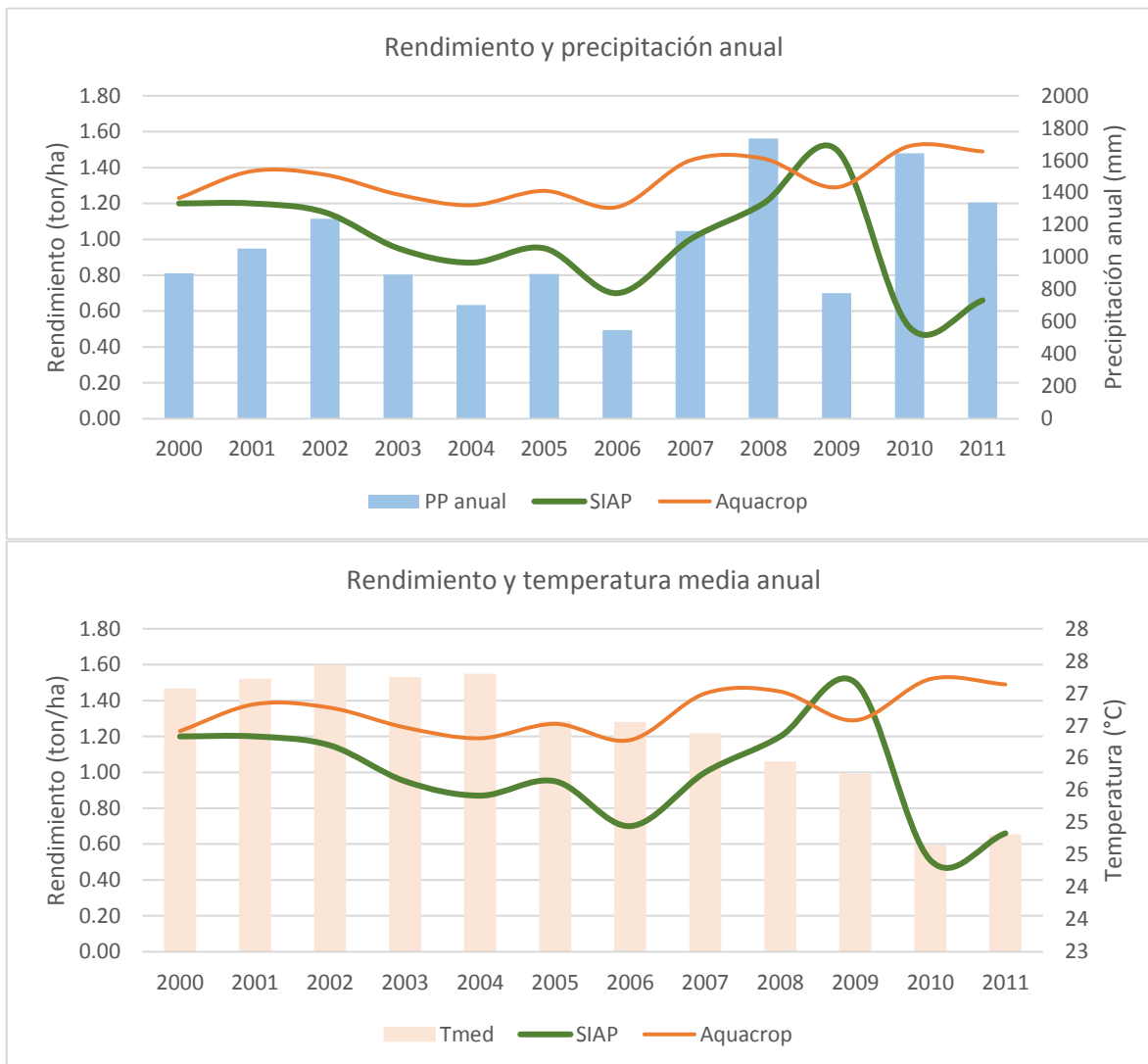


Figura 31 Modelo base para maíz en Juchitán, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En una revisión de Cabrera-Toledo *et al.* (2015), la variedad de maíz sembrada en la región presentó rendimientos de 1.73 a 2.97 ton/ha de forma experimental, bajo ciertas condiciones de manejo. El error medio cuadrático fue de 0.47 ton/ha, lo cual implica que el modelo se equivoca en esa cantidad.

Cabe destacar que los datos de rendimiento de SIAP presentaron correlación muy baja e inclusive negativa (-0.2) con la precipitación anual. En cambio, el modelo de *Aquacrop* fue más sensible a la lluvia al arrojar un coeficiente de correlación de 0.90 entre ambas variables.

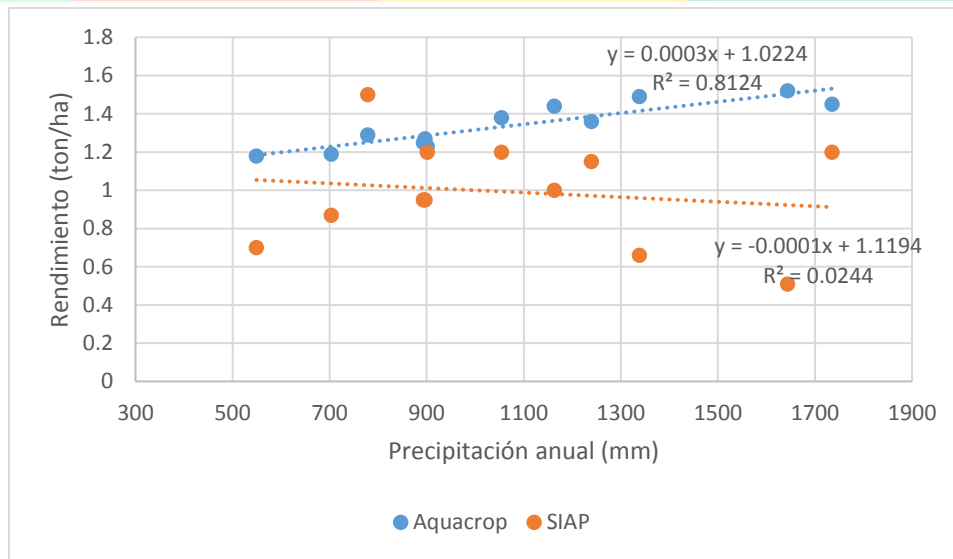


Figura 32 Relación de rendimiento con precipitación en estación Juchitán

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El promedio de producción de biomasa considerando los años desde 1990 al 2011 fue de 4.35 ton/ha. No obstante, la biomasa potencial fue de 10.69, lo cual implica que se produjo al menos 6.34 ton/ha menos que las que podrían ser alcanzadas sin ninguna limitante de agua, fertilizante o plagas. Siguiendo la respuesta del modelo ante la precipitación se presenta la gráfica siguiente que muestra en barras la lluvia del periodo vegetativo.

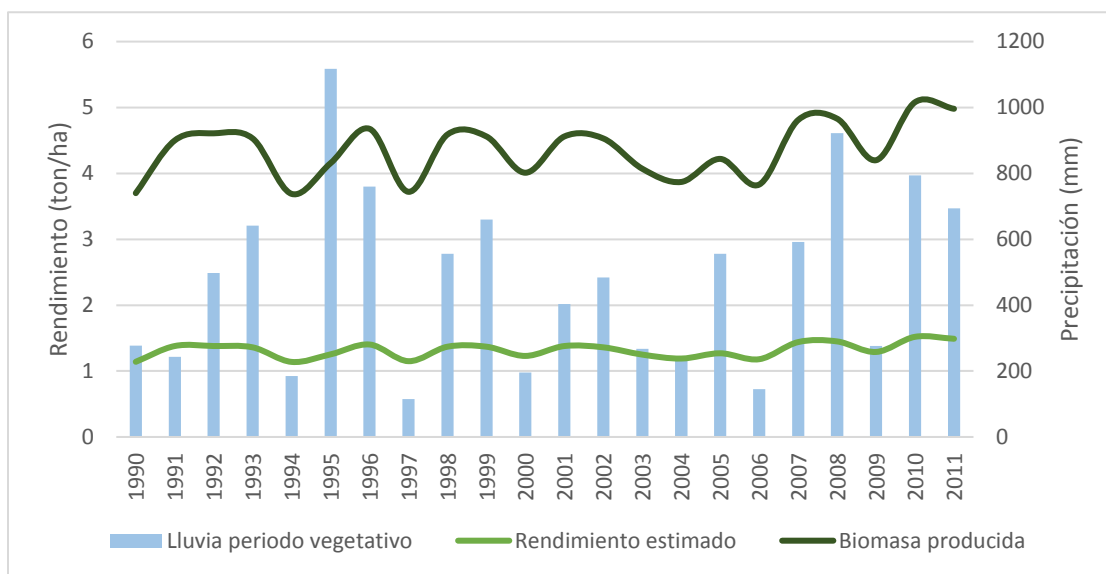


Figura 33 Rendimiento y biomasa producida en la estación Juchitán

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El comportamiento de la biomasa producida y del rendimiento estimado para el año 1997 fue a la baja, pues se cosecharon al menos 170 kg/ha menos que el promedio lo cual implica un 13%

menos. La biomasa tuvo una reducción de 630 kg/ha que se tradujo en un 15% menos respecto al promedio de 1990-2011.

Escenarios de cambio climático

Bajo condiciones de cambio climático, la precipitación de la estación de Juchitán podría experimentar decrementos y cambios en la distribución intra anual, como lo muestra la siguiente figura. La precipitación histórica marcada por la normal climatológica reportada por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra con la línea negra, mientras que los escenarios de cambio climático tienen una coloración gris continuo para RCP de 4.5 y una línea puntada para RCP de 8.5.

La distribución intra anual de la precipitación presenta dos picos, uno en junio y otro en septiembre. La mayoría de los escenarios de cambio climático indican una disminución de la lluvia desde junio hasta agosto, incrementando la cantidad de la misma de septiembre a diciembre (Figura34).

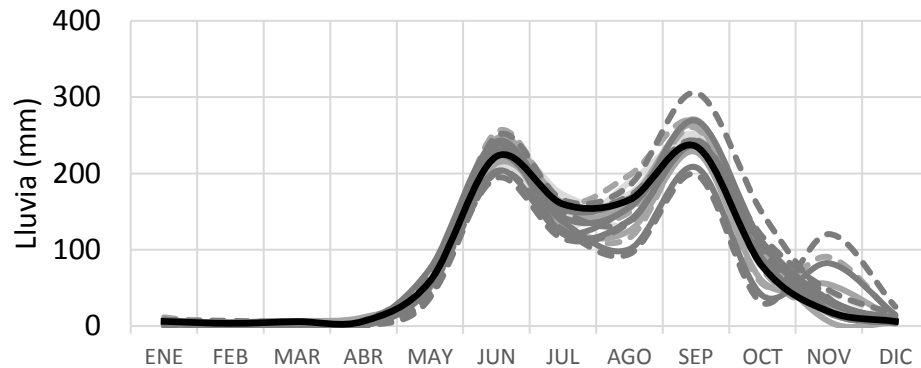


Figura 34 Precipitación con cambio climático en Juchitán, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La biomasa del escenario histórico fue de alrededor de 4.3 ton/ha, mientras que los escenarios de cambio climático indican incrementos y decrementos en el horizonte cercano. El modelo CNRM-CM5 y GFDL-CM3 plantean incrementos, mientras que los modelos MPIECHAM-5 y el Ensamble REA prevén disminuciones. La siguiente figura muestra la gráfica de biomasa para la estación de Juchitán con escenarios de cambio climático.

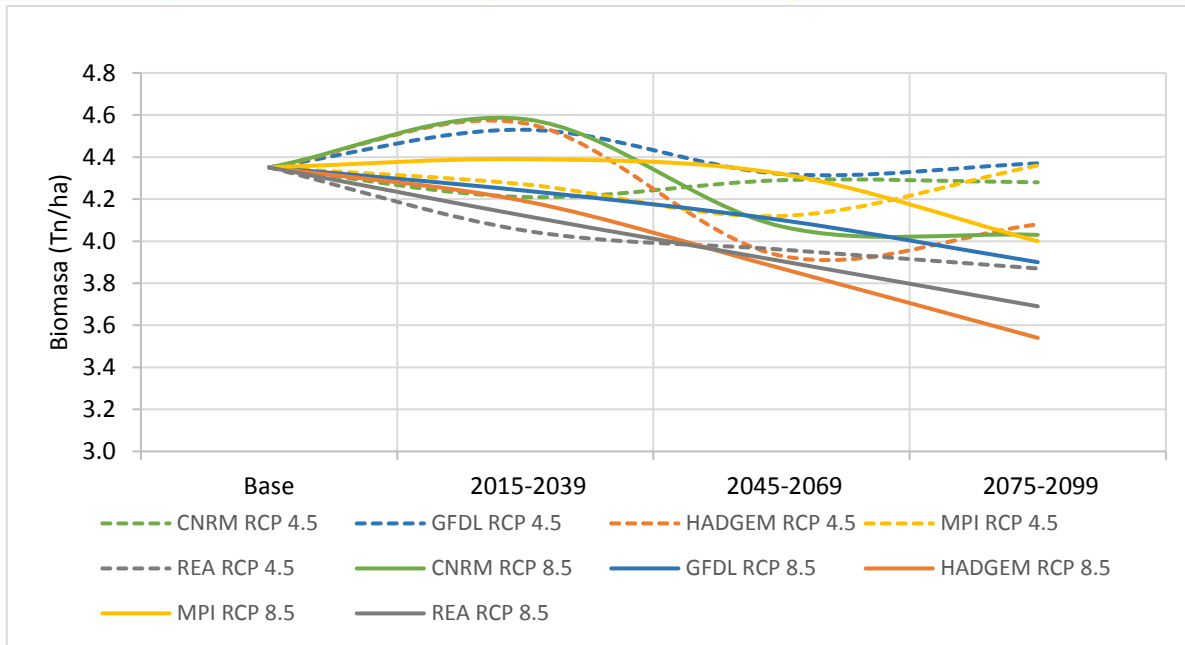


Figura 35 Biomasa bajo cambio climático para Juchitán, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software *Aquacrop*

El rendimiento, al ser un resultado de la biomasa, presenta similares tendencias respecto al comportamiento de la biomasa, aunque es la variable de mayor importancia. En el horizonte cercano, algunos escenarios prevén incrementos del 5%, para el horizonte medio la mayoría de los escenarios coinciden en decrementos del 10% mientras que en el horizonte lejano todos los escenarios, excepto dos, prevén disminuciones de un 10 a un 15% menos respecto al escenario base.

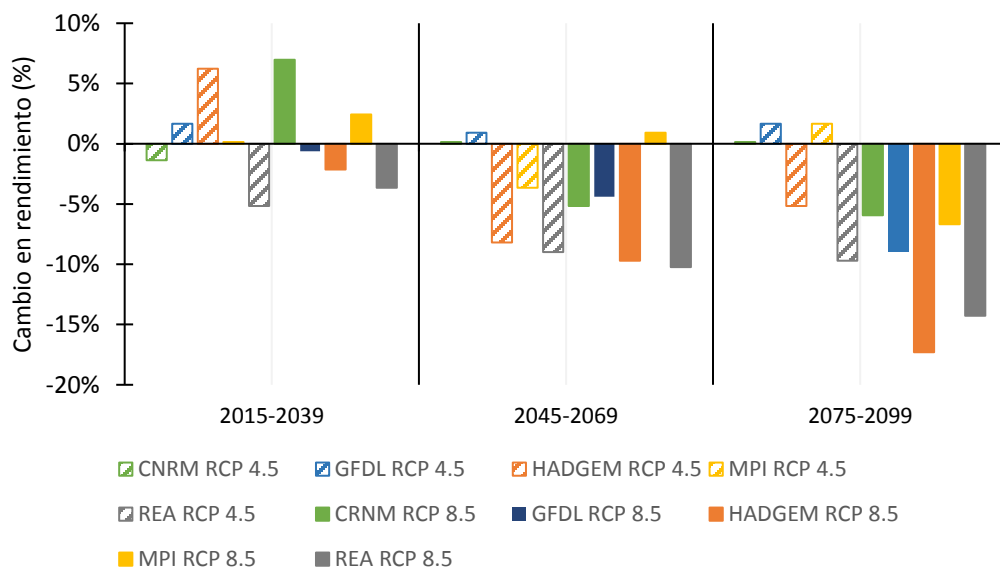


Figura 36 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Juchitán, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software *Aquacrop*

Las medidas de adaptación probadas resultaron proyectar rendimientos mayores a los obtenidos con escenarios de cambio climático únicamente. La medida de un cambio en la fecha de siembra proyectó incrementos y decrementos que en promedio se ubicaron en un cambio de 0% respecto al escenario base. Por otro lado, la medida de acolchados implicó que la mayoría de los escenarios reportaron incrementos en el rendimiento. La medida de un cambio en la fenología de crecimiento arrojó resultados similares a la del cambio de acolchados, mientras que la aplicación de una lámina de riego proyectó incluso resultados menos favorecedores.

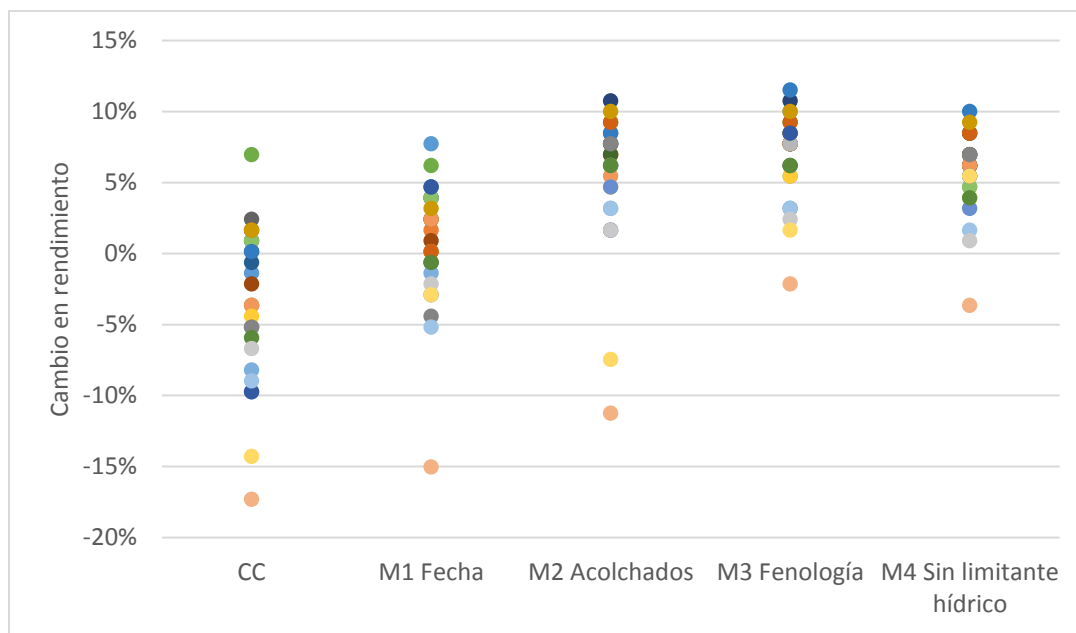


Figura 37 Medidas de adaptación para Juchitán Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software *Aquacrop*

Con base en los resultados obtenidos de las medidas de adaptación, es posible resaltar los resultados de la aplicación de acolchados orgánicos y el cambio de la fenología para buscar ciclos de crecimiento más precoces y variedades más resistentes.

Cuencamé, Durango

La estación de Cuencamé se encuentra en el municipio del mismo nombre, en el estado de Durango. El municipio pertenece al CADER Cuencamé, el cual se encuentra dentro del DDR de Guadalupe Victoria. La agricultura de temporal que se practica en esta zona enfrenta un clima árido con difíciles condiciones hidrometeorológicas, por lo que bajo cambio climático se podrían agravar esas condiciones haciendo más difícil la subsistencia del sistema productivo tal como hoy se practica.

A continuación, se presentan algunas características relevantes de la estación.

Cuadro 12 Datos de referencia de la estación Cuencamé

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Cuencamé, Durango	10012	Baja	Primer filtro de López (2015)	Balance neutro con 766 ton a favor. Rendimientos bajos (1.75 ton/ha)

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación se encuentra localizada en los 24.87° latitud norte y -103.70° longitud oeste, a 1600 msnm, se ubica muy cerca de los límites de dos topoformas: sierra baja con lomerío y sierra baja escarpada. Ambas topoformas pertenecen a la subprovincia fisiográfica de Sierras y llanuras del norte de acuerdo con INEGI.

Climatología

La estación de Cuencamé fue depurada por López (2016) y se registraron diversos cambios dentro de los que se encuentran las gráficas de control de calidad en el Anexo 1.

La precipitación del municipio de Cuencamé se encuentra dentro del rango de los 200 a los 600 mm anuales históricamente. Los meses donde se concentra la mayor precipitación son de julio a septiembre, aunque aquella no alcanza los 90 mm mensuales. Por otro lado, la evapotranspiración alcanza un máximo en los meses de mayo y junio por encima de los 200 mm mensuales, lo que ocasiona que la disponibilidad de agua atmosférica sea adversa para cualquier cultivo. En este sentido, el periodo de crecimiento de la estación se ve fuertemente afectado pues sólo en los meses con mayor precipitación se alcanza la mitad de la *ETP*, lo que marcaría el periodo de crecimiento. El periodo de crecimiento en la estación comienza el 5 de julio, dura 89 días y finaliza el 1 de octubre; cabe mencionar que no se presenta periodo húmedo. En la siguiente figura se aprecia la distribución de la precipitación y el comportamiento de la evapotranspiración en el año.

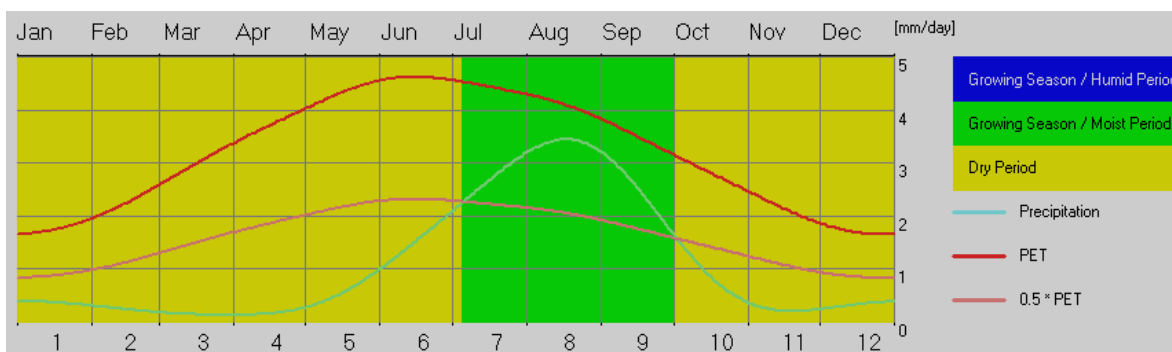


Figura 38 Periodo de crecimiento de la estación Cuencamé

Fuente: Captura de pantalla en el *software CliCom*

La serie de datos importada para *Aquacrop* incluyó datos de precipitación y *ET_o* de los años 1990 a 2009, en donde se puede observar en el diagrama que la *ET_o* es mucho mayor que la precipitación en todos los meses, sin embargo, esto disminuye ligeramente a partir de junio a septiembre, lapso de meses donde se presentan los eventos de precipitación.

Las temperaturas altas del municipio se presentan durante los meses de mayo y junio, en cambio las temperaturas bajas suceden durante los meses de diciembre, enero y febrero. Se presenta poca variabilidad en los registros de temperatura en la estación de verano, aunque en invierno las temperaturas oscilan en mayor medida. En la siguiente figura se aprecia la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) histórica. (*T_x*=temperatura máxima; *T_n*=temperatura mínima).

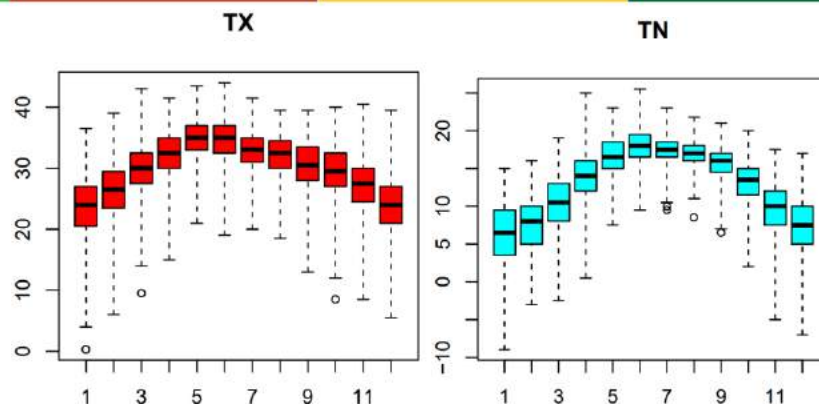


Figura 39 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Cuencamé

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

El municipio de Cuencamé presenta un clima semiárido o seco semicálido con lluvias en verano [BS₀ (h') w(w)] de acuerdo a la carta de climas de Köppen modificada por García. Una proporción menor del municipio presenta clima de tipo muy seco semicálido con lluvias en verano, templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (1.1%) y muy seco muy cálido y cálido con lluvias en verano. Por ello las condiciones para el cultivo de diversas especies es difícil y se obtienen rendimientos muy bajos con un manejo de temporal.

Cultivo, manejo y suelo

El municipio de Cuencamé, se ubica en la región natural del semidesierto en Durango, siendo una región en su mayoría no apropiada para la agricultura, con la limitación principal de precipitación.

De acuerdo con CONABIO (2016b) la raza de maíz que domina en esta región es la Cónico Norteño, por su adaptabilidad a las zonas templadas y semiáridas del norte del país, especialmente en el régimen de temporal, con limitadas precipitaciones y temperaturas extremas. En cuanto a los meses de siembra en temporal, existe una inclinación del 49.8% para el mes de julio (SAGARPA-SIAP, 2015). Debido a las condiciones climáticas que rigen en esta zona, el potencial productivo para maíz es bajo, por lo cual la densidad de siembra recomendable es de 35,000 o menos plantas por hectárea. Por otra parte, el rendimiento promedio para esta zona es de 1.5 ton/ha (Brajcich *et al.*, 2015), sin embargo el rendimiento promedio reportado por el SIAP (2015b) es menor (0.8 ton/ha) durante los años 2000-2009.

Los suelos dominantes en el municipio de Cuencamé son los Phaeozem (38.5%) y los Leptosoles (37.7%), seguidos de Regosoles, Calcisoles y Chernozem con menos de 10% cada uno, entre otros (INEGI, 2009d). Como se mencionó anteriormente los suelos de tipo phaeozem, son muy aptos para la agricultura, se ubican en casi todo el país, su capa superficial es de color oscuro y su profundidad depende del tipo de relieve. Los leptosoles son suelos que se han formado en áreas pedregosas, por lo cual tienen una capa superficial delgada, siendo poco aptos para la agricultura. Por último los tipo regosol, son poco desarrollados por lo que no se diferencian las capas entre sí, son de tonalidad clara y pobres en materia orgánica, mientras que los suelos Chernozem son alcalinos pero ricos en materia orgánica y nutrientes, por lo general llegan a sobrepasar los 80cm de profundidad, principalmente estos suelos se ubican en las zonas áridas del país (INEGI, 2004).

La textura de suelo que domina en el municipio es de franco arcilloso arenoso, a partir de la información reportada por INEGI (INEGI, 2005).

Modelo base

En promedio el rendimiento observado por el SIAP durante los años 2000-2008 para el municipio de Cuencamé fue de 0.80 ton/ha en condiciones de temporal, similar al rendimiento modelado por *Aquacrop* de 0.81 ton/ha, con el cual sólo difirió por 10 kg/ha.

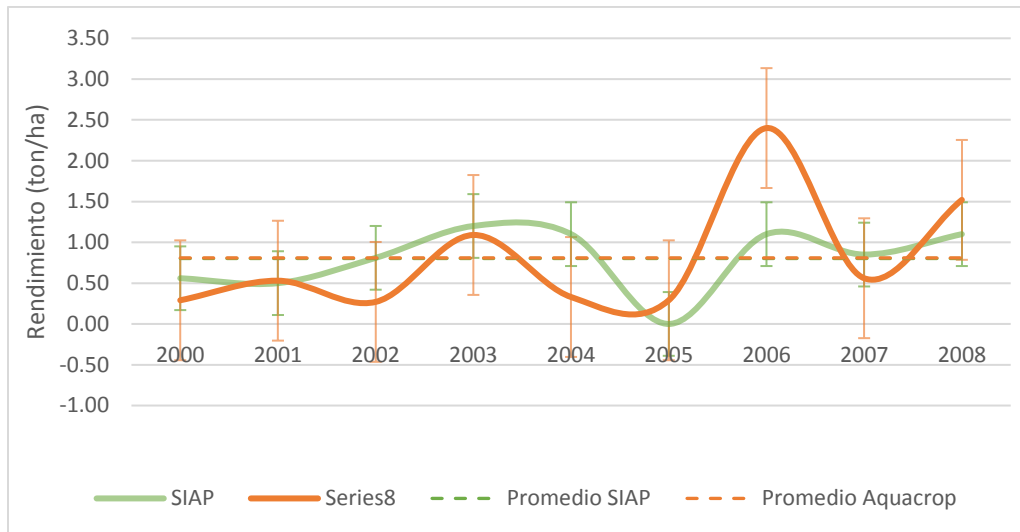


Figura 40 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Cuencamé

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

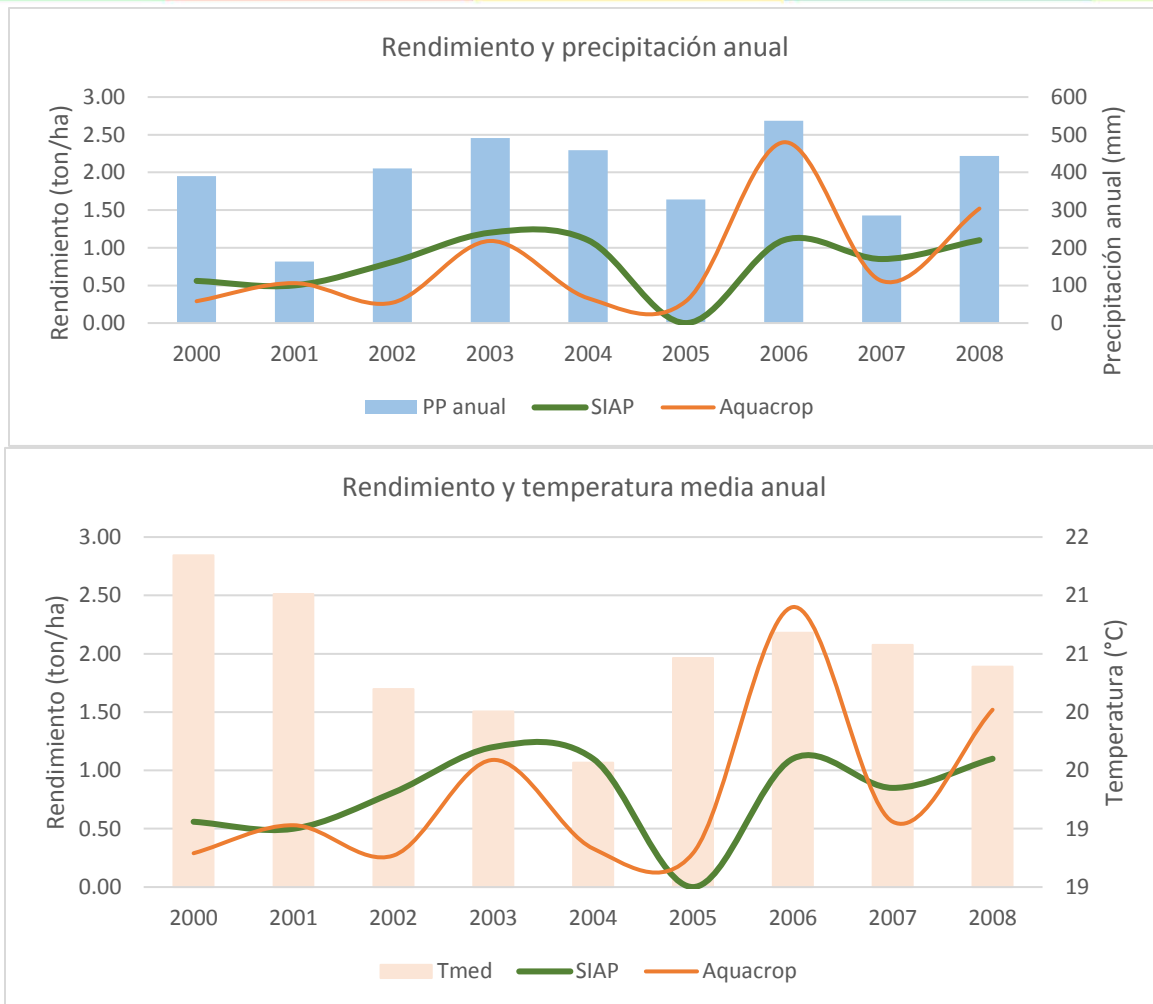


Figura 41 Modelo base para maíz en Cuencamé, Dgo.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En general el modelo se ajustó a los datos observados en la mayoría de los años, excepto para el año 2006, con el cual difirió en más de 1 ton/ha. El error medio cuadrático fue de sólo 190 kg/ha, lo cual implica que hay un muy buen ajuste del modelo respecto a lo observado. Aunado a ello, el coeficiente de correlación entre el rendimiento modelado y la precipitación fue de 0.56, muy cercano al reportado entre el rendimiento según SIAP y la misma precipitación (0.65) con lo que se espera que el modelo sea sensible ante las variaciones en dicha variable.

Por otra parte, el modelo lineal muestra que la distribución de los puntos en el modelo *Aquacrop* proyectó puntos ligeramente más bajos que el SIAP, razón por la cual el parámetro de R^2 fue más bajo. En la figura siguiente se aprecia un diagrama de dispersión de puntos comparando el rendimiento con la precipitación. Los rendimientos reportados por el SIAP son ligeramente más directamente proporcionales a la lluvia, aunque la diferencia no es de grandes magnitudes.

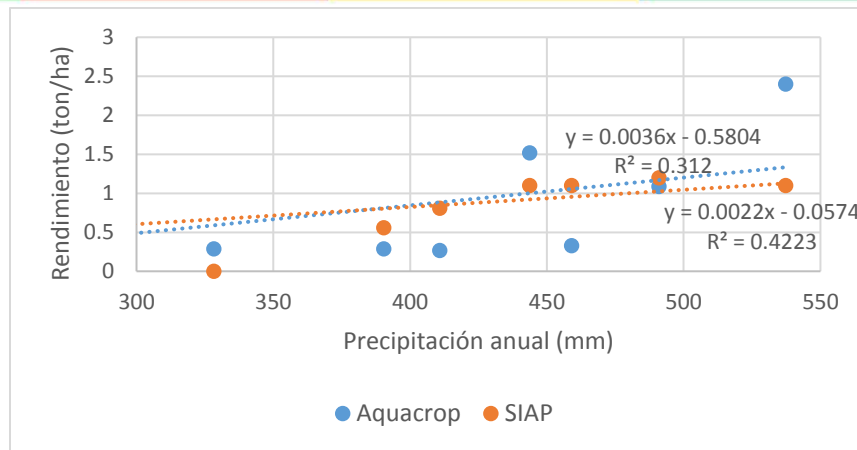


Figura 42 Relación de rendimiento con precipitación en estación Cuencamé

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El promedio de rendimientos históricos proyectados por *Aquacrop* considerando el periodo comprendido de 1990 al 2011 fue de 0.76 ton/ha. La biomasa producida durante ese periodo fue de 3.35 ton/ha, mientras que la biomasa potencial fue de 30.63 ton/ha, es decir casi 10 veces más si no se tuvieran las limitantes en la disponibilidad hídrica. La lluvia del periodo vegetativo fue de 294 mm en promedio, lo cual muestra la baja adaptabilidad agroecológica del cultivo a la zona.

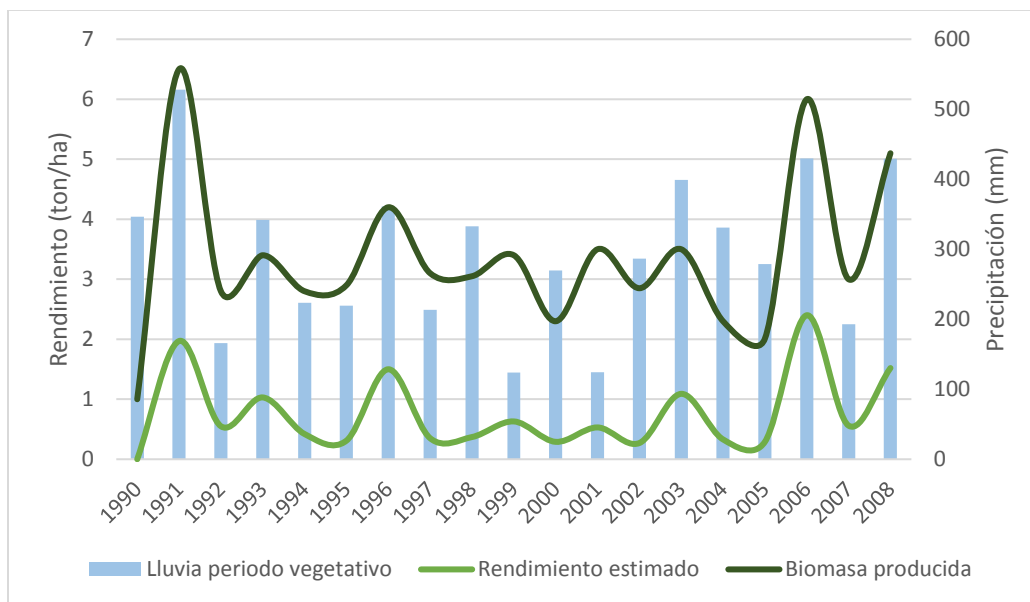


Figura 43 Rendimiento y biomasa producida en la estación Cuencamé

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El año 1997 se caracterizó por presentar un fenómeno El Niño muy fuerte. Para ese año, el rendimiento de maíz se reportó en 410 kg/ha menos que el promedio histórico de acuerdo con el modelo *Aquacrop*. Asimismo, en el año 2005 el rendimiento reportado por SIAP fue de cero, disminución importante con la que el modelo *Aquacrop* concordó.

Escenarios de cambio climático

La época de precipitación que históricamente reporta el municipio de Cuencamé, ocurre durante tres meses (julio-agosto), con eventos de lluvia que no alcanzan ni los 100 mm, la cual es expresada con la línea negra en la siguiente figura.

Por otra parte, la precipitación, bajo condiciones de cambio climático del RCP 4.5 proyecta escenarios con tendencias similares a las del escenario base, lo cual es posible identificar por la línea gris continua, en cambio en condiciones del RCP 8.5 expresado por la línea punteada, podría experimentar decrementos en la precipitación.

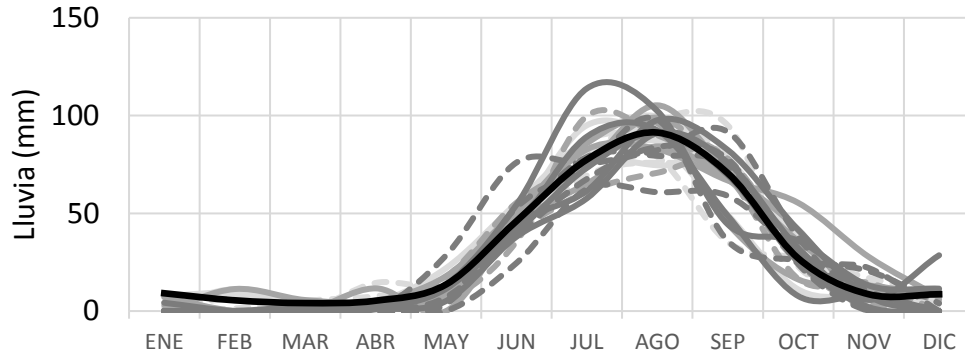


Figura 44 Precipitación con cambio climático en Cuencamé, Dgo.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la modelación del cultivo de maíz en el municipio, el *software* proyectó un rendimiento de biomasa de 3.35 ton/ha en promedio, con posibilidades a disminuir con cambio climático. Situándonos en el horizonte cercano (2015-2039), este horizonte podría obtener rendimientos más bajos, en comparación con el escenario base, con posibilidades de un leve incremento para los dos horizontes de años posteriores.

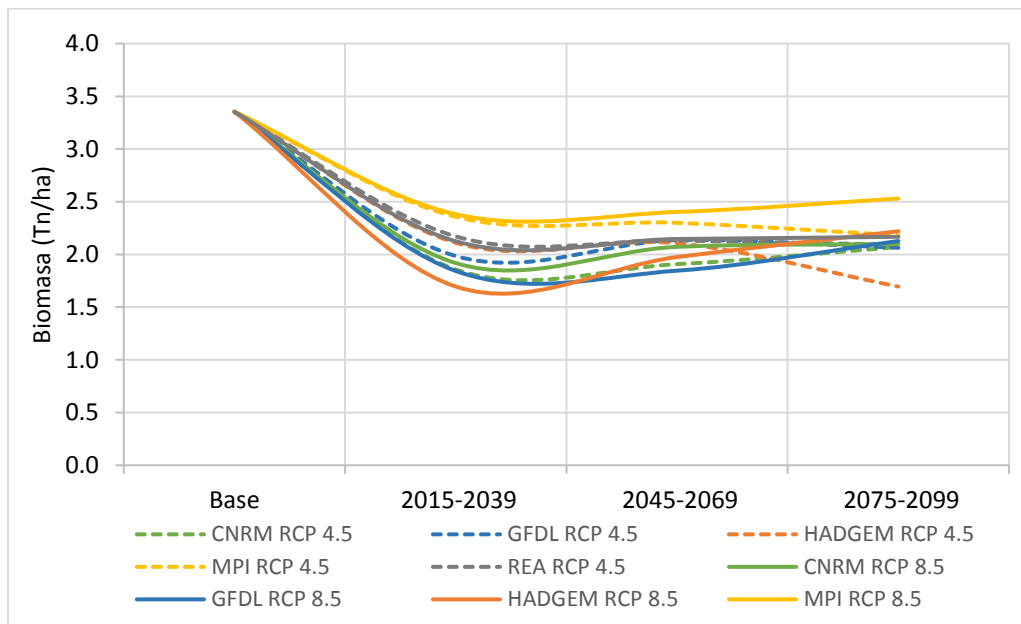


Figura 45 Biomasa bajo cambio climático para Cuencamé, Dgo.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento de maíz al tener una estrecha relación con el rendimiento de biomasa, proyecta una tendencia similar en los dos casos de RCP. En el caso del horizonte cercano, hubo escenarios que proyectaron hasta un -80% de cambio en el rendimiento, caso particular de los modelos CRNM Y GFDL-CM3 del RCP 8.5; en el horizonte medio la mayoría de los escenarios reportaron un cambio que oscila en -70% en promedio, para los dos casos de RCP; por último, en el horizonte lejano el promedio tiende a disminuir ligeramente con cambios en el rendimiento de -75% en promedio.

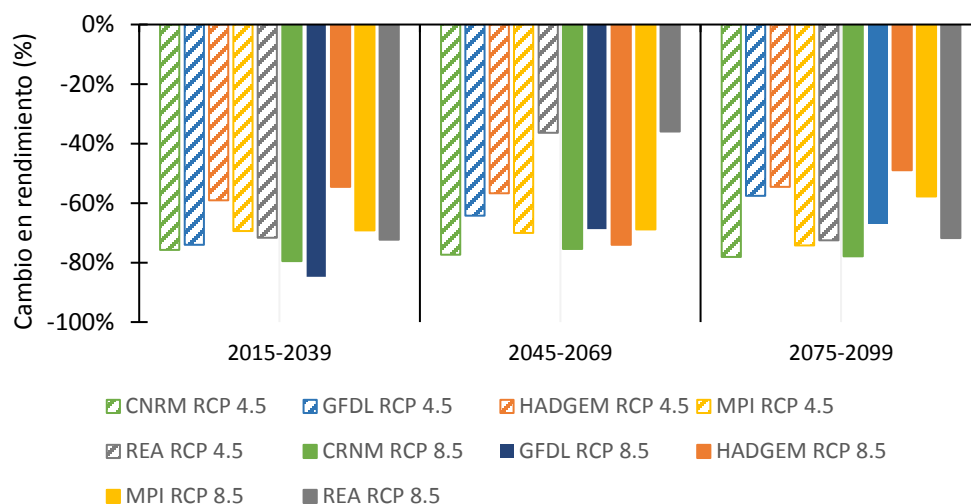


Figura 46 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Cuencamé, Dgo.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

De las cuatro medidas de adaptación probadas, las medidas de cambio de fecha de siembra y acolchado arrojaron resultados similares, de los cuales no representan tener un incremento significativo; en el caso de la medida de fenología resultó tener un leve incremento, mientras que la aplicación de lámina de riego proyectó rendimientos que llegan a tener hasta un 200% de cambio. De tal forma que, dado los escenarios de precipitación con cambio climático, el considerar un riego durante el desarrollo del cultivo podría ayudar al incremento del rendimiento.

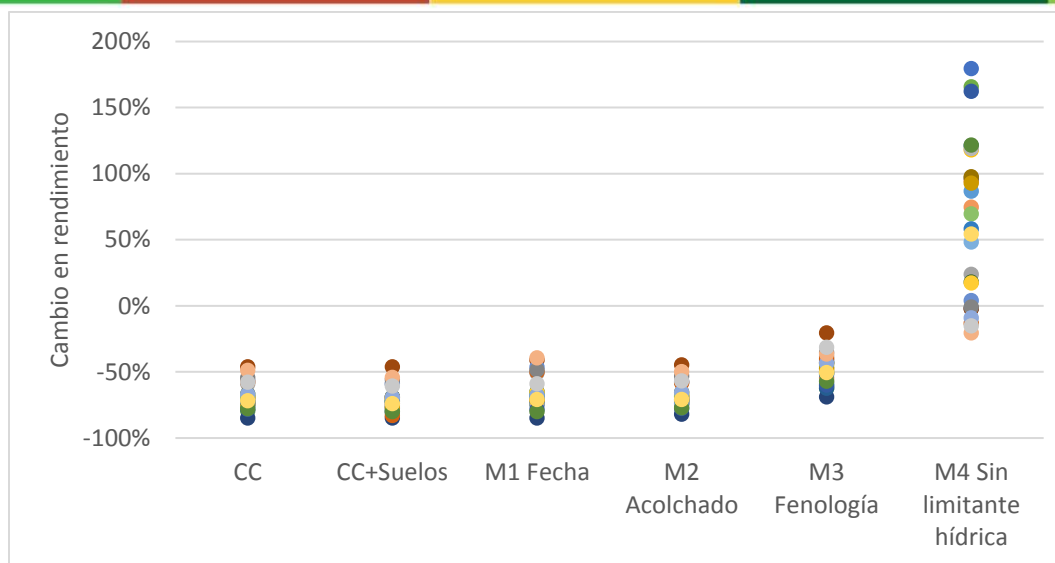


Figura 47 Medidas de adaptación para Cuencamé, Dgo.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

FRIJOL

Descripción botánica

México es, probablemente, el centro de origen del frijol y su centro de diversificación (Debouck & Hidalgo, 1991). Se ha reportado que la superficie sembrada en los últimos años ha rebasado los dos millones de hectáreas a nivel nacional, abarcando casi todos los estados de la república mexicana (Acosta Gallegos et al., 2010). Aunque el frijol se encuentra presente en todo el país, especialmente destacan dos regiones climáticas: la templada-semiárida y la cálida con invierno seco. Por superficie o por el valor de la producción los estados de Zacatecas y Durango lideran la primera clasificación, mientras que Sinaloa y Nayarit son los principales productores de la segunda región (SIAP, 2015a). En el Altiplano de México se cultivan dos principales variedades de frijol: Durango y Jalisco, las cuales son sensibles al fotoperiodo (Rosales Serna, Ochoa-Márquez, & Acosta-Gallegos, 2001).

La importancia del frijol se encuentra relacionada también con su uso en el sistema de producción denominado “milpa”, pues además de proveer del grano la planta puede fijar nitrógeno que es a su vez aprovechado por el maíz (Muñoz Saldaña, 2010). Su clasificación botánica se ubica en la Familia *Leguminosae*, Subfamilia *Papilionoidene*, Tribu *Phaseolaceae*, Subtribu *Phascolinae*, Género *Phaseolus* y Especie *Phaseolus vulgaris* (Koenig & Gepts, 1989).

El frijol es una hierba de vida corta que puede presentar una forma de enredadera de espiral o erecta en forma de arbusto, alcanza los 40 cm de alto en su forma arbustiva y hasta 3 m como enredadera. Las hojas son alternas, pecioladas y compuestas de tres pequeñas hojas a su vez llamadas foliolos (Koenig & Gepts, 1989). La planta cuenta con una raíz principal pivotante y varias secundarias (SIAP-SAGARPA, 2015b).

La inflorescencia se compone de pocas flores dispuestas en pedúnculos más cortos que las hojas y acompañadas por brácteas estriadas. Las flores se componen de un cáliz en forma de tubo campanulado que se divide en cinco lóbulos. La corola es de color rosa y blanco con 5 pétalos desiguales. Tiene 10 estigmas, ovario angosto con un estilo largo y delgado (Koenig & Gepts,

1989). El fruto consiste en una vaina curvada, dehiscente y puede medir de 10 a 12 cm; los granos de frijol varían de acuerdo a la raza pero pueden ser oblongos, ovales o redondeados de color negro, rojo, café o amarillo (SIAP-SAGARPA, 2015b).

Requerimientos ambientales

Para el crecimiento del frijol se han reportado diversas características climáticas que son divergentes de acuerdo a las fuentes de origen. Según Sys, Van Ranst, Debaveye, y Beernaert (1993) el frijol es susceptible a temperaturas superiores a los 30°C. Las zonas bioclimáticas donde se ha reportado desarrollo de frijol han sido las selvas bajas caducifolias, los bosques de pino y encino y los ecosistemas de transición entre ellos (Koenig & Gepts, 1989). También se ha reportado que el frijol es susceptible a condiciones extremas de frío y se ve afectado por exceso o falta de humedad (SIAP-SAGARPA, 2015b).

A continuación, se muestra una tabla de los requerimientos ambientales para el cultivo del frijol.

Cuadro 13 Requerimientos ambientales para frijol

Variable	Referencia	Grado de aptitud			
		Alta	Moderada	Ligera	Nula
Precipitación del ciclo de crecimiento (mm)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	400-500	300-400 500-1000	>1000 250-300	<250
Temperatura media (°C)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	15-20	10-15 20-27	27-30 8-10	>30 <8
	(SIAP-SAGARPA, 2015b)	10-27	>27	-	<10
Altitud (msnm)	(Koenig & Gepts, 1989)	1000-1800	<1000	>1800	-
Humedad relativa (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	50-60	36-50 60-90	30-36 >90	<30
Pendiente (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	0-2	2-4	4-6	>6
Profundidad del suelo (cm)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>100	50-100	20-50	<20
pH	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	6-7	5.4-6 7-8	<5.4 8-8.2	>8.2
COS (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>2	0.8-2	<0.8	-

Fuente: Elaboración propia con datos de referencias citadas

El frijol requiere de 300 a 500 mm de agua durante el periodo vegetativo, además de un periodo seco durante la floración. Por otro lado, no tolera los vientos fuertes, ya que éstos pueden afectar negativamente la polinización (Doorenbos & Kassam, 1979).

Los mejores suelos para frijol son de textura ligera, como franco-arenosos y franco-arcillosos, con una profundidad mínima de 60 cm. Por otro lado, Doorenbos y Kassam (1979) mencionan que la profundidad mínima es de 50 cm, mientras que una profundidad óptima se consideraría a partir de los 75 cm. La textura de los suelos puede variar de arena francosa a arcilla; aunque la mejor textura es la de suelos francos o franco arcillosos (Sys *et al.*, 1993). Respecto al pH se sabe que el frijol crece bien en valores de 5.3 a 7.5, aunque óptimamente de 5.5 a 6.5 (Rosales Serna *et al.*, 2001). Esto contrasta con lo reportado por SIAP-SAGARPA (2015b), donde se declara que el frijol prefiere los suelos neutros pero que se comporta bien en suelos ligeramente ácidos. A continuación, se presenta una imagen con las condiciones adecuadas para la producción de frijol de acuerdo con información de SIAP-SAGARPA.



Figura 48 Características geográficas adecuadas para producción de frijol

Fuente: Tomado de SIAP-SAGARPA (2016)

Desarrollo de fenología

La fenología del frijol en gran parte de México depende en gran medida de las condiciones de humedad, temperatura y fotoperiodo (Rosales Serna *et al.*, 2001). A nivel general se han clasificado a las etapas fenológicas en dos grupos: la etapa vegetativa y la reproductiva. La etapa vegetativa abarca desde la germinación hasta la máxima profundidad radical, mientras que la reproductiva comienza con la floración y termina con la madurez del grano. A continuación, se presenta un cuadro que muestra algunas referencias para dichas etapas encontradas en la literatura.

Cuadro 14 Etapas fenológicas de frijol

Etapas/Referencia	(Rosales Serna <i>et al.</i> , 2001)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	Descripción
Germinación	-	10-15	Emergencia de la planta
Máxima cobertura	-	30-40	Punto de máximo follaje

Máxima profundidad radical	-	40	Máximo profundidad de raíces
Floración	52	45-65	Inicio de la floración
Duración de la floración	-	15-25	Días a la fecundación
Inicio de madurez	-	70-95	<i>E</i> tapa donde comienza a formarse el grano
Senescencia		90-120	Inicio del declive de la actividad fotosintética
Madurez	103	120	Madurez fisiológica del grano

Fuente: Elaboración propia con base en Rosales Serna *et al.* (2001) y Sys *et al.* (1993)

Los rendimientos reportados según Sys *et al.* (1993) van de 0.5 a 1.5 ton/ha en condiciones de manejo de temporal y poca tecnificación. En cambio, para manejos comerciales los rangos varían de 6 a 9 ton/ha. En condiciones de humedad limitada, los rendimientos experimentales para el Altiplano Mexicano han sido de 700 a 1000 kg/ha (Rosales Serna *et al.*, 2001).

Considerando la producción nacional la mayoría de los productores siembran a partir de junio hasta agosto, aunque se presenta un pico de siembra en julio principalmente. La siguiente figura ilustra los periodos de siembra reportados por la SAGARPA.

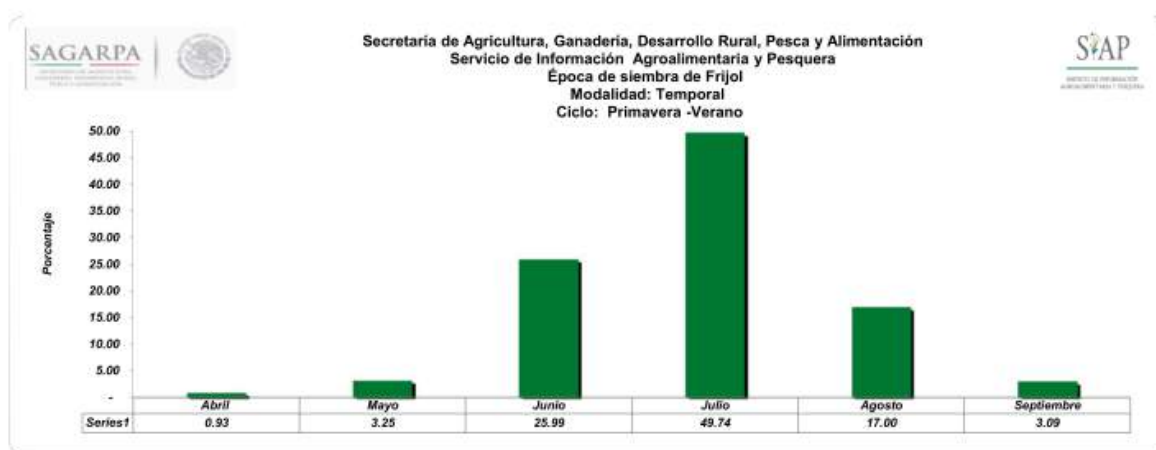


Figura 49 Época de siembra de frijol de temporal

Fuente: Tomado de SIAP-SAGARPA (2015a)

Por otro lado, la época de cosecha puede variar en función de las condiciones de humedad y fotoperiodo que se han destacado líneas arriba. No obstante, el 54% de los productores cosechan en noviembre y sólo el 25 % cosecha antes. Estas cifras consideran un manejo de temporal, por lo que en condiciones de riego podrán variar significativamente. Se ha reportado que el mejor momento para cosechar es cuando se abren las vainas de la parte inferior de la planta (SIAP-SAGARPA, 2015b).

Estudios de caso

El frijol es la leguminosa más importante de México y es un alimento fuertemente incorporado en los platillos mexicanos. Dentro de la categoría de leguminosas secas participa con el 85.4% de la producción nacional según datos oficiales, aunque comparada con las principales

leguminosas su participación es de hasta un 92% (SIAP, 2015a). Es importante mencionar que el frijol ha sido cultivado desde siglos por diversos pueblos originarios en forma combinada con el maíz o la calabaza, formando de esta manera el agroecosistema conocido como milpa. No obstante, en la actualidad también se produce como monocultivo en diversos puntos del país.

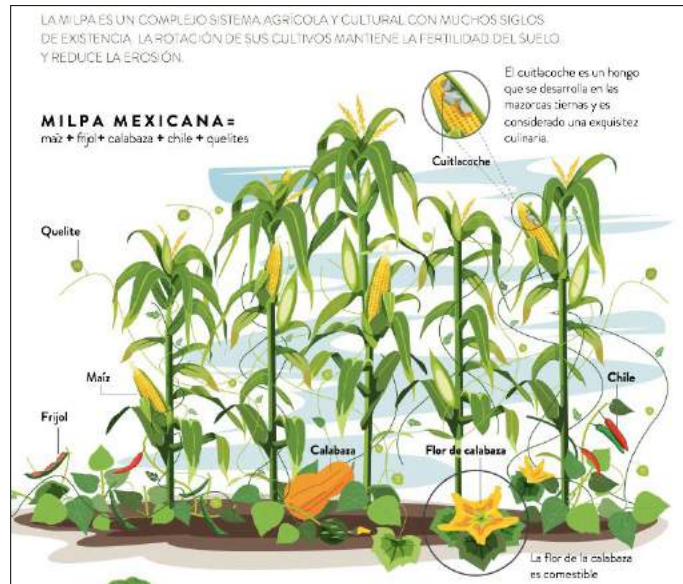


Figura 50 Esquema ilustrativo de la milpa

Fuente: Extraída de [<http://viaorganica.org/la-milpa-del-buen-comer/>]

En la figura siguiente se presenta la distribución espacial de las estaciones seleccionadas para modelar el rendimiento de frijol. Para su selección se consideró la metodología detallada en documentos anteriores, la cual se basó en el criterio de presencia del cultivo, la estacionalidad de la producción, la vulnerabilidad del municipio y la cercanía a instituciones de investigación. En el caso particular del frijol, se seleccionaron estaciones que estuvieran arriba y debajo de los 1500 msnm, considerando un criterio de frijol de altura para el primer caso y frijol “tropical” o de baja altura para el segundo.



Figura 51 Distribución de las estaciones seleccionadas para frijol

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2008)

Para el caso de estudio se realizó una revisión sobre la calidad de las series climáticas. Para ello se retomó la metodología utilizada por López (2016), la cual incluye un control de calidad bajo dos metodologías (método de desviaciones estándar y rangos intercuartílicos) y una prueba de homogeneidad con el programa RHtestV4. La importancia del control de calidad para el proceso de modelado reside en la confiabilidad de los datos para obtener resultados congruentes en el programa *Aquacrop*. Una vez efectuada la revisión climática se procedió a recopilar información paisajística y fenológica para cada caso de estudio. Con la información obtenida se calibraron los modelos de cultivo en el programa *Aquacrop* con ayuda de los datos observados por el SIAP. En los siguientes apartados se presentan los resultados correspondientes a cada estación modelada

Atoyac de Álvarez, Guerrero

La estación de Atoyac de Álvarez se encuentra en el municipio del mismo nombre del estado de Guerrero. Pertenece al CADER de Coyuca de Benítez y forma parte del DDR de Atoyac. La producción de frijol en esta zona es de bajos insumos y los rendimientos obtenidos son de cantidades limitadas. En el siguiente cuadro se presentan algunas características de la estación.

Cuadro 15 Datos de referencia de la estación Atoyac

Estación	ID ¹⁵	Vulnerabilidad ¹⁶	Fuente/referencia ¹⁷	Observaciones
Atoyac (DGE), Guerrero	12161	Alta	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 0.7 ton/ha.

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

¹⁵ Número asignado por el Servicio Meteorológico Nacional para identificación

¹⁶ Vulnerabilidad del municipio conforme al Atlas de Vulnerabilidad al Cambio Climático

¹⁷ Origen de la propuesta de la estación, considerando el control de calidad climático

La estación tiene coordenadas geográficas 17.21° latitud norte y -100.42° longitud oeste, se ubica a una altura de 220 msnm sobre topofomas tipo “sierras altas y bajas complejas” principalmente, y “llanura costera con lomerío” en menor cantidad. Las primeras pertenecen a la subprovincia fisiográfica Cordillera Costera del Sur, mientras que la última topofoma se ubica en la subprovincia Costas del Sur. Todo el municipio se encuentra enclavado en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (INEGI, 2009c).

Climatología

Como parte del control de calidad efectuado por (López, 2016), se registraron cambios en las series climáticas los cuales fueron realizados por la consultora. La serie de temperatura mínima no presentó saltos o inhomogeneidades, mientras que la temperatura máxima presentó varias en la década de 2000 a 2010. Después de revisar dichos saltos se concluyó que no eran parte de la variabilidad natural y se procedió a homogeneizarlos. Las salidas gráficas se encuentran disponibles en el Anexo 1.

El rango anual de temperatura va de los 12 a los 28°C. Los meses con temperatura más cálida se presentan en abril y mayo, mientras que los más fríos corresponden al primer trimestre del año. A continuación, se presentan las gráficas de la distribución de la temperatura en el año, con la gráfica de máxima (izquierda) y mínima (derecha). En el eje “x” se observan los meses del 1 al 12, mientras que el eje “y” corresponde a los valores de temperatura en °C (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

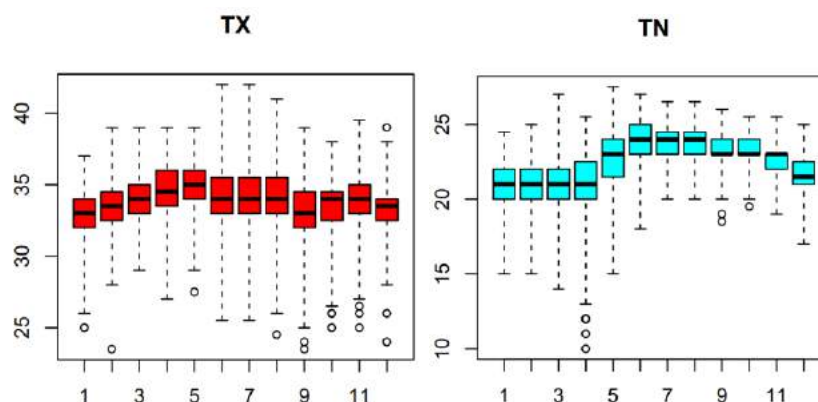


Figura 52 Comportamiento intra-anual de la temperatura en Atoyac

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

La precipitación histórica es de 1264 mm anuales, por lo que se ubica dentro de un rango de los 1000 a los 1500 mm anuales. La estación presenta dos picos de precipitación en el año, uno en los meses de junio y otro en septiembre, con un periodo de menor precipitación en julio-agosto. El periodo de crecimiento de la estación comienza el 28 de mayo, dura 151 días y termina el 25 de octubre. La estación de Atoyac si presenta periodo húmedo, que está caracterizado por el cruce entre la precipitación y la evapotranspiración, y comienza el 15 de junio, dura 115 días y termina el 11 de octubre. En la siguiente gráfica se aprecia una aproximación gráfica al periodo de crecimiento.

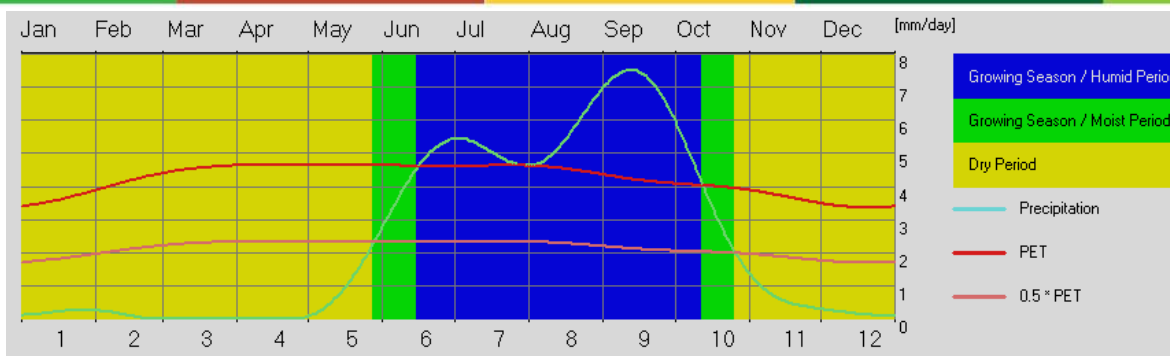


Figura 53 Periodo de crecimiento de la estación Atoyac

Fuente: Elaboración propia con *software LocClim*

Así, el municipio de Atoyac presenta climas de tipo Aw2(w)igw”, Aw1(w)igw” y Awo(w)igw”. El clima Aw2(w)igw” se define como cálido subhúmedo con lluvias en verano y precipitación anual que oscila de los 1000 a los 2500 mm y es el clima predominante en la parte alta del municipio. Por otro lado, el clima Awo(w)igw” es un clima cálido subhúmedo con temperatura media anual de 24°C (INEGI, 2009c).

Cultivo, manejo y suelo

El cultivo de frijol en el municipio de Atoyac se sostiene bajo un manejo de temporal y con bajos insumos. El enfoque de producción en la región es de subsistencia y normalmente se encuentra asociado a una rotación de cultivos con maíz y girasol. El rendimiento promedio en el estado de Guerrero es de 0.54 ton/ha de acuerdo con el SIAP.

Para la región de la costa de Guerrero se ha documentado que la siembra recomendada se realiza entre el 25 de junio y 25 de julio, ocupando de 50 a 60 kg de semilla/ha, por lo que se esperarían de 200-300 mil plantas/ha (N. García, González, & Mena, 2013; Reza & Acosta, 2005). Por otro lado, se recomienda que el porcentaje de germinación sea de al menos 80% (INIFAP, 2013).

La variedad modelada para la estación de Atoyac fue la de tipo Negro Jamapa. Esta variedad presenta la floración a los 43 días después de siembra y la madurez fisiológica es alcanzada a los 97 días (García *et al.*, 2013). Algunas variedades de frijol negro de semiguía tardan en promedio 45 días después de siembra en presentar floración, y estas exhibe una duración promedio de 28 días y una madurez fisiológica alcanzada a los 88 días después de la siembra (SAGARPA, 2015). Los tipos de suelos dominantes en el municipio de Atoyac son los cambisoles (49%), luvisoles (25%) y regosoles (11%). Por otro lado, en la zona de la costa chica de Guerrero los suelos son del tipo “lama”, o también denominados franco-arcillosos por su textura (Reza & Acosta, 2005). Los suelos de tipo cambisol deben contar con al menos un horizonte sub superficial, cuentan con un alto porcentaje de arcilla y su coloración es café; debido a su alto contenido de arcilla son aptos para la agricultura aunque su presencia en trópicos húmedos se caracteriza por una baja concentración de nutrientes (FAO, 2007a).

Los principales problemas de productividad están más ampliamente relacionados con las fitosanidad, pues debido a las condiciones de humedad de la región se establece un ambiente propicio para plagas y enfermedades (Reza & Acosta, 2005)

Modelo base

El modelo de cultivo obtenido de *Aquacrop* tuvo un ajuste aceptable respecto a los datos observados por el SIAP. De acuerdo con lo reportado por SIAP, el rendimiento de los años 2000 a 2011 fue de 0.58 ton/ha para el municipio, bajo condiciones de temporal. El modelo

Aquacrop arrojó un promedio de 0.71 ton/ha para el mismo periodo, es decir, 120 kg/ha de diferencia. El error medio cuadrático fue de 0.14 ton/ha, que es el margen de lo que el modelo se equivoca respecto a los datos observados.

En la siguiente figura se aprecian una comparativa entre el rendimiento observado y el rendimiento modelado.

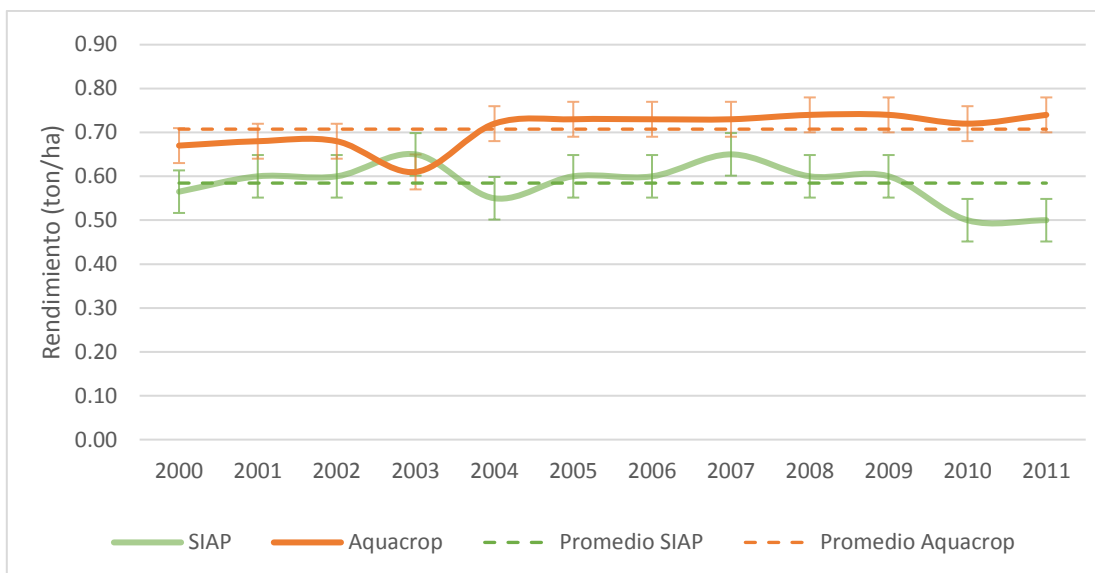


Figura 54 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Atoyac

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La desviación estándar de los datos del SIAP y de *Aquacrop* fue de 0.048 y 0.040 ton/ha respectivamente. En el modelo de *Aquacrop* se observa un comportamiento homogéneo en la mayoría de los años, excepto en el 2003. Al analizar la relación del rendimiento con la precipitación se encontró un coeficiente de correlación negativo de -0.6 con los datos reportados por SIAP. En cambio, el coeficiente de correlación del modelo *Aquacrop* fue de 0.6 positivo.

La temperatura fue una variable con relación más directamente proporcional en el caso de los datos del SIAP. Esto encuentra un referente teórico a partir de los estudios de (Rosales Serna *et al.*, 2001), quienes documentaron la relación del cultivo de frijol y su sensibilidad ante el fotoperiodo y ciertos requerimientos térmicos para el crecimiento del frijol. En la gráfica siguiente se aprecian los rendimientos de SIAP y *Aquacrop* (eje izquierdo) contrastados con la precipitación y la temperatura media anual (eje derecho).

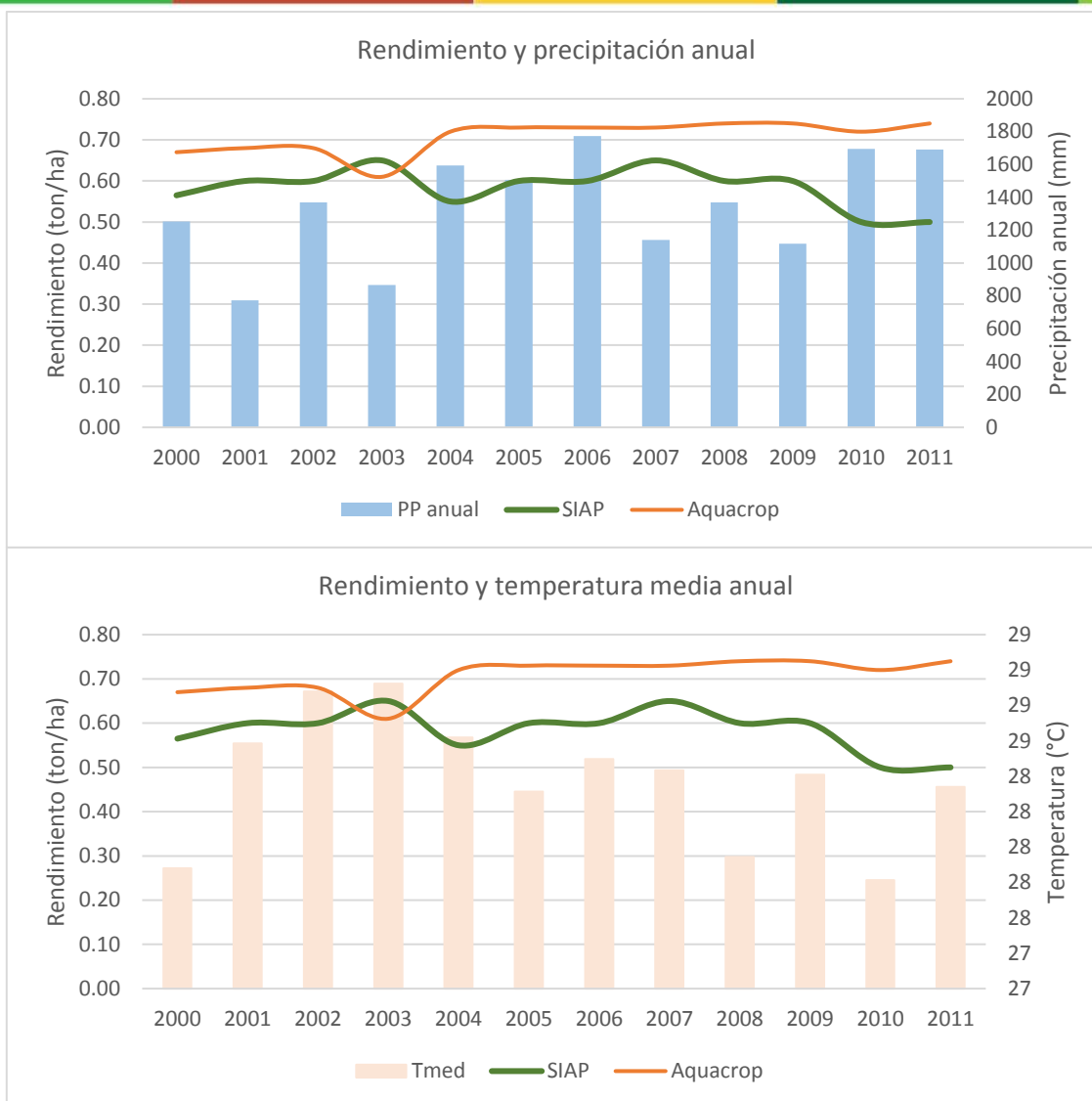


Figura 55 Modelo base para frijol en Atoyac, Gro.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software *Aquacrop*

El modelo *Aquacrop* reportó una relación más directamente proporcional a la precipitación anual. Puesto que la relación entre la lluvia y el rendimiento de SIAP es inversamente proporcional es posible asumir que la producción reportada depende de otros factores externos al sistema climático, tales como la fertilización o los estímulos para la comercialización. En la siguiente gráfica se muestra la relación entre la precipitación y el rendimiento para cada serie de datos (SIAP y *Aquacrop*).

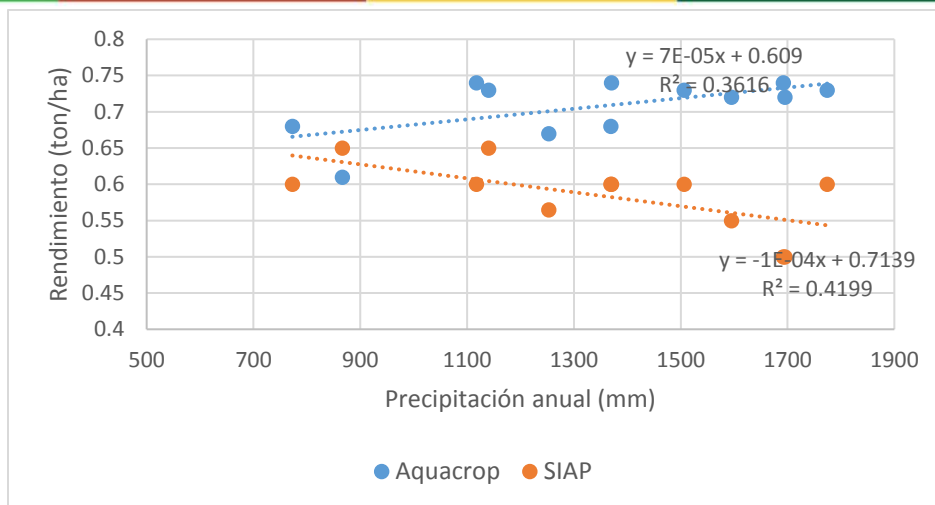


Figura 56 Relación de rendimiento con precipitación en estación Atoyac

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Por otro lado, la biomasa producida se refiere al total de materia orgánica que se produce considerando raíces, tallo, hojas y grano. Para el caso del frijol en Atoyac, el promedio de producción de biomasa fue de 4.84 ton/ha considerando desde el año 1996 hasta el 2011, esto de acuerdo al modelo de *Aquacrop*. No obstante, se alcanza una biomasa potencial de 5.2 ton/ha para el mismo periodo. En otras palabras, actualmente sólo se alcanza el 54% de la producción que podría obtenerse sin ninguna limitante de agua, fertilización o plagas.

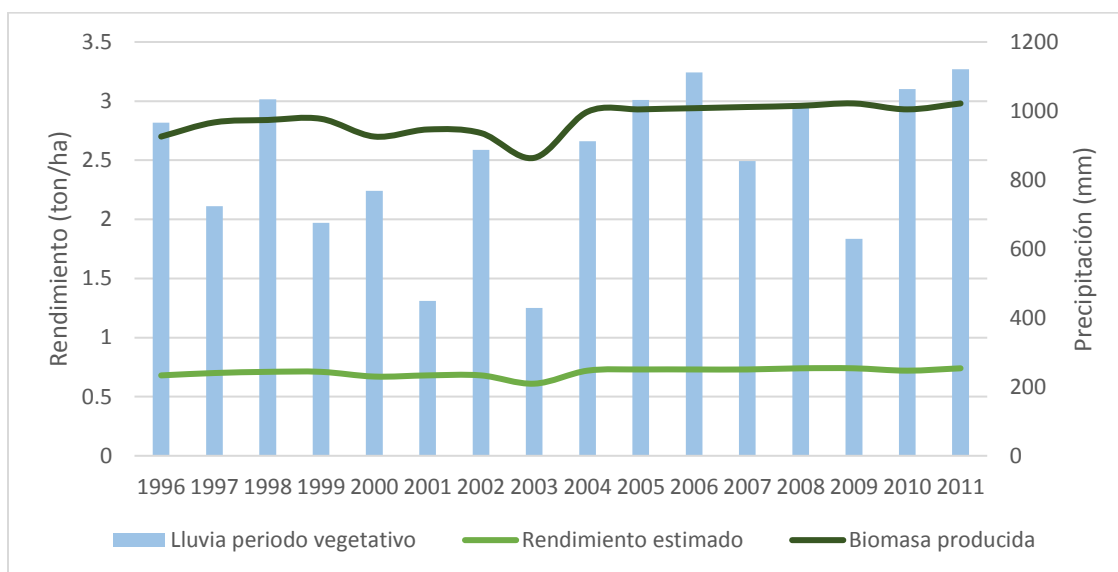


Figura 57 Rendimiento y biomasa producida en la estación Atoyac

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La lluvia del periodo vegetativo fue de 854 mm en promedio, aunque para el año 2003 sólo fue de 428 mm, razón por la que el rendimiento tuvo un decremento.

Escenarios de cambio climático

El impacto del cambio climático en la precipitación de la estación de Atoyac implica disminuciones en los meses intermedios del año, principalmente de junio a septiembre, que

coincide con las fechas de siembra de frijol en la región. Aunado a ello, la cantidad total de precipitación podría disminuir y afectar al ciclo entero de crecimiento. En la siguiente figura se muestra la distribución intra anual de la precipitación para dicha estación.

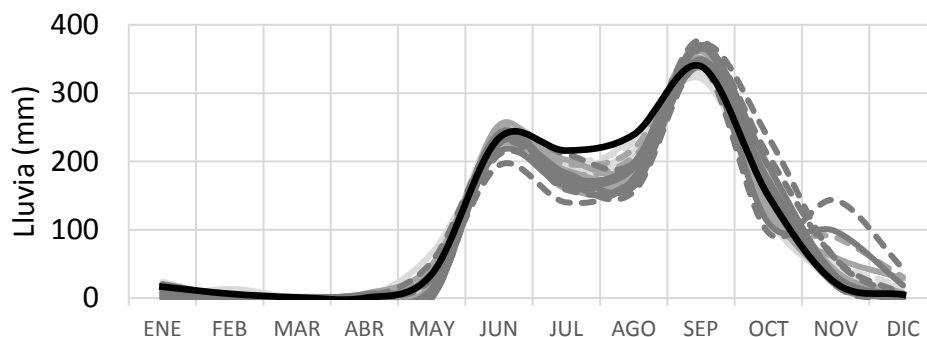


Figura 58 Precipitación con cambio climático en Atoyac, Gro.

Fuente: Elaboración propia

El frijol es especialmente susceptible a la sequía en las primeras etapas de desarrollo, por lo que la biomasa que podría alcanzarse podría disminuir. En el escenario base o histórico se presentan alrededor de 2.8 ton/ha de biomasa, mientras que en el horizonte cercano se podrían esperar 2.2 ton/ha. En el horizonte medio se observa una ligera disminución que se mantiene para el horizonte lejano. Puesto que el clima de la zona en el escenario base es cálido, el desarrollo del frijol se podría beneficiar de un mayor periodo de crecimiento por temperatura. En la siguiente figura se muestra la biomasa con diferentes escenarios de cambio climático.

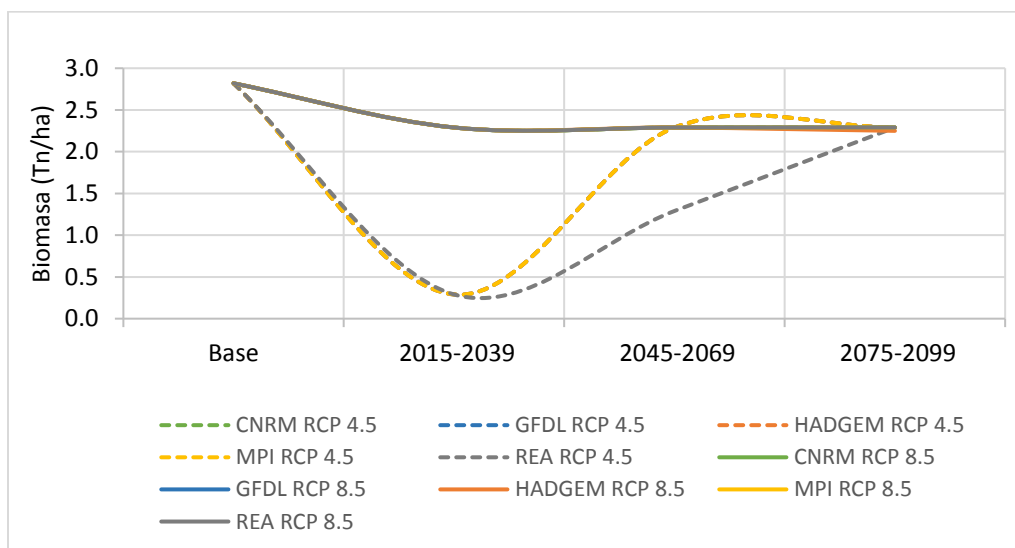


Figura 59 Biomasa bajo cambio climático en Atoyac, Gro.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El decremento de la biomasa implica un decremento del rendimiento de un 5% para la mayoría de los escenarios. Al no haber decrementos significativos en la precipitación y la biomasa, todos los escenarios de horizontes futuros coinciden con el mismo decremento. Únicamente el Ensamble REA proyecta decrementos más drásticos en el horizonte medio, los cuales rondan el

50% menos. En la siguiente figura se aprecia un comparativo entre los rendimientos con cambio climático y el histórico.

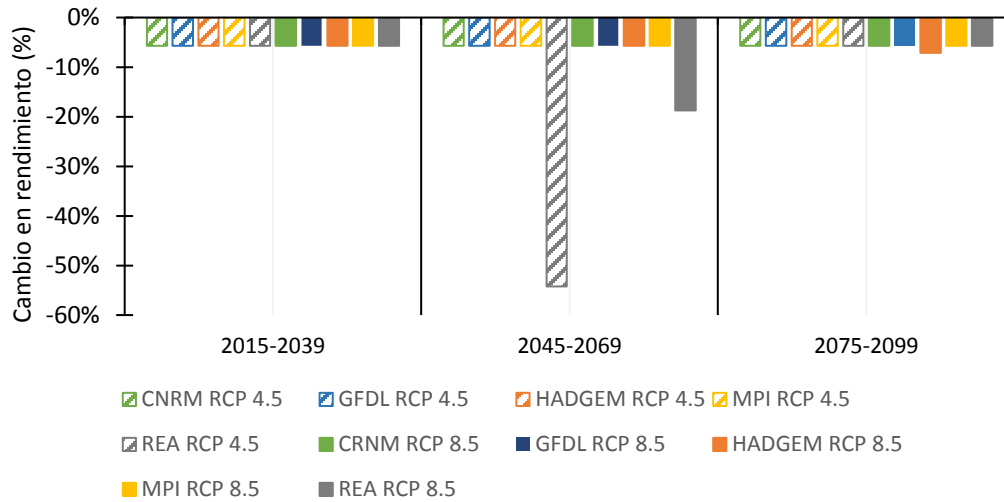


Figura 60 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Atoyac, Gro.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La inclusión escenarios de erosión de suelos implicó que los rendimientos modelados únicamente con escenarios climáticos disminuyeran. En el horizonte cercano, los rendimientos podrían caer un 25% menos. El horizonte medio implica un decremento mayor, ya que pasa situarse en -60%. Finalmente, el horizonte lejano implicó reducciones de hasta -67% respecto al escenario base por efecto del cambio climático sumado a la erosión del suelo.

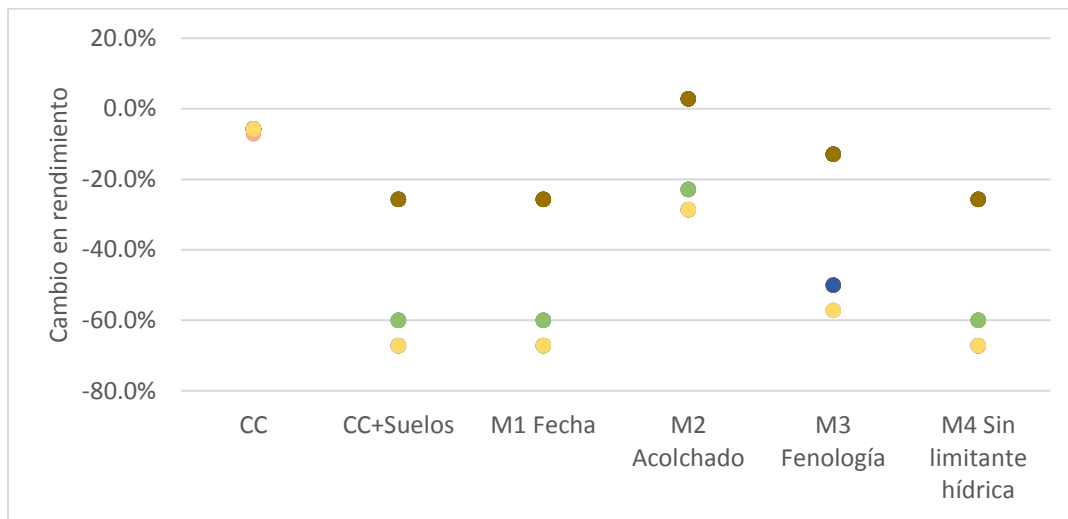


Figura 61 Medidas de adaptación para Atoyac, Gro.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La medida de cambio de fecha de siembra no reportó recuperación significativa en los rendimientos, así como tampoco la aplicación de una lámina de riego. No obstante, la inclusión de acolchados podría beneficiar en mayor medida, pues se obtendrían rendimientos desde -30%

hasta +5%. Este estudio de caso proyecta resultados que sugieren que el efecto del suelo podría afectar significativamente al rendimiento, además de un cambio en el clima.

Villa de Cos, Zacatecas

La estación de Villa de Cos fue elegida siguiendo el parámetro de elección de una variedad de frijol que se desarrollará a más de 1500 msnm de altura. La estación se encuentra dentro del municipio del mismo nombre, pertenece al CADER Villa de Cos y al DDR de Zacatecas.

Cuadro 16 Datos de referencia de la estación Villa de Cos

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Villa de Cos, Zacatecas	32059	Baja	Bibliografía	Cerca de Fresnillo, municipio vulnerable (media). Rendimientos de 0.5 ton/ha.

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación climática de Villa de Cos tiene coordenadas 23.29° latitud norte y -103.34° longitud oeste. Se ubica a 1999 msnm sobre una topografía predominante tipo llanura desértica de piso rocoso cementado. A su vez, se encuentra dentro de la Subprovincia de Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas.

Climatología

La estación Villa de Cos no estuvo considerada dentro del estudio de López (2016), por lo que se procedió a ejecutar el control de calidad y la prueba de homogeneidad correspondiente.

De acuerdo con los registros reportados por el SMN, los primeros registros meteorológicos de la estación datan de 1988 y los últimos del 2011. Se reporta que existe un 85.9% de información disponible. Al revisar los datos de forma visual, se observó que los años 2001 y 2002 se encontraron sin datos para algunos de los meses. No obstante, para fines de calibración del modelo, las series de temperatura y precipitación se trabajan en forma mensual, por lo que la ausencia de datos afecta ligeramente el promedio final. Dentro del primer control de calidad realizado con el método de 4 desviaciones estándar se encontraron diversos *outliers* que fueron revisados con bases de datos del FONDEN, CENAPRED y Desinventar. El año 1988 fue un año atípico puesto que concentró a casi el 75% de los *outliers* encontrados, por lo que fue completamente suprimido para evitar sesgos en los análisis posteriores. El análisis de homogeneidades de temperatura mínima no arrojó ningún salto, por lo que se conservó sin cambios. La temperatura máxima reportó tres saltos que no correspondieron con ningún evento de El Niño o La Niña fuertes, por lo que la serie fue homogeneizada.

Para el año 2004 se registraron ausencias de datos en varios meses, por lo que se utilizó el Método de Razón Normal para calcular los datos faltantes con base en estaciones cercanas. Este Método consiste en estimar un dato climático faltante a partir de los datos ponderados de tres estaciones climáticas cercanas. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$Px = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{Nx}{N1} * P1 \right) + \left(\frac{Nx}{N2} * P2 \right) + \left(\frac{Nx}{N3} * P3 \right) \right]$$

Donde:

Px Dato faltante objetivo de la estación x

Nx Normal climática de la estación x para la variable seleccionada

N1,2,3 Normal climática de la estación 1,2,3 para la variable seleccionada

P1,2,3 Dato mensual de la estación 1,2,3 para la variable seleccionada

Una vez finalizados los procesos de control de calidad, homogeneización de temperatura y cálculo de datos faltantes se procedió a importar las series climáticas al *software Aquacrop* para el cálculo de rendimientos.

El rango de temperatura media anual en la estación de Villa de Cos oscila de los 14° a 18°C (INEGI, 2010d). La temperatura máxima tiene un pico en los meses mayo, junio y julio. En contraste, la temperatura mínima encuentra valores altos de mayo a septiembre y muy bajos de diciembre a febrero. Ambas series climáticas tienen un aumento en su variación en la estación de invierno, pero se estabilizan en verano. En la siguiente gráfica se muestra la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) con sus respectivas escalas. (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

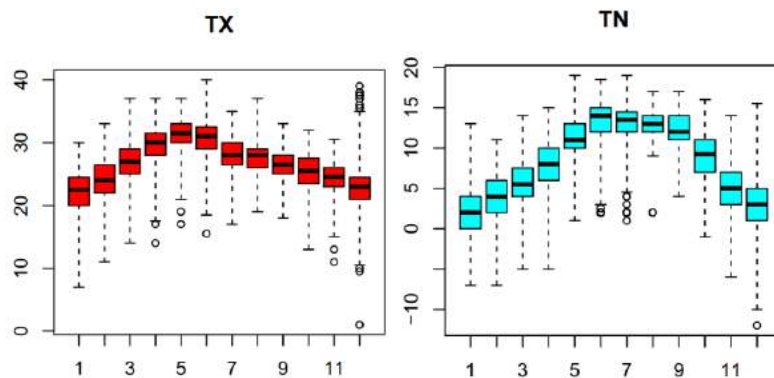


Figura 62 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Villa de Cos

Fuente: Elaboración propia con *software R*.

La precipitación anual en el municipio de Villa de Cos va de 300 a 500 mm, lo que convierte al clima de este lugar en seco templado con lluvias en verano. El periodo de crecimiento es corto en comparación con otras estaciones estudiadas, comienza el 22 de junio, dura 103 días y termina el 2 de octubre. Debido a las condiciones de alta evapotranspiración y escasa precipitación, no se presenta ningún periodo húmedo. Estas condiciones suponen la dificultad para cultivar muchos cereales en regímenes de temporal, aunque se ha documentado que si se siembran. A continuación, se presenta un diagrama que muestra la distribución de la precipitación durante el año, así como la intersección con la evapotranspiración donde se visualiza que no existe un periodo húmedo.

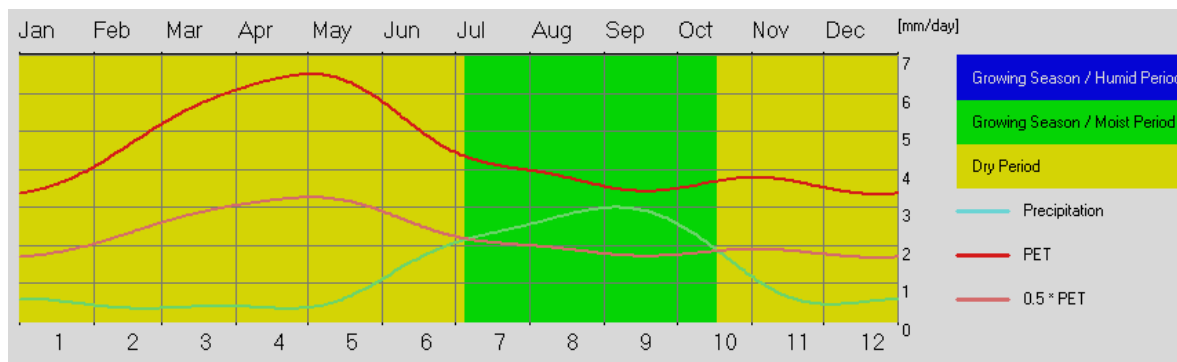


Figura 63 Periodo de crecimiento de la estación Villa de Cos

Fuente: Captura de pantalla en el *software CliCom*

En conjunto, el municipio presenta clima tipo Bsokx'(w)(e)g. Se define como un clima extremoso con verano cálido, temperaturas medias anuales entre 12° y 18°C con periodo de lluvias en verano y con porcentaje de lluvias invernales menor al 18% y con oscilación térmica de entre 7° y 14°C (INEGI, 2008).

Cultivo, manejo y suelo

La práctica de cultivos de temporal en el municipio de Villa de Cos se encuentra fuertemente restringida por las condiciones climáticas que limitan el crecimiento del frijol en la mayor parte del año debido a la baja disponibilidad de humedad. No obstante el bajo potencial, el frijol de temporal que se cultiva en la zona alcanza rendimientos de apenas 280 kg/ha (SIAP, 2014).

Puesto que el cultivo de frijol de temporal es de producción limitada, la densidad de población adecuada varía de 65 mil a 80 mil plantas por hectárea. Esta densidad se obtiene con 35 kilogramos de semilla aproximadamente, considerando que el grano sea grande. En cambio, se requerirían 20 kilogramos el grano es pequeño (INIFAP, 2014). Bajo condiciones de riego, la densidad de plantas adecuada es de 130 a 150 mil plantas por hectárea, según la variedad que se está utilizando, y se recomienda utilizar una distancia entre plantas de 10 a 12 centímetros entre plantas y una profundidad de cinco a seis centímetros. Bajo ciertas condiciones especiales de fertilidad y humedad óptimas, es posible llegar a utilizar de 40 a 45 kg de semilla/ha, para obtener una densidad de 100000 plantas/ha (Martínez, Ceja, Ramírez, & Osti, 2008).

Si no se dispone de riego, la siembra se debe realizar desde que se establezca el temporal, hasta el 25 de julio, para evitar daño por la presencia de posibles heladas tempranas (INIFAP, 2014). Las variedades que se siembran mayormente en la región son las llamadas Flor de Junio (León y Dalia) y Flor de Mayo (Eugenia y Dolores). Estas variedades presentan un promedio de 52 % y 43 % de índice de cosecha respectivamente (INIFAP, 2014).

La variedad Flor de Junio ha sido objeto de diversos mejoramientos que buscan hacerla resistente a las enfermedades. Recientemente se lanzó la variedad Flor de Junio León que, bajo condiciones experimentales, mostró tener resistencia a la roya, la virosis, pudriciones de raíz y mejor aspecto físico (INIFAP, 2017). La variedad Flor de Mayo Eugenia es reportada como de tamaño mediano, forma alargada y color rosa atractivo, lo cual crea un nicho de mercado favorable para el consumo, además de que en su versión mejorada puede llegar a resistir algunas razas de roza, antracnosis y tizonas (Acosta Gallegos *et al.*, 2010).

El ciclo de cultivo es intermedio, llega a madurez fisiológica a los 100 ó 110 días dependiendo de las condiciones climáticas (INIFAP, 2014). La variedad Flor de Junio León tiene un ciclo de cultivo de intermedio a tardío, presenta la floración a los 55 días después de la siembra y la madurez a los 110 días (*Ibid.* 2014a).

Para la producción de semilla de cualquier categoría se recomienda utilizar surcos a 0.76 m, colocando una cintilla a cada hilo de siembra (*Ibid.*, 2014b). En condiciones de temporal se recomienda sembrar a partir de junio y julio cuando se establezcan las precipitaciones de la temporada; en cambio, no se recomiendan establecer siembras después del 25 de julio (*Ibid.*, 2014b).

Modelo base

El promedio de rendimiento observado por el SIAP para el municipio de Villa de Cos fue de 280 kg/ha en los años 2000-2011. El modelo de cultivo arrojado por *Aquacrop* consideró un rendimiento promedio de 500 kg/ha, con una diferencia de 220 kg/ha con lo reportado por

SIAP. La siguiente gráfica muestra el comportamiento del rendimiento reportado por SIAP y modelado por *Aquacrop* con la desviación estándar como barra de error.

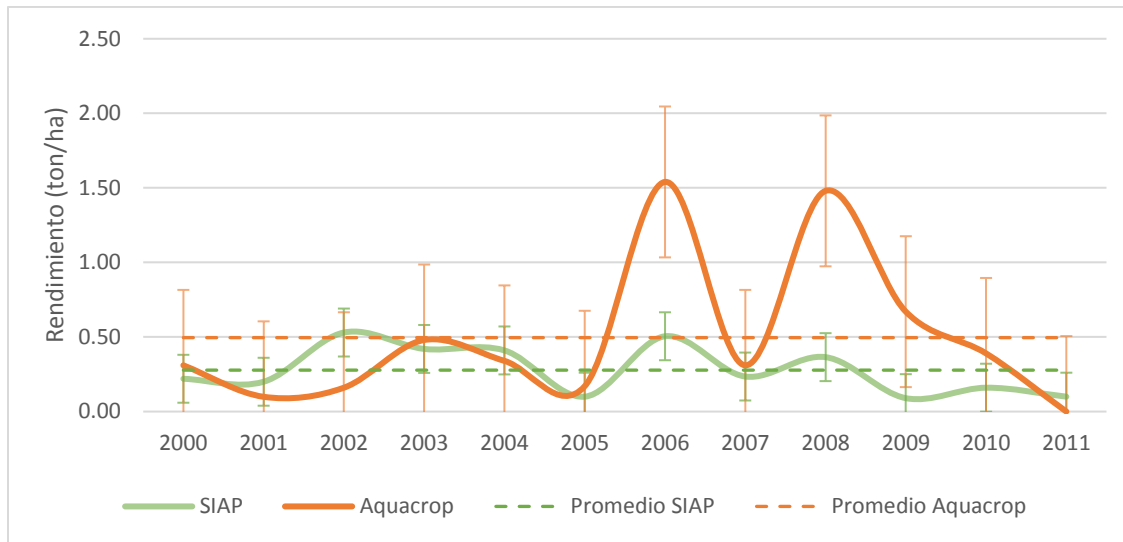


Figura 64 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Villa de Cos

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En la mayoría de los años se observa un traslape entre el rendimiento observado y el modelado, excepto en los años 2006 y 2008. La precipitación es el factor que limita la producción en el municipio de Villa de Cos. El coeficiente de correlación entre el rendimiento observado por SIAP y la precipitación anual fue de 0.6; no obstante, el modelo *Aquacrop* fue más sensible al reportar 0.72 de correlación con la lluvia. A continuación, se presentan dos gráficas que comparan los rendimientos modelados y observados con la precipitación anual y la temperatura media anual.

*Para mayor referencia, las líneas corresponden a los rendimientos (eje izquierdo), mientras que las barras presentan la precipitación anual (eje derecho).

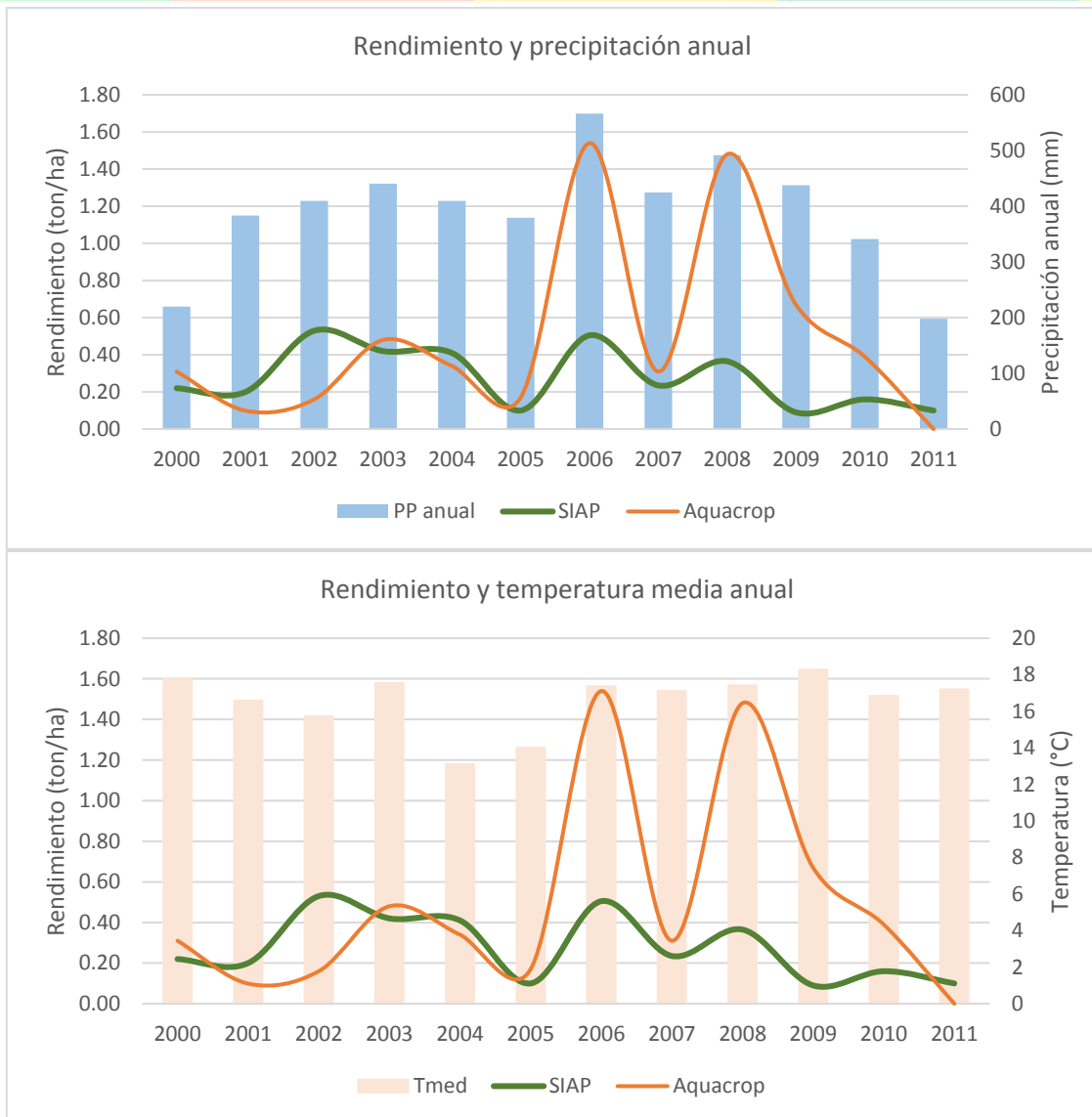


Figura 65 Modelo base para frijol en Villa de Cos, Zac.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Puesto que el modelo *Aquacrop* resultó ser más sensible a la precipitación, se generó un modelo lineal para comparar el rendimiento y la lluvia anual. En la siguiente gráfica se aprecia una gráfica de dispersión para ambas variables con datos de SIAP y de *Aquacrop*. El coeficiente de determinación del modelo lineal generado para los datos de *Aquacrop* es mayor que el de los datos de SIAP. El hecho de que el rendimiento bajo el modelo *Aquacrop* responda de forma directamente proporcional a la precipitación es congruente con el enfoque adoptado por el *software*, al cual se define como un enfoque hídrico optimizado para manejar el agua en los cultivos (Steduto et al., 2009).

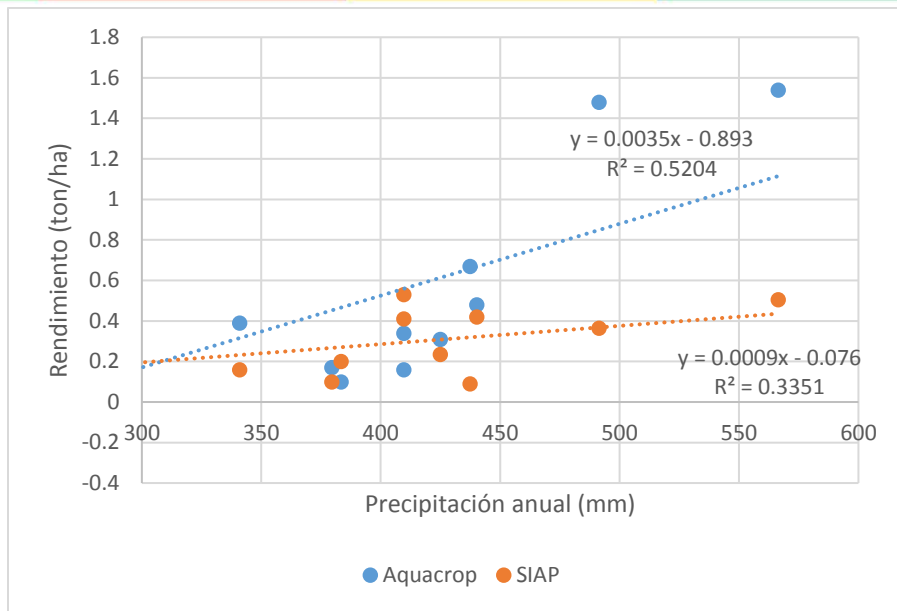


Figura 66 Relación de rendimiento con precipitación en estación Villa de Cos

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Mediante una retrospectiva al comportamiento del modelo en las últimas décadas es posible visualizar que el rendimiento promedio del frijol en la estación ronda entre 200 y 500 kg/ha. La cantidad de biomasa producida para el mismo periodo de tiempo fue de 2.25 ton/ha, considerando todas las partes funcionales de la planta, además del grano. En contraste, la biomasa potencial asciende a 7.68 ton/ha, es decir, un 341% más si no se tuviera ninguna limitante de agua, nutrientes o presencia de plagas. En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la biomasa modelada y su relación con el rendimiento y la precipitación del periodo vegetativo.

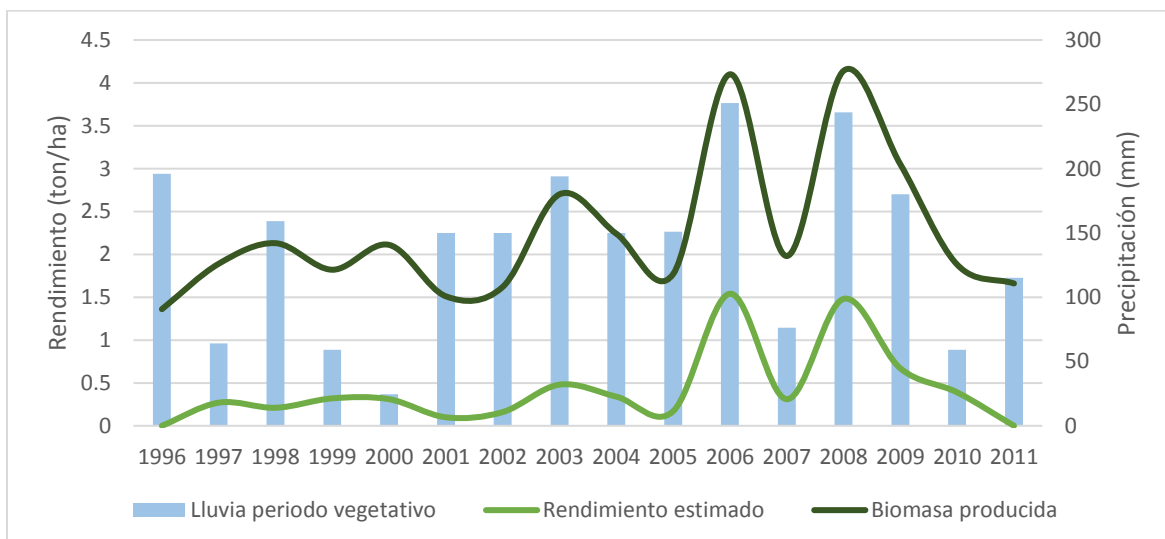


Figura 67 Rendimiento y biomasa producida en la estación Villa de Cos

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El comportamiento de la biomasa y el rendimiento a partir de los años 1996 al 2000 fue más bajo que el promedio. Durante ese periodo se produjo anualmente únicamente el 50% de lo que se obtuvo en los años subsecuentes. La producción de biomasa en el año Niño de 1997 fue un 40% más baja que el promedio.

Escenarios de cambio climático

En condiciones de cambio climático, la precipitación de la estación de Villa de Cos, Zacatecas podría variar en incrementos y decrementos como lo muestra la siguiente figura. La precipitación histórica marcada por la normal climatológica reportada por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra con la línea negra, mientras que los escenarios de cambio climático tienen una coloración gris continuo para RCP de 4.5 y una línea puntada para RCP de 8.5.

La distribución intra anual de la precipitación presenta diversos picos, pero el incremento más notorio en julio con RCP de 4.5 evaluado con el modelo HADGEM2-ES en el horizonte 2075-2099 y otros dos en junio y septiembre con respectivo RCP de 8.5 correspondientes al modelo CNRM-CM5 en el horizonte 2075-2099 mientras que la disminución de la precipitación más extrema es en agosto correspondiente a un RCP de 8.5 evaluado con el modelo MPIECHAM-5 en el horizonte 2075-2099. En promedio los escenarios de cambio climático indican una disminución de la lluvia desde junio hasta agosto, incrementando la cantidad de la misma de septiembre a diciembre.

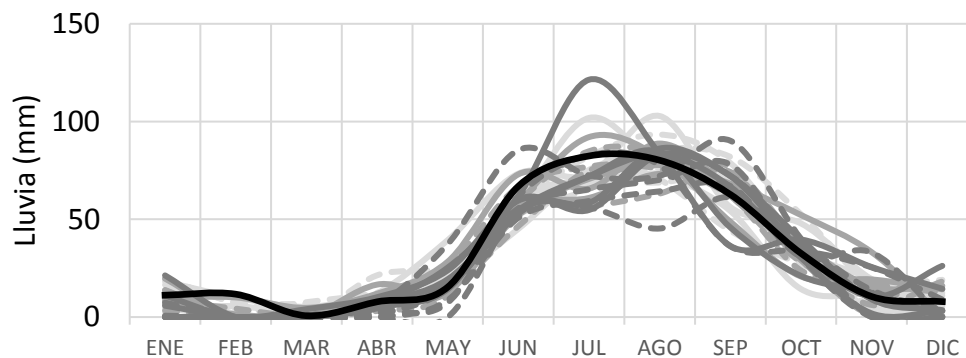


Figura 68 Precipitación con cambio climático en Villa de Cos, Zac.

Fuente: Elaboración propia

La biomasa del escenario histórico fue de alrededor de 2.21 ton/ha, mientras que los escenarios de cambio climático indican incrementos y decrementos en el horizonte cercano. El modelo GFDL-CM3 con RCP 4.5 plantea incrementos, mientras que los modelos GFDL-CM3 y la mayoría de la evaluación prevén disminuciones. La siguiente figura muestra la gráfica de biomasa para la estación de Villa de Cos con escenarios de cambio climático. Se observa una disminución generalizada desde el escenario histórico hasta el horizonte lejano.

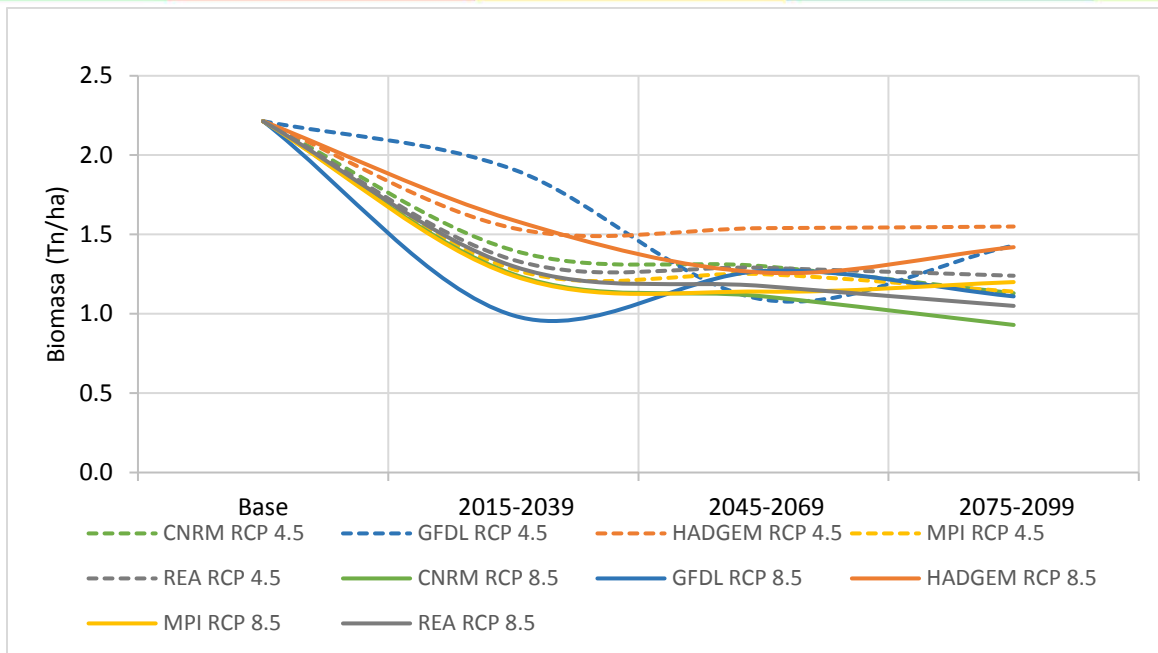


Figura 69 Biomasa bajo cambio climático para Villa de Cos, Zac.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento, al ser un resultado de la biomasa, presenta similares tendencias respecto al comportamiento de la biomasa, aunque es la variable de mayor importancia. En el horizonte cercano y horizonte medio, ningún escenario prevé incrementos, en el horizonte lejano todos los escenarios muestran decrementos, excepto uno, prevé aumento de un 9.26% respecto al escenario base.

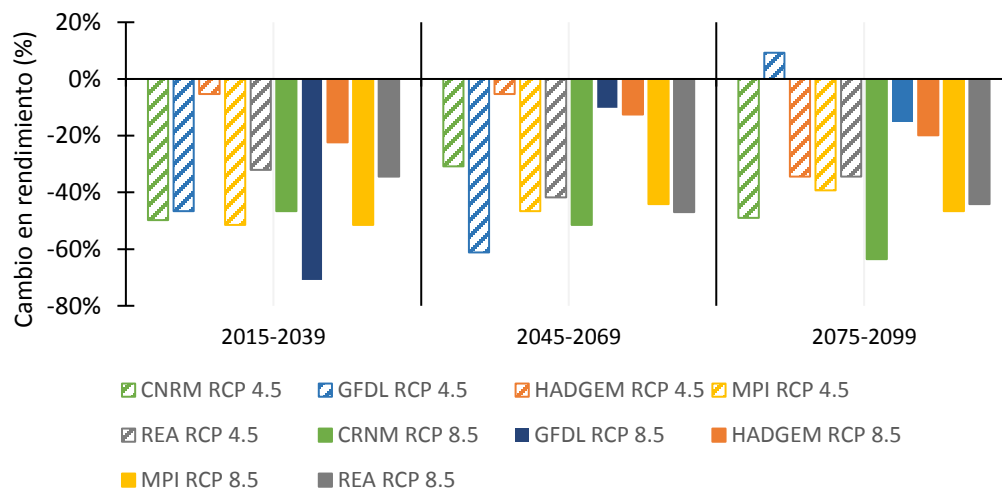


Figura 70 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Villa de Cos, Zac.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Las medidas de adaptación probadas resultaron proyectar rendimientos mayores a los obtenidos con escenarios de cambio climático. A medida de un cambio en la fecha de siembra proyectó incrementos en un 33% y decrementos que en promedio se ubicaron en un cambio de 0% respecto al escenario base. Por otro lado, la medida de acolchados implicó que la mayoría de los

escenarios reportaron decrementos en el rendimiento. La medida de un cambio en la fenología de crecimiento arrojó resultados poco favorecedores, mientras que la aplicación de una lámina de riego proyectó resultados favorecedores sobre todas las otras medidas, por lo cual se considera la mejor medida.

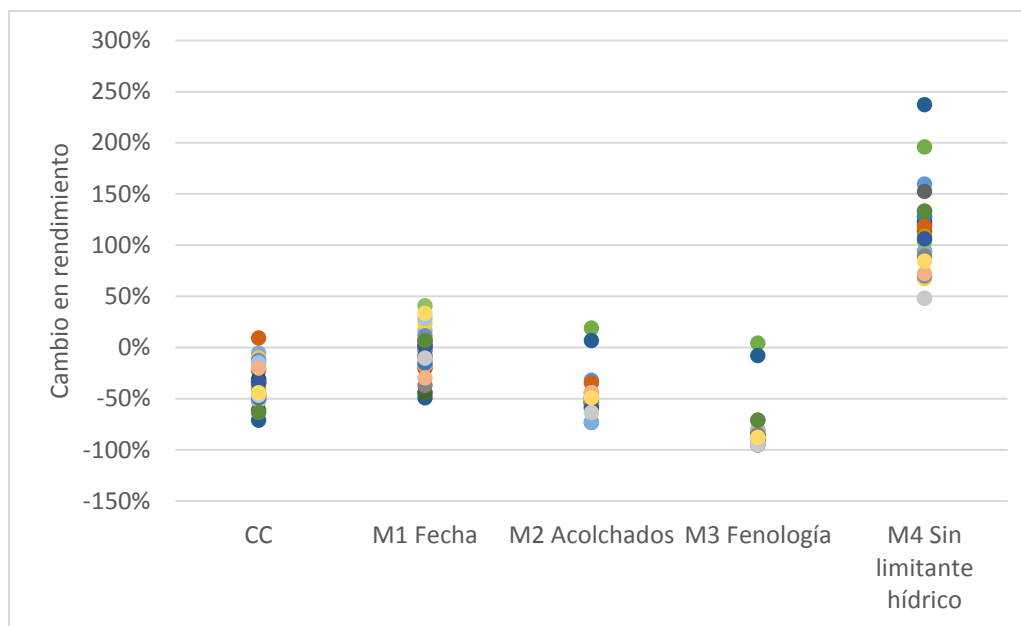


Figura 71 Medidas de adaptación para Villa de Cos, Zac.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

TRIGO

Descripción botánica

El trigo es el segundo cereal en importancia por su producción en el ámbito mundial, destacando la Unión Europea, China y E.U.A. Actualmente el trigo ocupa el segundo lugar de los cereales para la alimentación en México, principalmente bajo condiciones de riego (Márquez, Almaguer, Schwentesius, & Ayala, 2014), aportando con el 55% de la producción nacional la Región del Noroeste y un 28% la Región del Bajío.

El trigo (*Triticum aestivum*) pertenece al orden *Poales*, familia *Poaceae*, tribu *Triticaceae* y al género *Triticum* (OECD, 1999).

En México, los trigos se clasifican de acuerdo a su funcionalidad: fuertes, medio fuertes, suaves y cristalinos. En la región del noroeste se cultivan los trigos panaderos y cristalinos, mientras que en la región del Bajío se cultivan los suaves (Juárez, Bárcenas-Pozos, & Hernández, 2014).

El trigo es una planta anual con posibilidad de crecimiento en los ciclos de primavera-verano u otoño-invierno. Presenta lígulas cortas y el tallo alcanza desde los 0.7 hasta los 1.6 metros (OECD, 1999). Las raíces suelen alcanzar más de un metro, aunque la mayoría se sitúan en los primeros 25 cm. del suelo (CIBIOGEM, 2014)

Requerimientos ambientales

El trigo es un cultivo que se desarrolla bien en climas templados. Se ha documentado su producción hasta en latitudes de 60° en Europa o 55° en América, además de desarrollarse bien en altitudes superiores de los 1500 msnm (OECD, 1999).

En términos generales, la temperatura donde el trigo se desarrolla va de los 10 a los 25°C (Sys et al., 1993). La temperatura mínima de germinación es entre los 3 y los 4 °C, aunque la floración comienza a partir de los 14°C (OECD, 1999).

A continuación, se muestra una tabla de requerimientos.

Cuadro 17 Requerimientos ambientales para trigo

Variable	Referencia	Grado de aptitud			
		Alta	Moderada	Ligera	Nula
Precipitación del ciclo de crecimiento (mm)	(Sys et al., 1993)	450-1000	250-450 1000-1500	200-250 1500-1750	<200 >1750
	(FAO, 2017b)	750-900	-	750-1600 300-750	<300 >1600
Temperatura media (°C)	(Sys et al., 1993)	15-20	10-15 20-25	8-10 20-30	>30 <8
	(FAO, 2017b)	15-23	-	5-15 23-27	<5 >27
Pendiente (%)	(Sys et al., 1993)	0-1	1-4	4-6	>6
Profundidad del suelo (cm)	(Sys et al., 1993)	>90	50-90	15-50	<15
pH	(Sys et al., 1993)	6.5-7.5	5.6-6.5 7.5-8.3	5.2-5.6 8.3-8.5	<5.2 >8.5
	(FAO, 2017b)	6-7	-	5.5-6 7-8.5	<5.5 >8.5
COS (%)	(Sys et al., 1993)	>1.5	1.5-0.8	<0.8	-

Fuente: Elaboración propia con base en Sys et al. (1993) y FAO (2017).

Existen algunas diferencias en cuanto a la resistencia del frío del trigo. De acuerdo con OECD (1999) el trigo puede soportar temperaturas de hasta -25°C para trigo de otoño invierno en condiciones extremas, aunque no especifica la variedad ni el sitio de referencia. A continuación, se muestra un mapa que presenta las zonas potenciales para el cultivo del trigo.

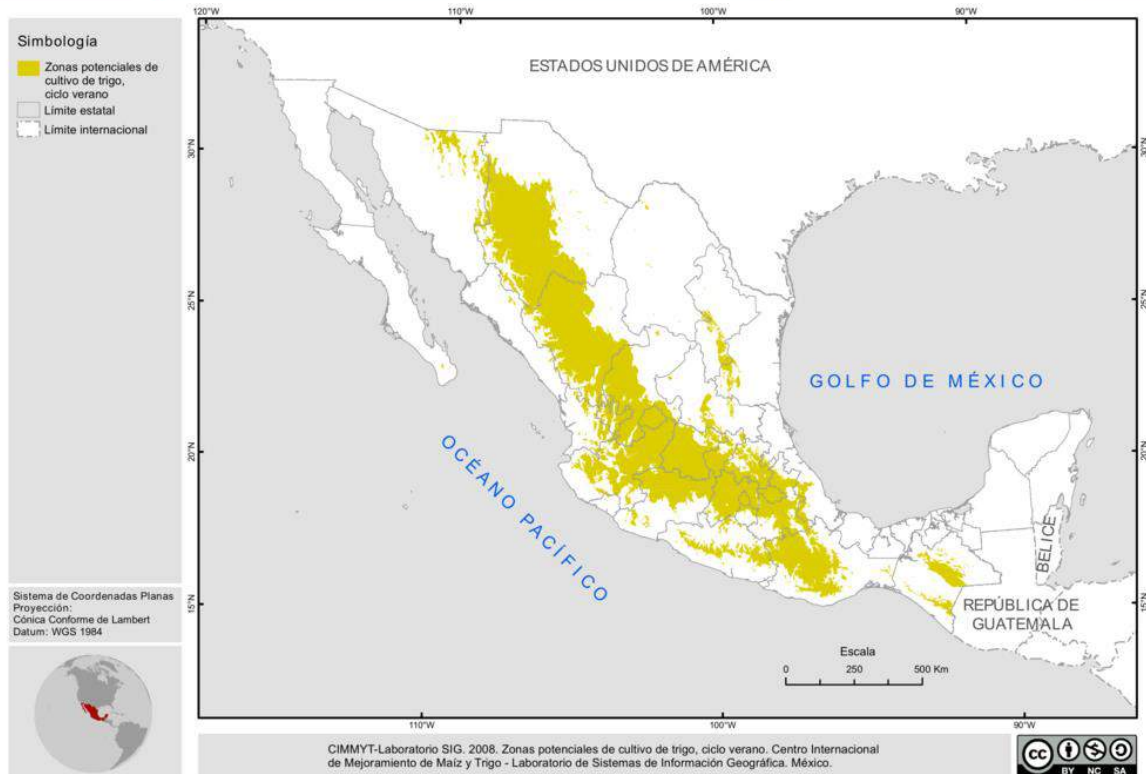


Figura 72 Zonas potenciales para el cultivo de trigo en México

Fuente: Tomado de CONABIO (2010)

Desarrollo de fenología

Dependiendo de las latitudes en el hemisferio norte el trigo puede sembrarse desde agosto hasta diciembre, aunque las fechas de siembra ocurren generalmente entre mediados de septiembre y finales de octubre. No obstante, en Guanajuato y otros estados del centro de México se ha reportado una fecha de siembra que va desde el establecimiento del temporal hasta el 20 de julio (SAGARPA, 2015d).

El ciclo total del cultivo de trigo puede variar de 90 hasta 250 días, conforme a la latitud y las condiciones climáticas donde se encuentre (FAO, 2017b). A nivel general se han clasificado a las etapas fenológicas en dos grupos: la etapa vegetativa y la reproductiva.

Cuadro 18 Etapas fenológicas de trigo

Etapas/Referencia	(Sys et al., 1993)	(SAGARPA, 2015a)	Referencia
Germinación	10-15	-	Emergencia de las primeras hojas
Máxima cobertura	40	-	Establecimiento del amacollamiento
Máxima profundidad radical	50	-	Máxima profundidad de raíces
Embuchamiento	-	-	Hinchamiento de las panículas o espigas
Floración	60	74-93	Inicio del espigamiento
Duración de la floración	15-20	-	Fin de la floración: todas las espiguillas han terminado la floración

Inicio de madurez	85	-	Inicio de la formación del fruto. Grano en estado lechoso.
Senescencia	95	-	Inicio de la senescencia
Madurez	95-135	119-135	Grano masoso, sólido y difícil de dividir con la uña del pulgar

Fuente: Elaboración propia con base en Sys et al. (1993) y SAGARPA (2015a).

Los rendimientos reportados según (Sys et al., 1993) van de 1.3 a 2 ton/ha en condiciones de manejo de temporal y poca tecnificación. En cambio, para manejos comerciales los rangos varían de 3 a 5 ton/ha, aunque bajo manejo comercial se pueden alcanzar las 6 ton/ha.

Para la cosecha el contenido de humedad del grano al momento de la trilla se recomienda que sea del 13% (SAGARPA, 2015a).

Estudios de caso

El trigo es el segundo cereal con mayor importancia en México. Es utilizado para elaborar diversos alimentos, aunque se reconocen dos variantes según su destino final: el trigo cristalino y el panificable. El primero es utilizado para producir pastas y ocupa el 55.8% de la producción, mientras que el segundo es utilizado para panificación y representa el 44.2%. México importa trigo grano suave en el orden de las 4.5 millones de toneladas para el 2014, mientras que exporta sólo 1.3 millones del trigo de tipo duro (SIAP, 2015a).

Este cereal es estratégico para la alimentación directa y para la elaboración de diversos productos intermedios en México. De acuerdo con la metodología establecida para evaluar rendimientos en cultivos, se eligieron dos estaciones para evaluar considerando la estacionalidad de la producción. La estación Tres Hermanos, Navojoa, Sonora refiere a cultivo de trigo en modalidad Otoño Invierno mientras que la estación Ocampo, Ocampo, Guanajuato se aboca a la estación Primavera Verano. La siguiente figura muestra la distribución de las estaciones seleccionadas para efectuar el modelado del rendimiento.



Figura 73 Distribución de las estaciones seleccionadas para trigo

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2008)

Para caso de estudio se realizó una revisión sobre la calidad de las series climáticas. Para ello se retomó la metodología utilizada por López (2016), la cual incluye un control de calidad bajo dos metodologías (método de desviaciones estándar y rangos intercuartílicos) y una prueba de homogeneidad con el programa RHtestV4. La importancia del control de calidad para el proceso de modelado reside en la confiabilidad de los datos para obtener resultados congruentes en el programa *Aquacrop*. Una vez efectuada la revisión climática se procedió a recopilar información paisajística y fenológica para cada caso de estudio. Con la información obtenida se calibraron los modelos de cultivo en el programa *Aquacrop* con ayuda de los datos observados por el SIAP. En los siguientes apartados se presentan los resultados correspondientes a cada estación modelada.

Tres hermanos, Navojoa, Sonora

La estación de Tres Hermanos se encuentra en el municipio de Navojoa, Sonora. Pertenece al CADER Navojoa y al DDR del mismo nombre. La agricultura que se practica en la región es de tipo tecnificado, cultivando principalmente dos variedades de trigo, el suave y el cristalino. A continuación, se presenta un cuadro con información general de la estación.

Cuadro 19 Datos de referencia de la estación Atotonilco

Estación	ID ¹⁸	Vulnerabilidad ¹⁹	Fuente/referencia ²⁰	Observaciones
----------	------------------	------------------------------	---------------------------------	---------------

¹⁸ Número asignado por el Servicio Meteorológico Nacional para identificación

¹⁹ Vulnerabilidad del municipio conforme al Atlas de Vulnerabilidad al Cambio Climático

²⁰ Origen de la propuesta de la estación, considerando el control de calidad climático

Tres hermanos, Navojoa, Sonora	26102	Baja	Depuradas López (2015)	por	Cerca de municipio vulnerable (media). Rendimientos de 6.1 ton/ha
--------------------------------------	-------	------	---------------------------	-----	---

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación de Tres Hermanos se encuentra en la latitud 27.077° norte y longitud -109.44° oeste, a 48 msnm. Se encuentra ubicada en los límites de diversas topofomas, dentro de las que destaca el valle abierto de montaña con lomerío, la bajada con lomerío y el lomerío con valles, todos dentro de la subprovincia fisiográfica del Pie de la Sierra en Sonora.

Climatología

Como resultado del control de calidad con el programa RClindex, se registraron cambios en la base de datos climáticos depurada por López (2016). La mayoría de los outliers detectados con el método de 4 sigmas se encontraron en el año 1979 y correspondieron a la temperatura máxima. Después de revisar con las bases de datos de Desinventar, el FONDEN y CENAPRED, entre otras fuentes, se determinó que correspondían a la variabilidad natural. Una vez ejecutado el control de calidad extra, se verificaron las inhomogeneidades y se encontró un salto de la temperatura máxima en marzo del 2003; mientras que para la temperatura máxima se registraron tres saltos significativos. Comparando las fechas se determinó que el salto en la temperatura máxima se debía a la variabilidad natural, por lo que esta serie no fue homogeneizada. En cambio, la temperatura mínima requirió de homogeneización para uno de los tres saltos que ocurrió en diciembre de 1976.

El rango anual de temperatura media en Navojoa oscila de 22° a 24°C (INEGI, 2009j). La distribución de la temperatura en el año no es homogénea entre la máxima y la mínima. La temperatura máxima tiene un pico en junio, aunque se mantiene relativamente homogénea durante varios meses. En cambio, la temperatura mínima se mantiene muy baja de enero a marzo y a continuación sube abruptamente hasta reportar un pico superior en junio. En la figura siguiente se parecía una comparativa entre temperatura máxima y mínima. En el eje “x” se observan los meses del 1 al 12, mientras que el eje “y” corresponde a los valores de temperatura en $^\circ\text{C}$ (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

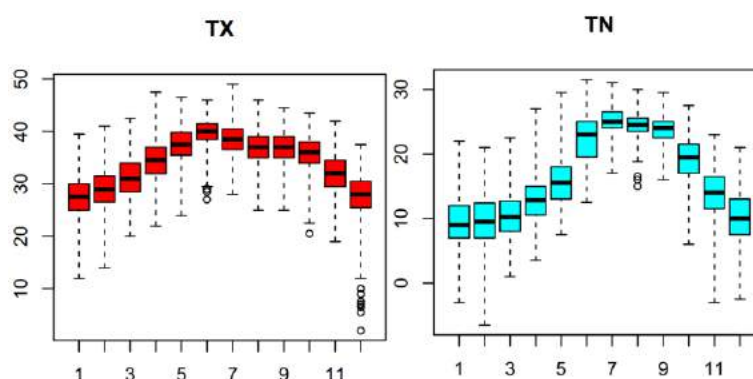


Figura 74 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Tres Hermanos

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

La precipitación anual histórica se reporta en un rango de 300 a 700 mm anuales (INEGI, 2009j). El periodo de crecimiento de la estación comienza el 18 de julio, dura sólo 74 días y termina el 29 de septiembre. Debido a las condiciones de precipitación y su interacción con la

evapotranspiración alta en esa zona, no se presenta periodo húmedo. En la siguiente figura se muestra un esquema gráfico de la intersección entre la mitad de la evapotranspiración y la precipitación, marcando de esta manera el periodo de crecimiento.

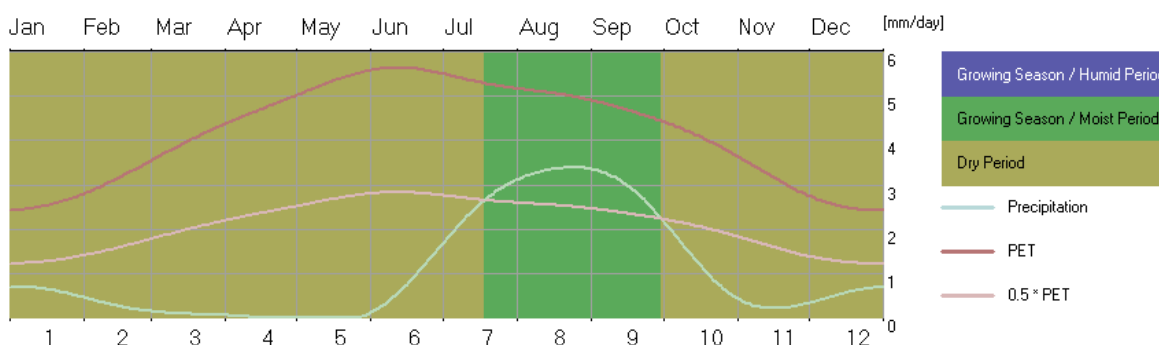


Figura 75 Periodo de crecimiento de la estación Tres Hermanos

Fuente: Elaboración propia con *software LocClim*

De acuerdo con INEGI, el clima donde se encuentra la estación Tres Hermanos es de tipo Bso(h)hw(e) seco cálido, con temperatura media anual mayor a 22°C y Bso(h)hw(x')(e) también cálido seco, con temperatura media anual mayor a 18°C y oscilación mayor a 14°C (INEGI, 2008).

Cultivo y manejo

La variedad de cultivo que se utilizó para la calibración del modelado fue la de tipo suave, que es utilizada para diversos fines dentro de los que se encuentra la panificación.

El municipio de Navojoa ubicado al Sur del estado de Sonora, se ubica en el Valle de Mayo, una zona conocida como productora de trigo, enseguida del Valle Yaqui (Márquez et al., 2014), además de los cultivos de maíz, cártamo y papa (Inzunza, 2008). De acuerdo con la relación de distritos de riego por CONAGUA (2010), el municipio se ubica en el DR038 Rio Mayo, el cual se compone de aguas de tipo residual urbano y por la actividad porcícola (Duarte, 2007).

La fecha de siembra del cultivo de trigo en el ciclo otoño-invierno, se realiza durante el periodo del 15 Nov al 15 Dic, considerando al mes de diciembre como el ideal (Aquino, 1998; Hernández, Guzman, & Valenzuela, 2010), en este sentido el SIAP-SAGARPA (2016b), señalan que el 46.8% de los agricultores del estado de Sonora siembran en diciembre, mientras que el 29.1% durante el mes de enero en condiciones de riego. La densidad de población varía para el sur de Sonora de 160kg/ha hasta 80kg/ha (Ibarra, 1991; Rodríguez-casas, Canseco-vichis, Martin, & México, 2010).

El número de riegos varía de acuerdo a las condiciones del ambiente y el tipo de suelo, sin embargo el promedio de riegos es de 3 a 5, sugiriendo aplicar un riego de presiembra; con una lámina de riego de 0.97 m (Gonzalez, Palacio, Scott, & Exebio, 2001; SEMARNAT, 2010). En el siguiente cuadro; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra el número de riegos y los días a ser aplicados. Los rendimientos que se maneja para esta región son de 5.72 ton/ha (CONAGUA, 2010; SIAP, 2015b) y en algunos sitios hasta 7ton/ha.

Cuadro 20 Calendario de riego para trigo en Navojoa

Riegos de auxilio	Días después	Etapas de crecimiento
-------------------	--------------	-----------------------

	de la siembra	
1	40-55	Amacollamiento
2	75-85	Encañe
3	100-110	Espigamiento
4	115-125	Grano en estado lechoso-masoso

Fuente: Elaboración propia con datos de (Hernández *et al.*, 2010)

Los suelos dominantes en el municipio son, Vertisol 44.79%, Regosol 26.67%, Calcisol 7.42% (INEGI, 2009a). Los vertisoles son por un alto contenido de arcillas, su color común es negro a gris, pero en el Norte del país es de color café rojizo. Son suelos muy fértiles y muy poco susceptible a la erosión, pero con riesgo alto a la salinización; en estos suelos se produce llega a producir la mayor parte de cereales, hortalizas y algodón. En cambio, los de tipo regosol son pobres en materia orgánica, su productividad depende de la profundidad y la pedregosidad del sitio. Los calcisol son suelos que se asocian con el clima árido o semiárido, son susceptibles a la salinización sin embargo pueden llegar a tener alta productividad (INEGI, 2004). De acuerdo con los perfiles de suelo reportados por INEGI, el valle donde se encuentra la estación Tres Hermanos presenta texturas franco-arcillo-arenosas y franco arcillosas, con buenas propiedades para la retención de humedad.

Modelo base

A partir de los datos modelados por *Aquacrop* es posible ver que el ajuste fue bueno con respecto al observado por SIAP. El rendimiento promedio por parte del SIAP (SIAP, 2015b) durante los años 2000-2011 fue de 5.72 ton/ha bajo un manejo de riego durante el ciclo Otoño-invierno, por otra parte el rendimiento promedio que se obtuvo con el modelo fue de 5.41 ton/ha, teniendo una diferencia de 5.4% menos en ambos rendimientos.

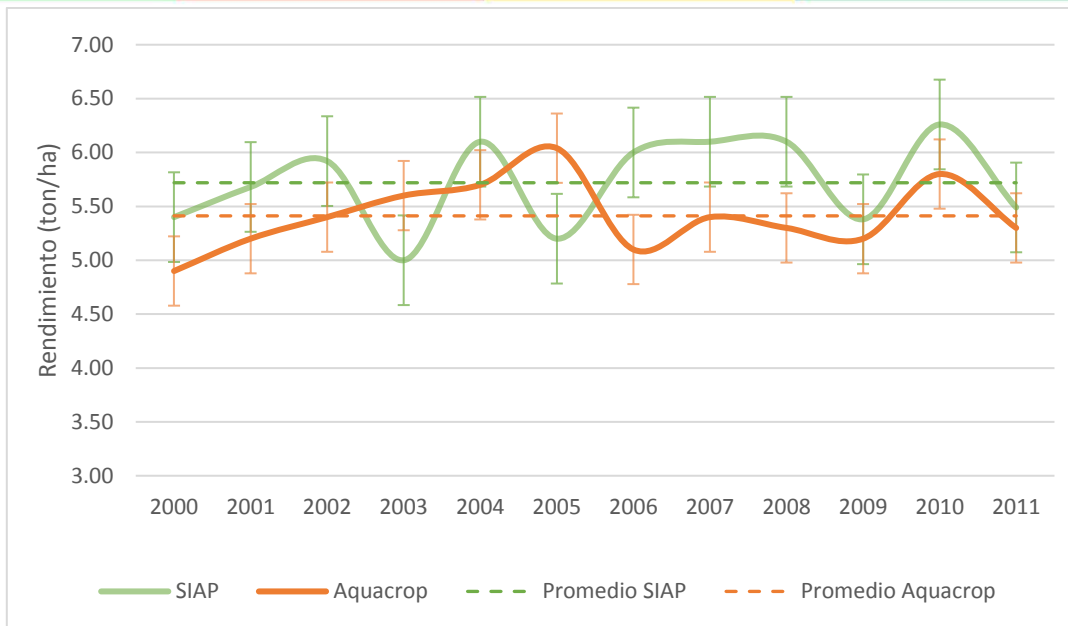


Figura 76 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Villa de Cos

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento del trigo se graficó con dos variables (precipitación y temperatura), en la primera grafica se observa que el rendimiento modelado por *Aquacrop* responde favorablemente en aquellos años donde la precipitación fue alta.

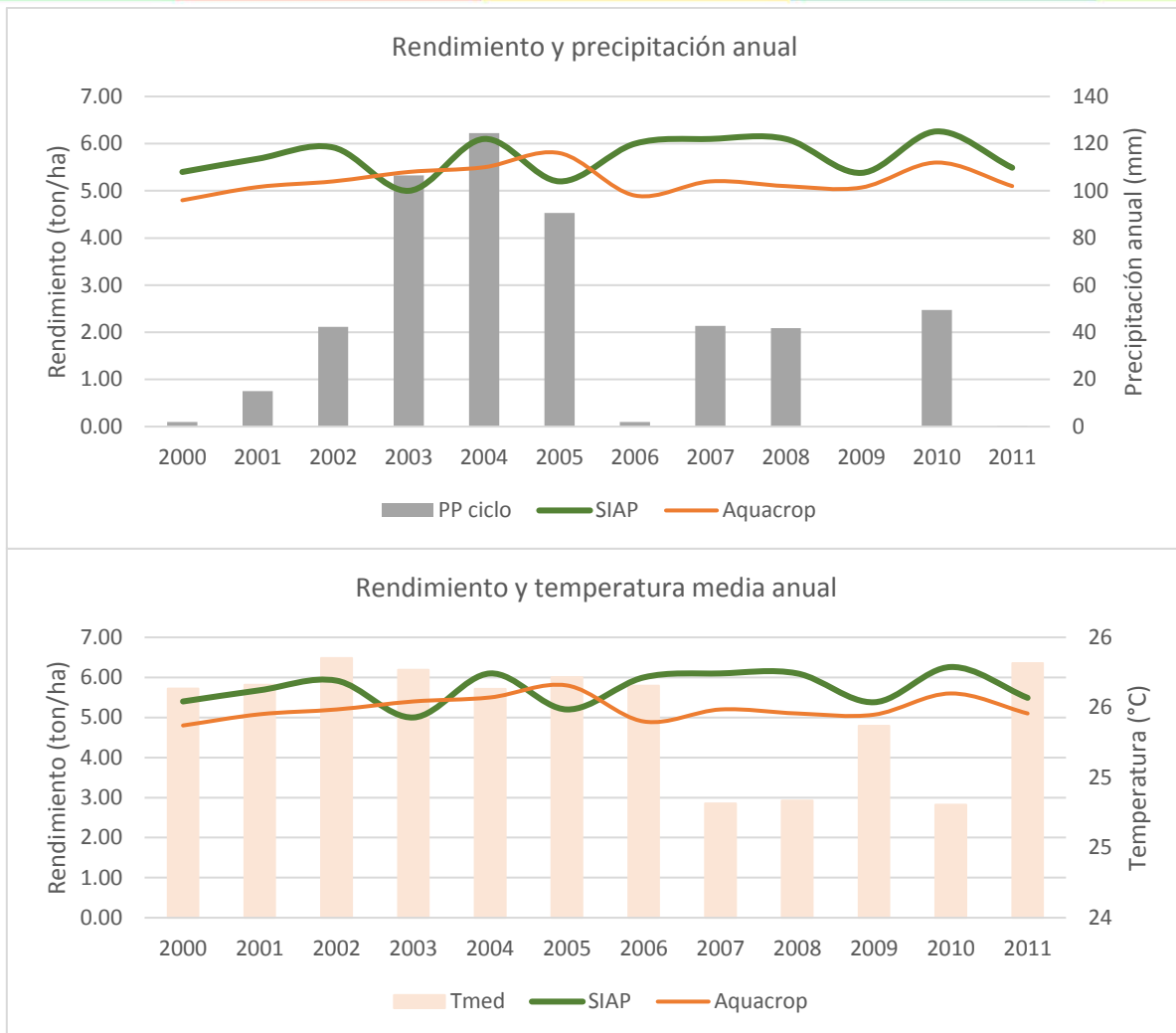


Figura 77 Modelo base para trigo en Navojoa, Son.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Por otra parte, el error medio cuadrático fue de 0.59, un valor bueno ya que el modelo difiere en menos de una tonelada con el valor observado. Otro indicador a considerar es el coeficiente de correlación, en el cual el SIAP reportó un valor medio pero negativo (-0.6), en cambio *Aquacrop* tuvo un valor muy bueno (0.79).

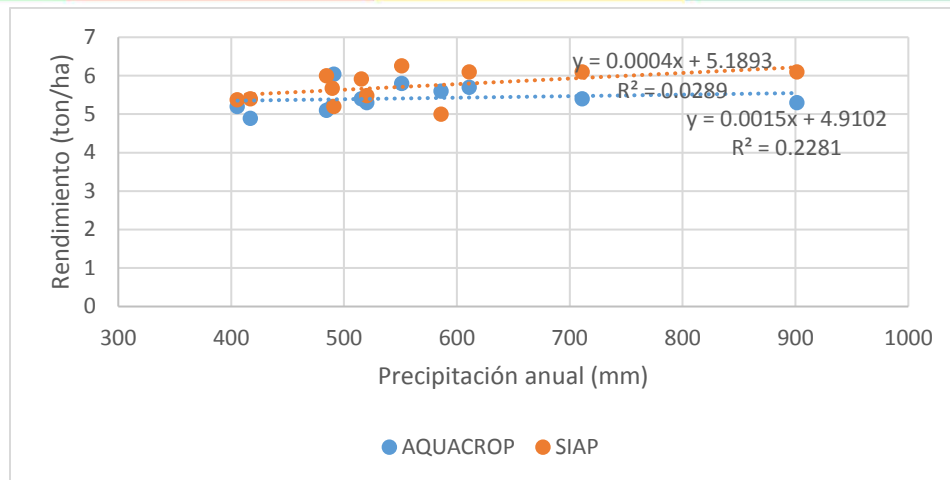


Figura 78 Relación de rendimiento con precipitación en estación Tres Hermanos, Navojoa

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La biomasa óptima que calculó el modelo para el periodo de 20 años (1991-2011) fue de 13.4 ton/ha en promedio, sin embargo, solo el 80 % de la biomasa fue aprovechado por el cultivo, convertido en toneladas representa 10.8 ton/ha en promedio. En la Figura 79 se observa un estrecho comportamiento del rendimiento del grano y la biomasa.

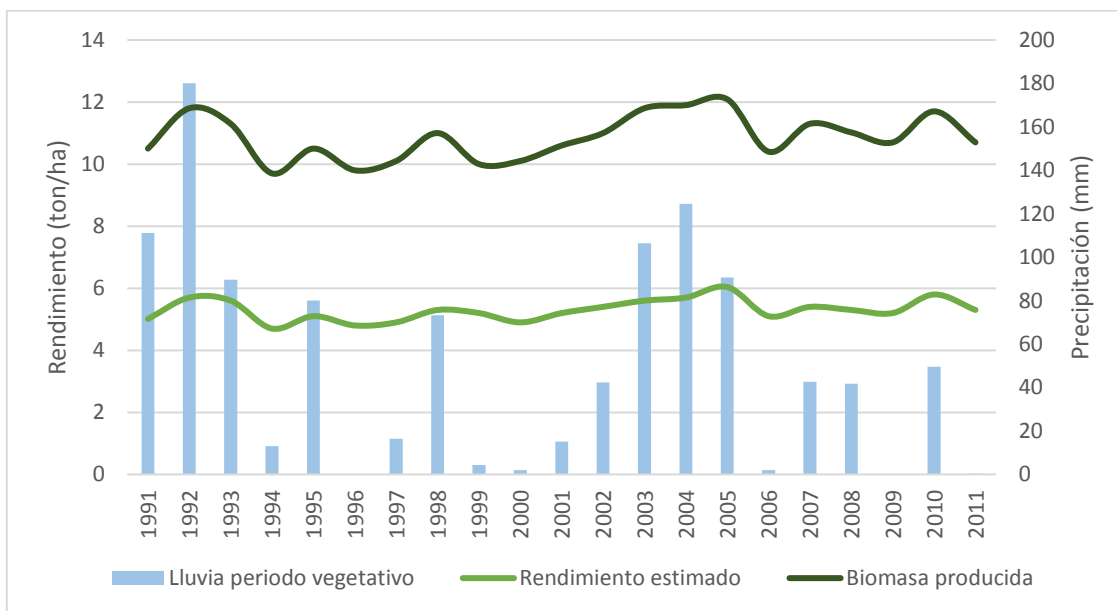


Figura 79 Rendimiento y biomasa producida en la estación Tres Hermanos, Navojoa

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Cabe mencionar que el modelo fue sensible ante la disminución de la precipitación que significó el año Niño de 1997. En dicho año, el rendimiento cayó un 8% respecto al promedio, lo que implicó 0.40 ton/ha menos.

Escenarios de cambio climático

De acuerdo con los datos de precipitación histórica de la estación de Cuencamé, es posible ver un periodo de lluvias marcado por tres meses de junio a septiembre, con una precipitación

promedio de 100 mm, sin embargo, durante el mes de diciembre se muestra un incremento en la precipitación, lo cual ha permitido el desarrollo de algunos cultivos.

Por otra parte, el escenario de cambio climático del RCP 4.5 simbolizado por una coloración gris continuo podría tener precipitaciones ligeramente más altas que las del escenario base, mientras que la precipitación del RCP 8.5 representada por una línea punteada proyecta fluctuaciones.

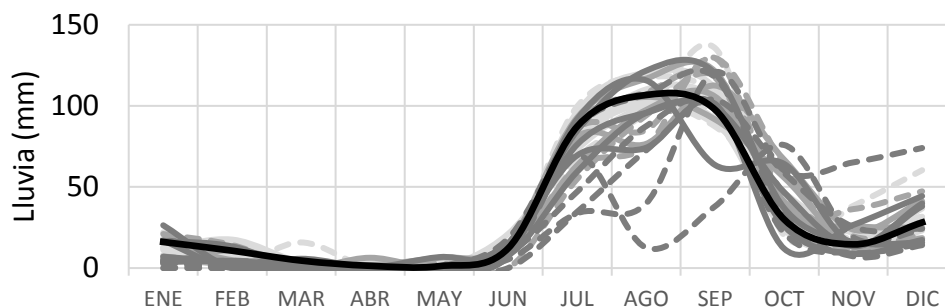


Figura 80 Precipitación con cambio climático en Tres Hermanos, Navojoa, Son.

Fuente: Elaboración propia

La biomasa del escenario histórico que se reportó fue de 10.86 ton/ha, sin embargo, las condiciones de ambos escenarios con cambio climático tienden a disminuir el rendimiento hasta el horizonte lejano. Cabe destacar que el escenario GFDL-CM3 del RCP 4.5, tuvo una disminución de casi dos toneladas, considerada la más baja de esta gráfica.

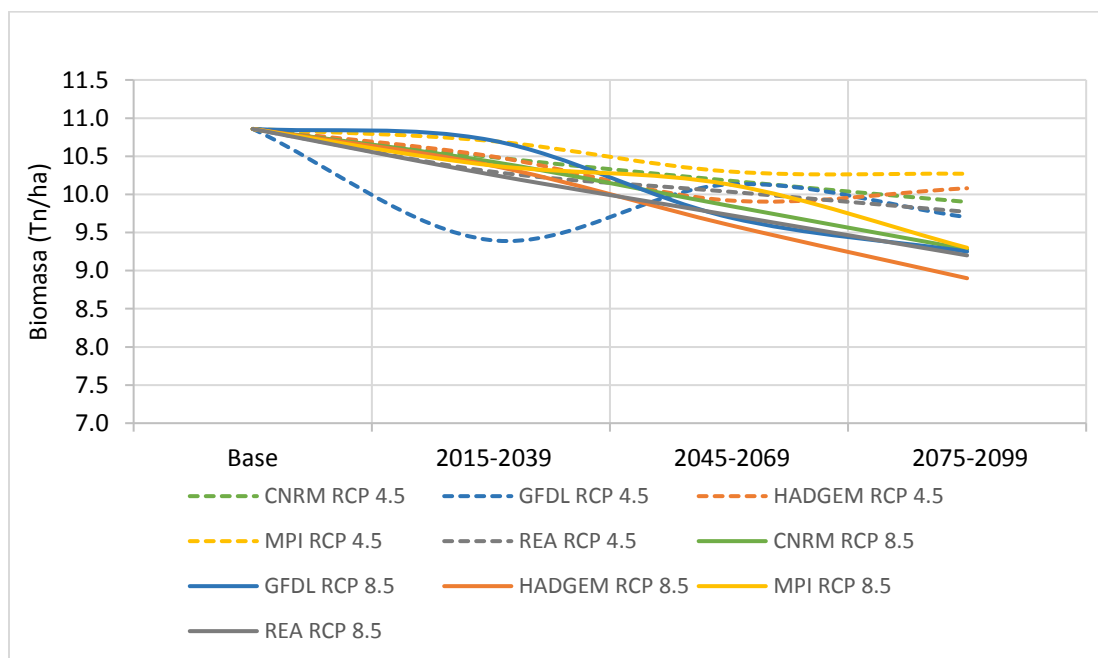


Figura 81 Biomasa bajo cambio climático para Tres Hermanos, Navojoa, Son.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software *Aquacrop*

Tomando en cuenta los rendimientos de grano proyectados con cambio climático, se visualizan en la siguiente grafica que en los tres horizontes de años habrá una disminución del rendimiento; en el caso del horizonte cercano, se espera una disminución en promedio del -5%, excepto por

el modelo GFDL-CM3 RCP4.5, el cual proyecta hasta un -15 %, cabe destacar que el modelo MPIECHAM-5 RCP 4.5 fue el único modelo que proyectó un leve incremento del 2%. En el horizonte medio, los modelos de ambos RCP tuvieron un cambio negativo de un -7% en promedio. Por último, en el horizonte lejano, se proyectó el mismo comportamiento negativo, sin embargo, en el RCP 4.5 el cambio fue de -10%, situación contraria en el RCP 8.5 en donde la mayoría de los modelos presentaron un cambio en un rango de -16 al -20 por ciento, excepto por un modelo que tuvo hasta un -28%.

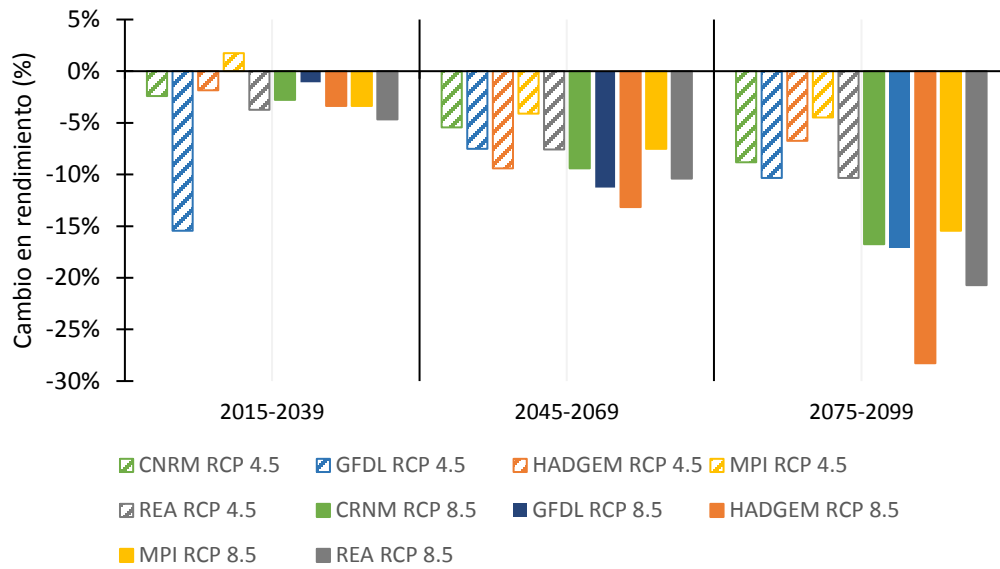


Figura 82 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Tres Hermanos, Navojoa, Son.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Con base a los rendimientos proyectados con cambio climático, se aplicó cuatro medidas de adaptación. La medida de cambio de fecha de siembra proyectó resultados con incrementos, por otro lado, las medidas de adaptación: acolchados y fenología de crecimiento, no favoreció al aumento del crecimiento, no obstante, la medida de riego es la que mejor beneficia al aumento del rendimiento en la mayoría de los escenarios.

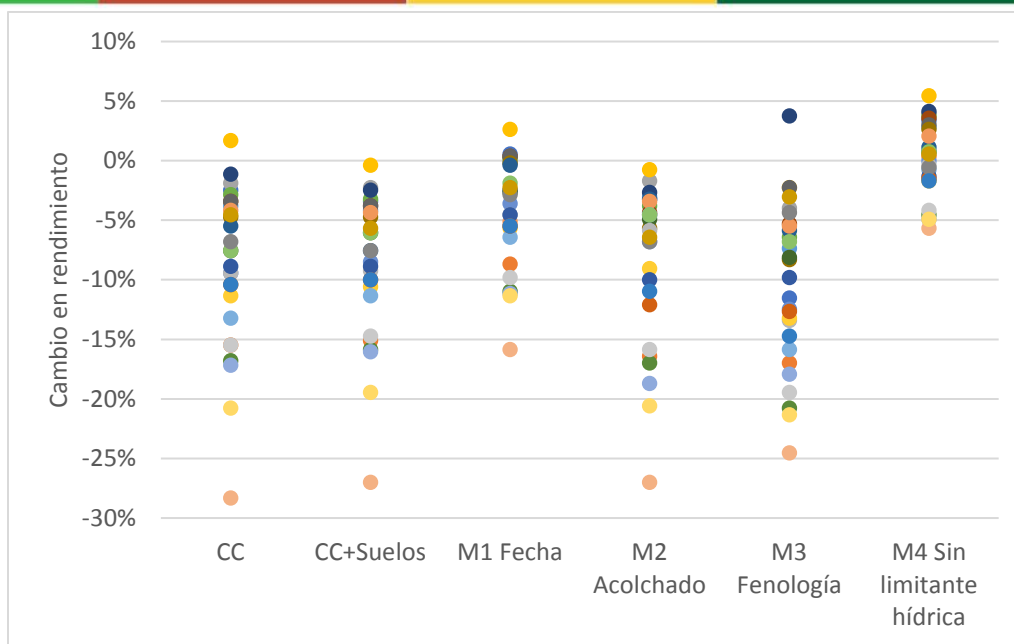


Figura 83 Medidas de adaptación para Navojoa, Son.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software *Aquacrop*

A partir de la gráfica de medidas de adaptación, es posible considerar que los resultados plasmados en el cambio de fecha de siembra y riego, son recomendables su aplicación para obtener ligeros incrementos en el rendimiento.

Ocampo, Guanajuato

El municipio de Ocampo se encuentra en el estado de Guanajuato, pertenece al CADER de San Felipe y al DDR de Dolores Hidalgo. La producción de trigo de temporal en la región del norte de Guanajuato presenta un potencial bajo en comparación con los rendimientos comerciales de riego del resto del Bajío. No obstante, el trigo se cultiva en algunas zonas del municipio y se ha reportado que tiene usos culinarios particulares. La estación modelada cuenta con las siguientes características generales.

Cuadro 21 Datos de referencia de la estación Ocampo

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Ocampo, Guanajuato	11050	Media	Bibliografía	Rendimientos de 1.3 ton/ha con manejo de temporal

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación de Ocampo se encuentra a 21.65° latitud norte y -101.48° longitud oeste con una altitud de 2250 msnm. La estación se ubica físicamente dentro del área de influencia de una topoforma de tipo meseta disectada, aunque en el municipio también se reconocen formaciones de tipo llanura desértica, ambas pertenecientes a la subprovincia fisiográfica denominada Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.

Climatología

La estación de Ocampo no fue depurada por los trabajos de consultoría de (López, 2016). En consecuencia, se procedió a ejecutar un control de calidad conforme a la metodología

previamente establecida y descrita. La serie de datos de la estación resultó ser relativamente homogénea de acuerdo con el primer análisis visual, con excepción de que muestra una discontinuidad en los registros en la primera mitad del año 2003 (ver gráficas de Anexo 1).

Sólo se registraron siete outliers considerando el periodo de tiempo de 1960 al 2012 según el control de calidad básico de RClindex. Se buscaron las referencias en diversas bases de datos y se realizaron los cambios que fueron pertinentes. El control de calidad extra arrojó relativamente pocos valores de outliers o datos repetidos, en comparación con otras estaciones. Para los 15 outliers encontrados se revisaron distintas estaciones y bases de datos para corroborar las diferencias, y fueron corregidos o ajustados conforme a la metodología.

El proceso de homogeneización consistió en encontrar los saltos o “change points” que presentaran las series de temperatura dentro del periodo analizado. La serie de temperatura máxima presentó 4 saltos (en 1962, 1986, 1988 y 2004, ver Anexo 1); el salto de 1962 correspondió a un evento de La Niña, el del 1986 no fue significativo estadísticamente por lo que se descartó después de revisar el correspondiente índice MEI, el de 1988 se conservó pues correspondió a un año Niña y finalmente el del 2004 no correspondió con ningún evento extremo por lo que fue eliminado. De esta forma se obtuvo la homogeneización final.

La serie de temperatura mínima presentó un solo salto o *change point* en noviembre del 1974, año en el que se presentó una condición del índice MEI baja, por lo que no se homogeneizó al tratarse de un año Niña.

La temperatura media anual del municipio de Ocampo oscila de 12° a 18°C (INEGI, 2009f). La temperatura máxima tiene un pico en el mes de mayo, donde se llegan a alcanzar de 28° a 30° C, mientras que la temperatura mínima alcanza sus puntos más bajos en enero y febrero reportando valores de entre 3° y 5°C. La mayor variación en ambas series de temperatura (máxima y mínima) se registra en la estación de invierno. En la siguiente figura se aprecia la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) histórica. (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

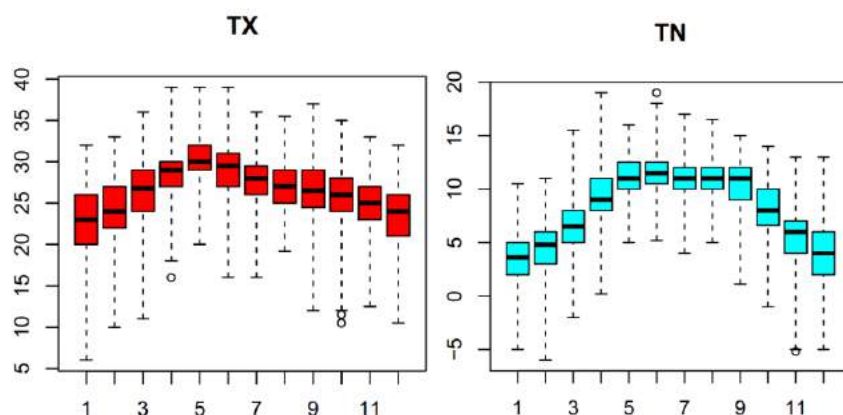


Figura 84 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Ocampo

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

La precipitación anual histórica oscila entre los 400 y 700 mm (INEGI, 2009f). El periodo de crecimiento para la estación de Ocampo tiene una longitud de 115 días, comienza el 10 de junio y acaba el 2 de octubre. La evapotranspiración es mayor en los meses con temperaturas más cálidas, por lo que en mayo y junio llega a alcanzar cerca de 200 mm mensuales. Por otro lado, las precipitaciones en esos meses son bajas respecto a la demanda hídrica puesto que alcanzan de 30 a 100 mm mensuales. Por este motivo no se alcanza un periodo húmedo. En la siguiente

figura se aprecia la distribución de la precipitación y el comportamiento de la evapotranspiración en el año.

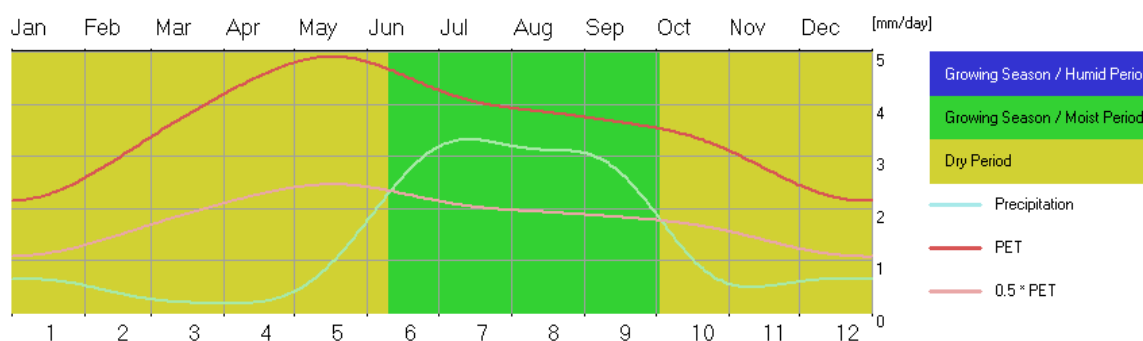


Figura 85 Periodo de crecimiento de la estación Ocampo

Fuente: Captura de pantalla en el *software CliCom*

Bajo estas condiciones, el clima del municipio se ubica en una categoría de tipo semiárido templado de tipo BS1kx'(w)(e)g, con régimen de lluvias intermedio y un porcentaje de lluvia invernal menos a 18% con canícula.

Cultivo, manejo y suelo

Se sabe que el trigo es uno de los cultivos más importantes de Guanajuato, particularmente en el bajío. Para su producción a nivel comercial se ha establecido que el manejo óptimo del cultivo es con riegos, el cual llega a reportar rendimientos de 6 ton/ha en promedio (Ramírez Ramirez, Espinosa, & Ramírez, 2009).

Se recomienda utilizar una densidad de población a partir de 120 kg por hectárea. Para una producción de gluten suave se recomienda de 120 a 150 kg/ha (SAGARPA, 2015d). Se ha reportado que uno de los problemas más importantes de producción en Guanajuato es la escasez de agua, el uso de grandes cantidades de riego para obtener buenos rendimientos y el abatimiento de los mantos freáticos (Ramírez Ramirez et al., 2009). El método de siembra recomendado es al voleo manual o con máquina sembradora en camas preferentemente separadas con una distancia de al menos 76 centímetros (SARH, 1990).

Se ha establecido que para el cultivo de trigo de temporal en Guanajuato la fecha de siembra en el ciclo primavera verano va desde que comienza el temporal hasta el 20 de julio. La mayoría de las variedades que se siembran en Guanajuato son las de tipo fuerte, que es el trigo destinado para la elaboración de pastas (SAGARPA, 2015d). Se ha reportado que las principales variedades para trigo de temporal son las de Salamanca S75, Temporalera M87 y Gálvez M87. Estas variedades son aptas para su siembra en el ciclo de primavera verano, registran un periodo vegetativo de 88 a 100 días a la madurez fisiológica y una floración entre los 47 y 58 días después de la siembra (SARH, 1990).

Diversas nuevas variedades se han generado para optimizar el uso del agua y la resistencia a ciertas enfermedades. Tal es el caso de la variedad Altiplano F2007, la cual reportó un mejor rendimiento comparación con varias razas testigo y se obtuvo desde un 5% hasta un 21% más rendimiento bajo condiciones de temporal (INIFAP, 2009a).

La preparación del mediante una labranza de tipo tradicional incluye un subsoleo y de uno a dos pasos de rastra, además de una nivelación final. Para el manejo de trigo de temporal en Guanajuato se recomienda ampliamente el uso de la labranza de conservación, ya que reporta una relación beneficio costo mayor a la de la labranza tradicional (SAGARPA, 2015d).

Los principales tipos de suelo del municipio son el Phaeozem, el Leptosol y el Durisol. Siguiendo la información reportada por INEGI respecto a los perfiles de suelo, la textura de la zona se encuentra dentro de la categoría franca y franco arenosa. La profundidad de los suelos es de alrededor de 75 cm (INEGI, 2005).

Modelo base

El rendimiento promedio observado de 2000 a 2011 según SIAP fue de 1.19 ton/ha para el municipio de Ocampo, bajo condiciones de temporal en el ciclo primavera-verano. Para el mismo periodo de tiempo el mejor modelo de cultivo obtenido en *Aquacrop* reportó rendimiento de 1.33 ton/ha, es decir, 140 kg/ha más que el de SIAP. Considerando que la diferencia de promedios es menor al 11% respecto a los datos observados, el modelo se consideró aceptable para los fines de la presente consultoría.

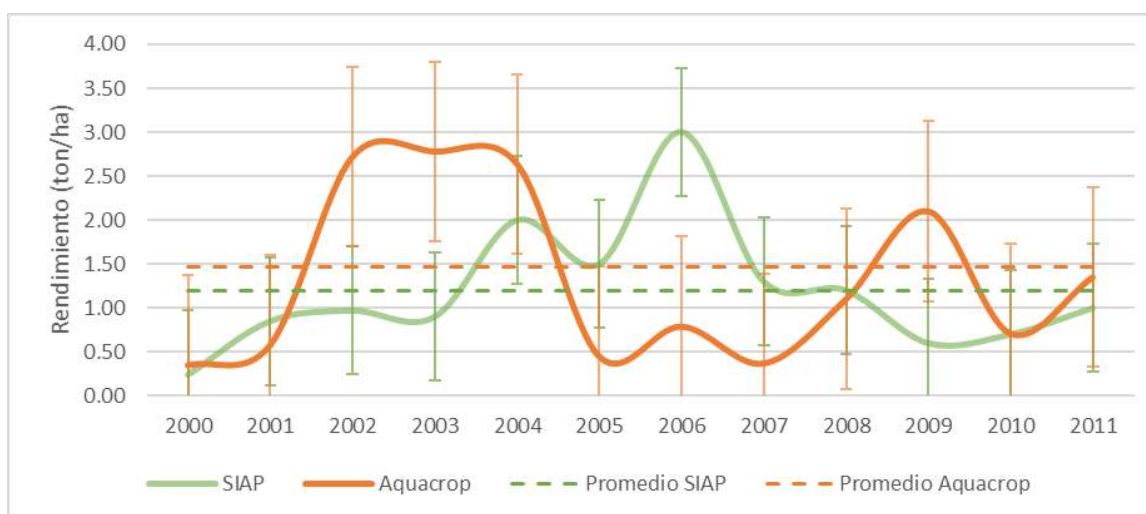


Figura 86 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Ocampo

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Aunque en promedio el modelo de *Aquacrop* fue cercano a SIAP, la tendencia y comportamiento en cada año fue diferente. En los años 2002-2004 *Aquacrop* proyecta rendimientos altos en comparación con los reportados por SIAP. De acuerdo con las bases de datos de Desinventar, en el 2003 se registró una inundación que llegó a afectar a algunos cultivos y disminuyó la producción a pesar de haber tenido buenas condiciones para el temporal. En la siguiente gráfica se comparan los rendimientos de *Aquacrop* y SIAP contra dos variables de importancia climática: la precipitación anual y la temperatura media anual.

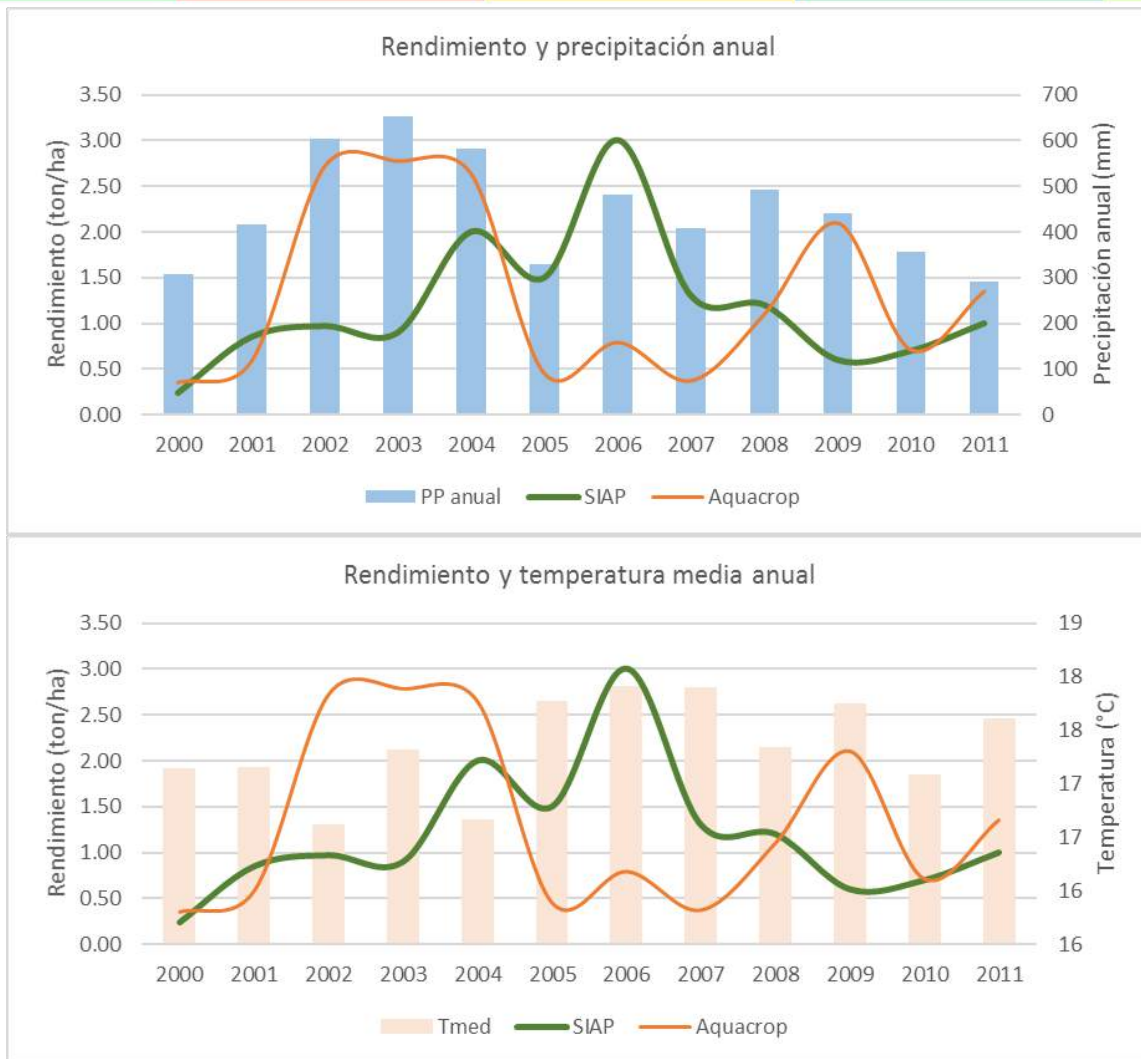


Figura 87 Modelo base para trigo en Ocampo, Gto.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El coeficiente de correlación de los datos de SIAP con la precipitación fue de 0.3, mientras que *Aquacrop* respondió con un 0.8 para la misma variable. El modelo *Aquacrop*, al estar enfocado al manejo de recursos hídricos, fue más sensible ante la precipitación. Al analizar un modelo lineal que compara el rendimiento contra la lluvia anual se obtuvo que los datos obtenidos con *Aquacrop* fueron más directamente proporcionales a la lluvia de lo que se reportó en SIAP. En la figura siguiente se aprecia un diagrama de puntos que contrasta los datos de SIAP contra los que se generaron por *Aquacrop*.

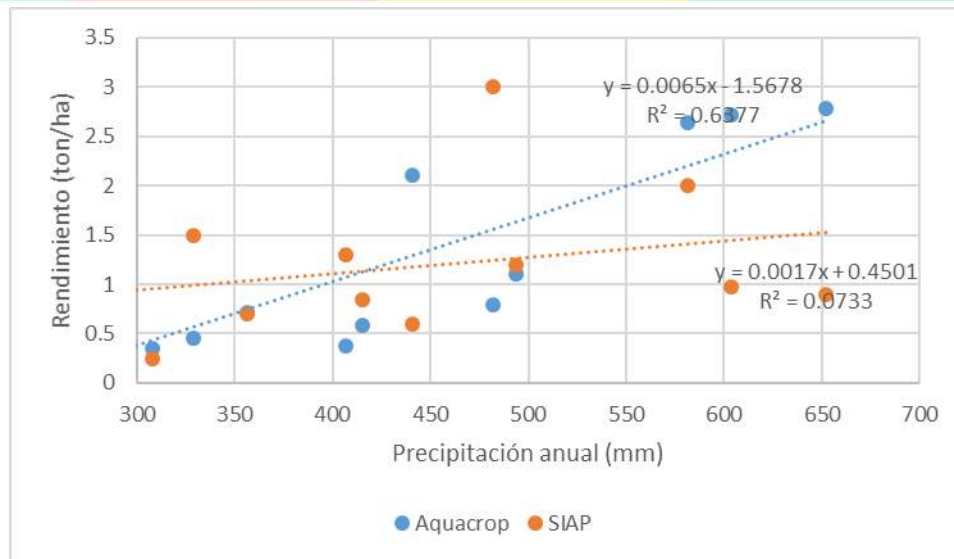


Figura 88 Relación de rendimiento con precipitación en estación Ocampo

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Realizando un análisis retrospectivo a la década de los 90's se encontró que el rendimiento promedio desde 1996 al 2011 fue de 1.34 ton/ha según el modelo generado por *Aquacrop*. La biomasa producida tuvo diversos cambios, pero en promedio fue de 5.08 ton/ha. No obstante, potencialmente se podrían obtener 14.47 ton/ha si no existiera ninguna limitante de agua, fertilización o plagas. Esto implicaría que si se obtuviera la biomasa ideal se podrían cosechar de 3 a 5 ton/ha de grano en seco. La siguiente figura muestra la relación de la biomasa producida con el rendimiento y la precipitación del periodo vegetativo.

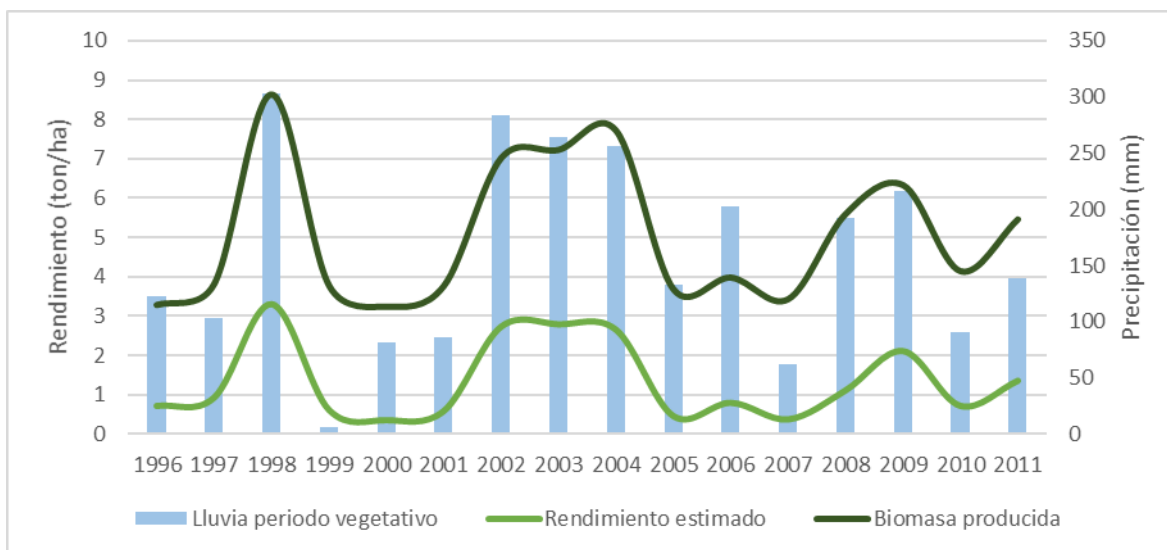


Figura 89 Rendimiento y biomasa producida en la estación Ocampo

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Cabe mencionar que el principal estrés que afecta el desarrollo del trigo de temporal en esta estación es el hídrico. Dentro de éste, se encontró que la expansión de la cobertura dentro de las primeras fases vegetativas es el que se ve más afectado con un 74%. En consiguiente, el estrés

hídrico que afecta la abertura estomatal fue de 48% en promedio para los años estudiados. Este estrés se caracteriza por afectar la tasa de respiración de la planta y limitar todas las funciones, dentro de las que se encuentra la producción del grano.

Escenarios de cambio climático

Bajo condiciones de cambio climático, la precipitación de la estación de Ocampo, Guanajuato podría experimentar variaciones marcadas y diversas en la distribución intra anual, como lo muestra la siguiente figura. La precipitación histórica marcada por la normal climatológica reportada por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra con la línea negra, mientras que los escenarios de cambio climático tienen una coloración gris continuo para RCP de 4.5 y una línea puntada para RCP de 8.5.

La distribución intra anual de la precipitación presenta un pico de aumento en julio con RCP de 4.5 evaluado con el modelo HADGEM2-ES en el horizonte 2075-2099 mientras que la disminución máxima se encuentra en agosto con RCP de 8.5 evaluado con el modelo MPIECHAM-5 en el horizonte 2075-2099. La mayoría de los escenarios de cambio climático indican una disminución de la lluvia desde julio hasta septiembre, incrementando la cantidad de la misma de abril a diciembre.

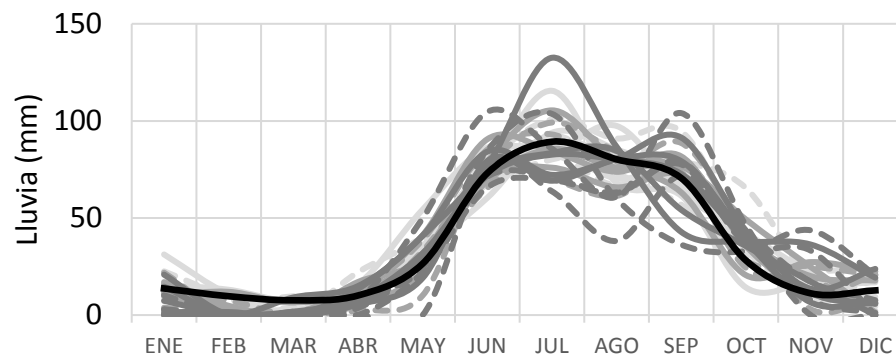


Figura 90 Precipitación con cambio climático en Ocampo, Gto.

Fuente: Elaboración propia

La biomasa del escenario histórico fue de alrededor de 5.13 ton/ha, mientras que los escenarios de cambio climático indican decrementos en el horizonte cercano. Los modelos REA y CNRM-CM5 son los que plantean más decrementos, los modelos MPIECHAM-5 y HADGEM2-ES prevén disminuciones, pero en menor cantidad y en un horizonte medio y lejano parecen estabilizarse. La siguiente figura muestra la gráfica de biomasa para la estación de Ocampo con escenarios de cambio climático. Se observa una disminución generalizada desde el escenario histórico hasta el horizonte lejano.

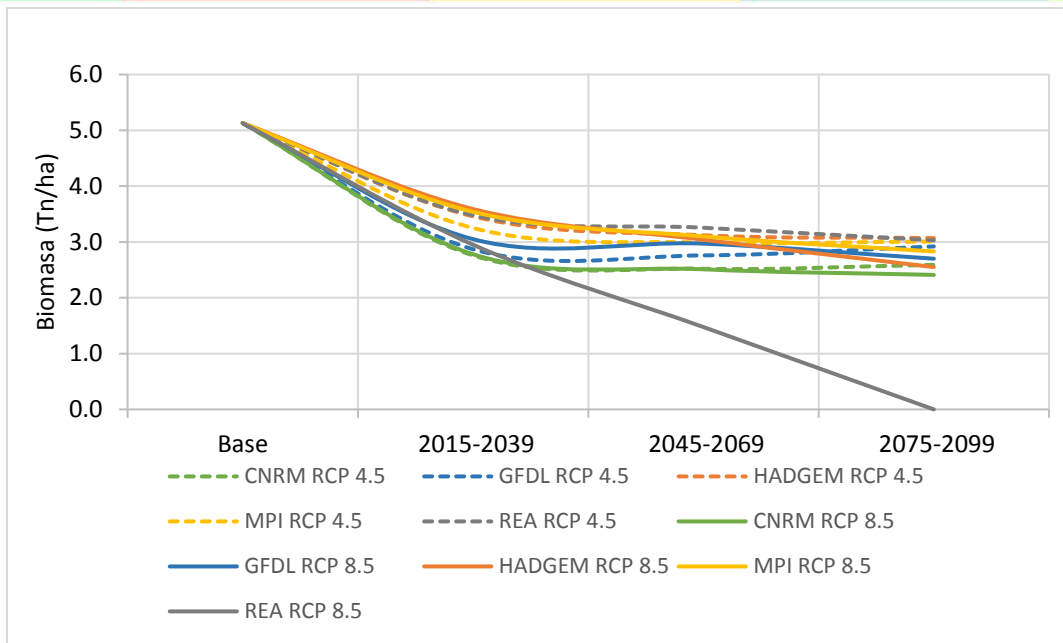


Figura 91 Biomasa bajo cambio climático para Ocampo, Gto.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento, presenta similares tendencias respecto al comportamiento de la biomasa y es la variable de mayor importancia. En este caso ningún horizonte prevé incrementos mientras que en todos los escenarios se prevén disminuciones de un 36 a un 100% menos respecto al escenario base.

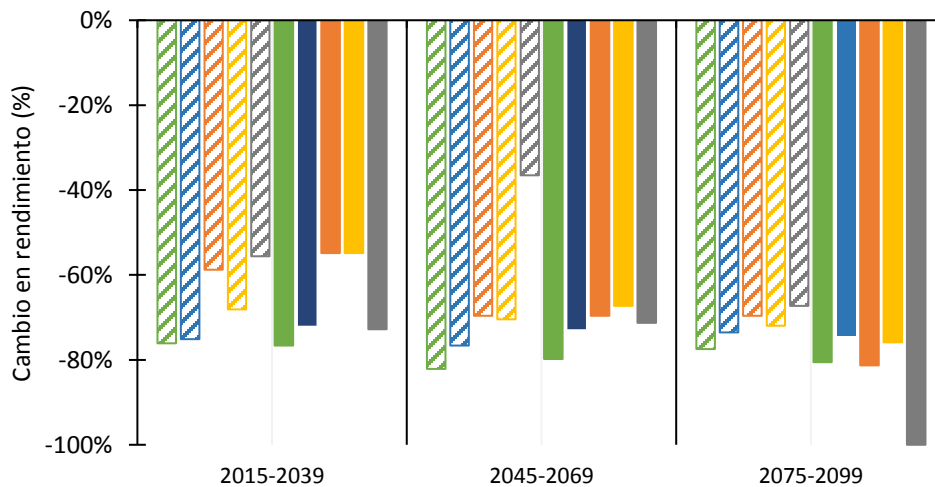


Figura 92 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Ocampo, Gto.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Las medidas de adaptación probadas resultaron proyectar rendimientos mayores a los obtenidos con escenarios de cambio climático. A medida de un cambio en la fecha de siembra se presenta una mejora, pero no es significativa ya que continúa debajo del escenario base. La medida de acolchados implicó que algunos de los escenarios reportaron incrementos en el rendimiento hasta un 47%. La medida de un cambio en la fenología de crecimiento arrojó resultados similares

a la del cambio de fecha de siembra, mientras que la aplicación de una lámina de riego proyectó resultados favorecedores de hasta un 80%.

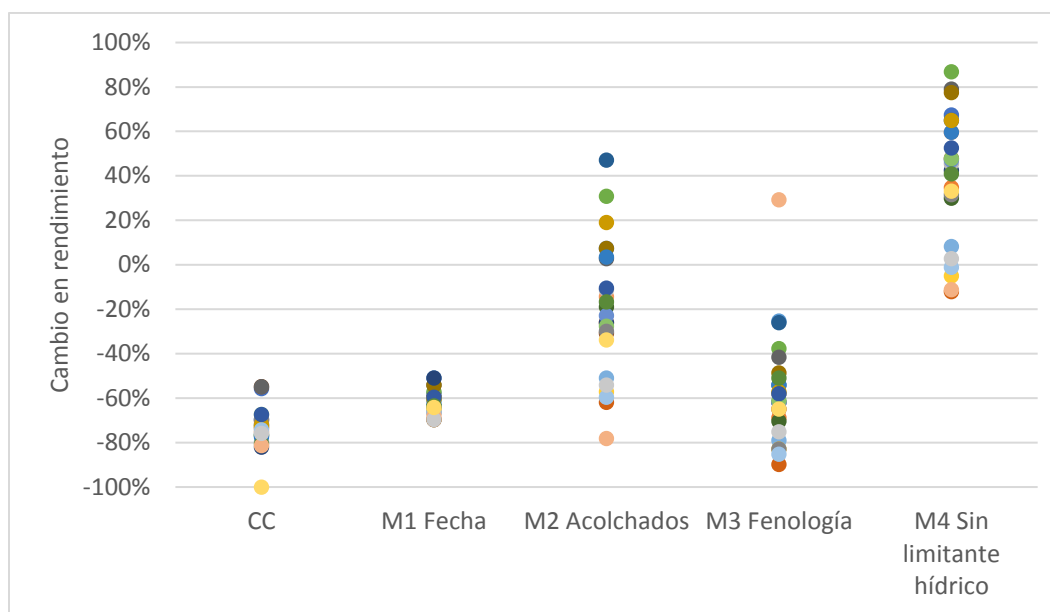


Figura 93 Medidas de adaptación para Ocampo, Gto.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En base en los resultados obtenidos de las medidas de adaptación, es posible resaltar los resultados de la aplicación de láminas de riego y acolchados serían las medidas ideales para buscar ciclos de crecimiento más favorables.

SOYA

Descripción botánica

La soya (*Glycine maximum*) es un cultivo con creciente importancia para México. La soya es originaria de Asia Oriental, inicialmente en América se utilizaba como forraje, actualmente es un cultivo de gran importancia por sus propiedades alimenticias e industriales. Su introducción en México data de finales del 1950 (PRODUCE, 2003).

El grano se destina principalmente a la industria extractora de aceite y la pasta residual tiene uso en la preparación de alimentos balanceados para ganado; actualmente por su alto contenido proteico la soya ocupa un lugar importante en la dieta humana. El contenido proteico del grano varía de 36.3 a 48.5 por ciento y el de aceite de 13 a 24% (SAGARPA, 2015b). Este cultivo se ha posicionado como uno de los más rentables en los últimos años en dos rubros principalmente: la alimentación de ganado para obtención de proteína y la alimentación humana a través de aceites (PRODUCE, 2003).

La soya se clasifica en la familia *Leguminosae*, pertenece a la subfamilia *Papilionaceae*, *Fabaceae* y a la tribu *Phaseoleae*. La especie recibe el nombre de *Glycine max* L. (OECD, 2000).

En México la soya se cultiva en áreas de riego y temporal, siendo el mayor porcentaje cultivado en riego y en menor proporción en temporal, en ambas condiciones el rendimiento es cercano a los 1900 kg por ha en los últimos años (PRODUCE, 2003).

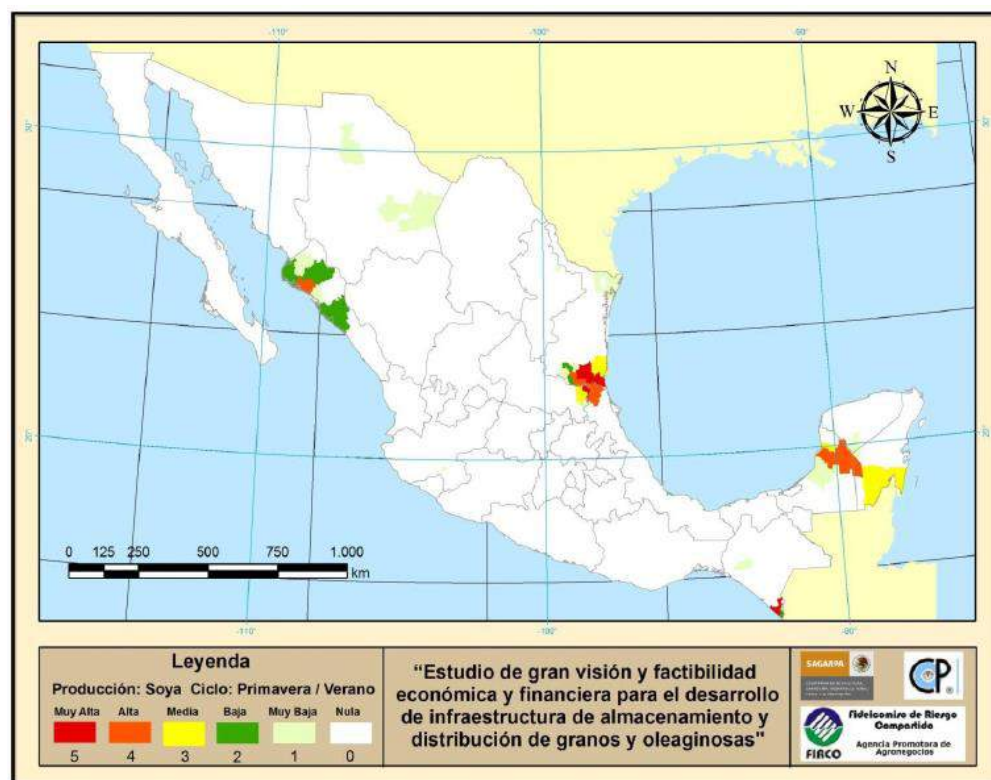


Figura 94 Producción de soya Primavera-Verano, 2004-2008

Fuente: Tomado de SAGARPA-SIAP (2012)

De acuerdo al Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas la superficie de siembra de soya en el país es de 88 mil ha; en la producción destacan municipios con muy alta producción de soya: Altamira y González en Tamaulipas, Tapachula y Mazatán en Chiapas, así como Ébano en San Luis Potosí. Entre los estados como alta producción de Soya se encuentran: El Mante, Tamaulipas; Campeche y Hopelchén en Campeche, Pánuco en Veracruz y Guasave en Sinaloa (SIAP, 2016a).

La soya es una planta herbácea, erecta, anual y ramificada, cuya altura puede variar entre 0.30 y 2 m y su ciclo de vida puede ir desde 80 hasta 200 días aproximadamente, según sea la variedad y condiciones ambientales. La raíz primaria puede alcanzar una profundidad de 2 m sin embargo el 80 % de las raíces se encuentran a 15-30 cm de profundidad. La formación de nódulos en las raíces es consecuencia de la presencia de bacterias *Bradyrhizobium japonicum*, estas realizan simbiosis con la planta de soya y fijan nitrógeno atmosférico (Rosas & Young, 1991).

La flor de la soya es perfecta o completa, es decir que los órganos sexuales femeninos como masculinos se encuentran en la misma flor. El cáliz es tubular de 5 sépalos pubescentes; la corola está compuesta de 5 pétalos color blanco o púrpura en diferentes tonalidades. La flor puede aparecer en las axilas de las hojas o en el ápice del tallo, formando parte de inflorescencias racimosas. El polen se encuentra fértil antes que las partes de la flor se hayan expandido completamente, asegurando la autofecundación de la planta. El fruto es una vaina achatada, con pubescencia de color amarilla, gris y/o negra; una planta puede llegar a producir más de 400 vainas. El número de semillas por vaina varía de 1 a 4, siendo más común 2 ó 3 semillas por vaina (Rosas & Young, 1991).

La forma de la semilla es variable, desde esférica hasta ovalada, la testa según el fenotipo puede ser de distintos colores, amarilla, verde, negra y/o café. El tamaño de la semilla puede variar desde 2 hasta 30 g por 100 semillas, dependiendo del cultivar utilizado (*Ibid.*, 1991).

Se ha documentado que la soya puede ser producida en rotación con maíz, sorgo y mijo; aunque se recomienda evitar asociarla con tabaco (Sys et al., 1993).

Requerimientos ambientales

Las temperaturas medias sobre las que se puede desarrollar la soya van de los 15 a los 40°C (Sys et al., 1993). El agua es frecuentemente el factor limitante primario en la producción de soya y es por lo tanto una importante preocupación de este cultivo. Según Rosas y Young (1991) la cantidad de lluvia requerida por el cultivo de soya puede oscilar entre 330 a 766 mm.

El primer periodo crítico de humedad para la soya es el de la emergencia y se requiere un contenido de humedad de 50% para la germinación de la semilla; el segundo periodo crítico es durante la formación de vainas y el llenado del grano. Un estrés hídrico durante la floración y el desarrollo de vainas puede resultar en un significativo aborto de flores y vainas (Rosas J.C, Young R, 1991).

La humedad relativa (HR) del aire también puede afectar el rendimiento de la soya. Se han observado reducciones de rendimiento hasta de un 21% en cultivos creciendo bajo condiciones de +- 46% de HR, en comparación con plantaciones bajo condiciones de 83% de HR (*Ibid.*, 1991).

Los requerimientos agroclimáticos se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 22 Requerimientos ambientales de soya

Variable	Referencia	Grado de aptitud			
		Alta	Moderada	Ligera	Nula
Precipitación del ciclo de crecimiento (mm)	(Sys et al., 1993)	450-800	250-450 800-1600	180-250 1600-1900	<180 >1900
	(Rosas J.C, Young R, 1991)	330-766	<766 <330	-	-
Temperatura media (°C)	(Sys et al., 1993)	22-25	18-22 25-35	15-18 35-40	<15 >40
	(Rosas & Young, 1991)	22-30	25-30	15-38	<15 >38
Humedad relativa (%)	(Sys et al., 1993)	50-80	36-50 >80	30-36	<30
	(Rosas J.C,	>83	46-83	46	<46

	Young R, 1991)				
Pendiente (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	0-1	1-4	4-6	>6
	(Rosas J.C, Young R, 1991)	0-3	4-8	>8	-
Profundidad del suelo (cm)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>100	50-100	20-50	<20
pH	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	6-7	5.4-6 7-7.8	5.2-5.4 7.8-8.2	<5.2 >8.2
COS (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>2	0.8-2	<0.8	-

Fuente: Elaboración propia con base en las referencias citadas

Los suelos adecuados para el desarrollo de la soya deben tener buen drenaje puesto que no tolera la inundación (Sys *et al.*, 1993).

Por otro lado, los rendimientos normales son de 1.5 a 2.5 ton/ha bajo temporal en condiciones comerciales y de 0.8 a 1.3 en cultivo de bajos insumos. Los rendimientos con riego van de las 2.5 hasta las 3.5 ton/ha (Sys *et al.*, 1993).

Desarrollo de fenología

La época óptima para la siembra de la soya en temporal está comprendida entre el 15 de junio si ocurren las primeras lluvias y como máximo al 15 de Julio, las cosechas ocurren cuando aún se presentan las últimas lluvias. Sin embargo, la guía para producir soya en el sur de sonora, 2011 sugiere sembrar del 20 de abril al 31 de mayo; de acuerdo con (SAGARPA-SIAP, 2015). De acuerdo con otro estudio, las fechas de siembra idóneas son del 20 de junio al 30 de julio; cuando se cuenta con humedad residual la fecha ideal es del 20 de octubre al 25 de noviembre (PRODUCE, 2003).

Se ha documentado que el 48.03% de los agricultores siembran en agosto y el 43.33% siembran en julio en condiciones de temporal. Las diferencias en las fechas de siembra pueden darse a la diferencia de variedades de soya que se ocupan en cada lugar y a las diversas condiciones climáticas del país. En términos generales, se ha identificado que la soya de temporal se siembra en los meses de julio y agosto, mientras que la cosecha se realiza en noviembre, diciembre y enero (SAGARPA-SIAP, 2011).

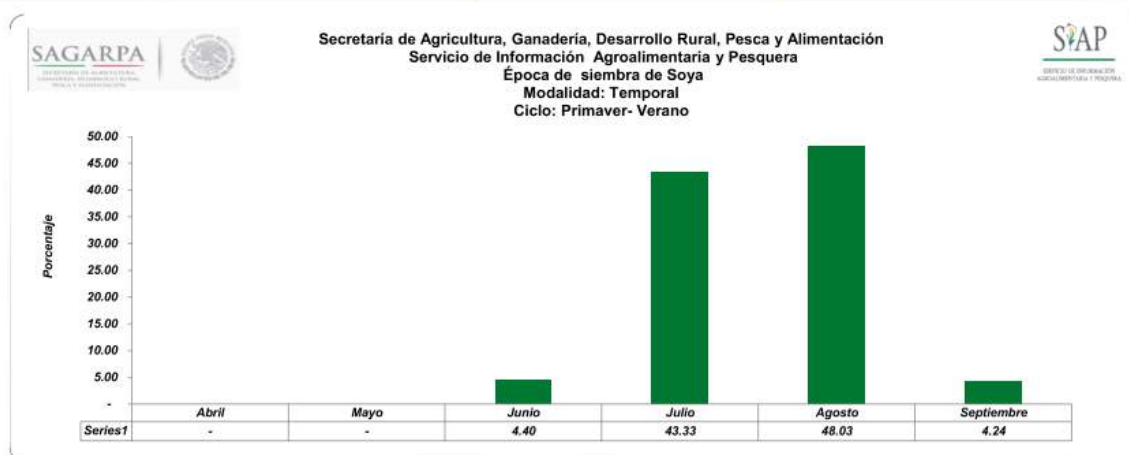


Figura 95 Época de siembra de soya en México

Fuente: (SAGARPA-SIAP, 2011)

La soya se siembra en surcos de 65 a 70 cm de separación con la finalidad de que se efectúen los cultivos con maquinaria, en temporal es preferible sembrar sobre el "lomo" del surco a una profundidad de 2 a 3 cm y a una distancia de 5 a 6 cm entre plantas. La cantidad de semilla está en función del tamaño del grano de la variedad a utilizar y esta va de 60 a 100 kg de semilla por ha. El cultivo debe permanecer libre de malas hierbas, principalmente durante los primeros 30 días de su desarrollo (Grajales Solís, 2007).

El desarrollo de la planta soya se divide en etapas vegetativas (V) y reproductivas (R). La etapa V tiene subdivisiones que son designadas numéricamente como V1, V2 hasta Vn, excepto las primeras dos etapas que son designadas como de emergencia (VE) y de cotiledón (VC); la numeración del estado vegetativo se determina mediante el recuento de los nudos sobre el tallo principal que tiene o han tenido hojas completamente desarrolladas; se considera que una hoja está completamente desarrollada cuando los bordes de los folíolos de la hoja inmediatamente superior no se tocan. La etapa R tiene 8 subdivisiones que son designadas numéricamente con su nombre común.

De acuerdo con (Sys *et al.*, 1993) los rendimientos de soya en condiciones de temporal van de 0.8 a 1.3 ton/ha en condiciones de baja tecnificación y de 1.5 a 2.5 ton/ha en condiciones comerciales.

A continuación, se presenta un cuadro con etapas fenológicas del cultivo de soya.

Cuadro 23 Etapas fenológicas para soya

Etapas/Referencia	(Sys <i>et al.</i> , 1993) ²¹	INIF AP, 2011	(Rosas J.C, Young R, 1991) (días) ²²	Descripción
Emergencia	10	VE	5-15	Cotiledones aparecen sobre el cuello

²¹ En número de días después de la siembra

²² En duración de cada uno de los periodos de desarrollo

Cotiledón	-	VC	3-10	Bordes de hojas primarias dejan de tocarse
Primer nudo	-	V1	3-10	Hojas primarias desarrolladas
Segundo nudo	-	V2	3-8	Primera hoja trifoliada desarrollada
n nudo	40-50	Vn	2-5	La enésima hoja trifoliada completamente desarrollada.
Inicio de floración	65-85	R1	1-7	Una flor en cualquier nudo
Floración completa	90-100	R2	5-15	Una flor en uno de los dos últimos nudos del tallo principal
Inicio de vainas	-	R3	4-26	Vaina de 5 mm en uno de los 4 nudos superiores
Vainas completas	-	R4	4-26	Vaina de 2 cm en uno de los 4 nudos superiores
Inicio de semillas	85-100	R5	11-20	Semilla de 3 mm en uno de los 4 nudos superiores
Semillas completas	-	R6	3-9	Semillas llenan la cavidad de la vaina en uno de los 4 nudos superiores
Inicio de madurez	-	R7	7-18	Una vaina en el tallo principal alcanza color de vaina madura, 50% hojas amarillas
Madurez completa	105-140	R8	--	95% de vainas con color típico de la madurez

Fuente: Elaboración propia con base en INIFAP (2001), Rosas *et al.* (1991) y Sys *et al.* (1993)

Para la agricultura de temporal en el ciclo primavera verano el 41.01% de la cosecha en México se realiza en diciembre, el 32.27% en noviembre y el 23.26% en enero (SAGARPA-SIAP, 2015).

Estudios de caso

Actualmente la soya es uno de los cultivos más importante, si no el más importante, dentro de la categoría de oleaginosas. Se sabe que su consumo sigue varias rutas para llegar a la alimentación humana, desde los alimentos industrializados hasta la producción animal. En el 2015 la soya se sembró en 13 estados del país, destacando por su contribución Tamaulipas, Sonora, San Luis Potosí, Campeche y Chiapas. Este grano contribuye con el 52.3% en la producción de oleaginosas y a pesar de que se ha incrementado su producción nacional en los últimos años, México sigue teniendo una balanza comercial negativa en el orden de 3 millones de toneladas que se importan de Estados Unidos principalmente (SIAP, 2016a).

Se eligieron dos estaciones para evaluar bajo el modelo de rendimiento de *Aquacrop* que cumplieron con las características enmarcadas en la metodología. A pesar de que los estados más productores se encuentran en el norte, se eligieron estaciones del sur puesto que éstas presentan una mayor vulnerabilidad de acuerdo con el Atlas de Cambio Climático y la soya en los estados del sur tiene un manejo de temporal. La siguiente figura muestra la distribución de las estaciones seleccionadas para efectuar el modelado del rendimiento.



Figura 96 Distribución de las estaciones seleccionadas para soya

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2008)

Para cada caso de estudio se realizó una revisión sobre la calidad de las series climáticas. Para ello se retomó la metodología utilizada por López (2016), la cual incluye un control de calidad bajo dos metodologías (método de desviaciones estándar y rangos intercuartílicos) y una prueba de homogeneidad con el programa RHtestV4. La importancia del control de calidad para el proceso de modelado reside en la confiabilidad de los datos para obtener resultados congruentes en el programa *Aquacrop*. Una vez efectuada la revisión climática se procedió a recopilar información paisajística y fenológica para cada caso de estudio. Con la información obtenida se calibraron los modelos de cultivo en el programa *Aquacrop* con ayuda de los datos observados por el SIAP. En los siguientes apartados se presentan los resultados correspondientes a cada estación modelada.

Bolonchén, Hopelchén, Campeche

La estación de Bolonchén se encuentra en el municipio de Hopelchén, Campeche. Pertenece al CADER de Hopelchén y al DDR de Campeche. La producción de soya se realiza bajo condiciones de temporal con un sistema de bajos insumos.

A partir de la promoción de este cultivo con manejos de variedades genéticamente modificadas y con insumos de alto impacto, diversos sectores de la población se han manifestado en contra de la instauración de dicha forma de cultivo. Uno de esos sectores es la comunidad maya que reside en Hopelchén y Tenabo, quienes han ganado, junto con otros actores, una consulta obligatoria del Estado Mexicano a dichas comunidades sobre la siembra de soya genéticamente modificada (CDI, 2016). No obstante, la presente consultoría sólo se aboca a estimar los rendimientos bajo un manejo de temporal, con bajos insumos y sin la sugerencia de la utilización de dichos organismos genéticamente modificados.

A continuación, se aprecian algunas características de la estación a modelar.

Cuadro 24 Características generales de la estación Bolonchén

Estación	ID ²³	Vulnerabilidad ²⁴	Fuente/referencia ²⁵	Observaciones
Bolonchén, Campeche	4001	Media	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 1.82 ton/ha

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación Bolonchén tiene coordenadas 20° latitud norte y -89.74° longitud oeste y se encuentra a 120 msnm. El paisaje de la región se encuentra sobre dos topoformas: llanura rocosa con lomerío de piso rocoso o cementado y Lomerío bajo con hondonadas. Ambos sistemas se ubican en la subprovincia fisiográfica denominada Carso y lomeríos de Campeche, dentro de la provincia Península de Yucatán (INEGI, 2009e).

Clima

La estación Bolonchén formó parte del grupo de estaciones que fueron sometidas a un control de calidad de acuerdo con los reportes de la consultoría en Eventos Climáticos Extremos (López, 2016). No obstante, fue necesario realizar una revisión de homogeneización de temperatura a falta de este proceso.

Conforme a la aplicación de la metodología acordada para la homogeneización de temperatura se encontró un salto para la temperatura máxima en septiembre de 1984 y un salto para la temperatura mínima en octubre de 1982. Después de revisar el índice MEI que indica la ocurrencia y gravedad de eventos del Niño y la Niña se encontró que el salto de la temperatura mínima coincidía con un evento del Niño de los más fuertes que se han registrado en los últimos 50 años, por lo cual la serie de datos no fue homogeneizada al asumirse que se trata de una variabilidad natural. En cambio, el salto de temperatura máxima del 1984 no correspondió con ninguno de los eventos antes mencionados por lo que se conservó sin cambios. Una vez que las series fueron ajustadas, se procedió a la importación al *software Aquacrop*.

El rango anual de la temperatura media oscila de los 26 a los 28°C. De acuerdo con las gráficas de distribución de temperatura obtenidas en el proceso de control de calidad se observó que la temperatura máxima es mayor de marzo a mayo. En cambio, la temperatura mínima alcanza sus puntos más bajos de diciembre a febrero, aunque la variación de la temperatura mínima de abril a octubre no varía mucho.

En la figura siguiente se muestra la distribución de la temperatura máxima y mínima durante el año, con datos desde 1960. En el eje “x” se observan los meses del 1 al 12, mientras que el eje “y” corresponde a los valores de temperatura en °C (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

²³ Número asignado por el Servicio Meteorológico Nacional para identificación

²⁴ Vulnerabilidad del municipio conforme al Atlas de Vulnerabilidad al Cambio Climático

²⁵ Origen de la propuesta de la estación, considerando el control de calidad climático

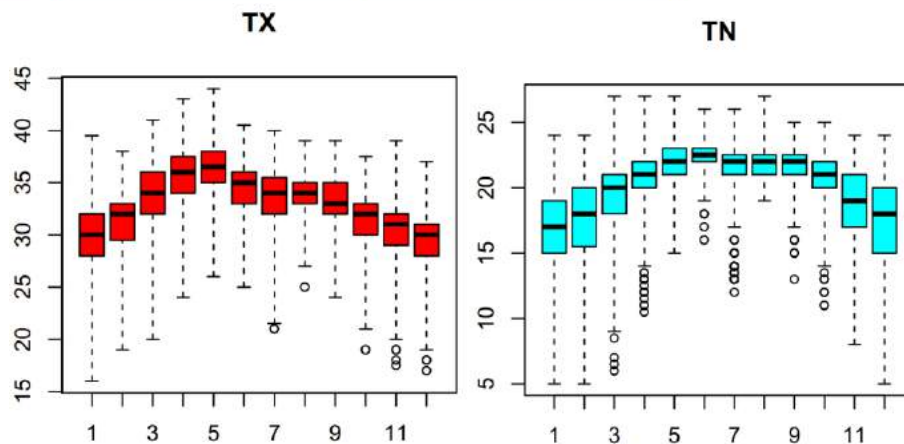


Figura 97 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Bolonchén

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

La precipitación normal anual oscila de 800 a 1000 mm, con un máximo en los meses de agosto y septiembre. El periodo de crecimiento comienza el 14 de mayo aproximadamente, dura 182 días y finaliza el 11 de noviembre aproximadamente. Para la estación Bolonchén si se presenta un periodo húmedo, que se caracteriza por tener precipitación por encima de la evapotranspiración. El periodo húmedo comienza el 11 de junio, dura 162 días y termina el 14 de octubre. A continuación, se tiene un diagrama que esquematiza el periodo de crecimiento para la estación seleccionada.

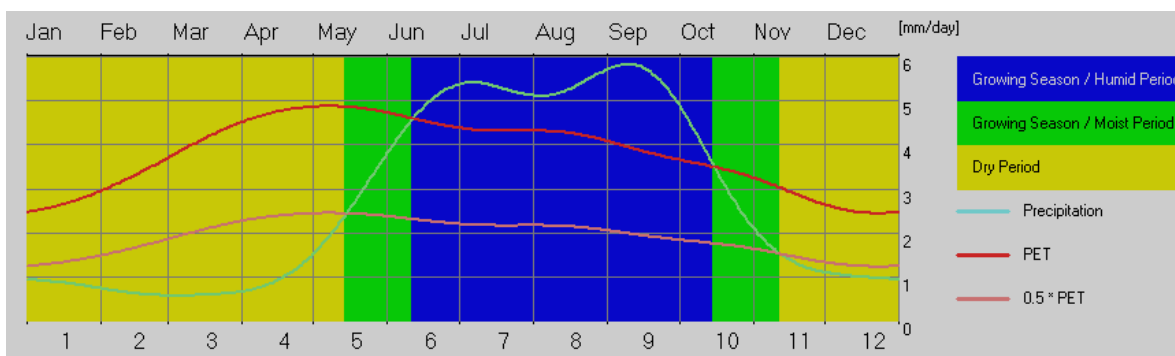


Figura 98 Periodo de crecimiento de la estación Bolonchén

Fuente: Elaboración propia con *software* *LocClim*

El clima predominante en el municipio de Hopelchén es el de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad (Ax'(wo)igw').

Cultivo, manejo y suelo

De acuerdo con las referencias bibliográficas revisadas, la soya para la zona de Hopelchén se siembra con una densidad que ronda los 3 millones 500 mil individuos. El ciclo vegetativo comienza con la germinación de la planta a partir del día 9 después de la siembra, la cobertura máxima se alcanza aproximadamente de 60 a 80 días después de la siembra y la madurez fisiológica ronda los 130 días.

El cultivo de soya se ha caracterizado como sensible al estrés hídrico que afecta la expansión de cobertura; y moderadamente sensible al estrés hídrico que actúa sobre la abertura estomatal. Por

otro lado, la profundidad de las raíces llega a ser de hasta 2 metros y se alcanza después de los 92 días después de la siembra, lo cual habla de un periodo tardío.

El tipo de suelo dominante en Hopelchén es el leptosol con un 50% de la superficie, el vertisol con 14%, el luvisol con 13% y otros tipos de suelo con el porcentaje restante. El leptosol es un suelo delgado que se encuentra en las partes medias o altas de una topografía escarpada y elevadas pendientes; su uso agrícola es limitado y se encuentran cimentando el desarrollo de comunidades arbóreas. El tipo de suelo vertisol concibe su nombre por sus características arcillosas que hacen que el suelo se voltee; se caracteriza por una estructura masiva y forma superficies de deslizamiento denominadas facetas que llegan a formar grietas en la superficie y la vegetación natural que se desarrolla bien en estos suelos son las selvas bajas, pastizales y matorrales (INEGI, 2005).

De acuerdo con los perfiles de suelo reportados por INEGI, la estación de Bolonchén se encuentra en sitios con textura de tipo arcillosa o franco arcillosa. Las características hidráulicas de estas clases le confieren importantes propiedades para el almacenamiento de agua.

Modelo base

El modelo de *Aquacrop* se ajustó a los datos reportados por SIAP en una magnitud aceptable. El promedio de rendimiento de soya de temporal para el municipio de Hopelchén fue de 1.81 ton/ha considerando los años de 2000 a 2010. Para el mismo periodo, el modelo aportado por *Aquacrop* fue de 2.05 ton/ha, es decir, 240 kg/ha más que lo observado, reportando así una diferencia del 13%. En mayoría de los años se registra una condición de traslape de los datos modelados contra los observados, exceptuando en el año 2006. Para este año el SIAP reportó 1.16 ton/ha menos que el promedio de la década, aunque al revisar las bases de datos de Desinventar no se registró reporte hemerográfico alguno. No obstante, dentro del registro histórico de tormentas y huracanes del 29 de mayo al 2 de junio se registró el impacto de la tormenta tropical “Bárbara” en las costas de Puerto Madero, Chiapas, lo cual pudo haber ocasionado desastres en los terrenos de cultivo. La siguiente figura muestra el comparativo entre el modelo de cultivo generado por *Aquacrop* y los datos reportados por el SIAP.

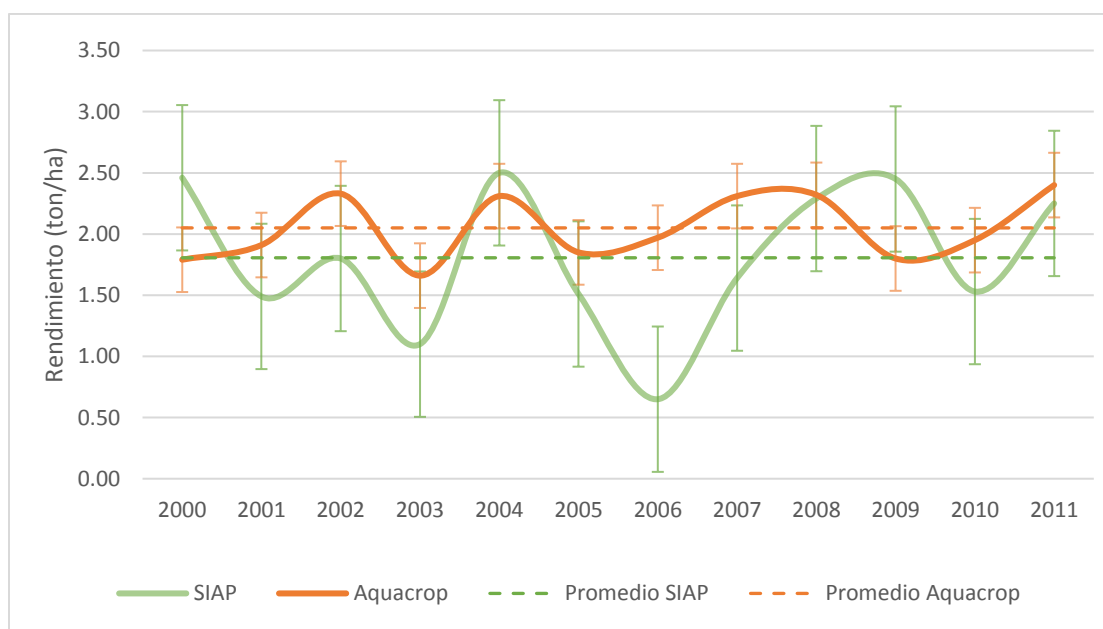


Figura 99 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Bolonchén

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El error medio cuadrado del modelo de cultivo respecto a los datos observados fue de 0.59 ton/ha. En la siguiente gráfica se comparan los rendimientos de *Aquacrop* y SIAP contra dos variables de importancia climática: la precipitación anual y la temperatura media anual.

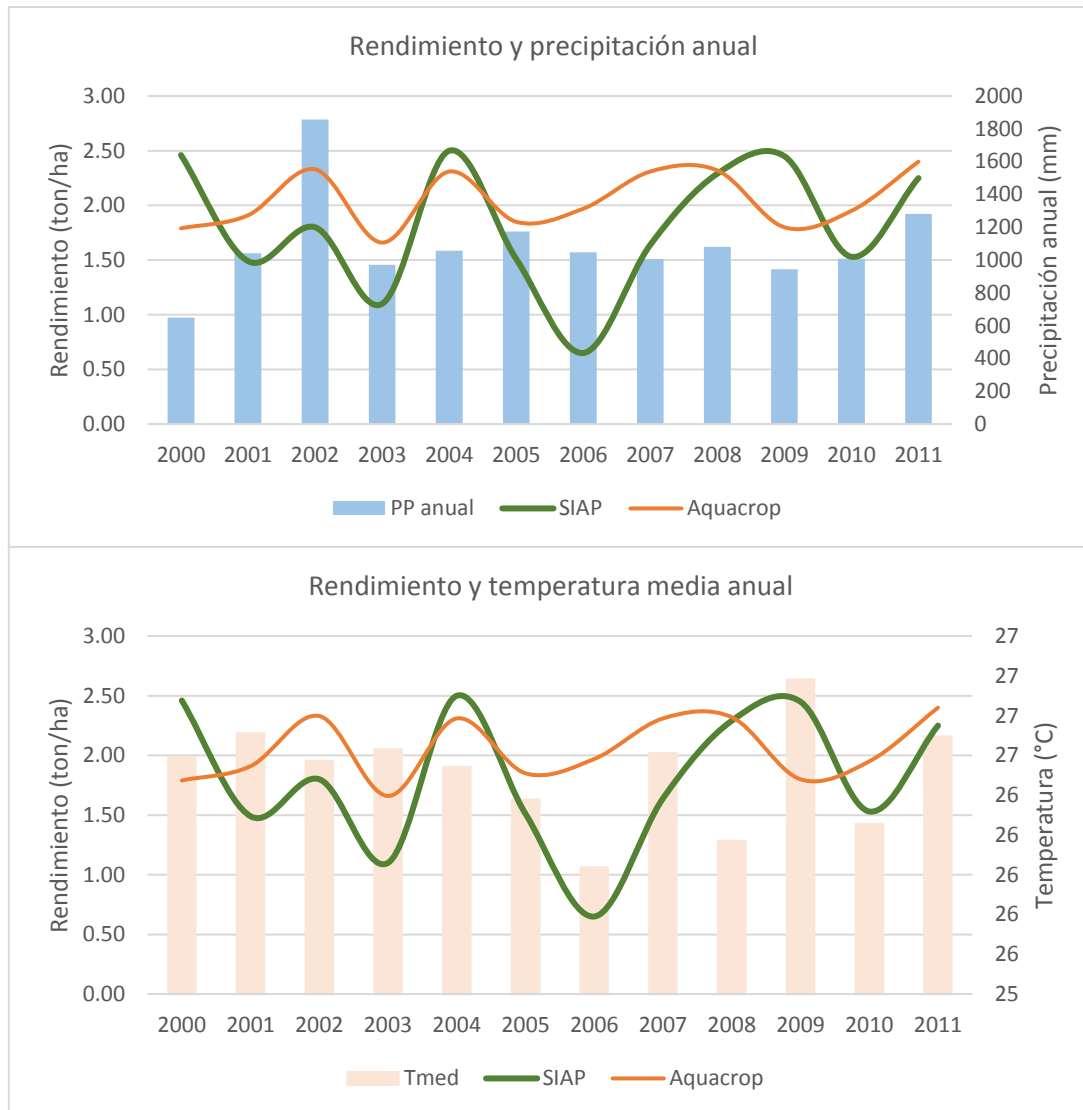


Figura 100 Modelo base para soya en Bolonchén, Camp.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La relación del rendimiento con la temperatura fue de 0.46 en el caso de los datos de SIAP y de -0.13 para el modelo *Aquacrop*. Por otro lado, la correlación del modelo con la precipitación anual reportó un coeficiente de 0.55 en contraste con los datos de SIAP que tuvieron -0.1 de correlación con la lluvia. Ello implica que los datos modelados fueron más sensibles a la precipitación y no tanto a la temperatura, mientras que los datos de SIAP presentaron una condición contraria. A pesar de ello, el error cuadrado medio normalizado entre ambas series fue de 32.7%, representando un estadístico aceptable para términos del modelado.

En la figura siguiente se aprecia un diagrama de puntos que contrasta los datos de SIAP contra los que se generaron por *Aquacrop*.

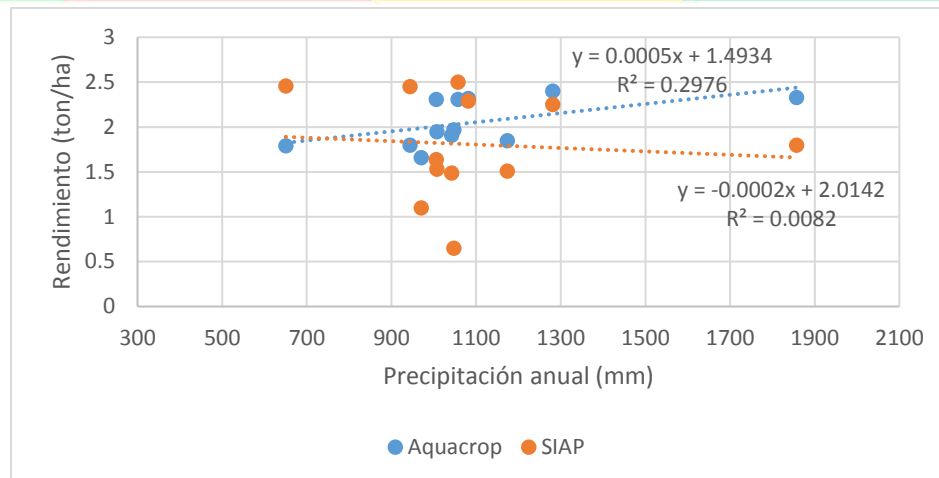


Figura 101 Relación de rendimiento con precipitación en estación Bolonchén

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Los datos de SIAP presentan un coeficiente de determinación muy bajo respecto a la precipitación, mientras que el rendimiento simulado con *Aquacrop* tuvo una relación más directamente proporcional con la lluvia. No obstante, no se recomienda establecer un modelo empírico con esos datos debido a su bajo coeficiente de correlación.

Considerando los años de 1996 al 2011, el rendimiento estimado por *Aquacrop* fue de 1.98 ton/ha. La biomasa producida (estimada) fue de 7.55 ton/ha, mientras que la biomasa potencial fue de 11.58 ton/ha. Potencialmente se podrían obtener hasta 2.26 ton/ha si no se tuviera ninguna limitante en la fertilidad, el clima o las plagas. La siguiente figura muestra la relación de la biomasa producida con el rendimiento y la precipitación del periodo vegetativo.

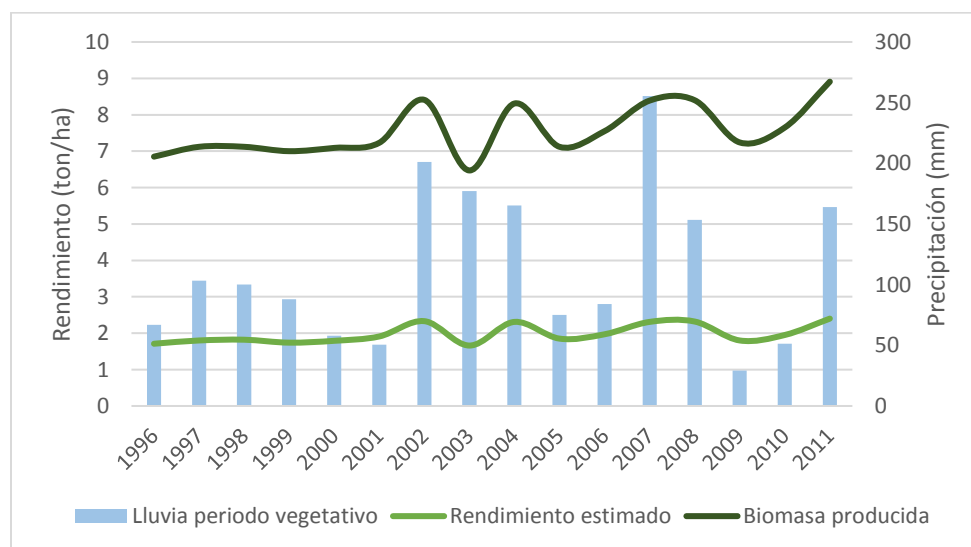


Figura 102 Rendimiento y biomasa producida en la estación Bolonchén

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El estrés hídrico fue el responsable de afectar la producción en un 60% del total de afectación. De este porcentaje, el 29% fue estrés térmico que afectó la expansión del follaje en las primeras etapas de desarrollo, mientras que el 32% fue afectación de abertura estomatal que se manifestó en las etapas de maduración. Por otro lado, el estrés de fertilidad representó el 40% restante.

Escenarios de cambio climático

Bajo condiciones de cambio climático, la precipitación de la estación de Hopelchén, Campeche podría experimentar decrementos y cambios en la distribución intra anual sin embargo no serían tan evidentes como en otros casos, tal como lo muestra la siguiente figura. La precipitación histórica marcada por la normal climatológica reportada por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra con la línea negra, mientras que los escenarios de cambio climático tienen una coloración gris continuo para RCP de 4.5 y una línea puntada para RCP de 8.5.

La distribución intra anual de la precipitación presenta dos picos, uno en junio y otro en septiembre. La mayoría de los escenarios de cambio climático indican una disminución de la lluvia desde junio hasta septiembre, incrementando la cantidad de la misma de septiembre a diciembre.

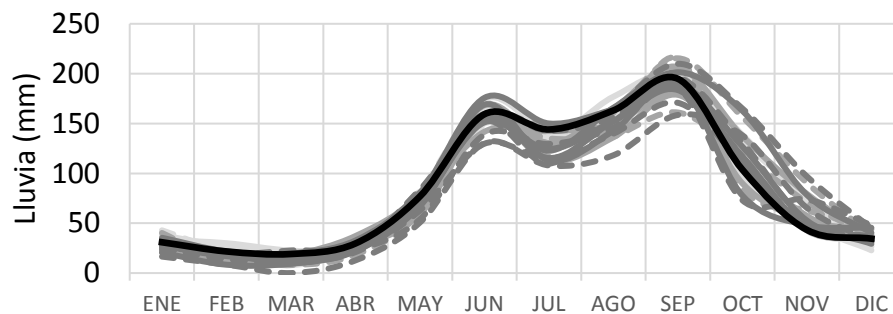


Figura 103 Precipitación con cambio climático en Bolonchén, Hopelchén, Camp.

Fuente: Elaboración propia

La biomasa del escenario histórico fue de alrededor de 5.62 ton/ha, mientras que los escenarios de cambio climático indican incrementos y decrementos en el horizonte cercano. El modelo GFDL-CM3 plantea incrementos, mientras que los modelos Ensamble REA y HADGEM2-ES prevén disminuciones. La siguiente figura muestra la gráfica de biomasa para la estación de Hopelchén con escenarios de cambio climático. Se observa una tendencia de aumento generalizado desde el escenario histórico hasta el horizonte lejano.

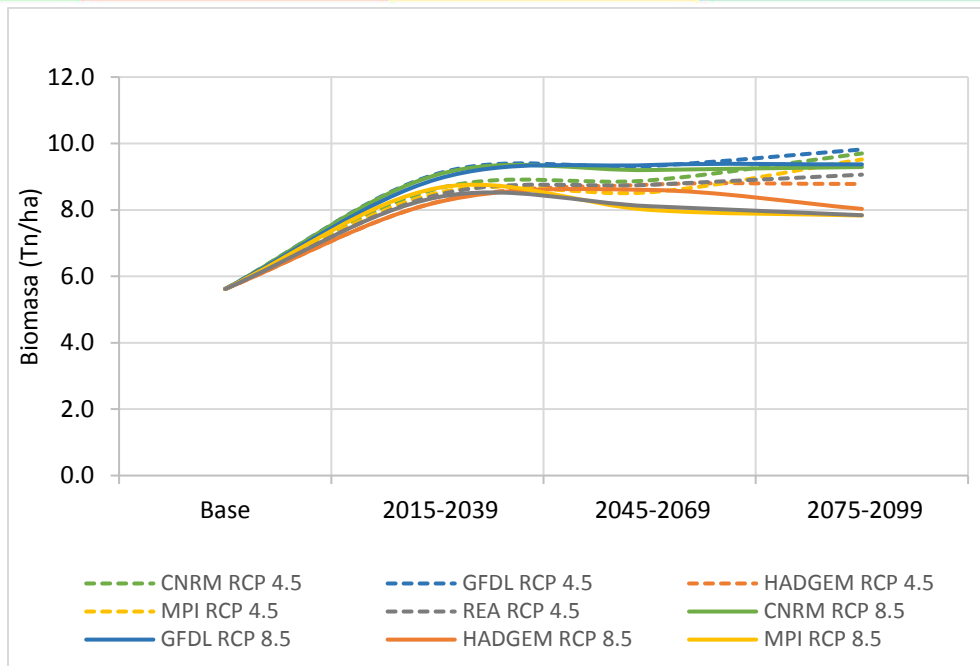


Figura 104 Biomasa bajo cambio climático para Bolonchén, Hopelchén, Camp.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento, al ser un resultado de la biomasa, presenta similares tendencias respecto al comportamiento de la biomasa y es la variable de mayor importancia. En todos los horizontes los escenarios prevén incrementos desde 20 hasta 57% respecto al escenario base.

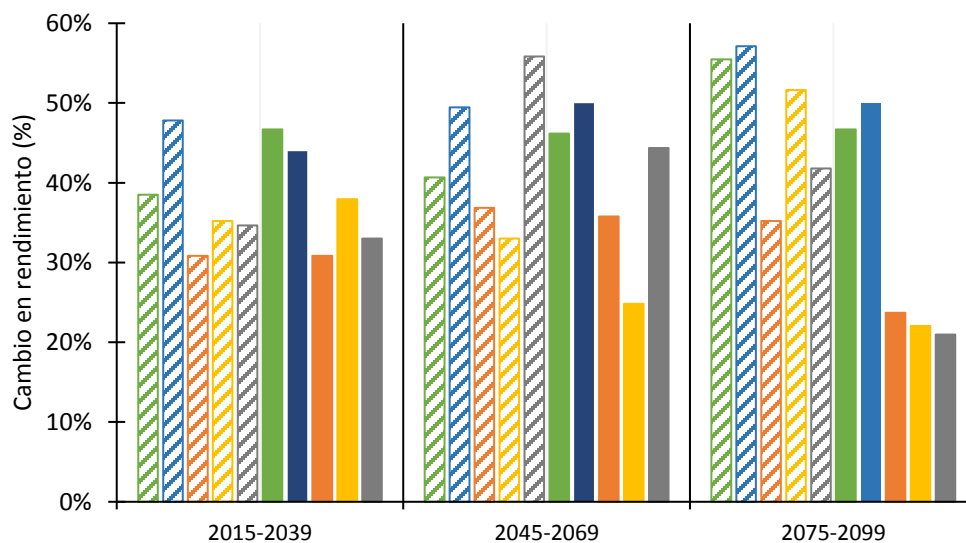


Figura 105 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Bolonchén, Hopelchén, Camp.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Puesto que los escenarios de cambio climático apuntan a que se obtendrán mayores rendimientos en el futuro, esta estación no fue considerada para la prueba de medidas de adaptación.

Malpaso, Tapachula, Chiapas

La estación de Malpaso se encuentra en el municipio de Tapachula, en Chiapas. Pertenece al CADER denominado Tapachula y al DDR también nombrado Tapachula. El cultivo de soya en este municipio se realiza en el ciclo primavera verano bajo un régimen de temporal. Debido a la alta exposición climática y las condiciones socioeconómicas el municipio está clasificado con una vulnerabilidad muy alta ante el cambio climático que afecta principalmente a la agricultura. En este sentido, el cultivo de soya, junto con otros más con los que se asocia, será susceptible a presentar cambios en los rendimientos bajo un manejo actual.

Chiapas es uno de los principales estados productores de soya; y tan sólo el municipio de Tapachula concentra el 58% de la superficie sembrada (SAGARPA, 2015b). En el siguiente cuadro se aprecian las características generales de la estación.

Cuadro 25 Datos de referencia de la estación Malpaso, Tapachula

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Malpaso, Tapachula, Chis	7191	Muy alta	Bibliografía	Rendimiento con referencia. 1.9 ton/ha de 2003 a 2013

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

Las coordenadas geográficas de la estación Malpaso son -92.25° longitud oeste y 14.92° latitud norte, a 200 msnm. Se encuentra ubicada sobre una sierra baja de laderas tendidas, aunque el paisaje de la zona también cuenta con llanuras costeras con lomeríos y la parte alta del municipio se ubica sobre una sierra volcánica. Tapachula es dividido entre dos subprovincias fisiográficas: la Llanura costera de Chiapas y Guatemala y los Volcanes de Centroamérica, aunque la estación de estudio se ubica en ésta última.

Clima

Dentro del proceso de control de calidad básico se observó que la serie de temperatura mínima tuvo un comportamiento anormal en varios datos diarios reportados para el mes de julio del 2007. En la siguiente gráfica se aprecian los datos de la temperatura mínima en los últimos 10 años con registros.

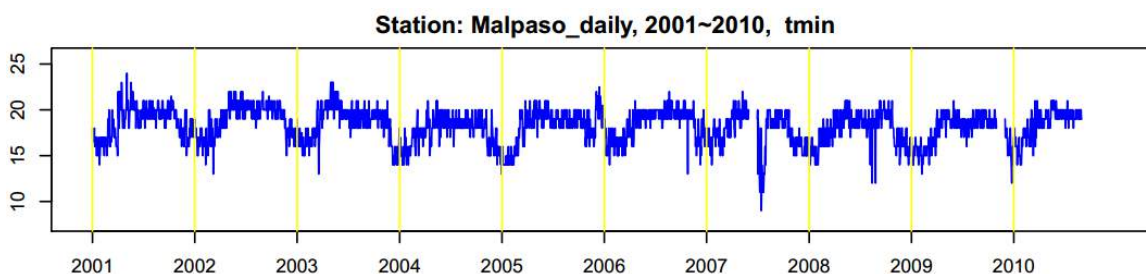


Figura 106 Serie temperatura mínima de 2001-2010 de estación Malpaso

Fuente: Elaboración propia con *software* RCLindex

Después de revisar en las diferentes fuentes independientes para cotejar este comportamiento se llevó a la conclusión de que no existe una referencia adicional para validarlo, ni en las estaciones cercanas ni en las bases de datos de desastres naturales, por lo que fue cambiada por el código de valor perdido. Respecto a los datos de precipitación se encontraron varios registros de más de 200 mm en un día en los años 2005, 2007 y 2010. No obstante, ese comportamiento también

se presentó en dos de las estaciones cercanas, por lo que dichos valores no fueron cambiados al asumirse que se trata de una variabilidad natural.

Dentro del proceso de homogeneización de temperatura se encontraron dos saltos significativos en la temperatura máxima. Dichos saltos se presentaron en el 1971 y en 1998. Ambos “change points” o saltos correspondieron con eventos extremos del índice MEI que mide la magnitud de los años Niño y Niña. Para la temperatura mínima se registraron también dos saltos, en 1999 y en 2003. El salto del 1999 correspondió con un evento de La Niña fuerte, empero el de 2003 no encontró correspondencia con eventos extremos del MEI por lo que la serie fue homogeneizada para este periodo.

La temperatura media anual en el municipio ronda de los 14° a los 30°C (INEGI, 2010c). La temperatura máxima tiene un comportamiento relativamente homogéneo durante el año, aunque en los primeros meses es cuando alcanza los puntos más altos (marzo). En cambio, la temperatura mínima es más divergente y varía a lo largo del año, presentándose los puntos más bajos de diciembre a febrero. En la siguiente gráfica se muestra la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) con sus respectivas escalas. (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

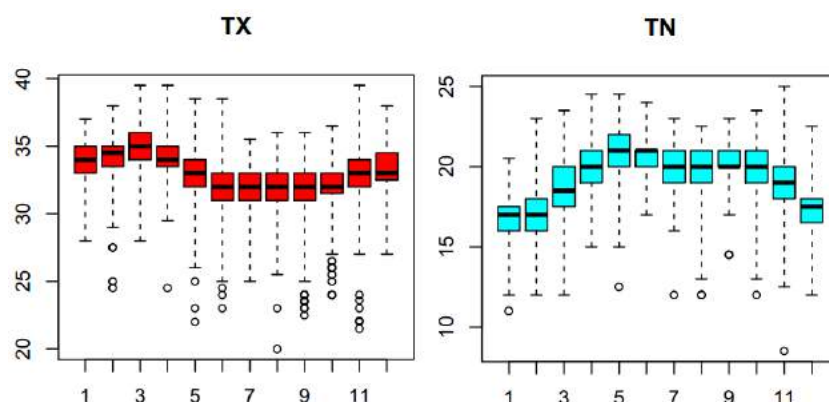


Figura 107 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Malpaso, Tapachula

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

El periodo de crecimiento de la estación Malpaso comienza el 11 de abril, dura 230 días y termina el 26 de noviembre aproximadamente. Debido a las condiciones de precipitación abundante, el periodo húmedo es extenso y se presenta muy cercano al periodo de crecimiento. El periodo húmedo comienza el 28 de abril, dura 197 días y termina el 10 de noviembre. A continuación se presenta un diagrama que muestra la distribución de la precipitación durante el año, así como la intersección con la evapotranspiración lo que marca un periodo húmedo que abarca al menos 6 meses completos.

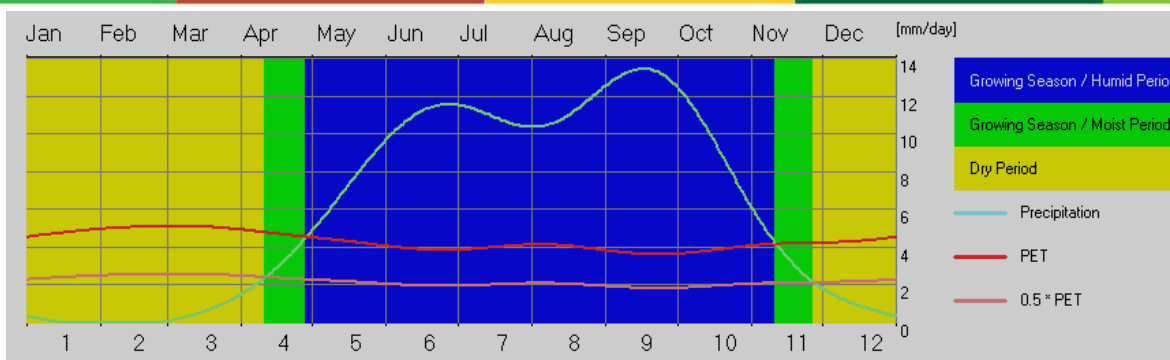


Figura 108 Periodo de crecimiento de la estación Malpaso, Tapachula

Fuente: Captura de pantalla en el *software CliCom*

El tipo de clima predominante en el municipio de Tapachula es el cálido subhúmedo con lluvias en verano, el tipo de menor humedad.

Cultivo, manejo y suelo

Se ha documentado que Chiapas, y particularmente la región del Soconusco, tiene alrededor de 28 mil hectáreas con potencial productivo para soya, del cual sólo el 5.5% es utilizado. El potencial productivo para la siembra de soya en esta región es mayor que ningún otro en el país. Por otro lado, en el municipio de Tapachula se siembra más de la mitad de la soya de todo el estado de Chiapas (SAGARPA, 2015b).

En la región del Soconusco ha reportado la presencia del cultivo de soya de forma documentada y comercial desde 1995, siendo la producción en el ciclo primavera verano la que abarca más superficie y producción (PRODUCE, 2003).

Dentro de los preparativos necesarios para la producción de soya se encuentra el chapeo, al barbecho y el rastreo-tabloneo. El primer proceso es necesario para el fraccionamiento de los rastrojos de la cosecha anterior y permitir así la entrada de instrumentos de labranza; el segundo fragmenta el suelo para proveer de mejores condiciones para el desarrollo de raíces y previene plagas; el tercero homogeneiza el suelo después del barbecho para preparar la siembra (SAGARPA, 2015b).

Hay diversas variedades recomendadas para manejo de soya en el Soconusco. Dependiendo de su duración, pueden ser de ciclo corto o largo. Dentro del ciclo corto se encuentra la variedad Huasteca 200; mientras que de ciclo largo se representan por la Huasteca 100, Huasteca 300 y Huasteca 400 (SAGARPA, 2015b). De acuerdo con los estudios de Grajales Solís (2007), las tres primeras son las que se han manejado con resultados exitosos probados.

La variedad Huasteca 100 tiene un ciclo de vida de corto a intermedio (102 a 115 días a madurez), rendimiento promedio de más de 3 ton/ha y con 39.4 % de proteínas y 21.2% de aceite. La variedad Huasteca 200 tiene mejor calidad bromatológica (40.2 % de proteína y 22.3% de aceite), aunque su madurez es intermedia y abarca de 118 a 122 días para la madurez con rendimientos promedio de 3.7 ton/ha en condiciones experimentales. La variedad Huasteca 300 tiene un hábito de crecimiento intermedio con 114 a 118 días a la madurez, tiene 6.7% de proteína y 21.6% de aceite, y sus rendimientos son de 3.2 ton/ha en promedio (Grajales Solís, 2007).

Cuadro 26 Características agronómicas de variedades de soya para el Soconusco, Chis.

Características agronómicas*	Valores			
	Huasteca 100	Huasteca 200	Huasteca 300	Huasteca 400
Rendimiento t/ha	3.3 a 3.8	3.2 a 3.5	3.4 a 3.9	3 a 3.4
Días a floración	40 a 42	51 a 53	39 a 43	43 a 46
Altura de planta (cm)	55 a 65	82 a 98	87 a 91	78 a 82
Altura de vaina (cm)	6 a 10	14 a 18	8 a 11	14 a 18
Días a madurez fisiológica	105 a 115	118 a 122	114 a 118	110 a 112
Peso de 100 semillas (g)	13 a 17	12 a 15	15 a 17	11 a 13
Desgrane	Resistente	Resistente	Resistente	Resistente
Reacción a las enfermedades "ojo de rana" y Mildiu vellosa	Resistente	Resistente	Resistente	Resistente
* Resultados de parcelas de validación				

Fuente: Tomado de SAGARPA (2015)

La época de siembra se relaciona estrechamente con el periodo de lluvias, el cual se ha reconocido que comienza a mediados de junio, por lo que el periodo de siembra recomendado es del 25 de junio al 30 de julio (SAGARPA, 2015b). La distancia entre surcos debe ser de 40 cm, obteniendo una densidad de 250,000 plantas/ha (Grajales Solís, 2007).

El tipo de suelo del municipio de Tapachula se divide entre luvisoles (39%), phaeozems (33%), acrisoles (10 %) y otros tipos (18%) (INEGI, 2010c). Por la textura del suelo, la región productiva de Tapachula presenta texturas desde franco arcillosa, franco-arcillo-arenosa, franco-arenosa y franca.

Modelo base

Según los datos reportados por el SIAP, dentro del periodo comprendido del 2000 al 2010, el promedio de rendimiento fue de 1.92 ton/ha para el municipio de Tapachula, Chiapas. Dentro del mismo periodo, el modelo *Aquacrop* proyectó un promedio de 1.96 ton/ha, es decir, sólo 20 kg/ha menos que los datos observados. Cabe mencionar que la variabilidad de los datos observados fue mayor que la de los datos modelados. La desviación estándar de los datos reportados por SIAP fue de 0.71 ton/ha, mientras que de los datos del modelo *Aquacrop* fue de 0.02 ton/ha. La siguiente gráfica muestra el comportamiento del rendimiento reportado por SIAP y modelado por *Aquacrop* con la desviación estándar como barra de error. Es importante destacar que la variabilidad de los datos de *Aquacrop* es muy baja que visualmente se confunde con el promedio.

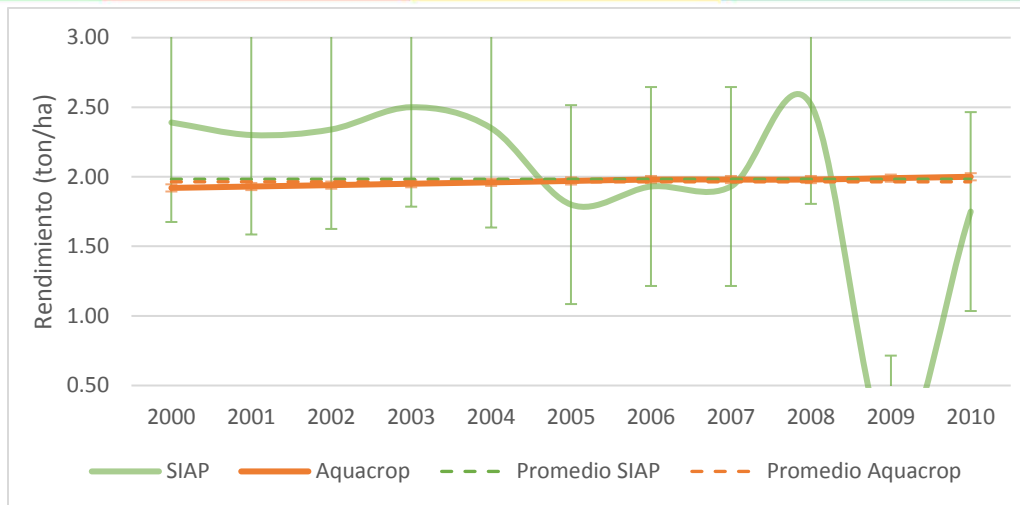


Figura 109 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Malpaso, Tapachula, Chis.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Según los datos de SIAP, en el año 2009 se reportó una producción de cero. Al respecto la base de datos de Desinventar reporta que se registró el paso del huracán Andrés, para el que se generaron varios derrumbes carreteros en la parte de la sierra, así como inundaciones y cierre de puertos ²⁶. En la siguiente gráfica se comparan los rendimientos de *Aquacrop* y SIAP contra dos variables de importancia climática: la precipitación anual y la temperatura media anual.

²⁶ Ver https://online.desinventar.org/desinventar/#MEX-1250695136-mexico_inventario_historico_de_desastres

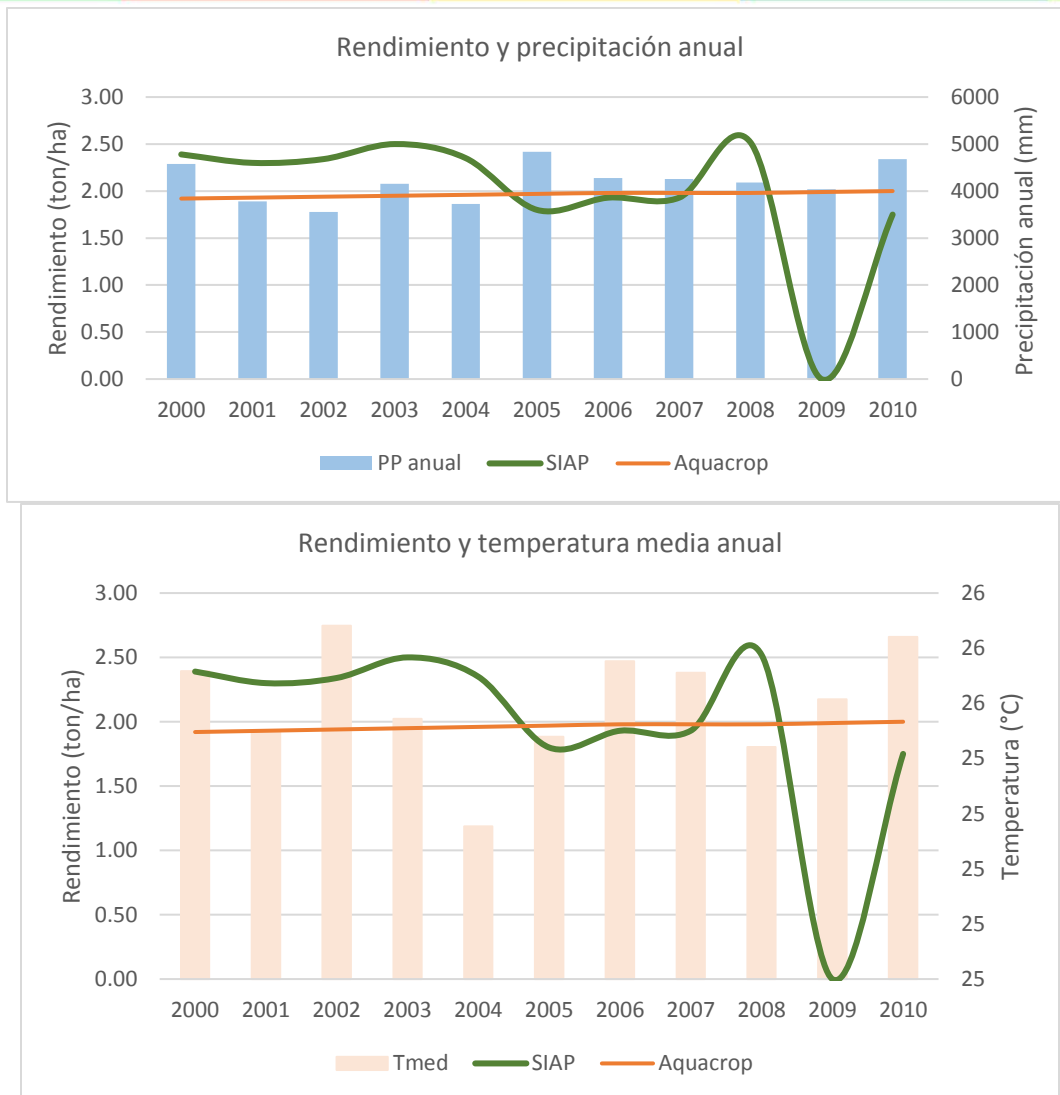


Figura 110 Modelo base para soya en Malpaso, Tapachula

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El comportamiento del rendimiento de soya según los datos observados por SIAP fue poco sensible a la precipitación, puesto que su coeficiente de correlación fue de -0.1 . En cambio, el modelo generado por *Aquacrop* tuvo un coeficiente de correlación entre la precipitación anual y el rendimiento de 0.33 . En la siguiente gráfica se muestra la relación entre la precipitación y el rendimiento para cada serie de datos (SIAP y *Aquacrop*).

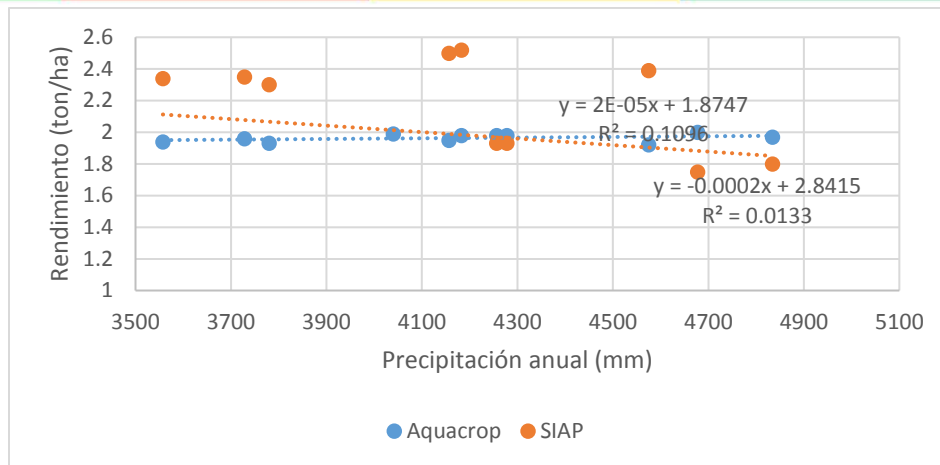


Figura 111 Relación de rendimiento con precipitación en estación Malpaso, Tapachula

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El modelo empírico generado con los datos del SIAP tuvo un coeficiente de determinación de -0.01 con la precipitación. El mismo modelo con datos de *Aquacrop* reportó un coeficiente de determinación de 0.10. Puesto que los valores de respuesta a la lluvia no son lo suficientemente sólidos, no se recomienda que se utilice esta variable únicamente para explicar el comportamiento del rendimiento. La siguiente figura muestra la relación de la biomasa producida con el rendimiento y la precipitación del periodo vegetativo.

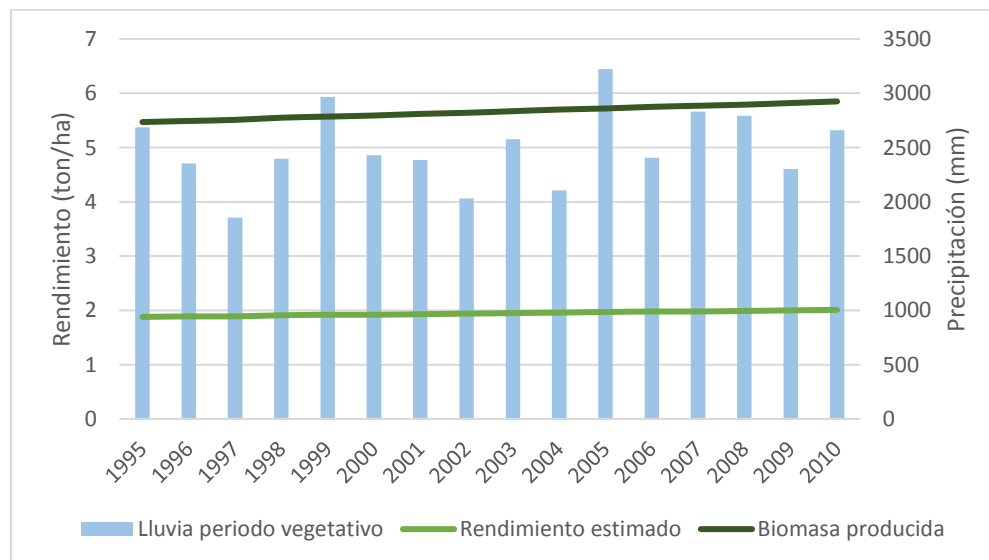


Figura 112 Rendimiento y biomasa producida en la estación Malpaso, Chis.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En promedio de los años 1995 al 2010, el modelo de cultivo de *Aquacrop* proyectó un rendimiento de 1.95 ton/ha. El rendimiento promedio histórico de la región ronda las 2.4 ton/ha, lo cual conlleva una diferencia de menos del 31% respecto al dato reportado por SIAP (SAGARPA, 2015b).

La biomasa producida en dicho periodo fue de 5.66 ton/ha, mientras que la biomasa potencial alcanzó las 9.85 ton/ha. Considerando un índice de cosecha ajustado del 34%, sin ninguna limitante en clima, plagas o fertilidad se podrían alcanzar las 3.49 ton/ha de rendimiento. Dentro

de los principales factores limitantes se encuentra el estrés por fertilidad, el cual afecta el 44% de la producción.

No se registraron estreses hídricos ni térmicos, puesto que las lluvias del periodo de crecimiento de la planta van de 1855 mm a 3222 mm, con un promedio de 2499 mm. Ello implica que no exista una limitante por agua dentro de los 122 días de crecimiento de la planta.

Escenarios de cambio climático

Bajo condiciones de cambio climático, la precipitación de la estación de Malpaso, Tapachula, Chiapas podría experimentar cambios, pero no tan evidentes en la distribución intra anual, como lo muestra la siguiente figura. La precipitación histórica marcada por la normal climatológica reportada por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra con la línea negra, mientras que los escenarios de cambio climático tienen una coloración gris continuo para RCP de 4.5 y una línea puntada para RCP de 8.5.

La distribución intra anual de la precipitación presenta dos picos, uno en junio y otro en septiembre. La mayoría de los escenarios de cambio climático indican una disminución de la lluvia desde junio hasta septiembre, incrementando la cantidad de la misma de octubre a diciembre.

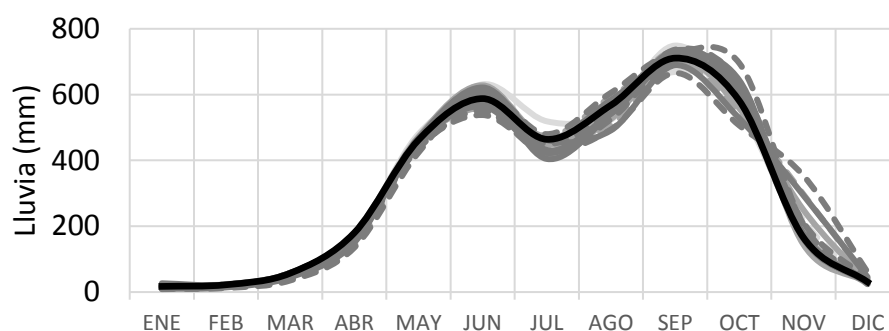


Figura 113 Precipitación con cambio climático en Malpaso, Tapachula, Chis.

Fuente: Elaboración propia

La biomasa del escenario histórico fue de alrededor de 5.64 ton/ha, mientras que los escenarios de cambio climático indican incrementos y decrementos en el horizonte cercano. El modelo CNRM-CM5 y GFDL-CM3 plantean incrementos notorios, mientras que los modelos MPIECHAM-5 y el Ensemble REA prevén disminuciones en el horizonte cercano y después tienden a aumentar. El modelo GFDL-CM3 con RCP 8.5 comienza en el horizonte cercano con el incremento de biomasa sin embargo después en el horizonte medio tiende a decrecer. La siguiente figura muestra la gráfica de biomasa para la estación de Tapachula con escenarios de cambio climático. Se observa un aumento generalizado desde el escenario histórico hasta el horizonte lejano.

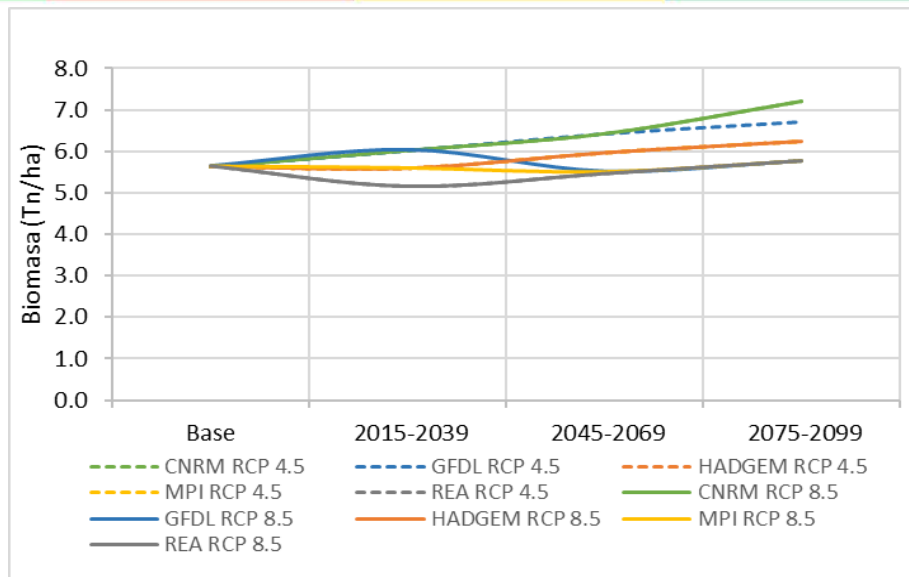


Figura 114 Biomasa bajo cambio climático para Tapachula, Chis.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento, al ser un resultado de la biomasa, presenta similares tendencias respecto al comportamiento de la biomasa, aunque es la variable de mayor importancia. En el horizonte cercano, algunos escenarios prevén incrementos del 7% y decrementos no mayores a 9%, para el horizonte medio la mayoría de los escenarios coinciden en incrementos del 14% mientras que en el horizonte lejano todos los escenarios, prevén aumentos de un 2 a un 19% respecto al escenario base.

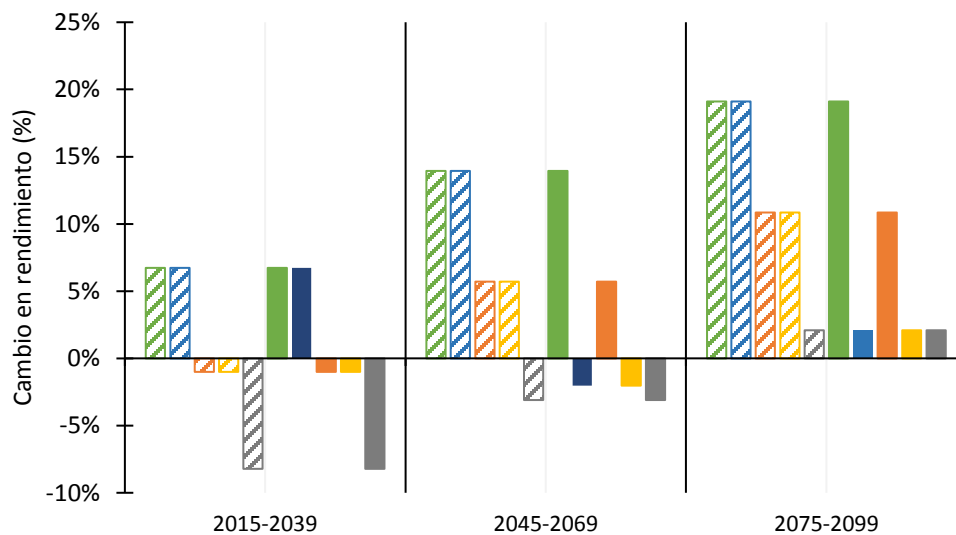


Figura 115 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Tapachula, Chis.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Las medidas de adaptación probadas resultaron no proyectar rendimientos mayores a los obtenidos con escenarios de cambio climático. La medida de un cambio en la fecha de siembra proyectó decrementos que en promedio se ubicaron en un cambio de 50% respecto al escenario

base. Por otro lado, la medida de acolchados y el cambio en la fenología de crecimiento arrojó resultados donde no son favorecedores respecto al escenario base, mientras que la aplicación de una lámina de riego proyectó resultados igual de desfavorecidos que el cambio de fecha de siembra.

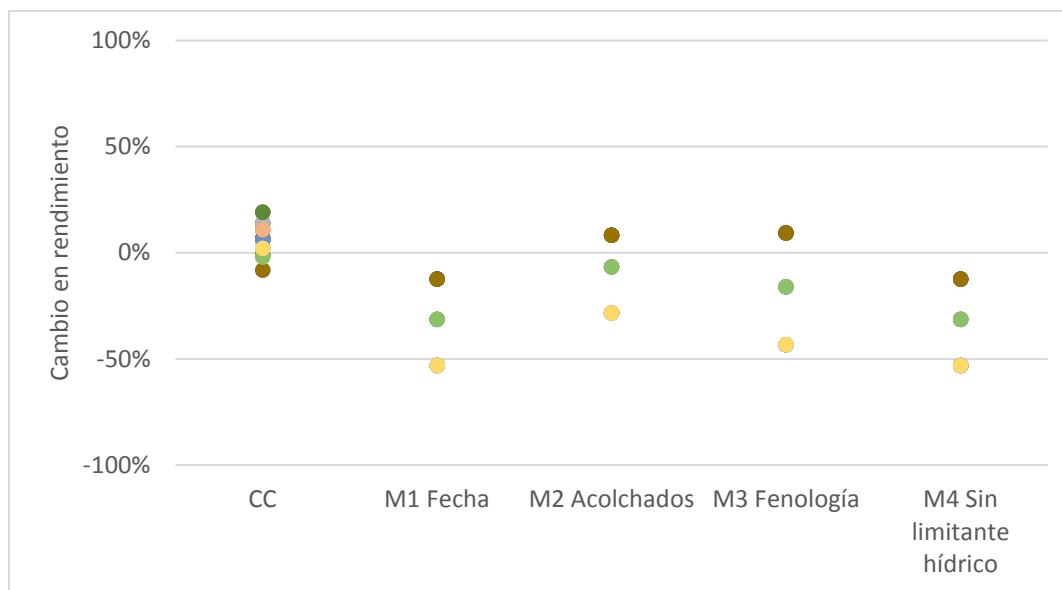


Figura 116 Medidas de adaptación para Tapachula, Chis.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Con base en los resultados obtenidos de las medidas de adaptación, es posible resaltar que los resultados de la aplicación de las medidas propuestas en la zona de Tapachula no son las más apropiadas para obtener mejores rendimientos, la opción es buscar otras medidas que favorezcan al crecimiento de los cultivos.

SORGO

Descripción botánica

El centro de origen del sorgo se ubica en la India (SIAP-SAGARPA, 2014). No obstante, otras estimaciones indican que se produjo alrededor del siglo I a. C. en la región de Etiopía (Vargas, 2009).

Como cultivo de sorgo se han identificado diversas variedades que coinciden con los principales usos que se le dan: como grano, como oleaginosa y como forraje. No obstante el sorgo genérico conforma la especie *Sorghum bicolor* (L.), pertenece a la familia de las gramíneas (*Poaceae*), tribu *Andropogoneae* y subtribu *Sorghinae* (OCDE, 2012).

A nivel internacional se reconocen más de 2° variedades de sorgo que se cultivan para diversos propósitos, principalmente en Europa, América y Asia. Los grupos de granos más destacables son el Kafir, originario de África tropical y resistente a sequías; el Kaoliang desarrollado en China más adaptado a zonas frías; el Shallu generado en la India con potencial forrajero, entre otros (Vargas, 2009).

En México se reconocen tres grupos conforme al uso final: el sorgo escobero utilizado para la elaboración de escobas, el sorgo forrajero con altos contenidos de azúcares usados con importante potencial para forraje en verde y el sorgo grano del que se obtiene el grano que posteriormente es utilizado en la elaboración de alimentos balanceados o inclusive la alimentación humana (Vargas, 2009).

El sorgo es una planta con morfología diversa, aunque los rangos de crecimiento varían de 0.5 hasta 6 metros, aunque es más abundante en los primeros 90 cm. El sorgo tiene una fuerte raíz primaria que a medida que crece se cubre de una capa silicatada que le permite soportar condiciones de sequía; después de que la planta produce 3 o 4 hojas se presentan raíces secundarias que se ubican cerca de la base del tallo y proveen de soporte extra (FAO, 2017a).

El tallo tiene de 10 a 20 nodos que sobresalen y cada uno de ellos da origen a una hoja posteriormente. Las hojas tienen de 30 hasta 135 cm de longitud y de 6 a 13 cm de ancho (FAO, 2017a). Dentro del tallo se desarrolla un tejido blanco y dulce, que es utilizado como edulcorante (SIAP-SAGARPA, 2014).

Las flores se encuentran agrupadas en una panícula apical formada por algunas espiguillas de coloración rojiza. El grano es una cariósipide oval que consiste en la cobertura de la semilla, la testa, el endospermo y el embrión. Los colores y formas de las semillas varían de blanco, amarillo claro, rosa, café, café rojizo, café oscuro, entre otros (FAO, 2017a). Las semillas miden alrededor de 3 mm nutricionalmente aportan carbohidratos de alta calidad y bajo contenido graso (SIAP-SAGARPA, 2016c).

Los usos de este cultivo son varios pero se pueden agrupar en alimenticios directos, como aditivo de otros alimentos, como forraje animal, como ingrediente en alimentos balanceados, en la constitución de fibras, para la obtención de alcohol y como combustible (FAO, 2017a). Se ha documentado que con la harina de sorgo se fabrican galletas y panes, además de la obtención de solventes como alcohol, acetona y butanol (SIAP-SAGARPA, 2014).

Requerimientos ambientales

Se ha reportado que la germinación del sorgo requiere una temperatura de al menos 10°C, mientras que para su desarrollo necesita de 21 a 23°C y es afectado severamente por el frío ya que si se presentan más de cinco noches con temperatura debajo de los 15°C se inhibe la anthesis (Sys et al., 1993). No obstante, estudios reportados por SIAP-SAGARPA (2014) indican que el sorgo crece activamente a partir de los 15°C, teniendo como óptima una temperatura de 32°C.

La susceptibilidad del sorgo ante las condiciones hídricas es baja respecto a otros cultivos, pues puede crecer en sitios donde la precipitación del periodo vegetativo es de 150 mm, soporta al menos 14 días de sequía aunque también es resistente a inundaciones por algunos periodos de tiempo (Sys et al., 1993). En general se reconoce al sorgo como un cultivo resistente a la sequía y permanecer en un periodo de latencia cuando se presenta, de modo que continúa su crecimiento una vez que las condiciones hídricas se han normalizado (SIAP-SAGARPA, 2014). A continuación, se muestra una tabla de requerimientos.

Cuadro 27 Requerimientos ambientales de sorgo

Variable	Referencia	Grado de aptitud			
		Alta	Moderada	Ligera	Nula
	(Sys et al., 1993)	500-700	300-500 700-1200	150-300 1200-1400	<150 >1400

Precipitación del ciclo de crecimiento (mm)	(FAO, 2017a)	500-1000	300-500	-	<300 >3000
Temperatura media (°C)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	24-26	18-24 26-32	15-18 >32	<15
	(FAO, 2017a)	27-35	35-40 8-27	-	>40 <8
Humedad relativa (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	0-60	60-85	>85	-
Pendiente (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	0-1	2-4	4-6	>6
Profundidad del suelo (cm)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>90	20-90	10-20	<10
pH	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	6-7	5.3-6 7-8.3	5.2-5.3 8.3-8.5	<5.2 >8.5
	(FAO, 2017a)	6-7	5-6 7-8.5	-	<5 >8.5
COS (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>1.5	0.8-1.5	<0.8	-

Fuente: Elaboración propia con datos de Sys *et al.* (1993) y FAO (2017)

El sorgo se adapta a muchos tipos de suelos, aunque su respuesta es mejor en suelos pesados (Sys *et al.*, 1993). Las variedades azucaradas crecen bien en terrenos alcalinos, puesto que así aumentan su contenido de sacarosa en los tallos y las hojas (SIAP-SAGARPA, 2014).

La cantidad de nutrientes removidos por cada tonelada de grano producido es de cerca de 50 kg de nitrógeno, 9 kg de fósforo y 45 kg de potasio (FAO, 2017a).

Desarrollo de fenología

La mayoría de las variedades de sorgo toman de 90 a 120 días para la madurez, alcanzando la etapa de establecimiento entre 50 y 60 días, la floración entre 60 y 70 días y la madurez entre 90 y 120 (FAO, 2017a).

La siembra de sorgo se realiza generalmente a chorrillo, de 8 a 16 plantas por metro de surco y con al menos 70 cm de distancia entre cada hilera para alcanzar una densidad de siembra entre 85 y 150 mil plantas por hectárea (SIAP-SAGARPA, 2014). En México el sorgo se siembra generalmente en ciclo de otoño invierno, aunque también se encuentra una importante superficie dedicada a siembra en primavera verano. Bajo un manejo de temporal, la mayoría de productores siembra en enero y febrero; mientras que la cosecha la realiza a finales de mayo y junio (SIAP-SAGARPA, 2011). La siembra en ciclo primavera verano se recomienda realizar desde el establecimiento de las lluvias hasta el 10 de marzo, cosechando desde el 1 de mayo hasta el 30 de junio (INIFAP, 2009b).

En la siguiente figura se muestran los periodos de siembra del sorgo de acuerdo con los datos oficiales recabados por el SIAP.

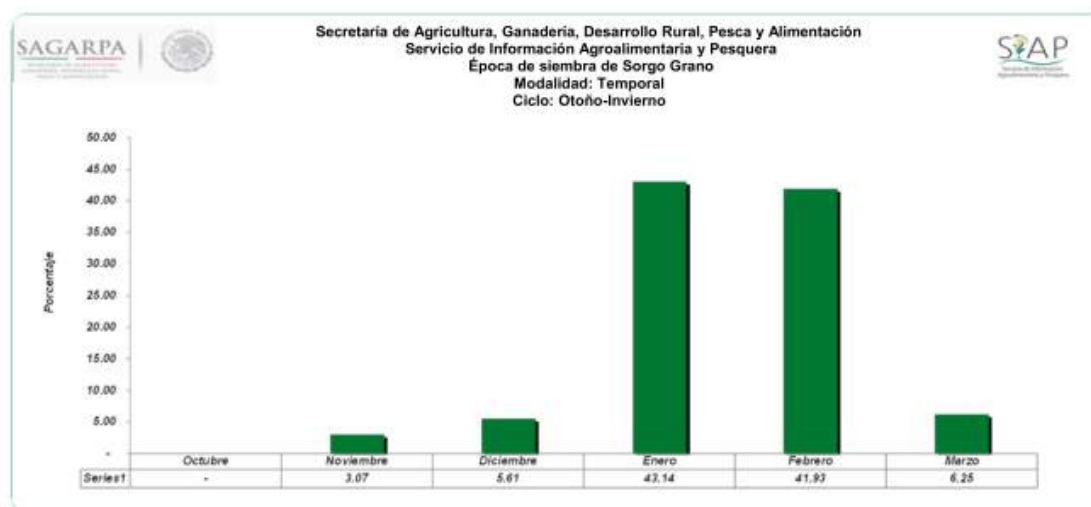


Figura 117 Época de siembra de sorgo en México

Fuente: Tomado de SIAP-SAGARPA (2011)

A nivel general se han clasificado a las etapas fenológicas en dos grupos: la etapa vegetativa y la reproductiva. La primera etapa comienza con la germinación de la planta y finaliza con la máxima cobertura y el establecimiento del sistema radicular definitivo. La segunda comienza con la floración y finaliza con la madurez del grano. En la siguiente tabla se presentan algunas etapas fenológicas genéricas para sorgo.

Cuadro 28 Etapas fenológicas para sorgo

Etapas/Referencia	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	(FAO, 2017a)	Referencia
Germinación	7-10	-	Emergencia de la planta
Máxima cobertura	35-50	50-60	Completo desarrollo de hojas
Máxima profundidad radical	50	-	Completo desarrollo de raíces
Floración	50-70	60-70	Inicio de la emergencia de la panícula
Duración de la floración	15-20	10	Duración del periodo de floración
Inicio de madurez	85-110	70	Inicio de la formación del grano
Senescencia	95-125	-	Decaimiento de la actividad fotosintética
Madurez	95-125	90-120	Finalización de la formación del grano

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2017) y Sys *et al.* (1993)

Los rendimientos bajo un manejo de temporal varían de 0.2 a 0.8 ton/ha para un manejo tradicional de subsistencia, de 1.3 a 2 ton/ha para un productor promedio y de 2.5 a 3.5 ton/ha para un productor con altos insumos. En cambio, bajo riego se obtienen de 3.5 a 5 ton/ha de grano (Sys *et al.*, 1993). De acuerdo con las referencias de FAO (2017) es posible obtener rendimientos de más de 4 ton/ha bajo manejos intensivos, aunque en regiones con sequía el rendimiento varía ente 0.3 y 1.2 ton/ha.

El rendimiento a nivel mundial no se ha incrementado significativamente en los últimos 10 años. Los países donde se ha incrementado ligeramente el rendimiento son Etiopía, Brasil y Australia (FIRA, 2015a). En la siguiente figura se aprecia la tendencia de rendimiento para algunos países productores. México está representado por la línea amarilla.

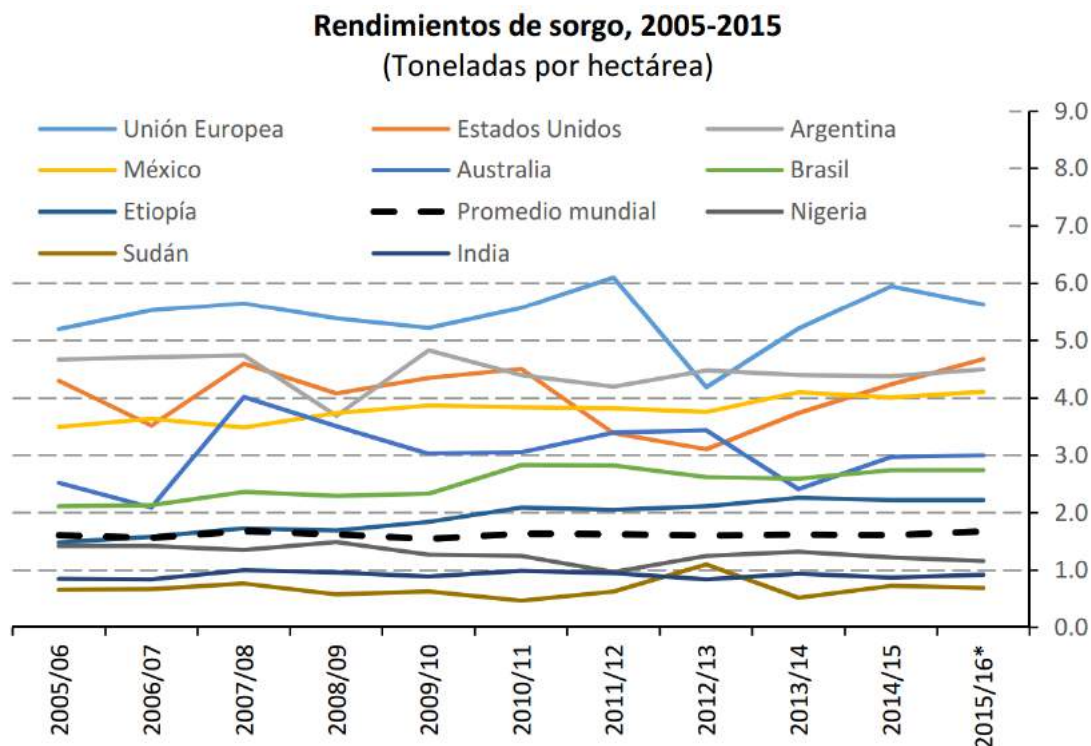


Figura 118 Rendimientos mundiales de sorgo (2005-2015)

Fuente: Tomado de FIRA (2015)

En cambio, en Estados Unidos y Argentina se reportaron pérdidas en el rendimiento histórico en el orden de 0.2 y 0.7 por ciento respectivamente (FIRA, 2015a).

Estudios de caso

El sorgo es el segundo grano con mayor superficie dedicada a su cultivo, pues se reporta que en el ciclo 2013-2014 se ubicó en el segundo lugar con 2.2 millones de hectáreas, sólo detrás del maíz blanco con 6.7 millones. Adicionalmente, es el tercer cultivo con mayor producción en volumen con 7.2 millones de toneladas, detrás del maíz blanco con 21.1 y la caña de azúcar con 49.3 millones de toneladas.

Para el modelado de rendimiento con escenarios de cambio climático se eligieron dos estaciones ubicadas en climas cálidos. Conforme a la metodología establecida en la presente consultoría se eligieron estaciones de trigo que contemplaran preferentemente un manejo de temporal. La mayoría de los municipios que reportan producción de temporal de acuerdo con cifras del SIAP siembran en un ciclo de primavera verano.

En la siguiente figura se muestra la distribución de las estaciones seleccionadas para el modelado del rendimiento con *Aquacrop*.



Figura 119 Distribución de las estaciones seleccionadas para sorgo

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2008)

Para caso de estudio se realizó una revisión sobre la calidad de las series climáticas. Para ello se retomó la metodología utilizada por López (2016), la cual incluye un control de calidad bajo dos metodologías (método de desviaciones estándar y rangos intercuartílicos) y una prueba de homogeneidad con el programa RHtestV4. La importancia del control de calidad para el proceso de modelado reside en la confiabilidad de los datos para obtener resultados congruentes en el programa *Aquacrop*. Una vez efectuada la revisión climática se procedió a recopilar información paisajística y fenológica para cada caso de estudio. Con la información obtenida se calibraron los modelos de cultivo en el programa *Aquacrop* con ayuda de los datos observados por el SIAP. En los siguientes apartados se presentan los resultados correspondientes a cada estación modelada.

Ciudad Ixtepec, Oaxaca

La estación de Ciudad Ixtepec se encuentra en el municipio del mismo nombre, en el estado de Oaxaca. Pertenece al CADER de Juchitán y al Distrito de Desarrollo Rural del Istmo. El cultivo de sorgo en esta zona se realiza bajo condiciones de temporal en un ciclo de primavera verano. A continuación, se aprecian algunas características de la estación a modelar.

Cuadro 29 Características generales de la estación Ciudad Ixtepec

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Ciudad Ixtepec, Oaxaca	20039	Media	Depuradas por López (2015)	Rendimientos de 1.9 ton/ha.

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación Ciudad Ixtepec tiene coordenadas -95.084° longitud oeste, 16.552° latitud norte a 69 msnm. El relieve donde se encuentra asentada la estación es una Llanura costera de piso rocoso o cementado, dentro de la subprovincia fisiográfica Llanura del Istmo. El municipio se encuentra

dividido entre dos provincias fisiográficas, la Cordillera Centroamericana (85% de la superficie) y la Sierra Madre del Sur (15%) (INEGI, 2009g).

Climatología

La estación meteorológica de Ciudad Ixtepec se encuentra dentro del cúmulo de estaciones que fueron trabajadas, depuradas y reportadas por López (2016). Por este motivo, no se realizó un procedimiento de homogeneización de datos y sólo se recuperó la información generada por dicha autora.

El rango histórico de la temperatura media anual en el municipio de Ciudad Ixtepec oscila de 22 a 28°C (INEGI, 2009g). La serie de temperatura máxima tiene un pico en el mes de mayo e importantes variaciones en la estación de invierno. En cambio, la serie de temperatura mínima se mantiene relativamente constante de marzo a octubre y presenta los mínimos en los meses de enero y febrero. En la siguiente gráfica se muestra la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) con sus respectivas escalas. (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

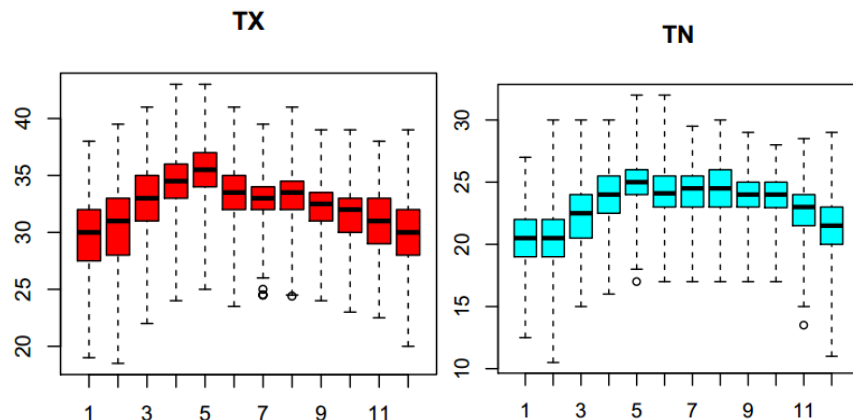


Figura 120 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación Ciudad Ixtepec
Fuente: Elaboración propia con *software* R.

El rango de precipitación del municipio oscila entre 800 y 1200 mm al año (INEGI, 2009g). El periodo de crecimiento en la estación de Ciudad Ixtepec inicia el 25 de mayo, dura 142 días y termina el 13 de octubre. Las condiciones de precipitación abundante en los meses intermedios al año hacen propicio dos periodos húmedos; uno comienza el 18 de junio, dura 11 días y termina el 28 de junio y el otro comienza el 14 de agosto, dura 46 días y termina el 28 de septiembre. A continuación, se presenta un diagrama que muestra la distribución de la precipitación durante el año, así como la intersección con la evapotranspiración lo que marca dos periodos húmedos.

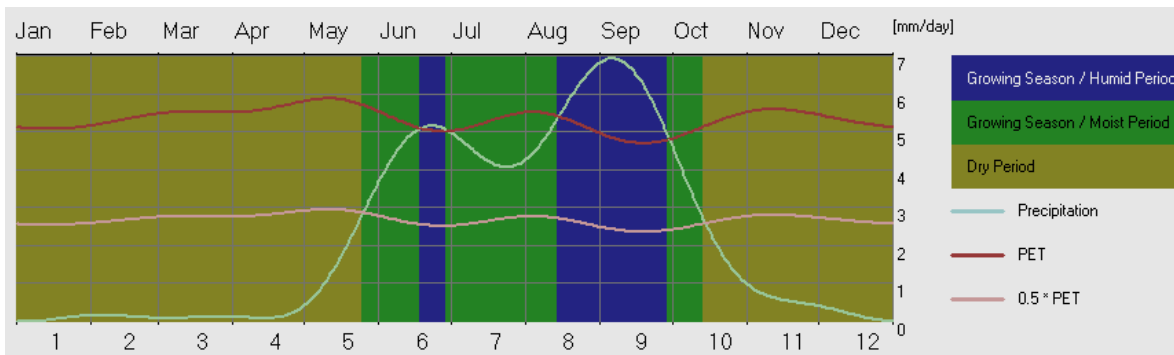


Figura 121 Periodo de crecimiento de la estación Ciudad Ixtepec

Fuente: Elaboración propia con *software LocClim*

Considerando las condiciones arriba enmarcadas el clima se clasifica como de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano, menos húmedo en la gran parte del municipio. No obstante, en la parte norte del municipio se presenta un clima de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano con humedad media (INEGI, 2009g).

Cultivo, manejo y suelo

En el estado de Oaxaca, la región que reúne con los requisitos ambientales para el desarrollo del sorgo dulce en condiciones de temporal es el Istmo de Tehuantepec; donde actualmente se produce sorgo para grano en alrededor de 16 mil hectáreas (Espinoza Paz & Contreras Hinojosa, 2011).

De acuerdo con SAGARPA-SIAP (2015), el 56.75 % de los agricultores del estado de Oaxaca siembran sorgo de temporal durante el mes de agosto y un 22.22% en el mes de julio; esto coincide con la Guía para cultivar sorgo dulce en el Istmo de Oaxaca, 2011 en la cual se recomienda sembrar desde el establecimiento de las lluvias hasta el 15 de agosto.

En Oaxaca para la región del Istmo en INIFAP recomienda las siguientes variedades para obtener una buena producción de biomasa en campo: Fortuna, Indú 1, Topper, Dale y Sureño (Espinoza Paz & Contreras Hinojosa, 2011).

Para las variedades antes mencionadas la floración varía de 82 a 92 días, la madurez fisiológica conlleva de 119 a 129 días, la altura de la planta puede variar de 1.5 a 2.1 m y el grosor del tallo puede ser desde 1.56 a 1.94 cm (Íbid. 2011).

Para la siembra del sorgo la separación entre surcos no debe ser mayor a 60cm, de esta forma se hace un uso eficiente del terreno y en la etapa vegetativa el cultivo cubre espacios libres, disminuyendo el crecimiento de malezas y conserva más humedad por efecto del sombreo (Íbid. 2011).

Es conveniente que se depositen 10 semillas por metro lineal en promedio a 5cm de profundidad esto con la finalidad de obtener en promedio 150mil plantas por hectárea (Íbid. 2011).

Se recomienda realizar la cosecha de sorgo entre la etapa de floración y el estado lechoso-masoso del grano para maximizar el rendimiento de biomasa y contenido de azúcares (Íbid. 2011).

Modelo base

De acuerdo con los datos reportados por SIAP, el rendimiento promedio del municipio de Ciudad Ixtepec del 2000 al 2011 fue de 2.06 ton/ha. Para el mismo periodo, el modelo de cultivo base generado con el *software Aquacrop* proyectó 2.11 ton/ha, es decir, 50 kg/ha más que lo indicado por SIAP, lo que representa menos del 2% de diferencia respecto al dato de SIAP. En la siguiente figura se aprecia una comparativa entre el rendimiento estimado por *Aquacrop* y el observado por SIAP, son las barras de error que muestran la desviación estándar en cada año.

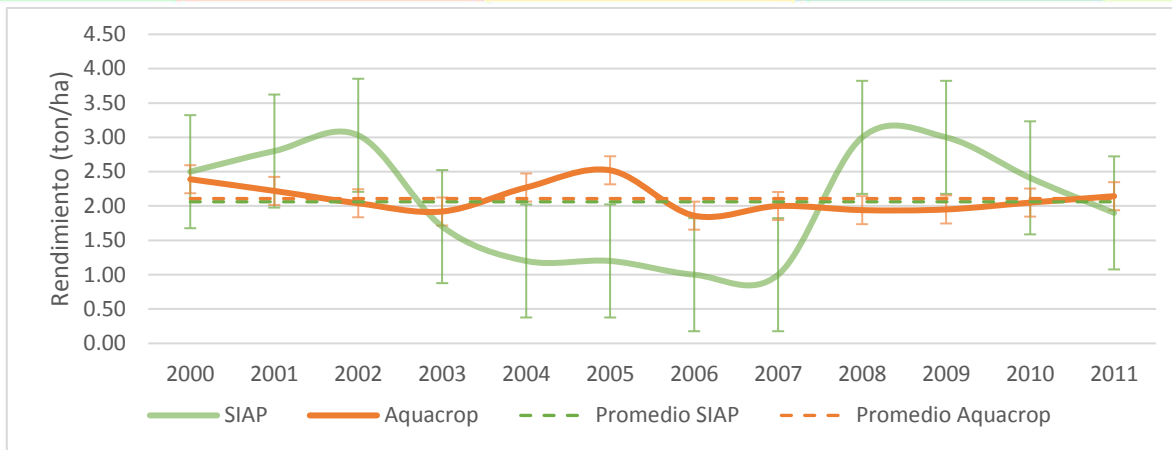


Figura 122 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Ciudad Ixtepec

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El error medio cuadrático fue de 0.84 ton/ha, lo que implica que el modelo se equivoca en esa cantidad en promedio. De acuerdo con la base de datos de Desinventar, en el año 2005 se registró una inundación que afectó a varias comunidades a causa de remanentes del huracán Stan y la conjunción con la depresión tropical 40; ello pudo haber ocasionado pérdidas por inundaciones que el programa *Aquacrop* no es capaz de simular. Para el año 2007 se registró una onda de calor que superó los 42°C y a su vez se reportaron casos de enfermedades entre la población. En este sentido, el modelo base generado por *Aquacrop* se mostró poco sensible ante las variaciones de precipitación y temperatura.

En la gráfica siguiente se aprecian los rendimientos de SIAP y *Aquacrop* (eje izquierdo) contrastados con la precipitación y la temperatura media anual (eje derecho).

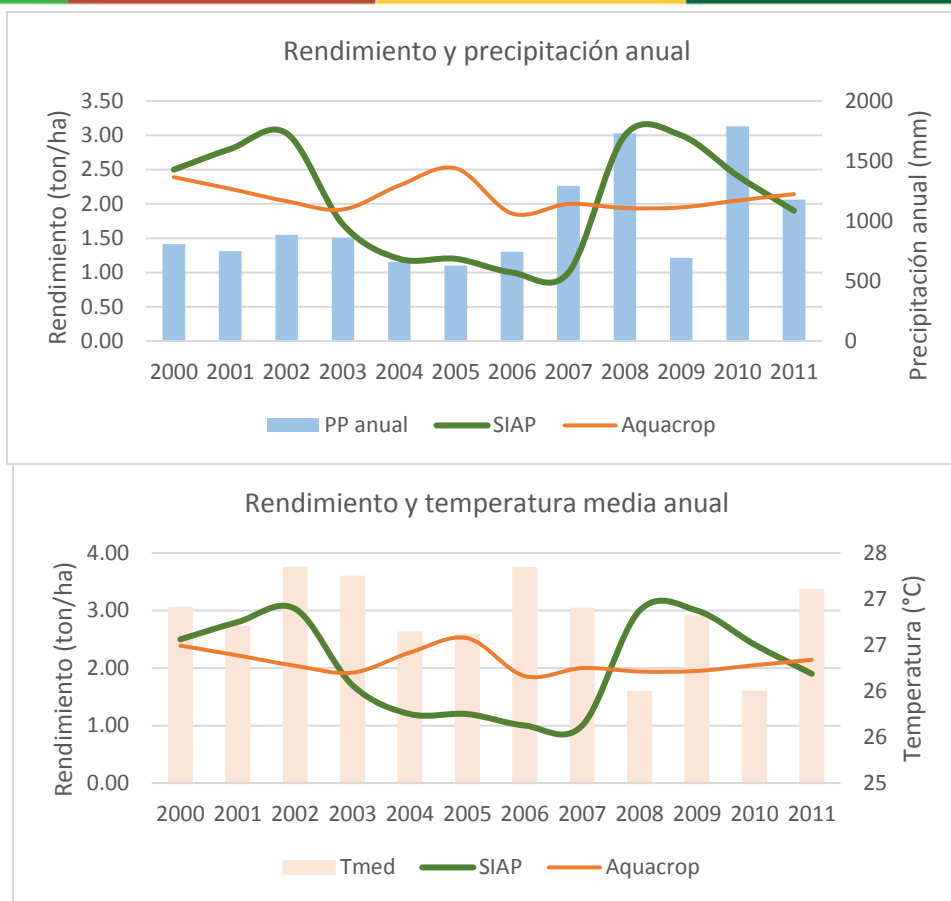


Figura 123 Modelo base para sorgo en Cd. Ixtepec, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El coeficiente de correlación entre la precipitación y el rendimiento fue de -0.37 para los datos de *Aquacrop*, mientras que para los del SIAP fue de 0.2 para el mismo periodo de datos. En este sentido, la utilización de un modelo lineal teniendo como variable de entrada la precipitación y como variable respuesta el rendimiento no encuentra una base sólida. Una vez que el modelo base fue considerado calibrado, se procedió a ejecutar el programa *Aquacrop* desde el año 1995 al 2011.

La biomasa producida en el periodo de estudio de datos climáticos 1995-2011 fue de 7.46 ton/ha. El rendimiento promedio durante ese periodo fue de 2.29 ton/ha. En cambio, la biomasa potencial fue de 24.26 ton/ha, lo que implica un aumento de 16.8 ton/ha más sin limitantes de agua, temperatura, fertilidad o plagas. En este sentido, el rendimiento potencial podría ser de alrededor de 7.2 ton/ha bajo las mejores condiciones de manejo, es decir, más del 300% de lo que se obtiene actualmente. Estas condiciones son beneficiadas por el clima cálido y el potencial productivo del Istmo.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la biomasa modelada y su relación con el rendimiento y la precipitación del periodo vegetativo.

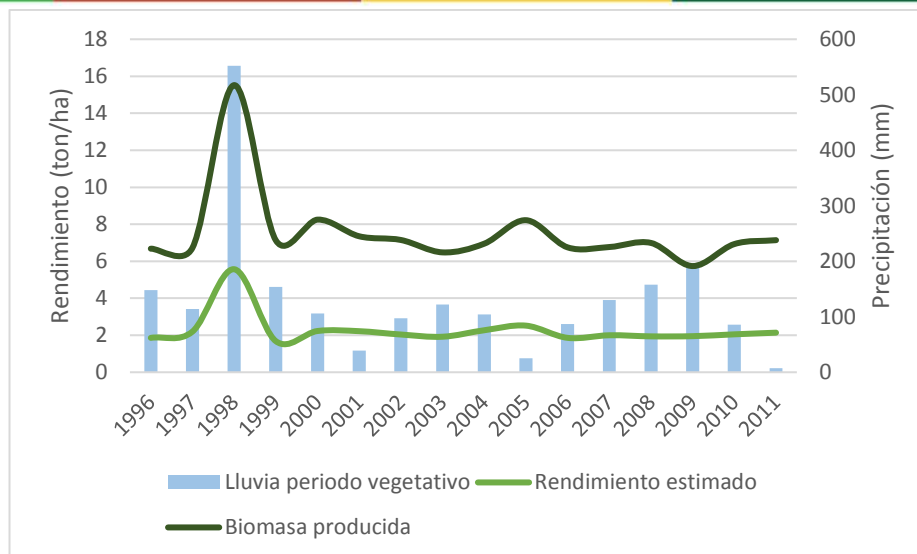


Figura 124 Rendimiento y biomasa producida en la estación Ciudad Ixtepec

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La productividad del agua promedio en el periodo de estudio citado anteriormente fue de 1.04 kg/m³. Este parámetro generaliza la relación de producción en función del agua y hace equivalente la obtención de 1 kg de biomasa por cada metro cúbico de agua aportado a la planta. Durante el periodo de crecimiento del cultivo no se registró estrés por temperatura, pues el rango requerido por el cultivo encuentra correspondencia con las condiciones del sitio de estudio.

No obstante, el factor limitante en el crecimiento fue la precipitación en algunos meses, que ascendió a 46% de afectación a la expansión foliar y a 34% afectando la abertura estomatal. Por otro lado, se estimó que el estrés por fertilidad afectó la producción en al menos un 50%. Cabe destacar que en el programa *Aquacrop* no se modeló el suministro de fertilizantes.

Escenarios de cambio climático

Bajo condiciones de cambio climático, la precipitación de la estación de Ciudad Ixtepec podría experimentar decrementos y cambios en la distribución intra anual, como lo muestra la siguiente figura. La precipitación histórica marcada por la normal climatológica reportada por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra con la línea negra, mientras que los escenarios de cambio climático tienen una coloración gris continuo para RCP de 4.5 y una línea puntada para RCP de 8.5. La distribución intra anual de la precipitación presenta dos picos, uno en junio y otro en septiembre. La mayoría de los escenarios de cambio climático indican una disminución de la lluvia desde junio hasta septiembre, incrementando la cantidad de la misma de agosto a diciembre; aunque los escenarios no muestran una diferencia tan significativa en la tendencia de la precipitación.

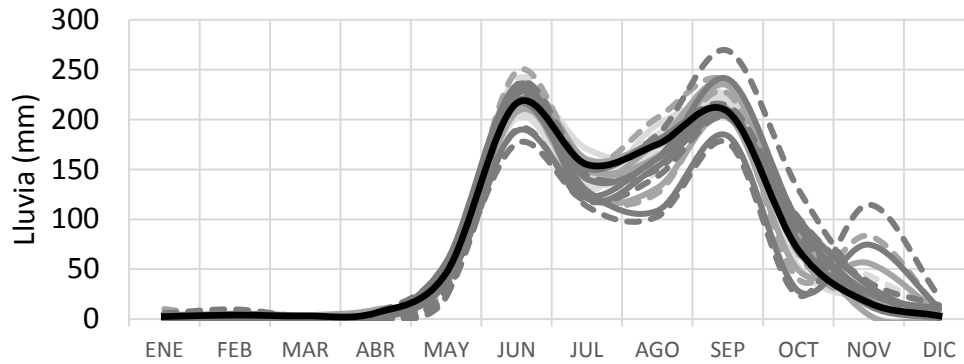


Figura 125 Precipitación con cambio climático en Cd. Ixtepec, Oax.

Fuente: Elaboración propia

La biomasa del escenario histórico fue de alrededor de 8.19 ton/ha, mientras que los escenarios de cambio climático indican incrementos y decrementos en el horizonte medio y lejano. El modelo MPIECHAM-5 plantea incrementos, mientras que los modelos GFDL-CM3, Ensamble REA y HADGEM2-ES prevén disminuciones. La siguiente figura muestra la gráfica de biomasa para la estación de Ciudad Ixtepec con escenarios de cambio climático. Se observa una disminución generalizada desde el escenario histórico hasta el horizonte medio

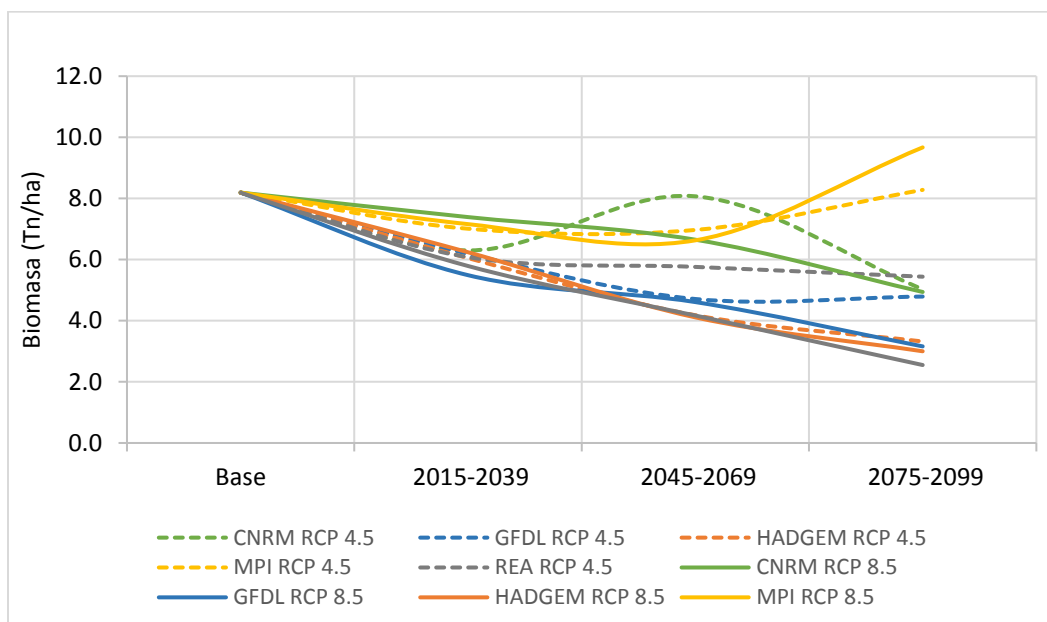


Figura 126 Biomasa bajo cambio climático para Cd. Ixtepec, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento, al ser un resultado de la biomasa, presenta similares tendencias respecto al comportamiento de la biomasa, aunque es la variable de mayor importancia. En el horizonte cercano y medio no se prevén incrementos mientras que para el horizonte lejano todos los escenarios, excepto uno, prevén disminuciones de un 28 a un 64% menos respecto al escenario base.

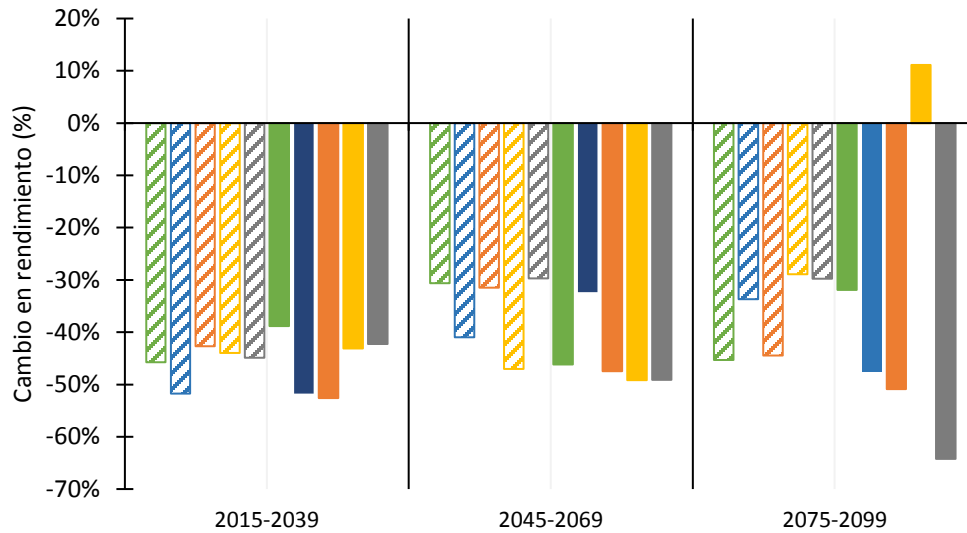


Figura 127 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Cd. Ixtepec, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Las medidas de adaptación probadas resultaron proyectar rendimientos mayores a los obtenidos con escenarios de cambio climático únicamente. La medida de un cambio en la fecha de siembra proyectó decrementos respecto al escenario base mientras que la medida de acolchados implicó que algunos de los escenarios reportaran incrementos en el rendimiento de hasta 48%. La medida de un cambio en la fenología de crecimiento arrojó resultados similares a la del cambio de acolchados, pero con un aumento de rendimiento menor desde un 8 hasta 28% y la aplicación de una lámina de riego proyectó resultados más favorecedores que implica que el rendimiento aumente hasta un 84%.

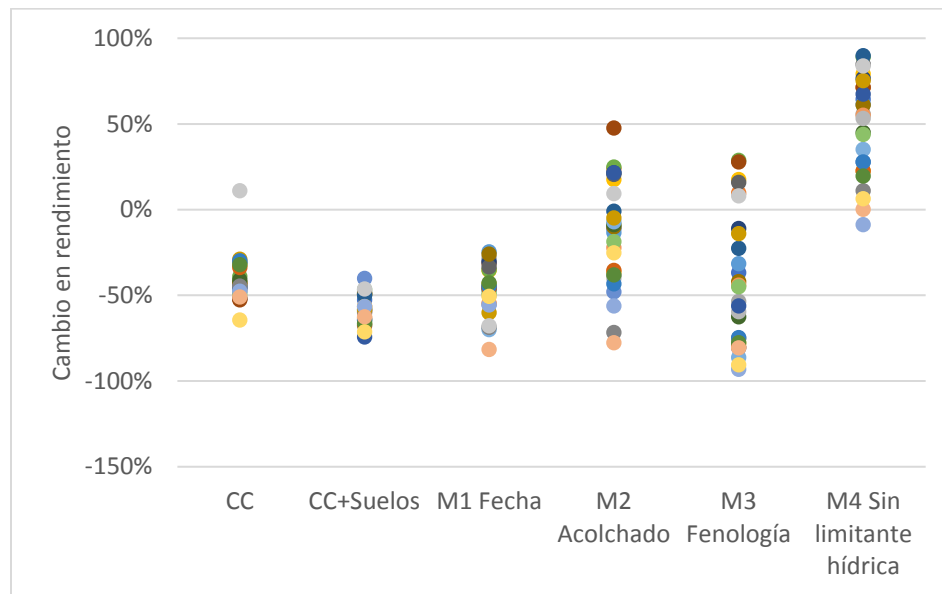


Figura 128 Medidas de adaptación para Cd. Ixtepec, Oax.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Con base en los resultados obtenidos a partir de las medidas de adaptación, hay que resaltar los resultados de la aplicación de acolchados orgánicos y la aplicación de una lámina de riego para buscar mejores ciclos de crecimiento.

González, Tamaulipas

La estación de González se encuentra en el municipio del mismo nombre, en Tamaulipas. Perteneció al CADER González y al DDR del mismo nombre. El sorgo en este municipio es un cultivo tradicional desde hace varios años y se siembra tanto en ciclos de primavera verano como de otoño invierno. No obstante, la producción de primavera verano es mayor en superficie sembrada y volumen de la cosecha. Asimismo, se caracteriza por reportar cultivo en temporal, aunque grandes extensiones también siembran bajo manejo de riego. A continuación, se presenta un cuadro con las características generales de la estación.

Cuadro 30 Datos de referencia de la estación González, Tamps.

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
González, Tamps.	28035	Media	Bibliografía	Rendimientos de 1.5 ton/ha.

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

Las coordenadas de la estación González son -98.42° longitud oeste, 22.814° latitud norte a 60 msnm. La estación se encuentra dentro de una llanura alta, perteneciente a la subprovincia de Llanuras y lomeríos de Tamaulipas y la provincia Llanura Costera del Golfo Norte (INEGI, 2009h).

Climatología

La estación seleccionada no se contempló dentro del proceso de control de calidad realizado por (López, 2016). Dentro del primer control de calidad, o control de calidad básico, se encontró que la mayoría de los outliers corresponden a abril del 2003 y julio, agosto y septiembre del 2009 en la serie de temperatura mínima. Al respecto, en la base de datos de Desinventar se encontró que se reportó un vendaval a finales de octubre del 2009 que afectó vías de comunicación. Ni la base de datos de CENAPRED ni la de FONDEN registraron eventos importantes para las fechas de los outliers. Las bajas temperaturas de la serie de temperatura mínima en el 2009 se visualizan en la siguiente gráfica, donde la temperatura máxima se muestra en color rojo y la mínima en azul.

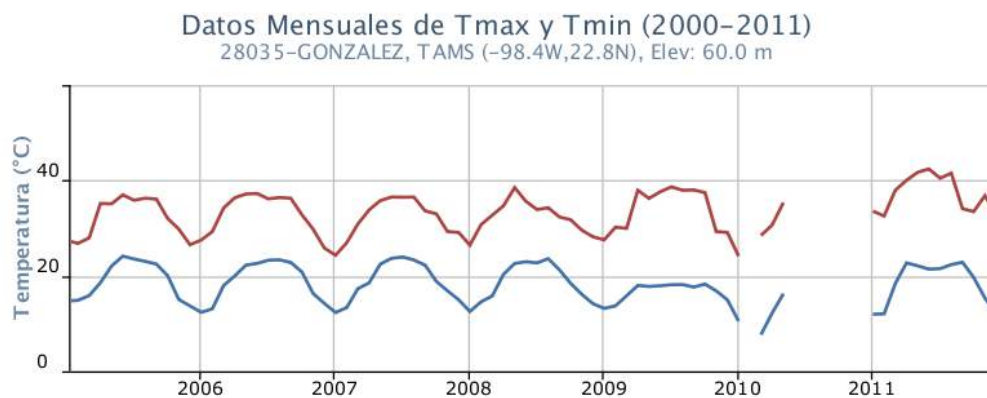


Figura 129 Gráfico de temperaturas máxima y mínima para González, Tamps (2000-2011)

Fuente: CICESE (2015)

Después de revisar las estaciones cercanas, se corroboró que ninguna presentó la situación de bajas temperaturas mínimas en ese periodo de tiempo, por lo que se procedió a sustituir los outliers por código de valor perdido. Dentro del control de calidad extra se encontraron outliers relacionados con la precipitación mayoritariamente, así como algunas series de temperatura mínima y máxima que tuvieron valores menores a los esperados. Los valores “outliers” fueron analizados en función de las bases de datos antes mencionadas los cambios pertinentes fueron ejecutados.

Dentro del proceso de homogeneización de temperatura máxima, se encontraron dos saltos en marzo de 2003 y en septiembre de 2009; ninguno de los changepoints o saltos correspondieron con valores extremos del MEI, que indica la severidad de El Niño o La Niña. Respecto a la temperatura mínima se encontró un salto en febrero de 2009, el cual no correspondió con ningún valor extremo del citado índice, por lo que fue homogeneizada.

El rango anual de la temperatura media es de 20° a 26°C para el municipio de González (INEGI, 2009h). La distribución intra anual de la temperatura presenta un pico en los meses de mayo a julio principalmente, mientras que la temperatura tiene los mínimos más marcados en enero y febrero. La diferencia de la temperatura también es mayor en el ciclo de invierno, aunque se mantiene por encima de los 10°C lo que hace propicia la siembra de cultivos en ciclo otoño invierno. En la figura siguiente se parecía una comparativa entre temperatura máxima y mínima. En el eje “x” se observan los meses del 1 al 12, mientras que el eje “y” corresponde a los valores de temperatura en °C (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

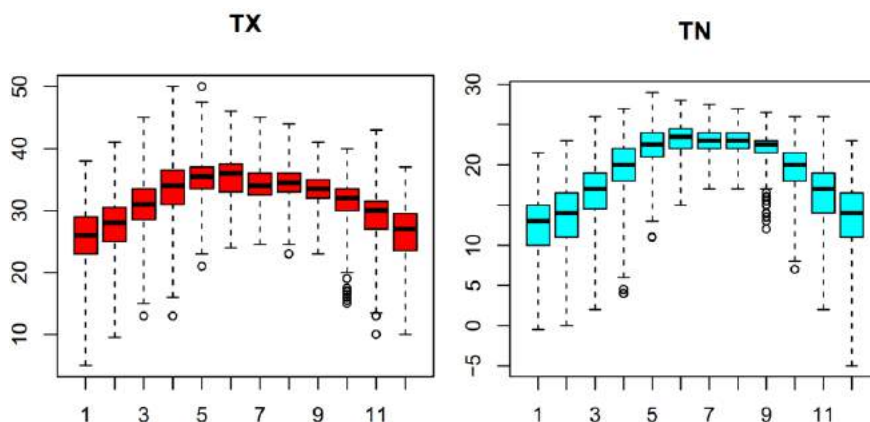


Figura 130 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con *software* R.

La precipitación histórica promedio es de 700 a 1100 mm anuales (INEGI, 2009h). El periodo de crecimiento para la estación seleccionada comienza aproximadamente en 21 de mayo, tiene una duración de 150 días y termina el 17 de octubre. No obstante, no se presenta ningún periodo húmedo debido a la alta evapotranspiración que llega a ser de casi 150 mm mensuales, mientras que la lluvia llega a ser de 120 mm en los meses más lluviosos. A continuación, se tiene un diagrama que esquematiza el periodo de crecimiento para la estación seleccionada.

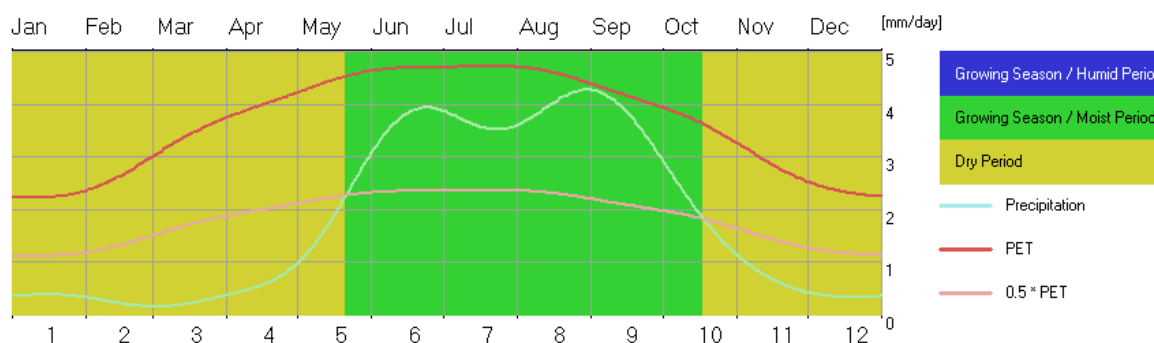


Figura 131 Período de crecimiento de la estación González, Tamps.

Fuente: Captura de pantalla en el *software CliCom*

El clima predominante en la mayor parte del municipio es el cálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad (87% del municipio), aunque existe una parte que presenta condiciones de clima semiseco muy cálido y cálido (11% del municipio) (INEGI, 2009h).

Debido a la ausencia de datos, en el año 2010 la mayoría de los datos faltantes de la estación objetivo fueron reemplazados por los valores históricos promedio. Las estaciones cercanas tampoco tuvieron información disponible para tales requerimientos.

Cultivo, manejo y suelo

Los datos de SIAP utilizados para el modelado del rendimiento de sorgo bajo manejo de temporal corresponden al ciclo primavera verano. La siembra de sorgo en ciclo primavera verano en Tamaulipas se efectúan en sitios con menos de 50 msnm, con una temperatura media anual de 23°C y con 450-720 mm de precipitación anual (SAGARPA, 2015e). De acuerdo con esta información, el municipio de González cumple adecuadamente con los requerimientos ambientales.

La preparación del terreno para la siembra de sorgo comienza con la limpia del terreno de las cosechas o residuos anteriores. A continuación es necesaria una rotura, seguida de una rastra y finalmente un bordeado que adecúa al suelo para el fácil desarrollo de la planta (SAGARPA, 2015e). Las variedades que se utilizan para temporal en Tamaulipas parten de una amplia gama de investigaciones, pero se reconocen actualmente las siguientes DKS-40, DKS-32, 8282, 83G19, Encino, Ébano, Ciprés, RB-Norteño, NK-180, NK-73J6, Syngenta 5515 (SAGARPA, 2015e).

La siembra se realiza en surcos separados por 80 cm, a una profundidad de 5 a 7 cm, con una densidad de siembra de 150 a 175 mil plantas por hectárea utilizando de 6 a 8 kg de semilla por hectárea. El periodo recomendado de siembra es del 1 de julio al 15 de agosto (SAGARPA, 2015e).

El rendimiento promedio esperado es de 2.5 ton/ha (SAGARPA, 2015e).

La fisiografía de llanura costera con lomeríos implica que los suelos predominantes en el municipio de González sean relativamente homogéneos. El tipo de suelo predominante es el vertisol (55% del territorio), seguido del Phaeozem en la parte norte (20%), el Kastañozem (8%) (INEGI, 2009h).

De acuerdo con los pozos edafológicos estudiados por INEGI, la textura predominante en los sitios agrícolas que corresponden a suelos vertisoles se presenta un tipo de textura pesada, con porcentajes de arcilla de más de 60%, por lo que la textura predominante es la de tipo arcillosa. La profundidad medida se reporta de 1.05 m (INEGI, 2013).

Modelo base

Los datos reportados por el SIAP para el periodo de 2000-2011 arrojaron un rendimiento promedio de 1.79 ton/ha bajo un manejo de temporal en ciclo de primavera verano en el municipio de González, Tamps. Para el mismo periodo el modelo de cultivo generado con *Aquacrop* proyectó un rendimiento promedio de 2.07 ton/ha, reflejando así una diferencia de 120 kg/ha con los datos del SIAP, lo que implica un 7% de diferencia. El error medio cuadrático entre los datos del modelo y los observados por SIAP fue de 0.85 ton/ha. La siguiente figura compara las series de rendimiento obtenidos a partir del modelo *Aquacrop* y las observadas por SIAP.

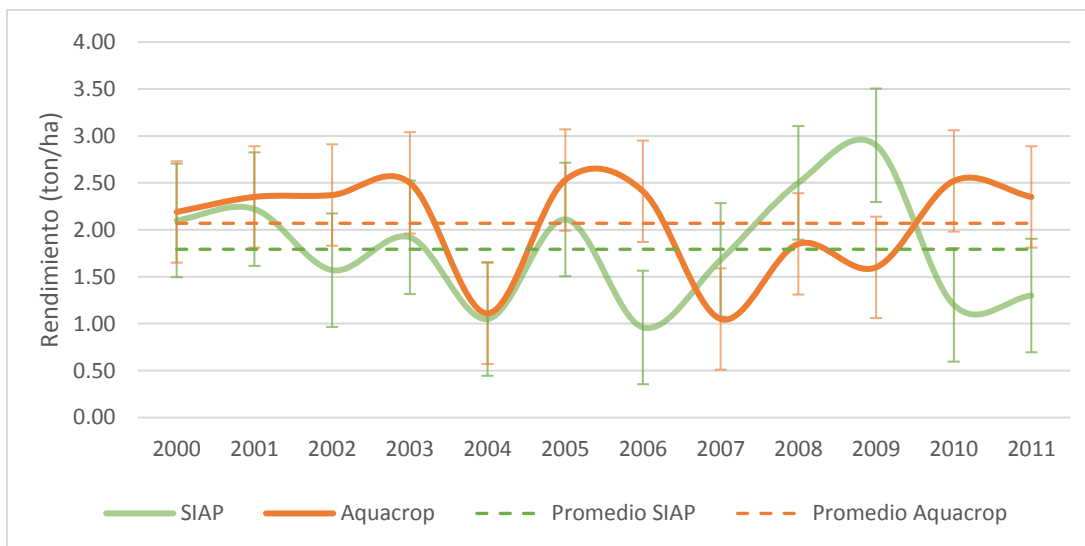


Figura 132 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En la mayoría de los años se registró una coincidencia de los datos del modelo *Aquacrop* con los observados por el SIAP en términos de más/menos la desviación estándar. En el año 2004 se registró una inundación que ocasionó el desbordamiento de dos ríos cercanos y puede ser el origen de la disminución del rendimiento en el municipio de González. En la siguiente gráfica se comparan los rendimientos de *Aquacrop* y SIAP contra dos variables de importancia climática: la precipitación anual y la temperatura media anual.

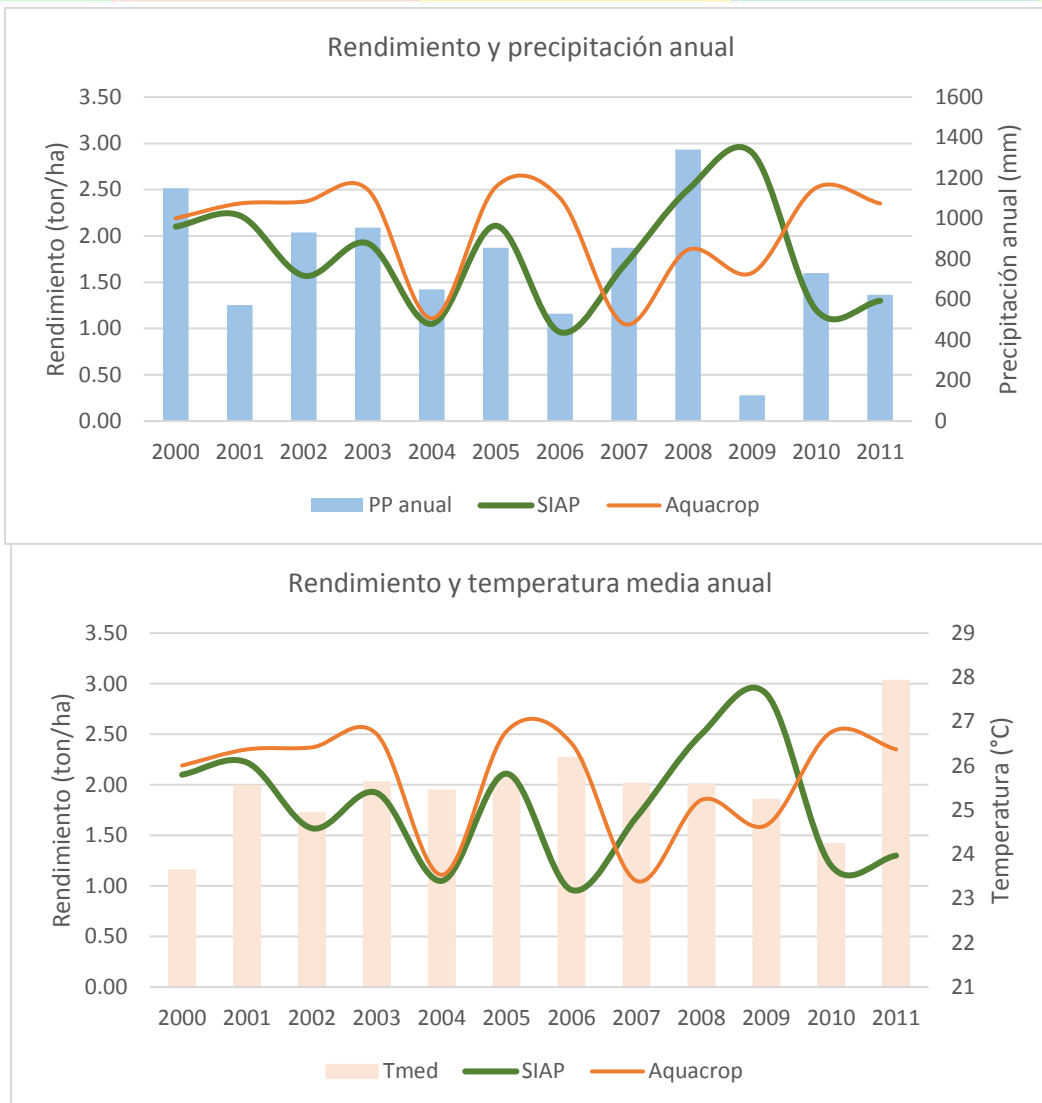


Figura 133 Modelo base para sorgo en González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La relación de la precipitación con el rendimiento tuvo un reporte positivo para este caso de estudio, aunque de magnitud baja. El coeficiente de correlación entre el rendimiento de SIAP y la precipitación anual fue de 0.1, mientras que entre el rendimiento de *Aquacrop* y la precipitación anual fue de 0.12. Aunque se muestra una relación lineal entre lluvia y rendimiento su magnitud es baja como para proponer la explicación del rendimiento a partir de dicha variable. En la figura siguiente se aprecia un diagrama de puntos que contrasta los datos de SIAP contra los que se generaron por *Aquacrop*.

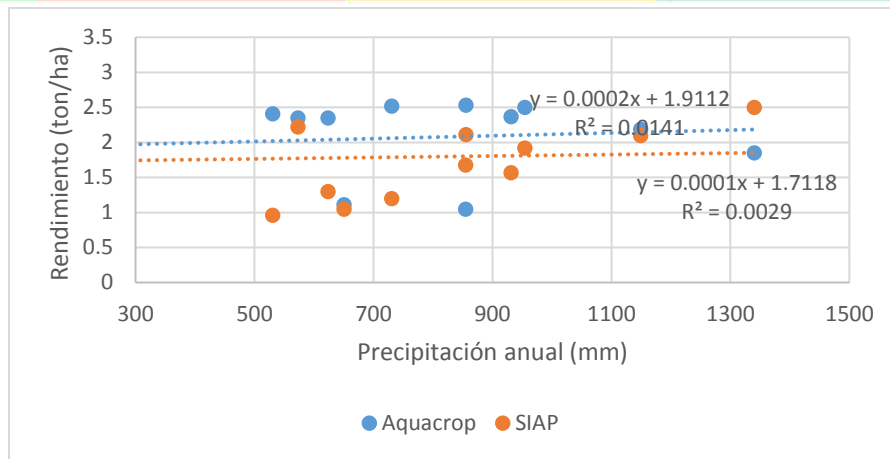


Figura 134 Relación de rendimiento con precipitación en estación González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Una vez que el modelo base fue considerado calibrado, se procedió a ejecutar el *software Aquacrop* con los datos desde 1995 hasta 2011. El rendimiento promedio de ese periodo fue de 2.03 ton/ha, mientras que la biomasa producida modelada fue de 6.32 ton/ha. No obstante, la biomasa potencial fue de 19.78 ton/ha, lo que implicaría que se podrían obtener rendimientos de hasta 5.9 ton/ha sin ninguna limitante de plagas, fertilización y agua, considerando un índice de cosecha de 30%. La siguiente figura muestra la relación de la biomasa producida con el rendimiento y la precipitación del periodo vegetativo.

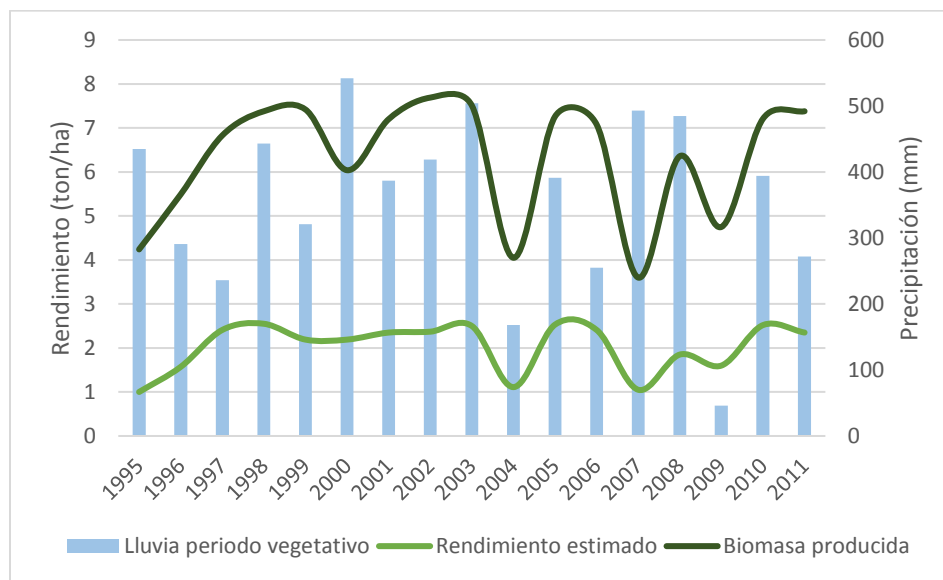


Figura 135 Rendimiento y biomasa producida en la estación González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La productividad del agua resultó ser menor que la reportada en el caso de estudio de Ciudad Ixtepec, Oaxaca. En promedio, el parámetro de productividad del agua fue de 0.53 kg por cada m³ suministrado. Durante el periodo de crecimiento del cultivo no se registró estrés térmico, aunque el factor más limitante fue la disponibilidad hídrica. El estrés hídrico afectó la producción en un 26% durante el periodo de establecimiento del cultivo y en un 20.9% durante el periodo

de producción. No obstante, el estrés por fertilidad resultó ser el mayor en todos los años afectando más del 50% de la producción.

Escenarios de cambio climático

En condiciones de cambio climático, la precipitación de la estación de González podría experimentar decrementos y cambios notorios en la distribución intra anual, como lo muestra la siguiente figura. La precipitación histórica marcada por la normal climatológica reportada por el Servicio Meteorológico Nacional se muestra con la línea negra, mientras que los escenarios de cambio climático tienen una coloración gris continuo para RCP de 4.5 y una línea puntada para RCP de 8.5.

La distribución intra anual de la precipitación presenta diversos picos, pero el incremento más notorio en julio con RCP de 4.5 evaluado con el modelo HADGEM2-ES en el horizonte 2075-2099 mientras que la disminución de la precipitación más extrema es en agosto correspondiente a un RCP de 8.5 evaluado con el modelo HADGEM2-ES en el horizonte 2075-2099. En promedio los escenarios de cambio climático indican una disminución de la lluvia desde junio hasta octubre, incrementando la cantidad de la misma de septiembre a diciembre sin embargo la variación no es tan considerable

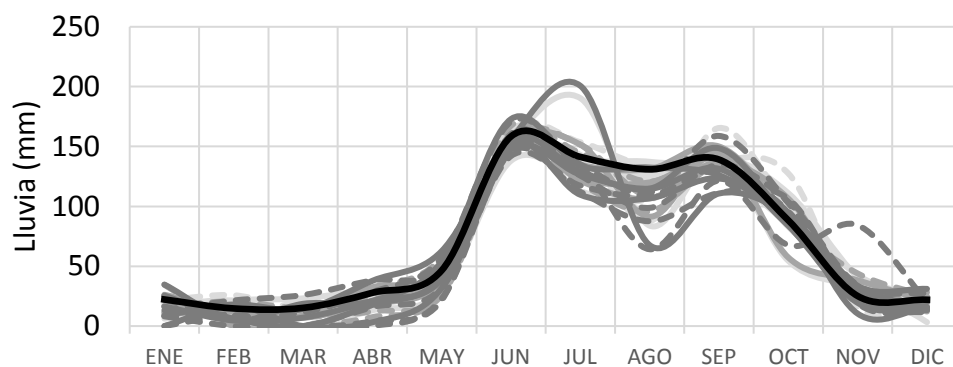


Figura 136 Precipitación con cambio climático en González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia

La biomasa del escenario histórico fue de alrededor de 5.83 ton/ha, mientras que los escenarios de cambio climático indican incrementos y decrementos en el horizonte cercano. El modelo CNRM-CM5 y HADGEM2-ES plantean incrementos, mientras que el modelo GFDL-CM3 prevé disminuciones así también se observa que el modelo HADGEM2-ES RCP 8.5 incrementa y después de llegar a un pico disminuye drásticamente. La siguiente figura muestra la gráfica de biomasa para la estación de González con escenarios de cambio climático. Se observa una disminución generalizada desde el escenario histórico hasta el horizonte lejano.

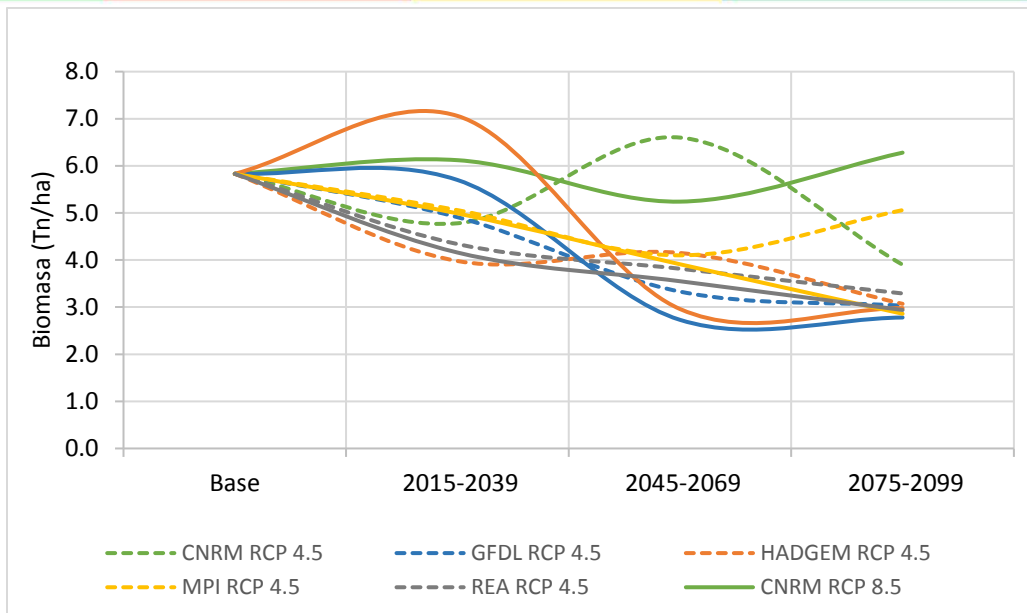


Figura 137 Biomasa bajo cambio climático para González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El rendimiento, al ser un resultado de la biomasa, presenta similares tendencias respecto al comportamiento de la biomasa, aunque es la variable de mayor importancia. En el horizonte cercano, algunos escenarios prevén incrementos desde el 10 hasta un 31%, para el horizonte medio la mayoría de los escenarios coinciden en decrementos desde 12 hasta 78% excepto uno que prevé incremento de 27%; mientras que en el horizonte lejano todos los escenarios, excepto uno, prevén disminuciones hasta de un 78% menos respecto al escenario base.

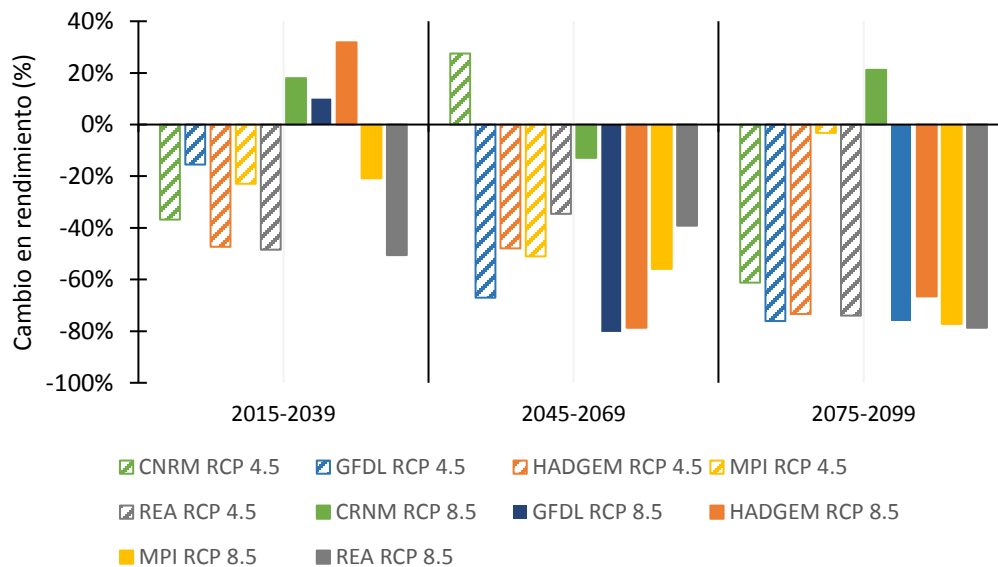


Figura 138 Rendimiento con escenarios de cambio climático en González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Las medidas de adaptación probadas resultaron proyectar rendimientos un poco mayores a los obtenidos con escenarios de cambio climático. Con el cambio en la fecha de siembra se proyectó incrementos de un 41% más respecto al escenario base. Por otro lado, la medida de acolchados implicó aumentos y decrementos respectivamente, sin embargo, al compararlos no hay diferencia mayor a lo previsto con el cambio de fechas de siembra. La medida de un cambio en la fenología de crecimiento arrojó resultados similares a la del cambio de acolchados, mientras que la aplicación de una lámina de riego proyectó resultados menos favorecedores.

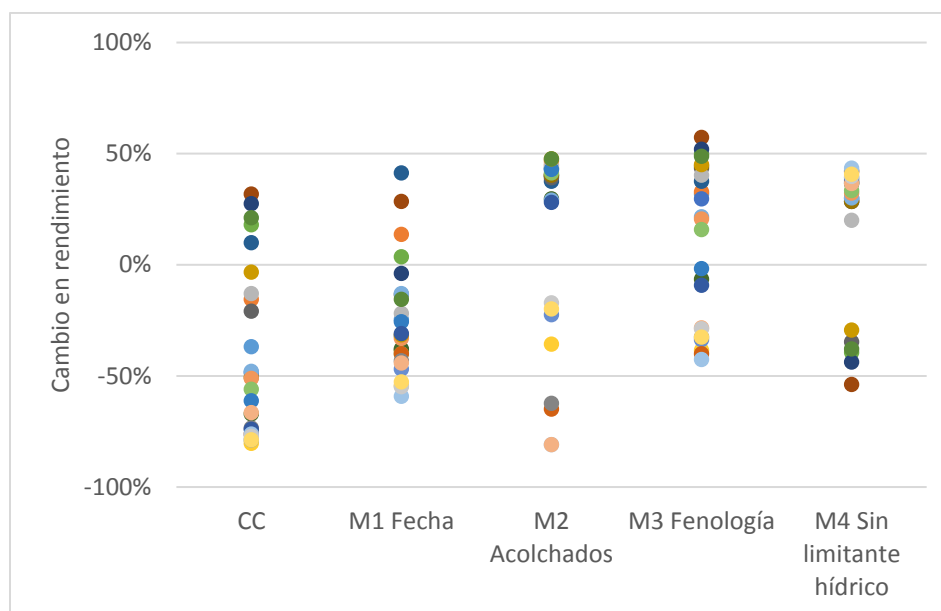


Figura 139 Medidas de adaptación para González, Tamps.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Con base en los resultados obtenidos de las medidas de adaptación, es posible resaltar los resultados de la aplicación de acolchados orgánicos y el cambio de la fenología son las mejores opciones en este caso para buscar mejores rendimientos en la zona de González.

CEBADA

Descripción botánica

La cebada maltera en México es de gran importancia socioeconómica, representando el ingreso de miles de familias que habitan en zonas productoras de los Valles Altos de la mesa central. En los últimos años este cultivo ha registrado una baja en la producción en el orden del 13% a pesar de mantener la misma superficie productiva (SIAP, 2016a).

De acuerdo con los informes de SIAP (2015a) señalan que existen 18 estados en el país que se dedican a la siembra de cebada estados como: Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México, Puebla y Michoacán principalmente bajo temporal y el estado de Guanajuato con una participación del 77% en condiciones de riego, aportando en promedio con el 90% de la producción total del país (Díaz *et al.*, 2008).

La cebada pertenece a la familia *Poaceae* (Gramínea) y a la subfamilia *Pooideae*. El nombre científico es *Hordeum vulgare* que corresponde a una especie de ciclo vegetativamente corto, aunque existen 32 especies del género *Hordeum*, dos de ellas comparten el mismo genoma básico (FAO, 2014). Los centros de origen y de diversidad de la cebada se encuentran en el este y suroeste de Asia, el noroeste y sur de América y en el mediterráneo; aunque los primeros indicios de domesticación señalan a la región del medio oriente desde hace unos 10,000 años (Australian Government, 2008).

El hábito de vida de la cebada es en forma de un pasto anual de 60 a 120 cm de alto. La planta de cebada suele tener un color verde más claro que el del trigo, con una altura menor a un metro, los tallos en particular son erectos y compuesto de entrenudos huecos. Las hojas son estrechas y de color verde claro, con estípulas cruzadas por delante del tallo y una corta lígula dentada (SIAP, 2016b). La Figura 1 muestra una representación de la planta de cebada destacando el tallo (izquierda), la espiga (derecha arriba), la gluma (derecha abajo) y el grano (centro).



Figura 140 Anatomía de la cebada

Fuente: Cortesía del USDA-NRCS PLANT database (Hitchcock, 1950).

Las raíces más profundas se originan primero y conforman el sostén de la planta (seminales), mientras que las raíces secundarias (adventicias) que surgen después se conforman en forma de macollos que brindan soporte a la planta; la profundidad depende de las condiciones del suelo y de la temperatura (Australian Government, 2008).

El fruto consiste en un grano en forma de cariósipide con glumillas adheridas, su tamaño alcanza longitud de 6 a 9.5 mm y un ancho de 1.5 a 4 mm, dependiendo de las condiciones ambientales y genéticas de la cebada (SIAP, 2016b).

Algunas de las variedades de cebada más importante en el país son: Esmeralda, Adabella, cierro prieto y centinela (SAGARPA, SENASICA, & INIFAP, 2015; SARH, INIA, & CIAB, 1983).

Los usos de la cebada son múltiples a nivel internacional, pueden ir desde la alimentación (85% de la producción), el procesamiento de malta para la producción de licores hasta la alimentación humana mediante harinas (Australian Government, 2008). En algunos lugares inclusive se ha documentado su uso en términos medicinales, siendo usada en afecciones de tipo digestivo

(FAO, 2014). No obstante, en México se utiliza principalmente en la industria de la cerveza (SIAP, 2016b).

Requerimientos ambientales

Se ha reportado que la cebada puede crecer en diversos ambientes que van desde los sub árticos hasta los subtropicales, aunque no es adaptable a climas cálido húmedos (Australian Government, 2008). En contraparte, se la reportado que la cebada crece bien en ambientes frescos y moderadamente secos, con precipitaciones de 400 a 600 mm anuales, altitudes de 1800 a 3000 msnm y un pH de 6.0 a 8.5 (SIAP, 2016b).

En temperaturas menores a 20°C la cebada puede desarrollarse de forma óptima, además de que requiere de una baja a media humedad relativa en el ambiente (Sys et al., 1993). La cebada presenta requerimientos de luz y no tolera temperaturas menores a -4°C durante algunos periodos de tiempo. Se puede distribuir en una amplia variedad de climas pero prefiere predominantemente los de tipo templado (FAO, 2014).

A continuación, se muestra una tabla de requerimientos.

Cuadro 31 Requerimientos ambientales para cebada

Variable	Referencia	Grado de aptitud			
		Alta	Moderada	Ligera	Nula
Precipitación del ciclo de crecimiento (mm)	FAO,1994	1000	700	380-600	-
	(Sys et al., 1993)	400-900	200-400 900-1300	150-200 1300-1500	<150 >1500
Precipitación anual (mm)	(FAO, 2014)	500-1000	200-500 1000-2000	-	<200 >200
	(Gómez, 2001)	28 -30	15-30	-	-
Temperatura media (°C)	(FAO, 2014)	15-20	2-15 20-40	-	<2 >40
	(Sys et al., 1993)	8-12	4-8 12-24	2-4 24-28	<2 >28
	(Sys et al., 1993)	0-2	2-4	4-6	>6
Profundidad del suelo (cm)	Moreno,1992	>100	>30<100	-	<30
	(Sys et al., 1993)	>90	50-90	10-50	<10
	(FAO, 2014)	>150	50-150	-	<50
pH	(FAO, 2014)	6.5-7.5	6-6.5 7.5-8	-	<6 >8
	(Sys et al., 1993)	7-7.5	5.8-7 7.5-8.2	5.5-5.8 8.2-8.5	<5.5 >8.5

COS (%)	(Sys <i>et al.</i> , 1993)	>2	0.8-2	<0.8	-
Altitud (msnm)	(FAO, 2014)	0-3000	3000-4400	-	>4400

Fuente: Elaboración propia con datos de referencias citadas

Respecto a algunos factores limitantes, se ha determinado que la temperatura mínima para la germinación debe ser entre 3° y 4°C, siendo 20°C la óptima y máxima de 28 a 30°C (FAO, 2014). Este cultivo prospera en diversos tipos de suelo de buen drenaje y fertilidad, especialmente de textura franco (INIFAP, 2011b). Se ha documentado que no tolera bien las texturas de tipo pesadas o muy ligeras, tales como las arenosas o arcillosas (FAO, 2014).

Desarrollo de fenología

El desarrollo completo de fenología puede tomar de 90 a 120 días para variedades de primavera-verano y entre 180 y 240 días para variedades de invierno, dependiendo de la latitud y las condiciones ambientales, pero invariablemente la cebada es un cultivo de tipo anual (FAO, 2014).

La germinación comienza cuando la semilla ha tenido suficiente humedad mediante la emergencia de la radícula hacia abajo; a continuación el coleóptilo cesa su alargamiento y surge la primera hoja, a partir de la cual surgen cada 3-5 días las subsecuentes hojas (Ver Figura 2, Em). El amacollamiento comienza cuando la plántula tiene al menos 3 hojas y el periodo de surgimiento es de 2 semanas en promedio (ET). La elongación del tallo sucede cuando los entrenudos del tallo incrementan su longitud; a continuación da inicio en periodo de embuche representado por el hinchamiento de la vaina a partir de la cual se desarrollará la espiga (HB, Esp) (Pérez Ruíz, 2014).

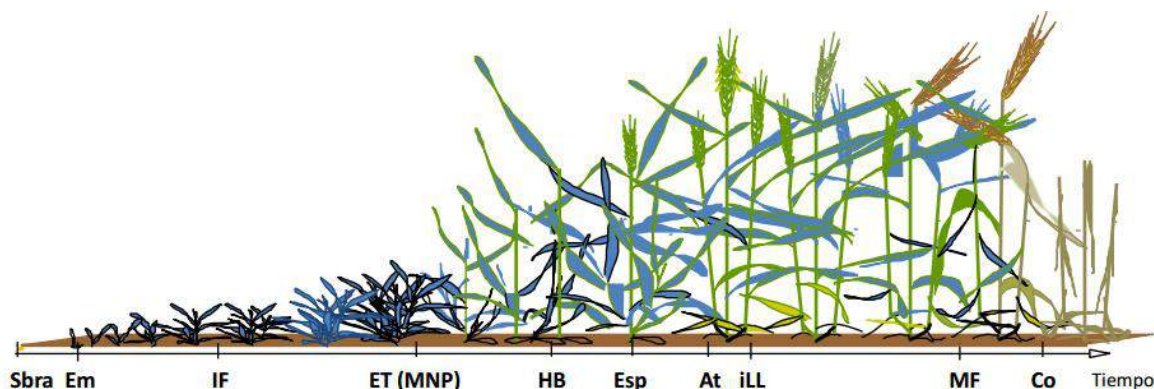


Figura 141 Etapas de desarrollo de cebada

Fuente: García (2012)

La espiga se consolida durante la época de embuche, mientras que la polinización comienza a la par (Esp). El primer periodo de desarrollo del grano es la fase acuosa (At), seguido de la etapa lechosa (iLL); cuando el grano está cercano a su madurez comienza a perder agua y su consistencia se vuelve sólida (MF) y finalmente las hojas pierden su color verde y se marca al fin del ciclo de vida de la planta (Pérez Ruíz, 2014).

A nivel general se han clasificado a las etapas fenológicas en dos grupos: la etapa vegetativa y la reproductiva. En general, todos los cereales de grano pequeño (cebada, trigo, avena) siguen patrones similares en su desarrollo.

Cuadro 32 Etapas fenológicas de cebada

Etapas/Referencia	(Pérez Ruíz, 2014)	Referencia
Germinación	7-9	Emergencia de la radícula
Amacollamiento	21-25	Generación de hojas
Elongación del tallo	30	Complemento del periodo vegetativo
Embuche	60	Formación de la espiga
Floración o espigamiento	60-70	Inicio de la fecundación
Duración de la floración	10	Duración de la fecundación
Inicio de madurez o desarrollo del grano	80	Comprende las etapas del grano lechoso, masa suave y masa dura
Senescencia	100	Inicio de la caída de hojas
Madurez fisiológica	105-115	Estado sólido y maduro del grano

Fuente: Elaboración propia con base en Pérez Ruíz (2014)

En México la época de siembra de cebada puede variar de mayo a agosto para el ciclo de primavera verano en manejo de temporal. Los principales meses de siembra son junio (46%) y julio (36%) en el país. Bajo riego y en ciclo otoño invierno se ha reportado que las fechas de siembra varían desde el 15 de noviembre hasta el 15 de enero para el centro de México (Pérez Ruíz, 2014).

Entretanto, la época de cosecha se da a partir de octubre hasta enero, siendo noviembre el mes con mayor cantidad de cosecha (47% del total), octubre (25%) y diciembre (16%) (INIFAP, 2011a). En la siguiente figura se aprecia la distribución de la cosecha en el año de acuerdo a promedios de productores a nivel nacional.

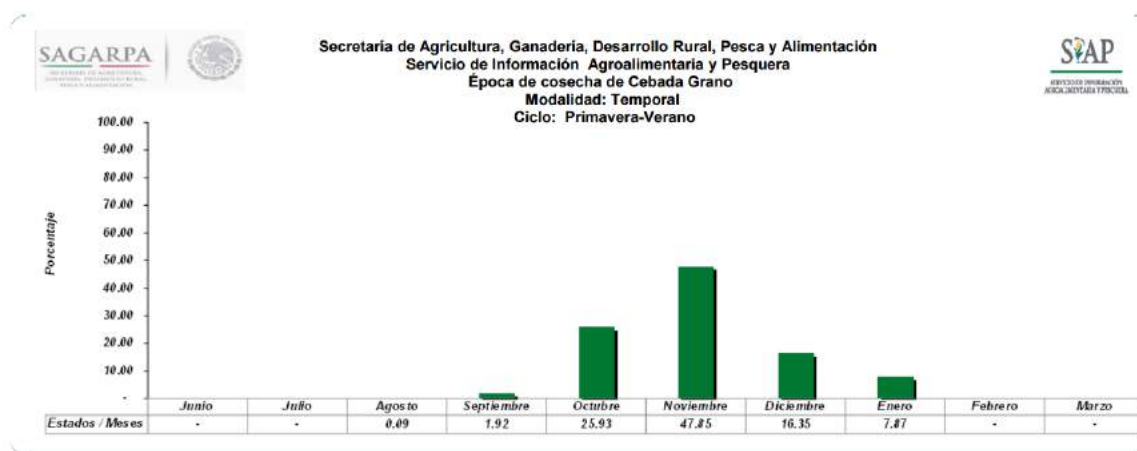


Figura 142 Época de cosecha de cebada en México

Fuente: Tomado de SIAP (2016)

El método de siembra podrá variar de acuerdo con el uso final del producto. Se sabe que para el caso de la producción de malta, la forma de siembra es en líneas utilizando 120 kg de semilla por hectárea, o bien al voleo con 150 kg de semilla por hectárea (SIAP, 2016b).

Los rendimientos pueden variar dependiendo de las condiciones genéticas, ambientales y de manejo, pero en general se ha reportado que los rendimientos bajo sistema de temporal oscilan entre 2 y 3 ton/ha, mientras que para manejo de temporal oscilan entre 3 y 4 ton/ha (Sys *et al.*, 1993).

Estudios de caso

La cebada es un cultivo con creciente importancia económica. Ha sido parte fundamental en la alimentación, la industria y la ganadería, de la cual México obtiene diversos productos que son incluso de exportación tales como la cerveza. En nuestro país este cultivo tiene el séptimo lugar en importancia y se produce en al menos 23 de los 31 estados. (SIAP, 2016a).

Las estaciones elegidas para modelar el rendimiento se basaron en la metodología descrita anteriormente, la cual se define a partir de la presencia de los cultivos, preferentemente bajo manejo de temporal, y con una coincidencia con vulnerabilidad al cambio climático.

Puesto que la cebada es cultivada mayoritariamente en climas de tipo templado, las dos estaciones correspondieron al centro de México. La siguiente figura muestra la distribución de las estaciones seleccionadas para efectuar el modelado del rendimiento.



Figura 143 Distribución de las estaciones seleccionadas para cebada

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2008)

Para cada caso de estudio se realizó una revisión sobre la calidad de las series climáticas. Para ello se retomó la metodología utilizada por López (2016), la cual incluye un control de calidad bajo dos metodologías (método de desviaciones estándar y rangos intercuartílicos) y una prueba de homogeneidad con el programa RHtestV4.

La importancia del control de calidad para el proceso de modelado reside en la confiabilidad de los datos para obtener resultados congruentes en el programa *Aquacrop*. Una vez efectuada la revisión climática se procedió a recopilar información paisajística y fenológica para cada caso de estudio. Con la información obtenida se calibraron los modelos de cultivo en el programa *Aquacrop* con ayuda de los datos observados por el SIAP. En los siguientes apartados se presentan los resultados correspondientes a cada estación modelada.

San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Estado de México

La estación San Miguel Tlaixpan se ubica en el municipio de Texcoco, Estado de México. Perteneció al CADER Texcoco y al DDR también con el mismo nombre. El manejo de cebada se realiza en las partes altas de municipio en ciclo de primavera verano y bajo un manejo de temporal. A continuación se aprecian algunas características de la estación a modelar.

Cuadro 33 Características generales de la estación San Miguel Tlaixpan, Texcoco

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
San Miguel Tlaixpan, Edo. De Mex.	15101	Baja	Bibliografía	Rendimientos de 2.2 ton/ha. Cercana a estación Texcoco.

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación climatológica tiene coordenadas 19.52° latitud norte y -98.81° longitud oeste, a 2405 msnm. La región productora de cebada se encuentra sobre un lomerío de basalto y sobre sierra volcánica en las partes más altas. Ambas topofórmulas se encuentran en la subprovincia fisiográfica de Lagos y Volcanes del Anáhuac y la provincia Eje Neovolcánico (INEGI, 2009i).

Climatología

La estación de San Miguel Tlaixpan no estuvo contemplada dentro del control de calidad y homogeneización de datos de la consultoría realizada por López (2016). En este sentido, se procedió a ejecutar los controles de calidad y homogeneización de temperatura correspondiente. Dentro del proceso de control de calidad básico se encontró que los años 1987 y 2001 presentaron algunos datos dudosos principalmente en los meses de marzo y agosto respectivamente. El control de calidad extra arrojó *outliers* en las series de precipitación y temperatura máxima en mayor número. Estos valores fueron corroborados con las bases de datos de Desinventar, FONDEN, CENAPRED y los registros históricos de ciclones; a continuación fueron corregidos o validados según fuese el caso.

Dentro del proceso de homogeneización de temperatura se encontró que la serie de temperatura máxima no presentó saltos sospechosos. En cambio, la temperatura mínima reportó un *change point* o salto significativo en abril del 1999. Puesto que este valor no correspondió con ningún valor extremo del índice MEI, se procedió a homogeneizar la serie (Ver Anexo 1).

El rango de temperatura media anual del municipio de Texcoco va de 6° a 16°C, aunque la estación seleccionada se encuentra a una altitud mayor que el promedio del municipio y tiende a ser más fría. La distribución de la temperatura en el año resultó tener un patrón heterogéneo, teniendo los picos más altos de temperatura máxima en los meses de mayo, junio y julio, aunque los de temperatura mínima se registraron entre abril y mayo.

La época más fría respecto a temperatura máxima es de diciembre a enero, aunque la temperatura mínima no presenta tantos cambios desde septiembre a febrero (Figura 4). En la figura siguiente se muestra la distribución de la temperatura máxima y mínima durante el año, con datos desde

1960. En el eje “x” se observan los meses del 1 al 12, mientras que el eje “y” corresponde a los valores de temperatura en °C (Tx=temperatura máxima; Tn=temperatura mínima).

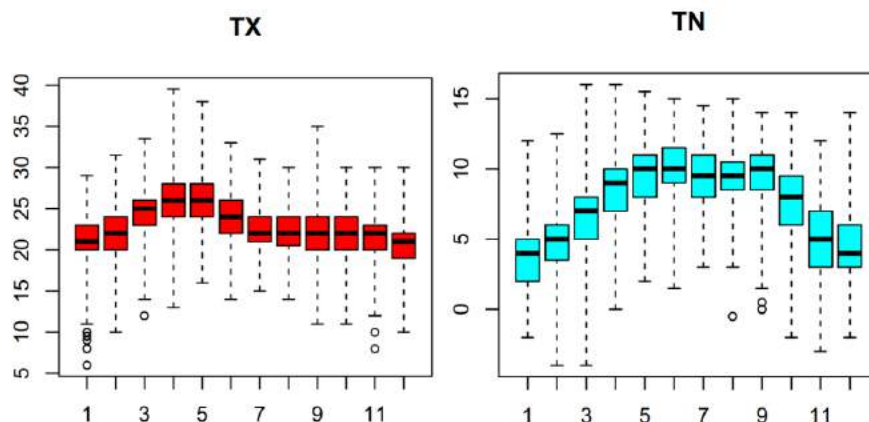


Figura 144 Comportamiento intra-anual de temperatura de la estación San Miguel Tlaixpan, Texcoco
Fuente: Elaboración propia con *software* R.

El rango de precipitación en el municipio es de 500 a 1200 mm anuales. El inicio del periodo de crecimiento se efectúa el 3 de mayo, y dura 169 días, hasta el 18 de octubre. En cambio, el periodo húmedo inicia el 27 de junio, dura 77 días y termina el 11 de septiembre. A continuación, presenta un diagrama que esquematiza el periodo de crecimiento para la estación seleccionada.

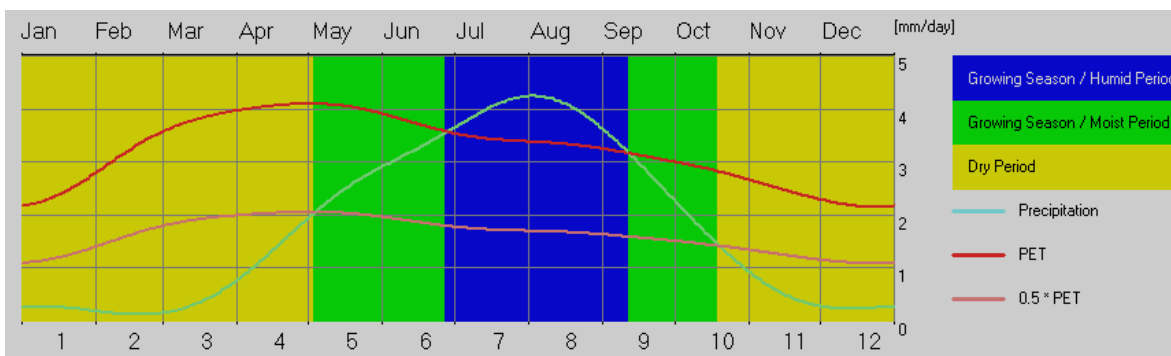


Figura 145 Periodo de crecimiento de la estación San Miguel Tlaixpan, Texcoco
Fuente: Elaboración propia con *software* *LocClim*

Las condiciones arriba enmarcadas en conjunción con la fisiografía de la zona generan una diversidad de climas que es captada en cuatro grupos principales. Así, el tipo de climas encontrados en el municipio comprenden el semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (29%), el templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (24.56%), el semiseco con lluvias en verano (22.57%) y el templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (16.57%) principalmente (INEGI, 2009i). La estación donde se modeló el rendimiento de cebada se ubica en el clima de tipo Cb(wo)(w)(i)° g.

Cultivo, manejo y suelo

La cebada es uno de los cultivos que ofrece una mejor alternativa de producción en las áreas de temporal de los Valles Altos en México. Su ciclo de cultivo corto, le permite producir cuando no es posible lograrlo con especies como maíz y trigo (González, Díaz, & Hernández, 2016).

De acuerdo con SAGARPA-SIAP (2015), el 58.52 % de los agricultores del estado de México siembran cebada de temporal durante el mes de junio y un 34.18% en el mes de julio; esto coincide con lo publicado en el manual “La cebada en siembra a dos hileras en el estado de Tlaxcala” donde se menciona que la siembra se realiza cuando se establece el período de lluvias en la primera semana de junio.

Para el Valle de México, dadas las buenas características de rendimiento y calidad del forraje verde, se recomienda sembrar la variedad Apizaco que tiene un periodo vegetativo de la siembra a la cosecha de 100 a 110 días (Alvarado Sosa & Briseño de la Hoz, 1979).

Con una buena preparación del terreno y semilla de alto porcentaje de germinación se puede utilizar 120 kg de semilla pura viable para una hectárea (Íbid.)

El método de siembra a doble hilera con conteo es una opción tecnológica para la cebada maltera en áreas de buena y mediana productividad, se recomienda la formación de surcos a doble hilera desde la siembra espaciados a 25 cm y con separación entre dobles hileras de 55 cm (Rojas Martínez, Fernández Sosa, & Zamora Díaz, 2013).

La cosecha de cebada se debe realizar entre los 20 y 25 días después de la madurez fisiológica, cuando el grano está maduro y lleno, con un contenido de humedad comercial aproximado de 13 a 14% que evita se afecte la calidad maltera por calentamiento del grano, germinación y desarrollo de hongos. (Íbid.)

Modelo base

El promedio de rendimiento de cebada de 2000 a 2011 según datos observados por SIAP fue de 2 ton/ha. Para el mismo periodo, el modelo de cultivo generado por *Aquacrop* reportó 2.02 ton/ha en la mejor estimación lo cual significó sólo 20 kg/ha de diferencia, es decir, cerca del 1% respecto al observado. En la siguiente figura se aprecia una comparativa entre el rendimiento estimado por *Aquacrop* y el observado por SIAP, son las barras de error que muestran la desviación estándar en cada año.

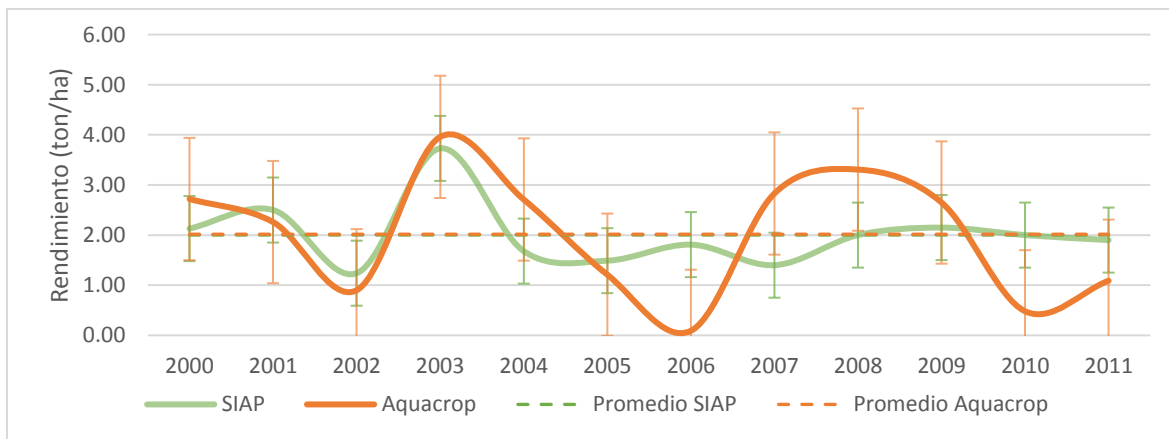


Figura 146 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para San Miguel Tlaixpan

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En la mayoría de los años el modelo *Aquacrop* se ajustó a la tendencia de rendimiento reportada por el SIAP. Los únicos años que no coincidieron con la tendencia reportada por el SIAP fueron el 2006 y el 2008 principalmente. En el año 2008 se registró un índice de MEI muy bajo en los meses de febrero y marzo, lo cual corresponde a una clasificación del evento de La Niña, que forma parte de un ciclo natural global del clima conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). Puesto que el modelo *Aquacrop* funciona a partir de la cantidad de agua que se

suministra en el periodo de crecimiento del cultivo, es probable que este evento climático extremo haya influenciado la alta productividad modelada en ese año. En el caso del año 2006, el estrés hídrico modelado que afecta la expansión del follaje fue de 83%, un 10% más que el promedio de estrés de 1996 a 2011, por lo que también posiblemente se haya manifestado una disminución considerable. En la gráfica siguiente se aprecian los rendimientos de SIAP y *Aquacrop* (eje izquierdo) contrastados con la precipitación y la temperatura media anual (eje derecho).

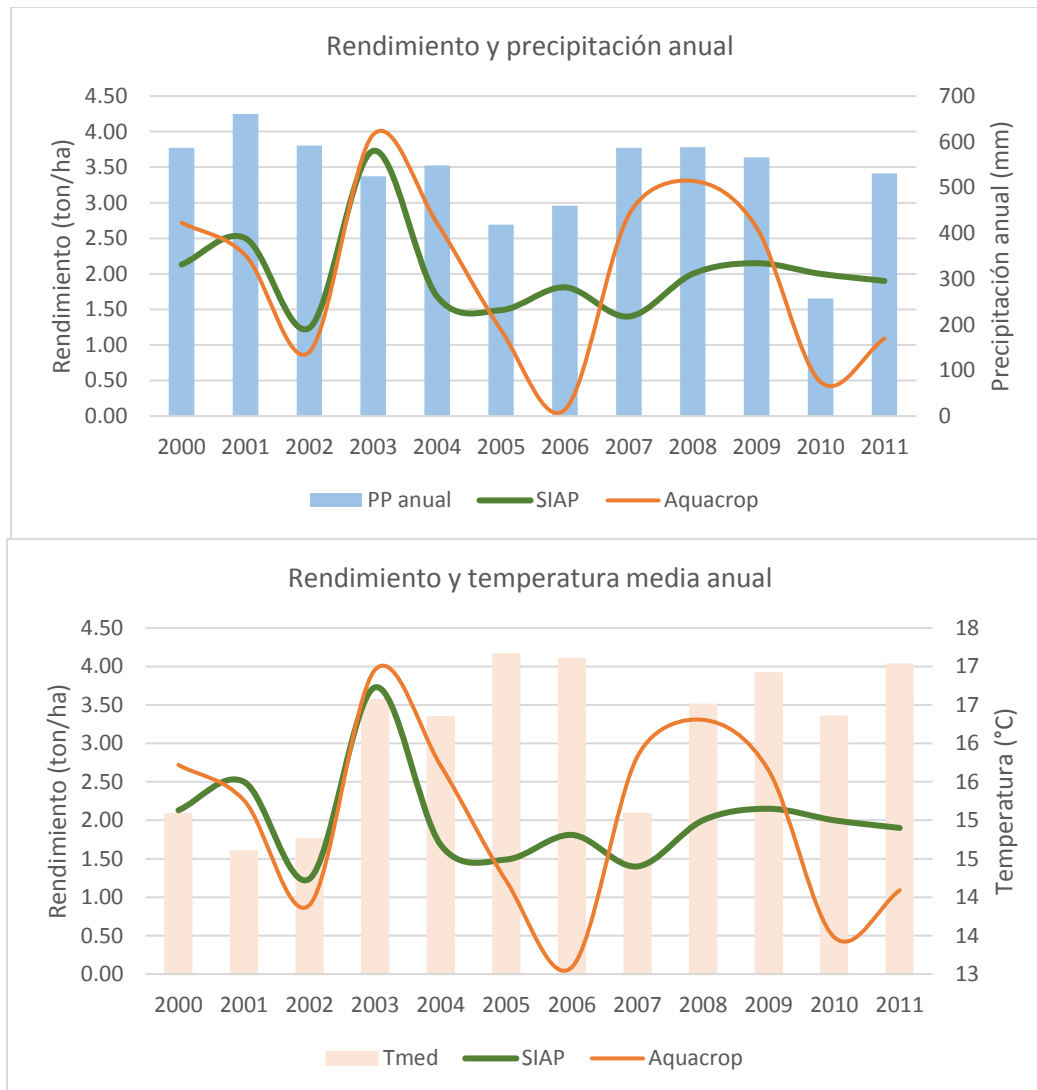


Figura 147 Modelo base para cebada en San Miguel Tlaixpan, Edo. Mex

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Respecto a la relación del rendimiento con la precipitación, una de las variables más importantes que explican la productividad bajo manejos de temporal, los datos observados por el SIAP reportaron un coeficiente de correlación de 0.1, mientras que los datos obtenidos a partir del modelo *Aquacrop* tuvieron un coeficiente de correlación de 0.56 con la precipitación anual. Como se ha discutido en anteriores casos, el modelo *Aquacrop* es más susceptible a proyectar cambios en función de la lluvia debido a su enfoque de construcción y al uso del agua como principal

agente de desarrollo de los cultivos. En la siguiente gráfica se muestra la relación entre la precipitación y el rendimiento para cada serie de datos (SIAP y *Aquacrop*).

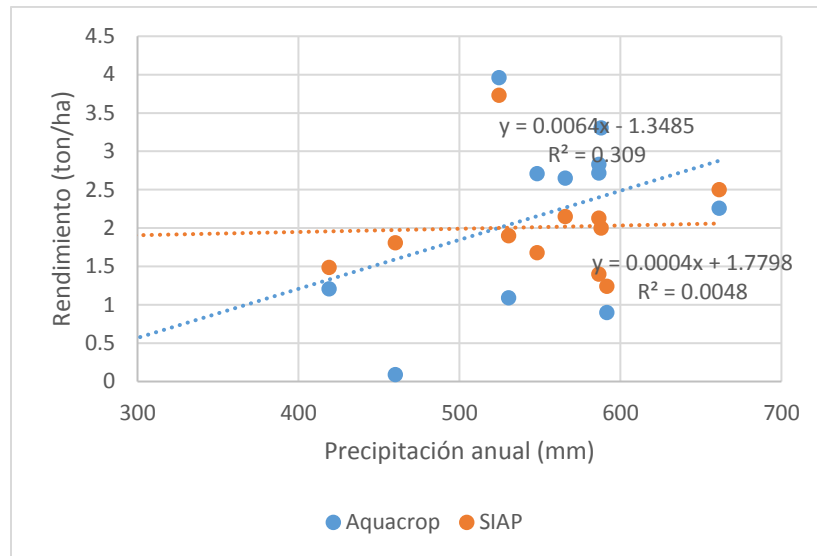


Figura 148 Relación de rendimiento con precipitación en estación San Miguel Tlaixpan

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La biomasa producida se refiere al total de materia orgánica que se produce considerando raíces, tallo, hojas y grano. Considerando los años de 1996 (a partir de la disponibilidad de información climática) al 2011, la biomasa producida según el modelo de *Aquacrop* fue de 6.49 ton/ha. Sin ninguna limitante de plagas o fertilidad del suelo la biomasa potencial alcanzaría los 16.4 ton/ha. Bajo este escenario, la productividad potencial sin limitantes sería de 5.17 ton/ha lo que implicaría más del 100% de lo que se produce actualmente. En la Figura 10 se muestra el comportamiento de la biomasa modelada y su relación con el rendimiento y la precipitación del periodo vegetativo.

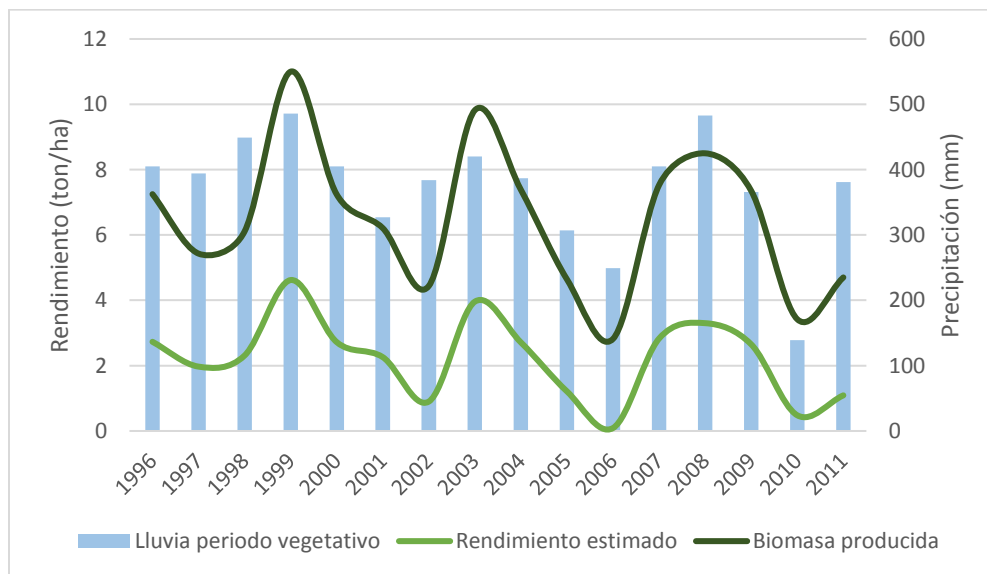


Figura 149 Rendimiento y biomasa producida en la estación San Miguel Tlaixpan

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

El factor que afecta más a la producción potencial es el estrés hídrico que actúa sobre la expansión de la cobertura con un 75%. El estrés por fertilidad del suelo y por la abertura estomatal abarcó un 30 % para el periodo de estudio seleccionado.

Escenarios de cambio climático

La precipitación de la estación de San Miguel Tlaixpan, Texcoco, presenta un máximo en el mes de julio y un mínimo en diciembre en el escenario histórico. Numerosos escenarios de cambio climático proyectan decrementos en la precipitación de los meses intermedios, los cuales afectarían de junio a agosto principalmente. Puesto que la siembra de cebada se realiza en los meses húmedos entre junio y julio, las proyecciones implican una disminución en la humedad disponible del suelo y una consecuente afectación en el periodo vegetativo inicial del cultivo.

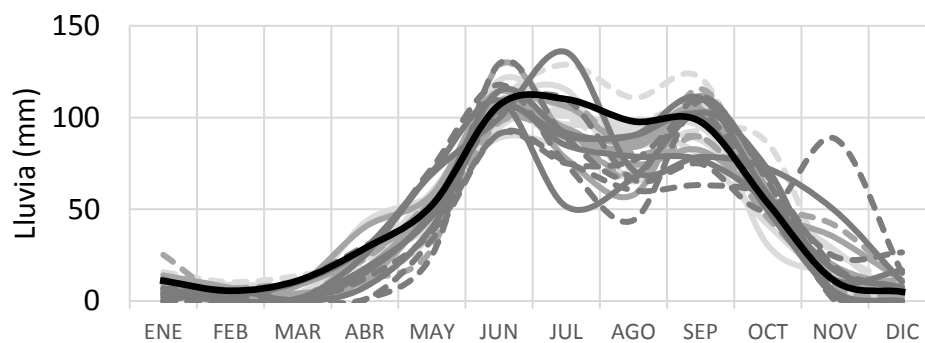


Figura 150 Precipitación con cambio climático en S. M. Tlaixpan, Texcoco, Edo. Mex.

Fuente: Elaboración propia

En conjunto, los escenarios de cambio climático proyectan cambios en la productividad de biomasa que indican incrementos y decrementos en el horizonte cercano, siendo cada vez más marcados con tendencias negativas en el horizonte lejano. La máxima biomasa se obtendría en el horizonte cercano con el modelo CNRM-CM5 bajo RCP de 8.5 W/m^2 . En el horizonte medio, sólo tres modelos se ubican por debajo del valor histórico, mientras que el resto sugieren un valor similar. En el horizonte lejano se presentan disminuciones en 6 de 10 escenarios de cambio climático, entre los que se encuentran los modelos GFDL-CM3, HADGEM2-ES y CNRM-CM5.

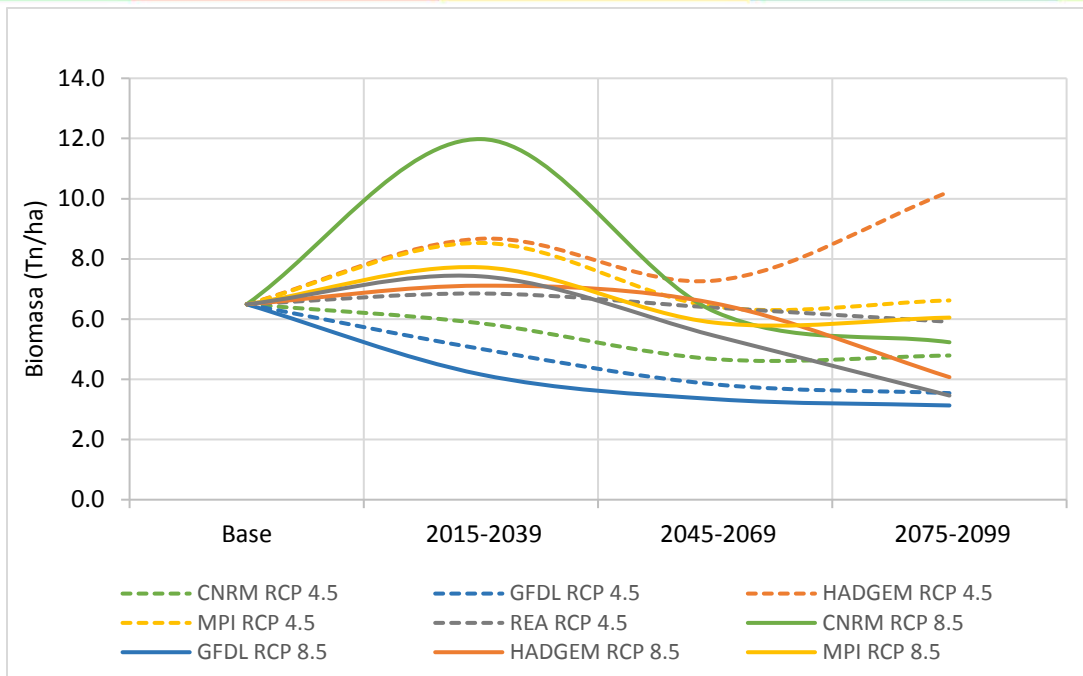


Figura 151 Biomasa bajo cambio climático para S. M. Tlaixpan, Texcoco, Edo. Mex.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el software Aquacrop

El rendimiento tiene un comportamiento similar a la biomasa, aunque presenta diferencias notables en algunos escenarios. En el horizonte cercano, la mayoría de los escenarios prevén aumentos en el rendimiento que podrían variar de 12% hasta un 120% más. Esa tendencia cambia en el horizonte medio, donde los escenarios que proyectaron aumentos en el horizonte cercano se verían afectados manteniendo aproximadamente el mismo rendimiento que el escenario base. Para el horizonte lejano todos los escenarios con RCP de 8.5 W/m² prevén disminuciones de hasta un 100% en el rendimiento. Únicamente el modelo HADGEM2-ES RCP 4.5 W/m² proyecta un aumento significativo.

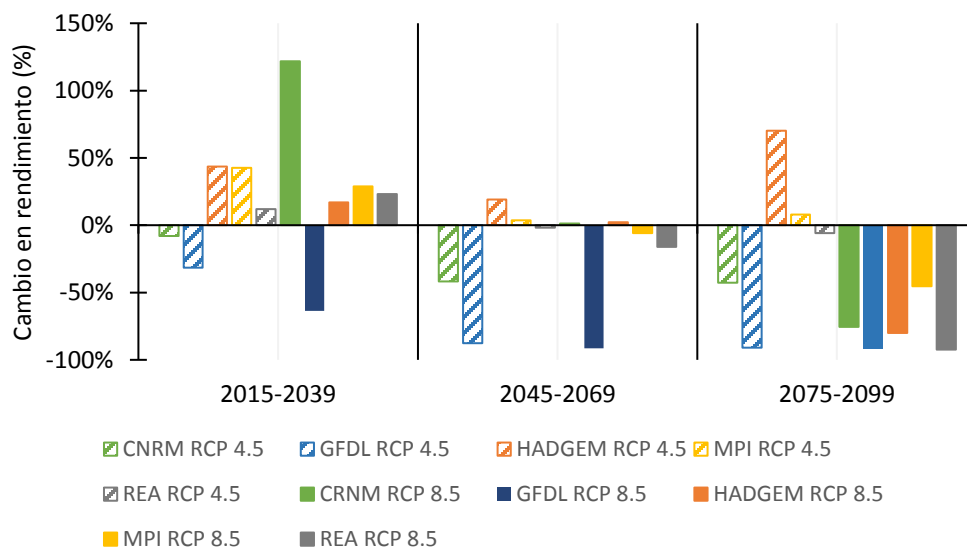


Figura 152 Rendimiento con escenarios de cambio climático en S. M. Tlaixpan, Texcoco, Edo. Mex.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

La aplicación de las medidas de adaptación proyectó cambios poco contrastantes con relación a los resultados impactados por cambio climático y suelos. En este último sentido, la aplicación del criterio de erosión de los suelos implicó que los incrementos aparentes en el rendimiento según algunos escenarios de cambio climático fueran menores. La medida que proyectó resultados más positivos fue la aplicación de lámina de riego (Medida sin limitante hídrica), la cual potenció la ampliación del periodo vegetativo de la región por limitante de frío, toda vez que el estudio de caso se ubica en un sitio de clima templado.

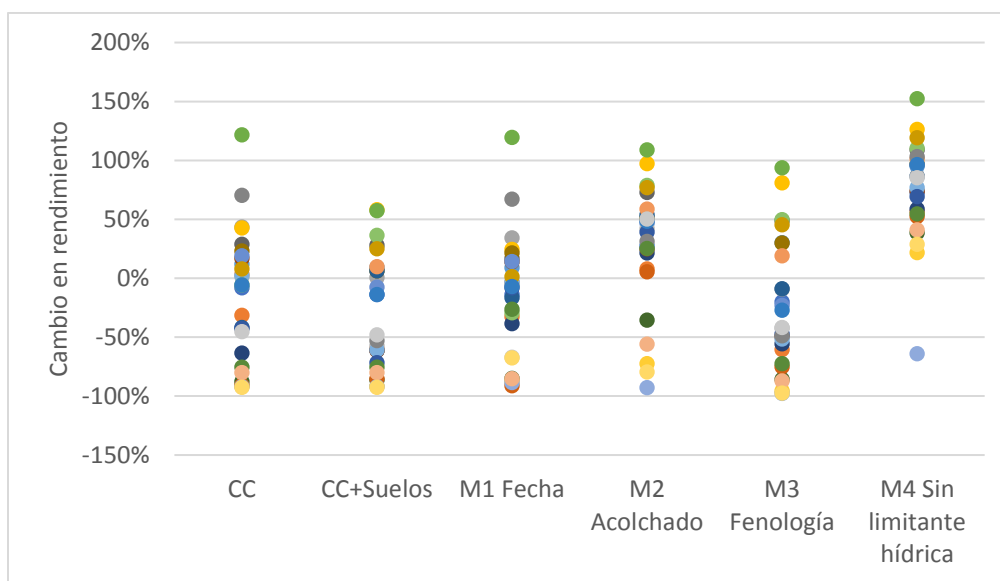


Figura 153 Medidas de adaptación en Tlaixpan, Edo. de Mex.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Respecto a la aplicación de acolchados, la segunda medida con mejor desempeño, la gran mayoría de los escenarios de cambio climático coincidieron en proyectar incrementos en el rendimiento que podrían variar desde un 5% hasta un 100% según los modelos más optimistas (CNRM-CM5). El cambio de fecha de siembra únicamente disminuyó el rango de variabilidad de rendimientos, aunque los concentró hacia un 0% de cambio mientras que el cambio en la fenología del cultivo no proyectó mejoras considerables para el rendimiento.

Huichapan, Hidalgo

La estación de Huichapan corresponde al municipio del mismo nombre, pertenece al CADER y al DDR de Huichapan. En el municipio la cebada es considerada uno de los principales cultivos, con la modalidad de temporal en el ciclo primavera verano, dada a esta condición los rendimientos son bajos y muy variables.

Cuadro 34 Datos de referencia de la estación Huichapan

Estación	ID	Vulnerabilidad	Fuente/referencia	Observaciones
Huichapan, Hidalgo	13012	Baja	Primer filtro de López (2015)	Rendimientos de 0.80 ton/ha.

Fuente: Elaboración propia con datos de IMTA (2013); López (2016) y SAGARPA (2012)

La estación tiene como coordenadas -99.65° longitud oeste, 20.37° latitud norte y se encuentra a 2120 msnm. Se ubica sobre un sistema de lomeríos de basalto, dentro de la subprovincia fisiográfica de Llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo, dentro de la provincia del Eje Neovolcánico.

Climatología

La información climática fue inicialmente depurada dentro de los trabajos realizados por López (2016), no obstante, no se seleccionó como una estación final. Dentro del proceso de control de calidad básico se encontró que la mayoría de los *outliers* correspondieron a temperaturas bajas a un nivel menor que 4 desviaciones estándar; la mayoría de ellos se encontraron en los años 1978 y 1987. El control de calidad extra reportó la incidencia de 18 *outliers*, la mayoría relacionados a altas precipitaciones o picos de bajas temperaturas. Asimismo, se encontraron alrededor de 5 casos donde un mismo valor se repetía 6 o más veces en días consecutivos. Todos los outliers fueron revisados siguiendo la metodología de López (2016) y se realizaron los cambios correspondientes en todos los casos donde fue pertinente.

Dentro del proceso de homogeneización de temperatura se encontraron tres saltos correspondientes a la serie de temperatura máxima. Dichos saltos se presentaron en el año de 1987 y en el 1992; los tres casos correspondieron a valores extremos del índice MEI por lo que no fueron homogeneizados. La temperatura mínima tuvo tres changepoints o saltos en los años de 1977, 1988 y 1999; los dos primeros encontraron una referencia en el índice MEI mientras que el tercer año no. Posteriormente a homogeneizar los casos donde no se encontraron referencias en el índice MEI, se procedió a importar los datos climáticos en el formato del programa *Aquacrop*.

El rango anual de la temperatura media es de 12° a 18°C (INEGI, 2009). La distribución de la temperatura máxima tiene un pico en mayo, mientras que la temperatura mínima presenta una importante diferencia entre el verano y el invierno, teniendo un mínimo en diciembre y enero.

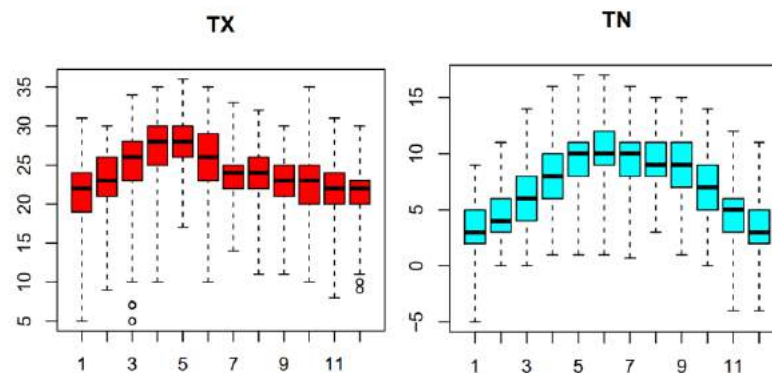


Figura 154 Comportamiento intra-anual de la temperatura de la estación Huichapan

Fuente: Elaboración propia con *software R*

La precipitación media anual oscila en un rango de 500 a 700 mm (INEGI, 2009). El periodo de crecimiento en la estación Huichapan comienza aproximadamente el 28 de mayo, dura 148 días y termina el 25 de septiembre. Debido a las condiciones de precipitación y alta evapotranspiración, no se presenta un periodo húmedo.

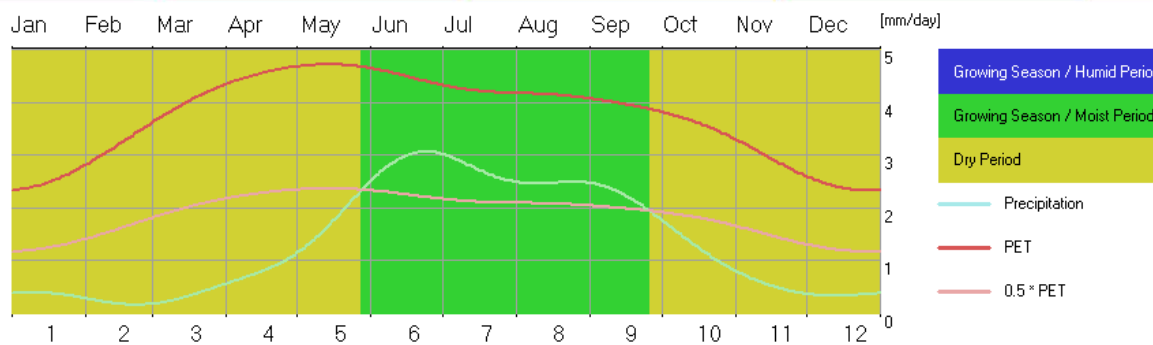


Figura 155 Período de crecimiento de la estación Huichapan

Fuente: Captura de pantalla en el *software CliCom*

Las condiciones de temperatura y humedad hacen del clima del municipio de Huichapan de un tipo semiseco templado en al menos el 88% de la superficie. Sólo un 10% presenta clima de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano.

Cultivo, manejo y suelo

El cultivo de cebada en el municipio de Huichapan se realiza en el ciclo de crecimiento de primavera verano en condiciones de temporal, según los datos de SIAP-SAGARPA (2015).

Respecto a las condiciones de cultivo se sabe que a partir de los 5 °C ya es capaz de iniciar su germinación, y una vez que ha crecido, necesita entre 15 y 20 °C para florecer y madurar. Asimismo, es un cultivo altamente tolerante a la salinidad y alcalinidad desarrollándose en un pH de 6.0 a 8.0. Por otra parte, los requerimientos de precipitación para la cebada son de 380 a 600 mm durante el ciclo productivo.

Cabe destacar que no es recomendable sembrar en la misma parcela variedades diferentes a la siembra del año anterior ya que puede disminuir el rendimiento y la calidad de la cosecha actual. Las condiciones geológicas, climáticas y fisiográficas han generado una importante diversidad de suelos en el municipio de Huichapan. De acuerdo con INEGI (2009), se reconocen siete tipos de suelos de los cuales el phaeozem, el vertisol y el luvisol se cuentan dentro de los más importantes con 54, 23 y 10% de la superficie respectivamente. La relación de arena, limo y arcilla en un perfil de suelo cercano a la estación (8.5 km) reportado por INEGI arrojó una textura gruesa, correspondiente a la clasificación textural de tipo franco arenosa con profundidades desde 20 hasta 70 cm.

Modelo base

En la siguiente grafica se puede apreciar una comparación del rendimiento reportado por el SIAP y el modelado por *Aquacrop*, con un rendimiento promedio de 0.80 ton/ha en ambos casos, no obstante el comportamiento que reporta el SIAP solo presentó un pico en los años 2002 y 2003 de 1.30 ton/ha, a diferencia del rendimiento por *Aquacrop* que presentó dos picos, uno en el año 2000 y otro en los años 2006-2008 con rendimientos superiores a 2 ton/ha, por otra parte los años 2002, 2004 y 2009 no registraron rendimientos.

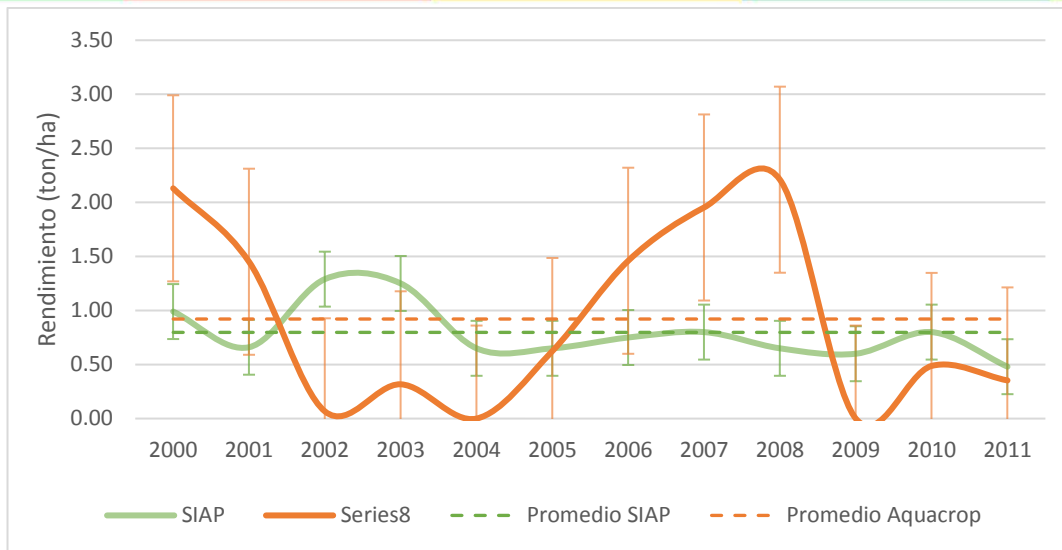


Figura 156 Comparativo del modelo *Aquacrop* contra datos de SIAP para Huichapan

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

En cuanto a la conducta del rendimiento en relación a la precipitación hubo diferencias, ya que el SIAP reportó tener rendimientos más altos con precipitaciones de solo 430 mm anual, en cambio *Aquacrop* proyectó mayor sensibilidad con aquellos años en donde se tuvieron las precipitaciones más altas en el lapso de los once años.

Con base a los datos de temperatura media proyectados, *Aquacrop* tuvo mejor respuesta con aquellos años donde los datos fueron más bajos, esto posiblemente también tenga una estrecha relación con los datos anteriores de precipitación, ya que al presentarse menor evaporación el cultivo aprovechó la humedad del suelo para canalizarla al llenado del grano.

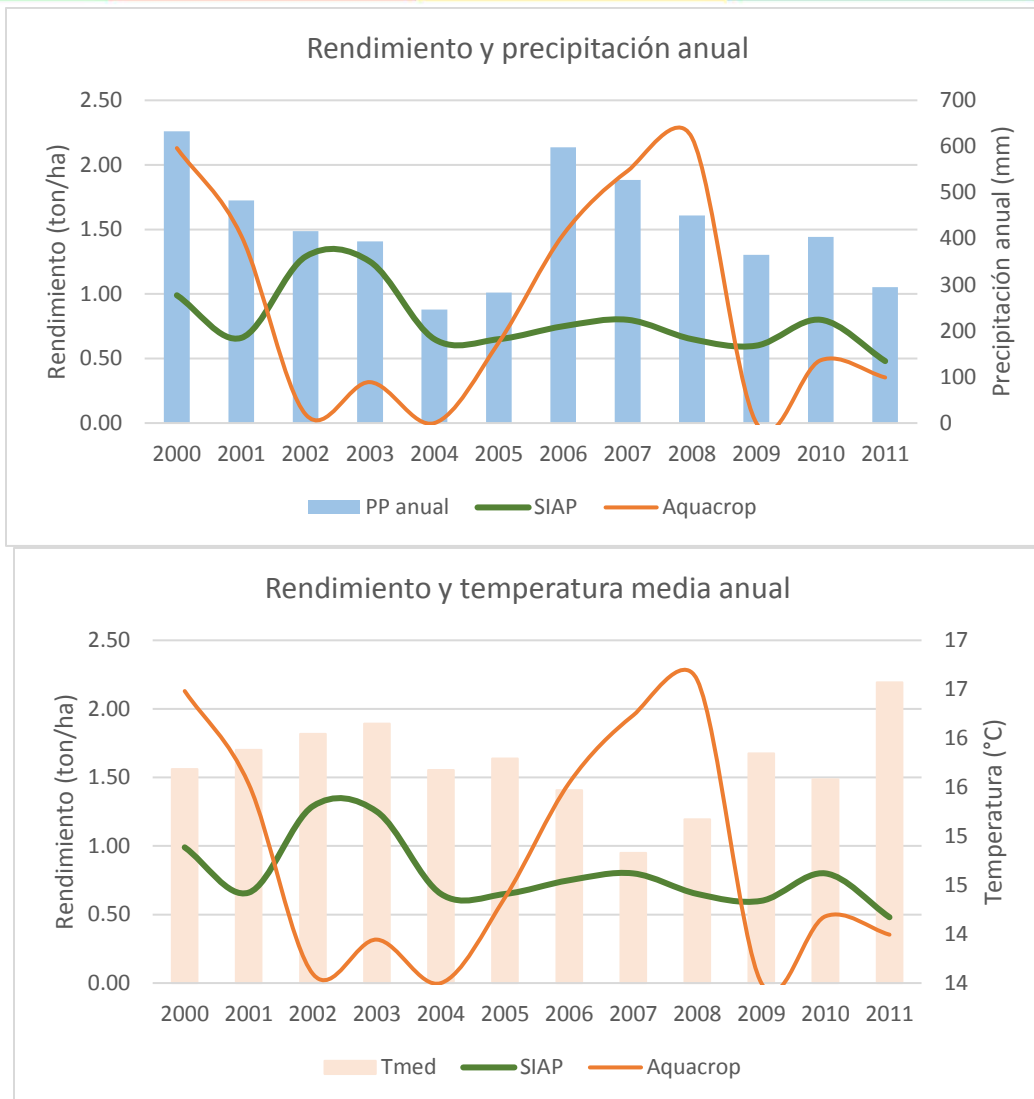


Figura 157 Modelo base para cebada en Huichapan, Hgo.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Haciendo una comparación de la información de rendimientos obtenidos por *Aquacrop*, el rendimiento de biomasa y el del grano presentaron una proporcionalidad. En cuanto a la respuesta de la lluvia, los años que obtuvieron mayor cantidad de precipitación fueron los mismos en los que se obtuvo mayor rendimiento, con excepción de los años 1998 y 2006, los cuales posiblemente tuvieron déficit de estrés hídrico en etapas importantes del desarrollo del cultivo.

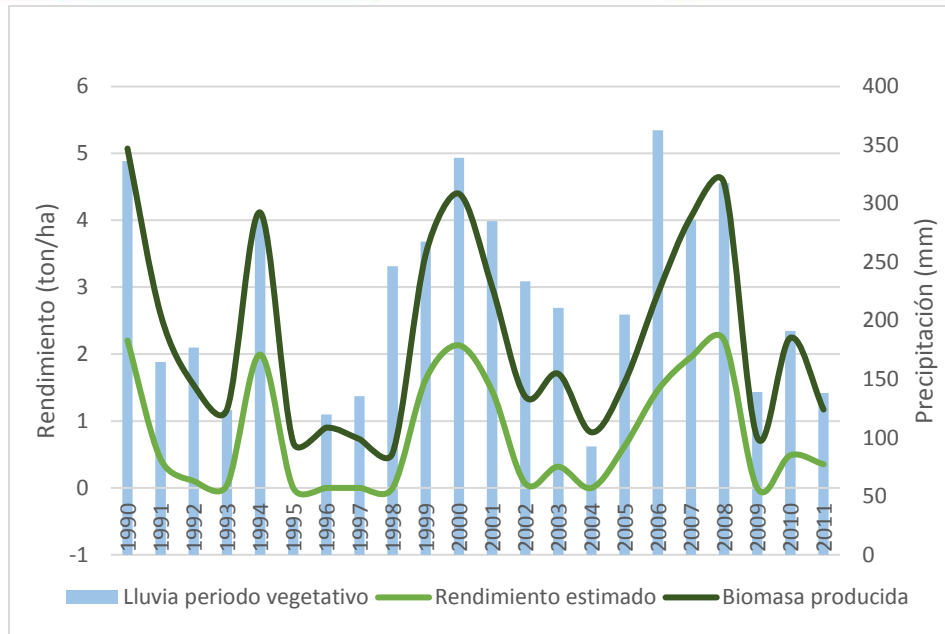


Figura 158 Rendimiento y biomasa producida en la estación Huichapan

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Escenarios de cambio climático

La precipitación que se proyectó bajo condiciones de cambio climático, es posible que presente cambios en ambos RCP, incluso hasta menores en la mayor parte del año en comparación con la precipitación histórica.

Sobre todo, llama la atención, el comportamiento de los escenarios durante la época de lluvia, la cual es marcada por cuatro meses (junio a septiembre), donde particularmente los meses de julio y agosto presentarán precipitaciones inferiores a la histórica con ambos RCP; sin embargo, existe la particularidad de los meses de junio y septiembre, donde se prevé que la precipitación superará a la cantidad histórica, en los dos casos de RCP. Esto es posible identificar en la siguiente figura, por una coloración gris continuo para los escenarios del RCP 4.5 y una línea punteada del RCP 8.5, mientras que la histórica es marcada por una línea negra.

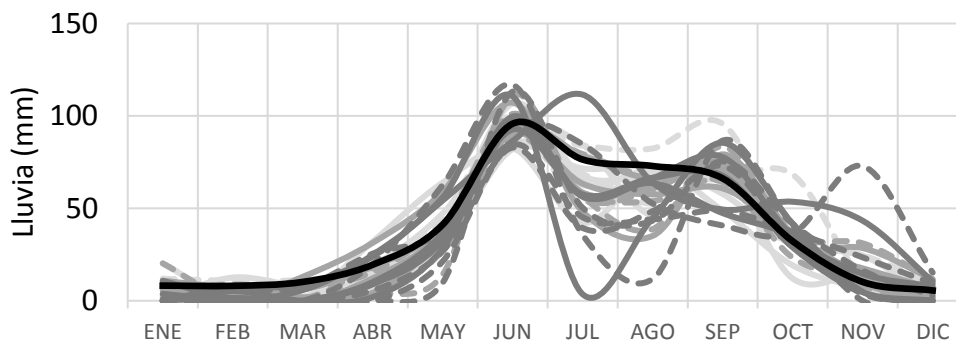


Figura 159 Precipitación con cambio climático en Huichapan, Hgo.

Fuente: Elaboración propia

El rendimiento de biomasa reportado con el escenario base fue de 2.24 ton/ha. Bajo condiciones de cambio climático, los escenarios proyectan ligeros incrementos durante el horizonte cercano

(2015-2039), sin embargo, el modelo CNRM-CM5 es un caso particular en este periodo, ya que en la figura proyecta discrepancia en los RCP. Con respecto a los dos horizontes que restan, el RCP 4.5 se ve favorecido ya que proyecta rendimientos sensiblemente altos a diferencia de los escenarios del RCP 8.5 los cuales tienden a decrecer.

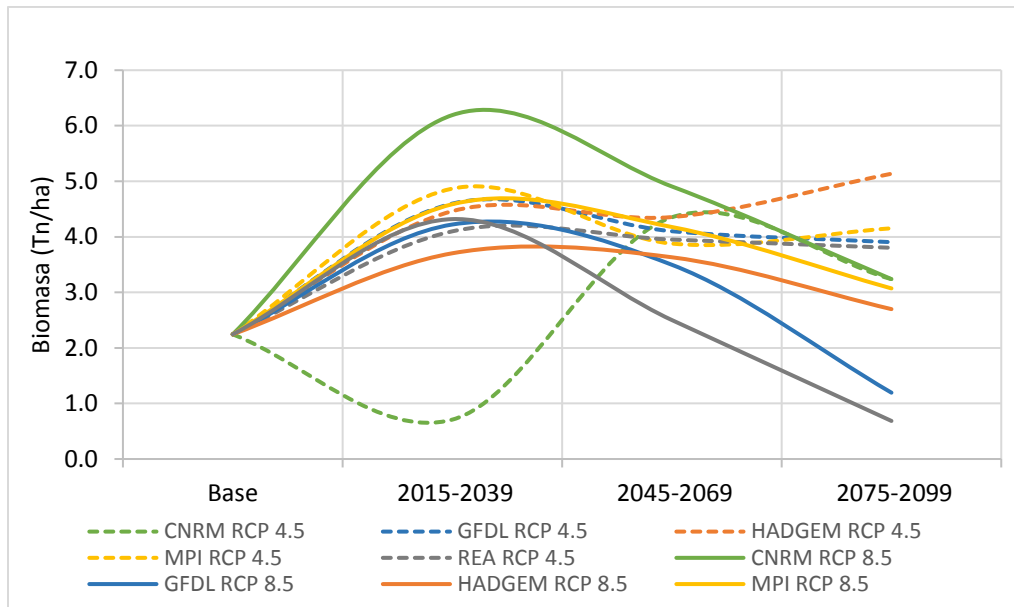


Figura 160 Biomasa bajo cambio climático para Ocampo, Gto

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Dada la relación estrecha que existe entre la biomasa y el rendimiento en grano, los escenarios se comportan de una forma similar a la figura anterior. En el caso del horizonte cercano (2015-2039), el modelo CRNM en condiciones del RCP 4.5 podría experimentar un cambio en el rendimiento de -100%, mientras que este mismo modelo en el RCP 8.5 el cambio sería positivo (300%).

Con respecto al horizonte medio (2045-2069), es bueno destacar que ninguno de los escenarios proyectados adquiere un cambio negativo en el rendimiento, caso contrario con el horizonte lejano (2079-2099), particularmente en condiciones de RCP 8.5, donde el modelo GFDL-CM3 Y REA podría tener cambios en el rendimiento de -100%.

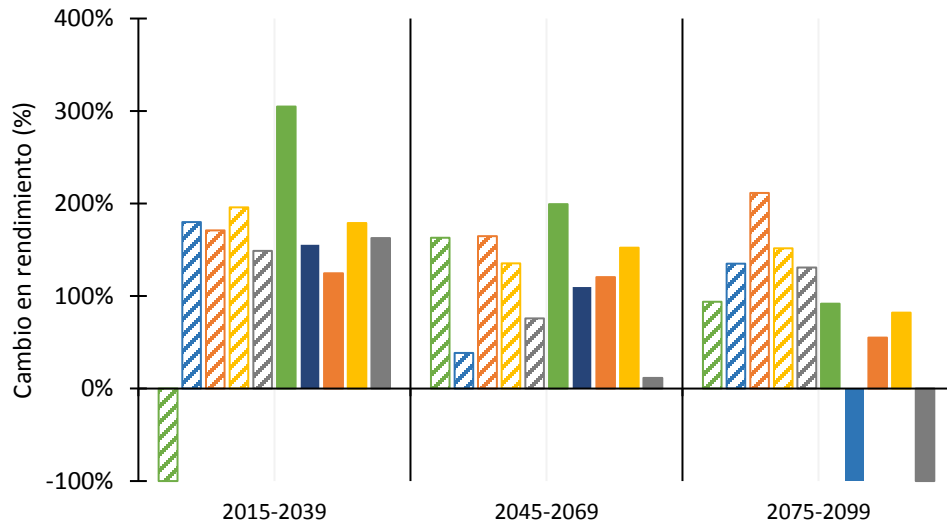


Figura 161 Rendimiento con escenarios de cambio climático en Ocampo, Gto.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

Tomando en cuenta la aplicación de cuatro medidas de adaptación, las medidas como; cambio de fecha, acolchado y fenología, no representan para el cultivo cambios notables, sin embargo, la medida de aplicar riegos si representa una ayuda para el aumento del rendimiento.

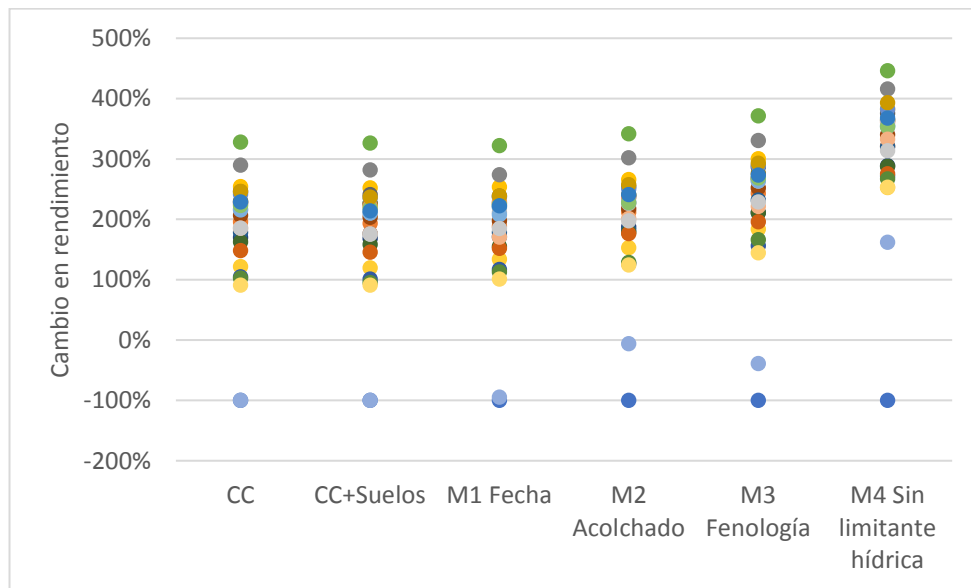


Figura 162 Medidas de adaptación para Huichapan, Hgo.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos en el *software Aquacrop*

CONCLUSIONES

La metodología planteada cubrió satisfactoriamente los objetivos programados por la consultoría. Se caracterizó y estableció un procedimiento teórico metodológico que podrá ser replicado y una base para futuros estudios.

Los resultados obtenidos en los modelos base concordaron en un ajuste entre los rendimientos modelados y observados de no más del 15% de diferencia respecto a lo observado, para la mayoría de los estudios de caso. Para la mayoría de las estaciones climáticas estudiadas se espera que la precipitación disminuya, aunado a un cambio en la distribución intra anual de la misma. Se corroboró que la productividad del agua disminuye para la mayoría de los cultivos estudiados, por lo que los requerimientos hídricos serían mayores desde un horizonte de tiempo cercano. Dentro del desarrollo fenológico de los cultivos, el estrés hídrico fue el que mayor contribuyó a la pérdida de biomasa, especialmente en la fase de crecimiento inicial de las plantas. Algunos estudios de caso presentan condiciones de bajos rendimientos desde el escenario base, por lo que bajo condiciones de cambio climático se esperarían los mayores impactos. Algunos sitios de climas fríos podrían alcanzar una mayor biomasa potencial beneficiándose de un aumento de la estación de crecimiento, aunque la disponibilidad hídrica limitaría su aprovechamiento. Un aumento en la concentración de dióxido de carbono podría conllevar a una mayor productividad, aunque la demanda hídrica se incrementaría para poder aprovecharla.

De los siete cultivos modelados se encontró una pérdida del rendimiento en la mayoría de los estudios de caso, especialmente en los cereales básicos como maíz, frijol y trigo. El sorgo y la cebada presentan casos donde el rendimiento aumenta o disminuye; y sólo la soya proyectó ganancias en las zonas de alta precipitación. Los modelos que proyectaron impactos más negativos fueron frecuentemente el GFDL-CM3 y el HADGEM2-ES, los de impactos medios fueron el MPIECHAM-5 y el Ensamble REA, mientras que el CNRM-CM5 arrojó los impactos más positivos. Las medidas de adaptación proyectaron resultados diferenciados entre cultivos y casos de estudio. Para las zonas secas del norte del país el aporte de agua adicional al temporal arrojó mejores resultados; no obstante, diversos estudios muestran déficit en la disponibilidad hídrica y sobre explotación de acuíferos en dicha zona; la segunda y tercera medida con mejores resultados fueron el cambio de fecha de siembra y el cambio en las características fenológicas de las variedades. En las zonas templadas la aplicación de acolchados orgánicos y el cambio en características fenológicas proyectaron mejores resultados. En zonas cálidas con altas precipitaciones la principal limitante es la fertilidad de los suelos; la aplicación de acolchados orgánicos tuvo buenos resultados. El cambio de fecha de siembra resultó ser una medida que permitió recuperar entre 5% y 20% el rendimiento impactado con cambio climático, considerando todos los estudios de caso.

Por todo lo anterior, es necesario realizar estudios que profundicen en la respuesta de los cultivos a las variaciones climáticas, así como las medidas de adaptación aplicables y diferenciadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Abendinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., & Singh, M. (2014). Prediction of maize yield under future water availability scenarios using the AquaCrop model. *Journal of Agricultural Science*, 152(4), 558–574. <http://doi.org/10.1017/S0021859614000094>
- Acosta Gallegos, J. A., Jiménez Hernández, Y., Sánchez García, B. M., Mendoza Hernández, F. M., Herrera Hernández, M. G., Salinas Pérez, R. A., & González Chavira, M. (2010). Flor de Mayo Eugenia, nueva variedad de frijol para riego y temporal en el centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(5), 751–757.
- Ahmadi, S. H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resources Management*, 29(8), 2837–2853. <http://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>
- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje. Rome (Italy): FAO.
- Alvarado Sosa, D., & Briseño de la Hoz, V. M. (1979). *Cultivos forrajeros en el valle de México*. Chapingo, México, México.: SARH. Centro de Investigaciones Agrícolas de la Mesa Central. Campo Agrícola Experimental del Valle de México.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Aquino, P. (1998). *La adopción del método de siembra de trigo en surcos en el Valle del Yaqui, Sonora, México*.
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838–1846. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.021>
- Arredondo-Moreno, T., & Huber-Sannwald, E. (2011). Impacts of drought on agriculture in Northern Mexico. In H. G. Brauch (Ed.), *Coping with Global Environmental Change, Disasters and Security* (Hexagon Se, pp. 875–891). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. http://doi.org/10.1007/978-3-642-17776-7_51
- ASERCA. (2013). *Teocintle: el ancestro del maíz*. <http://doi.org/10.1007/s11250-012-0216-z>
- Australian Government. (2008). The Biology of *Hordeum vulgare* L. (barley), (April), 44. <http://doi.org/10.1073/pnas.1215265109>
- Banco Mundial. (2015). Estadísticas mundiales de PIB agrícola. Retrieved from datos.bancomundial.org
- Bird, D. N., Benabdallah, S., Gouda, N., Hummel, F., Koeberl, J., La Jeunesse, I., ... Woess-Gallasch, S. (2015). Modelling climate change impacts on and adaptation strategies for agriculture in Sardinia and Tunisia using AquaCrop and value-at-risk. *Science of The Total Environment*, 543, 1019–1027. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.035>
- Brajcich, P., Cornejo, E., Govaerts, B., Moncada, J., Barrales, S., & Ornelas, P. (2015). *Guía técnica agrícola, Durango*. (SAGARPA-INIFAP-SENASICA, Ed.). Mexico.
- Cabrera-Toledo, J. M., Carballo-Carballo, A., & Aragón-Cuevas, F. (2015). Evaluación agronómica de maíces raza Zapalote chico en la región Istmeña de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (11), 2075–2082.
- Calderón-García, J. O., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2015). Cambio climático en el Centro de México: impacto en la producción de cebada (*Hordeum*

- vulgare) en Tlaxcala. *Ra Ximhai*, 11(5), 37–46.
- Carbone, G. J., Kiechle, W., Locke, C., Mearns, L. O., McDaniel, L., & Downton, M. W. (2003). Response of soybean and sorghum to varying spatial scales of climate change scenarios in the southeastern United States. *Climatic Change*, 60(1–2), 73–98. <http://doi.org/10.1023/A:1026041330889>
- Carrera, J. (2013). *Estudio de la diversidad genética y su distribución de los maíces criollos y sus parientes silvestres en Michoacán*. Mexico, DF: Proyecto No. FZ001.
- CDI. (2016). Reporte de las reuniones con comunidades de Hopelchén y Tenabo en la Fase de “Acuerdos Previos.”
- CEDRSSA, (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria). (2014). *Consumo, distribución y producción de alimentos: el caso del complejo maíz-tortilla*. Retrieved from www.cedrssa.gob.mx
- Cervantes, A., Angulo, V., Tavizón, F., & González, R. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación Y Ciencia*. Retrieved from <http://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/numero/429/el-futuro-de-la-energia-elica-8652>
- CIBIOGEM. (1997). *Manual de referencia de maíz*. Mexico, DF.
- CIBIOGEM. (2014). *Referencia de características del trigo*.
- CICESE. (2015). Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE. Retrieved from clicom-mex.cicese.mx
- COLPOS. (1986). *Estimación del Potencial Productivo Actual de Maíz y Frijol en la República Mexicana*. Montecillo, México.
- CONABIO. (2008). Agrobiodiversidad en México: el caso del Maíz, 1–64.
- CONABIO. (2010). *Zonas potenciales de cultivo de trigo. Primavera Vernano*.
- CONABIO. (2016a). *Razas de Maíz Tropicales precoces*.
- CONABIO. (2016b). *Teocintle. Biodiversidad mexicana*.
- CONAGUA. (2010). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*.
- Conde, C. (2011). Coping with Climate Change Impacts on Coffee and Maize for Peasants in Mexico. In H. G. Brauch (Ed.), *Coping with Global Environmental Change, Disasters and Security* (Hexagon Se, pp. 1067–1080). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Conde, C., Ferrer, R. M., & Liverman, D. (2000). Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES - MAIZE. In C. Gay (Ed.), *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México* (pp. 93–110). Mexico, DF: Instituto Nacional de Ecología y Universidad Nacional Autónoma de México.
- Conde, C., Liverman, D., Flores, M., Ferrer, R., Araujo, R., Betancourt, E., ... Gay, C. (1997). Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research*, 9, 17–23.
- CONEVAL. (2010). *Dimensiones de la seguridad alimentaria. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social* (Vol. 2).
- Cuevas, F. A. (2011). Maíces Nativos De Oaxaca.
- de Melo, T. M. (2014). Impacts of Climate Change on Soybean Irrigation Water Requirements in Northwest Region of Rio Grande do Sul, Brazil. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 3(3). <http://doi.org/10.4172/2168-9768.1000129>
- Deb, P., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2014a). Forecasting climate change impacts and evaluation of adaptation options for maize cropping in the hilly terrain of Himalayas: Sikkim, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 649–667. <http://doi.org/10.1007/s00704-014-1262-4>
- Deb, P., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2014b). Forecasting climate change impacts and

- evaluation of adaptation options for maize cropping in the hilly terrain of Himalayas: Sikkim, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 649–667. <http://doi.org/10.1007/s00704-014-1262-4>
- Debouck, D., & Hidalgo, R. (1991). Morfología de la planta de frijol común. In M. López, F. Fernández, & A. van Schoonhoven (Eds.), *Frijol: Investigación y Producción* (pp. 7–42).
- Díaz, M., Solano, S., Gómez, R., Rojas, I., Ireta, J., Garza, R., & Ortiz, C. (2008). Adabella: Variedad de cebada maltera para valles altos de la Mesa Central de México.
- Diepen, C. A. van, Wolf, J., Keulen, H. van, & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1).
- Djaman, K., Balde, A. B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., Diaye, M. K. N., ... Saito, K. (2015). Journal of Hydrology : Regional Studies Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 139–159.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. . *FAO Irrigation and Drainage Paper*, (33).
- Douglas, A. (1993). Mexican temperature, precipitation and Drought data base documentation.
- Duarte, J. (2007). *Evaluación de localidad de aguas superficiales en el cause del rio mayo*. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Espinoza Paz, H., & Contreras Hinojosa, J. R. (2011). Guía para cultivar sorgo dulce en el Istmo de Oaxaca. Etna, Oaxaca, Mexico: Folleto para productores Num. 11.
- Esquivel-Arriaga, G. (2014). Modelación Del Rendimiento Del Frijol Bajo Escenarios Regionales De Cambio Climático En La Región Sureste Del Estado De Durango. *Agrofaz*, 14(1), 97–105.
- FAO. (2007a). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. *Informes Sobre Recursos Mundiales de Suelos*, 103, 117. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Base+referencial+mundial+del+recurso+suelo#0>
- FAO. (2007b). *Ecocrop: Datos de maíz*.
- FAO. (2009). Declaración De La Cumbre Mundial Sobre La Seguridad Alimentaria. *Cumbre Mundial Sobre La Seguridad Alimentaria*, 8(WFSF 2009/2), 8. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/Summit/Docs/Final_Declaration/K6050S_WSFS_OEWG_06.pdf
- FAO. (2014). Data sheet about barley.
- FAO. (2016). *Climate change and food security: risks and responses*. Rome (Italy): Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2017a). *Data sheet about sorghum*.
- FAO. (2017b). *Data sheet about Wheat*.
- FAO - GIZ. (2012). *Herramientas para la Adaptación y Mitigación del Cambio Climático en el sector Agropecuario*.
- Feng, S., Krueger, A., & Oppenheimer, M. (2010). Linkages among climate change, crop yields and Mexico-US cross-border migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(32), 14257–14262.
- FIRA. (2015a). Panorama Agroalimentario: Sorgo, 0–35.
- FIRA. (2015b). Panorama Agroalimentario Maíz 2015, 0–39.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., & Mejía-Saéñz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*, 47(4), 347–359 .
- Gabriel Morales, J. (2003). *Tipología socioeconómica de las actividades agrícolas. Una herramienta de*

- síntesis para el ordenamiento ecológico* (Primera Ed). Mexico, DF: INE, SEMARNAT.
- García, G. (2012). *Desarrollo fenológico en trigo y cebada: principales etapas y generación de hojas, espiguillas y flores* (Curso Internacional Red METRICE).
- García, N., González, C., & Mena, L. (2013). Recomendaciones técnicas para obtener mayor productividad del cultivo de frijol en la Llanura Costera de Nayarit. INIFAPCIRPAC. Campo Experimental Santiago Ixcuintla.: Folleto técnico para productores no. 25.
- García Á., J., Riaño H., N., & Magnitskiy, S. (2015). Simulation of corn (*Zea mays* L.) production in different agricultural zones of Colombia using the AquaCrop model. *Agronomía Colombiana*, 32(3), 358–366. <http://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n3.45939>
- García Fernández, F., Sánchez Muñoz, N. E., & Sánchez Tovar, Y. (2014). Estrategias para potenciar la cadena de valor de la soya en la región El Mante (Tamaulipas), México. *Revista Agroalimentaria*, 20(39), 119.
- Gómez-Díaz, J., & Monterroso-Rivas, A. (2010). Caracterización del Índice de Aridez en México usando dos alternativas de estimación de la Evapotranspiración Potencial y escenarios de Cambio Climático.
- Gómez, H. (2001). *Hordeum vulgare*. FAO.
- Gonzalez, B., Palacio, E., Scott, C., & Exebio, A. (2001). Estimación del volumen de agua usado en una zona de riego mediante una imagen de satélite e información complementaria. *Agrociencia*, 35.
- González, G., Díaz, Z., & Hernández, S. (2016). Evaluación agronómica y física en líneas avanzadas de cebada maltera * Agronomic and physical evaluation in advanced lines of malting barley Resumen.
- Grajales Solís, M. (2007). Variedades de soya para la siembra de temporal en el Soconusco, Chiapas. Tuxtla Chico, Chiapas: INIFAP.
- Granados, R., Alejandro, A., & Rodríguez, S. (2013). Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 4, 435–446.
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficit field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <http://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Hernández, B., Guzman, S., & Valenzuela, J. (2010). *Guía para producir trigo en los valles de Mexicali, B. C. y san luis rio colorado, Son*. (INIFAP-SAGARPA, Ed.), *Folleto para productores*. Mexicali.
- Herrera-Pantoja, M., & Hiscock, K. M. (2015). Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. *Environmental Science & Policy*, 54, 81–89. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.020>
- Hitchcock, A. S. (1950). *USDA-NRCS PLANTS Database / Manual of the grasses of the United States*. (No. 200). Washington D.C.
- Ibarra, M. (1991). *Optimización de la densidad de siembra y la fertilización del trigo sembrado en surcos bajo riego*, General Teran, N.L. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- IMTA. (2013). ERIC v 3.2.
- INEGI. (2004). *Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología*. México.
- INEGI. (2005). *Conjunto de datos vectoriales Edafológicos Serie I*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000, Unidades climáticas*.
- INEGI. (2009a). *Prontuario de Información Geográfica Municipal: Naojua Sonora*.
- INEGI. (2009b). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*.
- INEGI. (2009c). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*.

- Retrieved from <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/12/12001.pdf>
- INEGI. (2009d). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Cuencame, 9. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- INEGI. (2009e). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Hopelchen, 9. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- INEGI. (2009f). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Ocampo, 9. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>
- INEGI. (2009g). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ciudad Ixtepec, Oaxaca.*
- INEGI. (2009h). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. González, Tamps., 9.
- INEGI. (2009i). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Texcoco, Estado de México, 9.
- INEGI. (2009j). Prontuario de Información Geográfica Municipal de Navojoa, Sonora.
- INEGI. (2010a). Compendio de información geográfica municipal Heroica Ciudad de Juchitán de Zaragoza Oaxaca. Retrieved from www.IEGI.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx
- INEGI. (2010b). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional escala 1:1 000 000 serie I (Subprovincias fisiográficas).*
- INEGI. (2010c). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tapachula, Chiapas.
- INEGI. (2010d). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Villa de Cos.*
- INEGI. (2013). Conjunto de datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Serie V. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI. (2015). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2014. Información Relevante (Boletín 328/15).* Aguascalientes, México.
- INIFAP. (2009a). Altiplano F2007. Nueva variedad de trigo para siembras de temporal en Guanajuato.
- INIFAP. (2009b). Guía para la asistencia técnica agrícola de Nayarit. Sorgo. *Guía Para La Asistencia Técnica Agrícola de Nayarit.*
- INIFAP. (2011a). *Ciclo de cultivo de cebada.*
- INIFAP. (2011b). *Manejo integrado del cultivo de cebada en condiciones de temporal en San Luis Potosí.*
- INIFAP. (2013). “Recomendaciones técnicas para obtener mayor productividad del cultivo de frijol en la Llanura Costera de Nayarit,” 30.
- INIFAP. (2014). *Producción de semilla de frijol.*
- INIFAP. (2017). *Lanza INIFAP variedad de frijol “Flor de Junio León ” resistente a enfermedades.*
- Inzunza, J. (2008). Optimización de patrones de cultivo de Distrito de Riego del Noroeste de México. *Revista Chapingo, Series Zonas Aridas.*
- Jacovides, C. P., & Kontoyiannis, H. (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27(3–4), 365–371. [http://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01152-9](http://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01152-9)
- Jones, C. A., Dyke, P. T., Williams, J. R., Kiniry, J. R., Benson, V. W., & Griggs, R. H. (1991). EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural Systems*, 37(4), 341–350. [http://doi.org/10.1016/0308-521X\(91\)90057-H](http://doi.org/10.1016/0308-521X(91)90057-H)
- Jones, C. A., & Kiniry, J. . (1986). *CERES-Maize: a Simulation Model of Maize Growth and Development.* College Station, TX, USA: Texas A&M University Press.

- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., ... Ritchie, J. T. (2003). *The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy* (Vol. 18). [http://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](http://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Juárez, Z., Bárcenas-Pozos, M., & Hernández, L. (2014). El grano de trigo : características generales y algunas problemáticas y soluciones a su almacenamiento. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8(1).
- Juchitán, A. de. (2016). Ayuntamiento juchiteco a la defensa de nuestro maíz. *Gaceta Del Municipio de Juchitán de Zaragoza*, pp. 1–2.
- Koenig, R., & Gepts, P. (1989). *Phaseolus vulgaris: Theoretical and Applied Genetics (TAG)*, 809–817.
- Krause, P., & Boyle, D. P. (2005). Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances In Geosciences*, 5(89), 89–97. <http://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrological and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35, 233–241.
- Lobell, D. B., Ortiz-Monasterio, J. I., Asner, G. P., Matson, P. a., Naylor, R. L., & Falcon, W. P. (2005). Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 94(2–3), 250–256.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. <http://doi.org/10.1126/science.1204531>
- López, F. (2016). Resultados de la consultoría “Eventos Climáticos Extremos”. Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México.
- Márquez, S., Almaguer, G., Schwentesius, R., & Ayala, A. (2014). *Trigo en Sonora y su contexto nacional e internacional*. México.
- Martinez, M. A., Ceja, E. S. O., Ramirez, S. P., & Osti, C. L. (2008). *Tecnología Para La Produccion De Frijol En El Norte Centro De Mexico*.
- Mastachi-Loza, C. A., Becerril-Piña, R., Gómez-Albores, M. A., Díaz-Delgado, C., Romero-Contreras, A. T., Garcia-Aragon, J. A., & Vizcarra-Bordi, I. (2016). Regional analysis of climate variability at three time scales and its effect on rainfed maize production in the Upper Lerma River Basin, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 225, 1–11. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.041>
- McCown R.L, Hammer G.L, Hargreaves J.N.G, H. D. . & F. D. . (1996). APSIM: a novel software system for model development, modle testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*.
- Mebane, V. J., Day, R. L., Hamlett, J. M., Watson, J. E., & Roth, G. W. (2013). Validating the FAO aquacrop model for rainfed maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal*, 105(2), 419–427. <http://doi.org/10.2134/agronj2012.0337>
- Monterroso-Rivas, A. I., Conde, C., Gay, C., Gómez-Díaz, J. D., & López, J. (2014). Two methods to assess vulnerability to climate change in the Mexican agricultural sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(4), 445–461.
- Monterroso, A., Fernández, A., Trejo, I., Conde, C., Escandón, J., Villers, L., & Gay, C. (2013a). *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*. (Vol. 2013). México DF. Retrieved from <http://atlasclimatico.unam.mx/VulnerabilidadalCC/Vulnerabilidad/>
- Monterroso, A., Fernández, E., Trejo, R. I., Conde, A. C., Escandón, J., Villers, L., & Gay, C. (2013b). Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Programa de Investigación en Cambio Climático

- Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://atlasclimatico.unam.mx/VyA>.
- Monterroso Rivas, A. I., Conde Álvarez, C., Rosales Dorantes, G., Gómez Díaz, J. D., & Gay García, C. (2011). Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México. *Atmosfera*, 24(1), 53–67.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <http://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muñoz Saldaña, R. (2010). Frijol, rica fuente de proteínas. *Biodiversitas*, 89, 7–11.
- Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlík, P., Ahammad, H., Deryng, D., ... Willenbockel, D. (2014). Climate change effects on agriculture: economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3274–9. <http://doi.org/10.1073/pnas.1222465110>
- Nikol'skii, Y. N., Castillo-Alvarez, M., Bakhlaeva, O. S., Gama-Castro, J., & Landeros-Sanchez, C. (2010). Assessing the Effect of Possible Global Climate Changes on the Fertility of Mexican Soils and the Prediction of Crop Yields. *Pochvovedenie (Eurasian Soil Science)*, 43(9), 985–992.
- OCDE. (2012). *Consensus document on the biology of sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench)*. [http://doi.org/ENV/JM/MONO\(2007\)10](http://doi.org/ENV/JM/MONO(2007)10)
- OECD. (1999). *Consensus document on the biology of Wheat (Triticum aestivum)*. <http://doi.org/10.1126/science.1252136>
- OECD. (2000). Consensus Document on the Biology of Glycine Max (L.) Merr. (Soybean). *OECD Environment Directorate, Environmental Health and Safety Division, France*, (9). Retrieved from <http://www.oecd.org/ehs/>
- OECD. (2003). Consensus Document on the Biology of Zea mays subsp. mays (Maize) *Environment*, (34), 1–49. Retrieved from [http://www.oecd.org/biotrack/%5Cn\(http://www.oecd.org/ehs/](http://www.oecd.org/biotrack/%5Cn(http://www.oecd.org/ehs/)
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Iñiguez-Covarrubias, M., & Montero-Martínez, M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1), 1–11.
- Pérez Ruíz, J. A. (2014). *Rendimiento de grano, fenología y calidad de semilla en genotipos de cebada maltera*. Colegio de Postgraduados. Retrieved from http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/256/Sanchez_Borja_M_DC_Fitosanidad_2010.pdf?sequence=1
- Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., ... Travasso, M. I. (2014). Food Security and Food Production Systems. In and L. L. W. (eds.). [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea (Ed.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 485–533). Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- PRODUCE. (2003). Programa Estratégico de Necesidades de Investigación y Transferencia de Tecnología del Estado de Chiapas. Fundación Produce A.C.
- Raes, D., & Munoz, G. (2009). The ETo Calculator. *Reference Manual Version*. Retrieved from <http://www.fao.org/NR/WATER/docs/ReferenceManualV32.pdf>
- Ramírez Ramírez, A., Espinosa, T. E., & Ramírez, O. A. G. C. L. L. (2009). ALTERNATIVAS

- DE MANEJO SOSTENIBLE DE CUATRO VARIEDADES DE TRIGO EN GUANAJUATO, *VIII(1)*, 429–436. <http://doi.org/10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2014.03.002>
- Reza, R., & Acosta, J. (2005). Tecnología para cultivar frijol en estado de Guerrero. INIFAP-CIRPS-CE Iguala: Folleto para productores no. 13.
- Ritchie, J., Godwin, D., Singh, U., & Hunt, L. (1990). A user's guide to CERES MAIZE, V2. 10, 2. Retrieved from http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABU271.pdf
- Rodríguez-casas, J., Canseco-vichis, E. P., Martín, E. C., & México, N. O. De. (2010). Época de aplicación del primer riego y densidad de plantas en el cultivo de trigo, 32–41.
- Rojas Martínez, I., Fernández Sosa, R., & Zamora Díaz, M. (2013). La cebada en camas con siembra de dos hileras en el estado de tlaxcala.
- Rosales Serna, R., Ochoa-Márquez, R., & Acosta-Gallegos, J. (2001). Fenología y rendimiento del frijol en el altiplano de México y su respuesta al Fotoperiodo. *Agrociencia*.
- Rosas, J. C., & Young, R. (1991). *El Cultivo De La Soya*. ESCUELA AGRICOLA PANAMERICANA; Departamento de Agronomía. Honduras.
- Ruiz-Corral, A., Medina-García, G., Ramírez-Díaz, J., Flores-López, H., Ramírez-Ojeda, G., Manríquez-Olmos, J., ... Mora-Orozco, C. (2011). Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 309–323.
- Ruiz Vega, J. (1998). ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL MAÍZ DE TEMPORAL EN LOS VALLES CENTRALES DE OAXACA. I. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL PRODUCTIVO. *Terra Latinoamericana*, 16, 269–275.
- SAGARPA. (2012). Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera. Retrieved May 20, 2010, from <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- SAGARPA. (2015a). *Agenda Agrícola de Sonora*.
- SAGARPA. (2015b). *Agenda Técnica Agrícola de Chiapas*.
- SAGARPA. (2015c). *Agenda Técnica Agrícola de Oaxaca* (Segunda Ed). Mexico, DF.
- SAGARPA. (2015d). *Agenda Técnica Agrícola Guanajuato* (Segunda Ed). Mexico, DF.
- SAGARPA. (2015e). *Agenda Técnica Agrícola Tamaulipas*.
- SAGARPA-SIAP. (2011). *Ficha de épocas de siembra y cosecha de soya*.
- SAGARPA-SIAP. (2012). Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional. *Informe Nacional De Produccion*, 256 pp.
- SAGARPA-SIAP. (2015). *Época de siembra de maíz grano*.
- SAGARPA-SIAP. (2016). Monografía maíz grano, 2016.
- SAGARPA, SENASICA, & INIFAP. (2015). *Guía técnica agrícola, Guanajuato*.
- Sánchez-Cohen, I., Inzunza-Ibarra, M., Catalán-Valencia, E., González-Barrios, J., González-Cervantes, G., & Velásquez-Valle, M. (2012). Variabilidad climática y productividad agrícola en zonas con errático régimen pluvial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(4), 805–811.
- SARH. (1990). Guía para cultivar trigo de riego y de temporal en Guanajuato.
- SARH, INIA, & CIAB. (1983). *Guía para la asistencia técnica agrícola, area de influencia del campo agrícola experimental del Norte de Guanajuato*.
- Scholze, M. (2013). Metodología para la Identificación y Priorización de Medidas de Adaptación frente al Cambio Climático, 22. Retrieved from http://www.ipacc.pe/eacc/wp-content/uploads/IPACC_Metodología-para-la-identificación-y-priorización-de-medidas.pdf
- SEMARNAT. (2010). Láminas de riego promedio utilizadas en los distritos de riego, 2003–

- 2004.
- SEMARNAT-INECC. (2015). *Elementos mínimos para la elaboración de los Programas de cambio climático de las entidades federativas*. Ciudad de México.
- Sengar, R. S., & Sengar, K. (2015). *Climate Change Effect on Crop Productivity*.
- SIAP. (2011). SIACON (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta).
- SIAP. (2014). Producción agrícola por municipio. Retrieved from <http://www.siap.gob.mx>
- SIAP. (2015a). *Atlas Agroalimentario 2015* (Primera Ed). Mexico, DF.
- SIAP. (2015b). Producción agrícola. Retrieved December 15, 2016, from <http://www.gob.mx/siap/>
- SIAP. (2016a). *Atlas Agroalimentario 2016* (Primera Ed). Mexico, DF.
- SIAP. (2016b). *Monografía de cebada*.
- SIAP-SAGARPA. (2011). *Fecha de siembra y cosecha de sorgo*.
- SIAP-SAGARPA. (2014). *Sorgo grano: MONOGRAFÍA*.
- SIAP-SAGARPA. (2015a). *Época de siembra de Frijol*.
- SIAP-SAGARPA. (2015b). *Monografía de Frijol*.
- SIAP-SAGARPA. (2016a). *El frijol*. Mexico.
- SIAP-SAGARPA. (2016b). *Época de siembra de trigo*.
- SIAP-SAGARPA. (2016c). *Monografía del Srogo*.
- Singh, A. K., Dagar, J. C., Arunachalam, A., Gopichandran, R., & Shelat, K. N. (2015). Climate change modelling, planning and policy for agriculture. *Climate Change Modelling, Planning and Policy for Agriculture*, 1–625. <http://doi.org/10.1007/978-81-322-2157-9>
- Soddu, A., Deidda, R., Marrocu, M., Meloni, R., Paniconi, C., Ludwig, R., ... Perra, E. (2013). Climate Variability and Durum Wheat Adaptation Using the AquaCrop Model in Southern Sardinia. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 830–835. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.092>
- Soltero, L., Garay, C., & Ruiz, J. (2010). Revista mexicana de ciencias agrícolas. *Respuesta de Rendimientos de Híbridos de Maíz a Diferentes Distancias Entre Surcos Y Densidades de Plantas*.
- Soltero, L., Ramirez, J., Flores, H., Perez, J., Ruiz, J., & Chuela, M. (2011). *Guía para producir maíz en la región Ciénega de Chapala*. (INIFAP-CIRPAC, Ed.) (Folleto Tê). Campo experimental Centros-Altos de Jalisco. Tepatitlan de Morelos, Jalisco. México.
- Southworth, J., Pfeifer, R. A., Habeck, M., Randolph, J. C., Doering, O. C., Johnston, J. J., & Rao, D. G. (2002). Changes in soybean yields in the Midwestern United States as a result of future changes in climate, climate variability, and CO₂ fertilization. *Climatic Change*, 53(4), 447–475. <http://doi.org/10.1023/A:1015266425630>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <http://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Steduto, P., Theodore C., H., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Riego y Drenaje* (Vol. 66).
- Stockle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18, 289–307. [http://doi.org/Pii S1161-0301\(02\)00109-0](http://doi.org/Pii S1161-0301(02)00109-0)
- Summit, W. F. (1996). Cumbre Mundial sobre la Alimentación. In *Declaración de Roma en la Cumbre Mundial sobre la Alimentación*. Roma, Italia.
- Sys, C., Van Ranst, E., Debaveye, I. J., & Beernaert, F. (1993). *Land Evaluation Part III Crop Requirements*. Brussels, Belgium.
- Talacuece, M., Justino, F., Rodrigues, R., Flores, M., Nascimento, J., & Santos, E. (2016). Modeling of Soybean under Present and Future Climates in Mozambique. *Climate*, 4(2),

31. <http://doi.org/10.3390/cli4020031>
- Tiscareño, M., Izaurrealde, C., Rosenberg, N. J., Báez González, A. D., & Salinas García, J. (2003). Modeling El Niño Southern oscillation climate impact on Mexican agriculture. *Geofísica Internacional*, 42(3), 331–339.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M. T., Stockle, C., & Steduto, P. (2009). Assessment of aquacrop, cropsyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101(3), 509–521. <http://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s>
- Torres, N., & Tovar-palacio, A. R. (2009). La historia del uso de la soya en México, su valor nutricional y su efecto en la salud. *Salud Pública de México*, 51(3), 246–254. <http://doi.org/10.1590/S0036-36342009000300016>
- Tsuji, G., Hoogenboom, G., & Thornton, P. (Eds.). (1998). *Understanding Options for Agricultural Production. Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Espinosa Calderón, A., & Mejía Andrade, H. (2010). ¿Es ventajosa para México la tecnología actual de maíz transgénico? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2010pp. 631-646, 1, nú, 631–646.
- Urbano Terrón, P. (2002). *Tratado de fitotecnia general*. Madrid: Mundi-Prensa.
- USDA. (2015). Estimación De La Densidad Aparente, 6.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., & Willems, P. (2015). Regional and global climate projections increase mid-century yield variability and crop productivity in Belgium. *Regional Environmental Change*, (February). <http://doi.org/10.1007/s10113-015-0773-6>
- Vargas, G. (2009). Producción y Comercialización de Sorgo Grano en México y en el Estado de Puebla : Caso DDR Izúcar de Matamoros . MONOGRAFÍA.
- Voloudakis, D., Karamanos, A., Economou, G., Kalivas, D., Vahamidis, P., Kotoulas, V., ... Zerefos, C. (2015). Prediction of climate change impacts on cotton yields in Greece under eight climatic models using the AquaCrop crop simulation model and discriminant function analysis. *Agricultural Water Management*, 147, 116–128. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.028>
- Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63, 1309–1313.
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial Statistics and Models* (pp. 433–460). Boston, USA.
- Wolf, J. (2002). Comparison of two soya bean simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. *Climate Research*, 20, 55–70. <http://doi.org/10.3354/cr020055>

ANEXOS

Anexo 1. Estadísticos de calibración

Coefficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación r^2 se define como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. R^2 indica la proporción de la varianza de los datos medidos explicados por el modelo, o también puede ser interpretado como el cuadrado de cociente entre la covarianza y la multiplicación de las desviaciones estándar de las observaciones y predicciones. Oscila entre 0 y 1, con valores cercanos a 1 indica un buen acuerdo, y normalmente los valores superiores a 0.5 se consideran aceptables en las simulaciones en cuencas hidrográficas (Moriasi et al., 2007). En las ecuaciones siguientes, O_i y P_i son observaciones y predicciones respectivamente, mientras que \bar{O} y \bar{P} son los promedios y n el número de observaciones.

$$r^2 = \left[\frac{\sum(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

Un inconveniente importante de r^2 es que sólo la dispersión es cuantificada, lo cual significa que un modelo que sobreestima sistemáticamente (o subestima) las observaciones aún pueden tener un buen valor r^2 (Krause et al., 2005). (Willmott, 1984) también afirma que en el contexto de las ciencias atmosféricas r y r^2 son insuficientes y a menudo engañosas cuando se utilizan para evaluar el desempeño de un modelo. El análisis del error residual (la diferencia entre las predicciones de los modelos y las observaciones) se considera que contienen la información más apropiada y perspicaz (Steduto et al., 2009).

Error cuadrático medio (RMSE)

El error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés), es uno de los indicadores estadísticos más ampliamente utilizados (Jacovides & Kontoyiannis, 1995) y mide la magnitud promedio de la diferencia entre las predicciones y las observaciones. Oscila desde 0 a infinito positivo, donde 0 significa un buen desempeño y un valor positivo alto un pobre desempeño. Una gran ventaja de la RMSE es que resume la diferencia media en las unidades de P y O . Sin embargo, no diferencia entre la sobrestimación y la subestimación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}}$$

Una desventaja de RMSE es el hecho de que los errores residuales se calculan como valores al cuadrado, lo que tiene como consecuencia que los valores más altos en las series de tiempo tienen un mayor peso en comparación con los valores más bajos (Legates & McCabe, 1999) y que el RMSE es excesivamente sensible a los valores extremos o atípicos (Moriasi et al., 2007). De hecho se trata de una debilidad de todos indicadores estadísticos donde la varianza residual es cuadrada, incluyéndolos indicadores estadísticos EF y Willmott's (Steduto et al., 2009).

Error cuadrático medio normalizado (NRMSE)

Porque RMSE se expresa en unidades de la variable estudiada, no permite la experimentación de modelos en una amplia gama de condiciones meteorológico-climáticas (Jacovides & Kontoyiannis, 1995). Por lo tanto, RMSE pueden normalizarse mediante la media de la variable observada. El RMSE normalizado (NRMSE) se expresa como un porcentaje y da una indicación de la diferencia relativa entre los modelos y las observaciones.

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} 100$$

Una simulación puede ser considerarse excelente si el NRMSE es menor al 10%, bueno si esta entre 10 y 20%, justo si esta entre el 20 y el 30% y pobre si es mayor de 30% (Steduto et al., 2009).

Coefficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (EF)

El coeficiente de eficacia del modelo Nash-Sutcliffe (EF) determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de las observaciones (Nash y Sutcliffe, 1970). Otra forma de verlo es decir que EF indica cómo la trama de los observados versus datos simulados se ajusta a la línea de 1:1 (Moriassi et al., 2007). EF puede ir desde menos infinito a 1. Una EF de 1 indica una coincidencia perfecta entre el modelo y las observaciones, y EF 0 significa que las predicciones de los modelos son tan precisas como la media de los datos observados y negativa a la EF se produce cuando la media de las observaciones es entonces una mejor predicción del modelo.

$$EF = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2}$$

EF es muy usada, lo que significa que hay un gran número de valores reportados disponibles en la literatura (Moriassi et al., 2007). Sin embargo, como r^2 , EF no es muy sensible al exceso sistemático o subestimar por el modelo (Krause & Boyle, 2005).

El índice de acuerdo de Willmott

El índice de acuerdo fue propuesto por (Willmott, 1982) para medir el grado en que los datos observados son abordados por los datos predichos. Representa la relación entre la media de los errores al cuadrado y el "error potencial", que se define como la suma de los cuadrados de los valores absolutos de las distancias desde los valores pronosticados para el valor promedio observado y las distancias de los valores observados para el valor promedio observado (Willmott, 1984). Supera la insensibilidad de r y EF a exceso sistemático o subestimación por el modelo (Legates & McCabe, 1999; Willmott, 1984). Oscila entre 0 y 1, donde 0 indica que no hay acuerdo y 1 indica un acuerdo perfecto entre las previsiones y los datos observados.

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Una de las desventajas es que los valores relativamente altos pueden ser obtenidos (más de 0,65), aun cuando el modelo funciona mal, y que a pesar de las intenciones de (Willmott, 1982) todavía no es muy sensible a la sobre o subestimación sistémica (Krause & Boyle, 2005).

Coefficiente de correlación con la precipitación

Un indicador utilizado en la calibración de modelos en la respuesta del rendimiento en función de la precipitación, buscando de este modo establecer una relación generalmente lineal y directamente proporcional entre estas dos variables. Este parámetro asume la relación directa entre la precipitación y la respuesta del cultivo. No obstante, no se recomienda utilizar como parámetro decisivo de calibración puesto que pueden existir cultivos y casos de estudio donde la precipitación no sea la variable que explique el rendimiento. Se considera que para el presente trabajo resulta importante estudiarlo ya que el objeto de estudio son los cultivos de temporal.

Promedio modelado vs promedio observado

Dado que la información reportada por el SIAP es susceptible a presentar sesgos asociados a la recolección y sistematización de información, considerar los índices arriba mencionados implica hacer coincidir la tendencia del modelo con los datos reportados, aun cuando éstos no muestren

una congruencia climática. Por ello, el Coeficiente de Determinación y el Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe no son considerados como parámetros decisivos para el modelado. Puesto que se sabe que las tendencias de producción reportadas pueden obedecer a fenómenos socioeconómicos, se propone utilizar la comparativa entre lo observado y lo modelado en promedio. Esto implica calcular el promedio de cada grupo de datos para los n años trabajados y considerar al modelo calibrado si los promedios son cercanos. Este indicador será especialmente útil en los estudios de caso donde la única fuente de información de rendimiento observado sea el SIAP.

Anexo 2 Proceso de control de calidad

El control de calidad en los datos meteorológicos es un procedimiento de suma importancia puesto que habilita realizar cálculos y estimaciones con mayor confiabilidad.

Para la presente consultoría se recomendó la utilización de ciertas estaciones que han pasado por un control de calidad y que han sido reportadas por (López, 2016). No obstante, para los fines de la consultoría se requirieron considerar otras estaciones que se encuentran asociadas a cultivos de importancia para México, y que no sufrieron el proceso de control de calidad de dicha autora. Para las estaciones cuyo caso fue ese, se procedió a ejecutar el control de calidad.

El procedimiento metodológico coincidió con el utilizado por (López, 2016) con la finalidad de que los resultados fuesen homogéneos y relativamente comparables. Las estaciones que se procesaron debieron cumplir ciertos requisitos, los cuales fueron que se tuviera mínimamente el 85% de los datos y que las series llegaran hasta el 2010 o lo más actual posible, ya que los datos de cultivo disponibles para calibrar el modelo *Aquacrop* abarcan de los años 2003 al 2013.

Primeramente, se efectuó un análisis gráfico de las series de precipitación, temperatura máxima y mínima. A continuación, se utilizó el paquete RCLimDex para ejecutar el control de calidad básico y el extra. El control de calidad básico determina si existe

ANEXO 3 Suelos

Erosión hídrica (ton/ha/año) para las estaciones climáticas estudiadas con escenarios de cambio climático.

Variables/Estaciones	Atotonilco	Cuencamé	Juchitán	Atoyac	Villa de Cos	Ocampo	Tres Hnos.	Hopelchén	Malpaso	Ixtepec	González	Tlaixpan	Huichapan
Profundidad base (cm)	100.00	140.00	100.00	75.00	150.00	75.00	200.00	400.00	125.00	80.00	105.00	130.00	70.00
Densidad aparente (g/cm³)	1.37	1.45	1.45	1.40	1.55	1.55	1.50	1.25	1.45	1.35	1.25	1.55	1.55
Eh base (ton/ha)	2.23	23.49	0.13	41.80	0.04	0.27	8.66	2.56	178.24	4.90	0.17	10.66	5.35
C4539_eh	9.02	12.54	0.13	52.50	0.04	0.25	15.38	3.48	205.46	18.10	0.14	4.29	7.71
C4569_eh	8.18	12.13	0.13	53.35	0.04	0.22	16.12	3.21	202.58	18.74	0.14	4.51	8.40
C4599_eh	8.18	12.13	0.13	53.35	0.04	0.22	16.12	3.21	202.58	18.74	0.14	4.51	8.40
C8539_eh	8.74	11.93	0.14	54.01	0.04	0.25	14.98	3.59	211.29	21.01	0.15	5.29	9.43
C8569_eh	8.15	11.15	0.13	54.11	0.03	0.22	14.46	3.45	206.44	18.38	0.14	4.45	7.64
C8599_eh	8.34	12.50	0.13	55.79	0.04	0.23	14.17	3.47	207.08	18.84	0.14	4.25	7.55
G4539_eh	8.61	10.02	0.14	52.83	0.02	0.19	14.47	3.67	212.56	20.50	0.12	4.23	7.37
G4569_eh	8.93	11.10	0.15	52.15	0.03	0.21	15.38	3.74	215.07	21.06	0.12	4.27	7.58
G4599_eh	8.51	7.94	0.14	50.25	0.02	0.17	13.18	3.70	214.33	20.01	0.10	4.02	6.74
G8539_eh	9.30	11.86	0.14	52.71	0.03	0.23	16.21	3.58	210.85	19.65	0.12	4.53	8.37
G8569_eh	8.58	9.46	0.14	51.52	0.02	0.18	14.37	3.77	213.82	19.95	0.11	3.97	6.89
G8599_eh	8.45	8.63	0.15	51.73	0.02	0.16	14.11	3.73	220.99	21.04	0.10	3.75	6.01
H4539_eh	7.85	10.55	0.14	51.24	0.03	0.20	14.10	3.15	217.45	19.57	0.13	4.52	8.23
H4569_eh	8.11	10.06	0.12	50.97	0.03	0.21	14.13	3.11	206.70	16.75	0.13	4.84	9.15
H4599_eh	8.49	13.10	0.12	51.32	0.04	0.24	14.87	3.05	205.24	15.92	0.14	5.06	10.28
H8539_eh	8.16	10.88	0.13	51.26	0.03	0.22	14.60	3.36	208.51	18.70	0.14	4.74	8.39
H8569_eh	7.97	10.60	0.12	50.95	0.03	0.21	13.75	3.15	205.34	16.76	0.14	4.80	9.13
H8599_eh	7.41	10.16	0.11	51.61	0.03	0.19	10.29	2.98	198.78	14.85	0.14	4.65	9.62
M4539_eh	8.75	11.06	0.14	45.06	0.03	0.22	15.34	3.15	208.46	20.13	0.14	4.88	8.70
M4569_eh	8.51	10.58	0.14	50.44	0.03	0.18	14.67	2.93	202.19	19.90	0.13	4.41	7.61
M4599_eh	8.65	10.13	0.14	52.17	0.03	0.19	14.36	3.00	204.07	21.12	0.13	4.54	7.94
M8539_eh	8.44	10.30	0.14	51.50	0.03	0.21	14.65	3.20	208.97	20.24	0.14	4.81	8.55

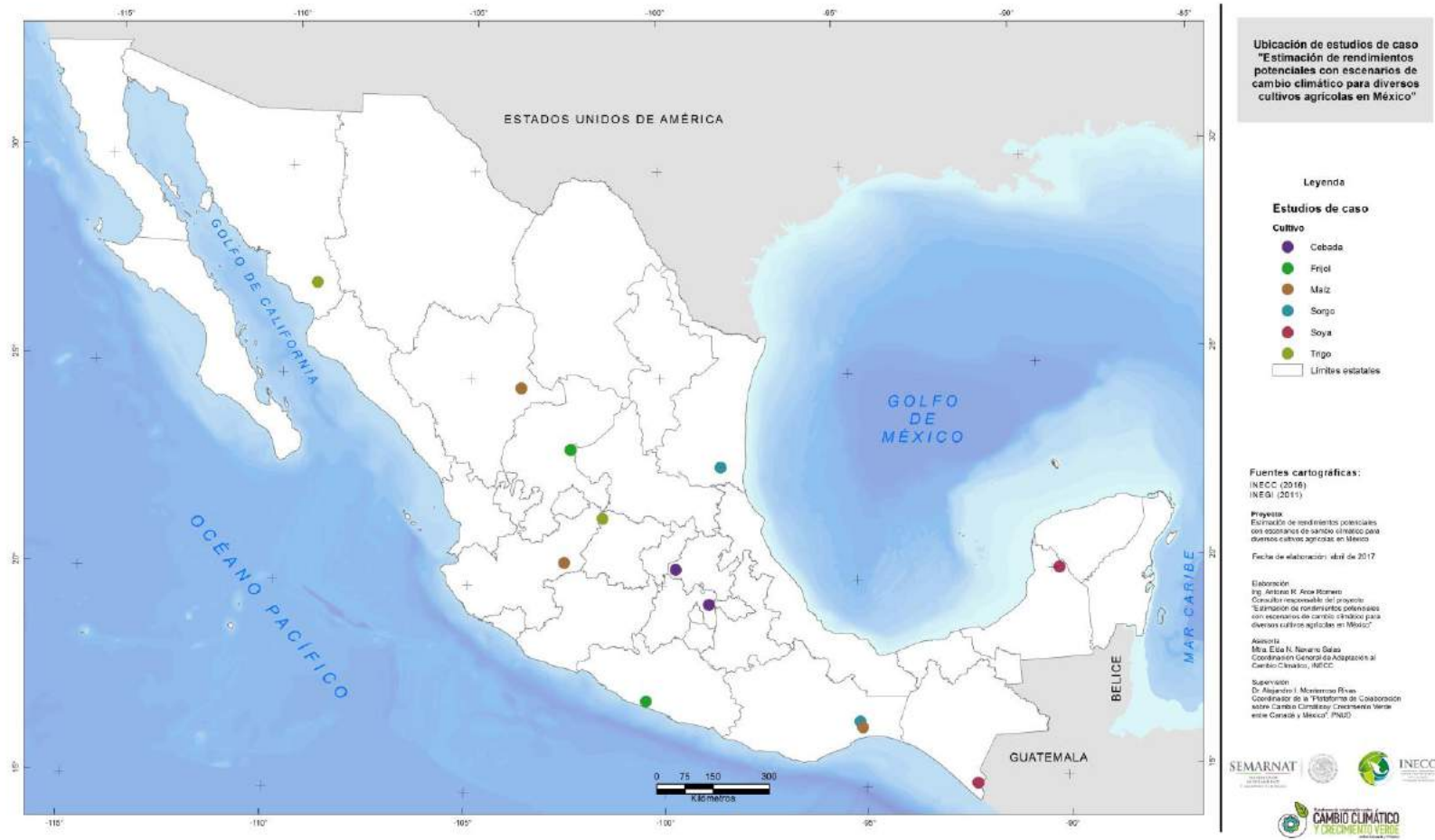
M8569_eh	8.41	9.11	0.15	24.81	0.03	0.17	14.17	2.96	205.00	21.69	0.12	4.31	7.39
M8599_eh	8.39	6.61	0.17	52.92	0.02	0.14	12.15	2.64	203.57	23.08	0.12	4.20	6.90

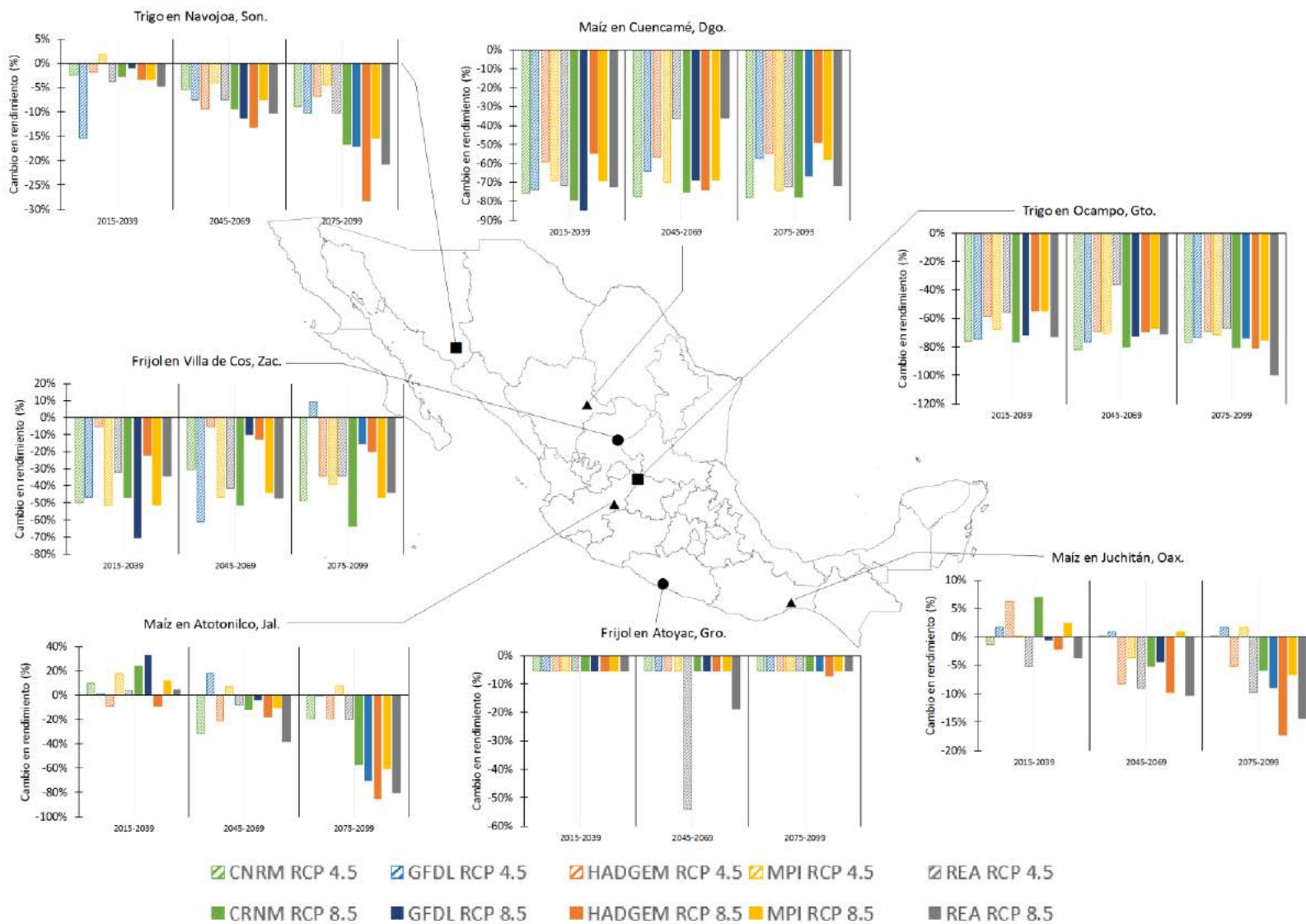
Profundidades del suelo con escenarios de cambio climático

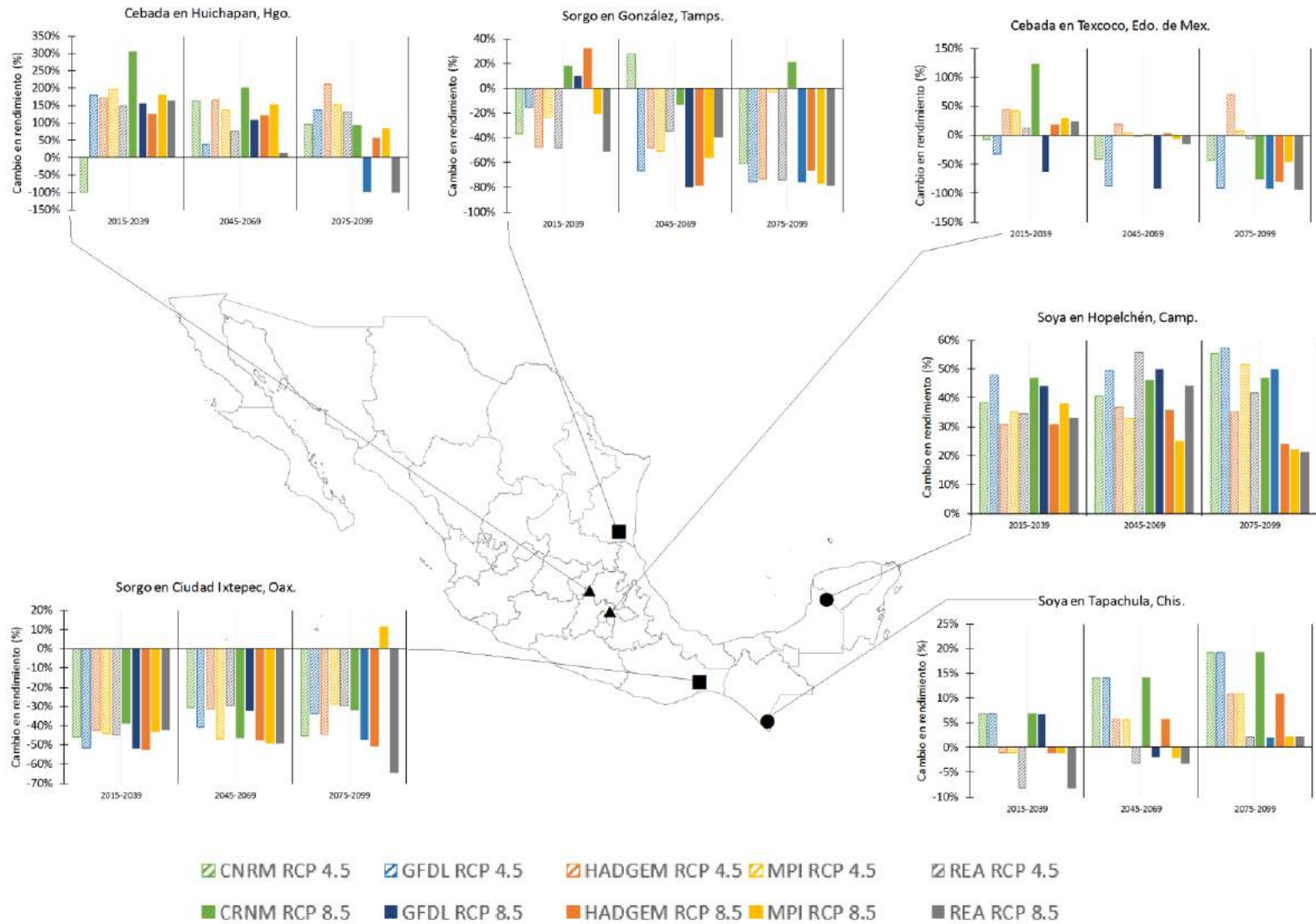
Variables/Estaciones	Atotonilco	Cuencamé	Juchitán	Atoyac	Villa de Cos	Ocampo	Tres Hnos.	Hopelchén	Malpaso	Ixtepec	González	Tlaixpan	Huichapan
Profundidad base (cm)	100.00	140.00	100.00	75.00	150.00	75.00	200.00	400.00	125.00	80.00	105.00	130.00	70.00
C4539_eh	98.77	136.27	99.97	64.90	149.99	74.95	197.60	399.27	85.31	77.44	104.96	128.55	68.74
C4569_eh	96.23	134.90	99.95	52.32	149.98	74.91	193.70	398.39	40.58	71.81	104.93	128.30	66.88
C4599_eh	94.62	132.47	99.92	40.71	149.98	74.87	190.33	397.69	-0.74	67.51	104.90	127.38	65.13
C8539_eh	98.80	136.34	99.97	64.73	149.99	74.95	197.64	399.26	84.70	77.12	104.96	128.46	68.57
C8569_eh	96.30	135.23	99.94	51.83	149.99	74.91	194.11	398.31	38.57	71.25	104.93	128.11	66.70
C8599_eh	94.58	132.66	99.92	39.67	149.98	74.87	191.41	397.51	-3.33	67.59	104.90	127.48	65.59
G4539_eh	98.81	136.53	99.97	64.86	149.99	74.95	197.69	399.25	84.57	77.18	104.97	128.56	68.77
G4569_eh	96.16	135.63	99.94	52.51	149.99	74.92	194.03	398.22	36.53	70.76	104.94	128.35	67.11
G4599_eh	94.27	134.09	99.91	42.09	149.99	74.89	191.43	397.32	-8.26	66.31	104.92	127.59	65.84
G8539_eh	98.74	136.34	99.97	64.87	149.99	74.95	197.51	399.26	84.75	77.27	104.96	128.53	68.67
G8569_eh	96.08	135.59	99.94	52.67	149.99	74.92	193.88	398.24	37.14	71.20	104.94	128.35	67.05
G8599_eh	94.41	134.39	99.91	41.82	149.99	74.90	191.45	397.30	-9.94	66.34	104.93	127.76	66.25
H4539_eh	98.90	136.48	99.97	65.03	149.99	74.95	197.72	399.31	84.07	77.28	104.96	128.53	68.69
H4569_eh	96.51	135.74	99.95	53.10	149.99	74.92	194.35	398.50	37.24	71.93	104.94	128.19	66.64
H4599_eh	94.55	132.81	99.93	42.12	149.98	74.87	191.30	397.78	-2.84	69.11	104.90	127.13	64.36
H8539_eh	98.86	136.44	99.97	65.03	149.99	74.95	197.67	399.29	84.99	77.38	104.96	128.51	68.67
H8569_eh	96.47	135.56	99.95	53.10	149.99	74.92	194.33	398.44	39.38	72.12	104.93	128.15	66.61
H8599_eh	94.95	133.56	99.93	42.03	149.98	74.88	192.79	397.80	-0.42	69.46	104.90	127.26	64.56
M4539_eh	98.80	136.43	99.97	65.69	149.99	74.95	197.60	399.31	85.00	77.22	104.96	128.50	68.64
M4569_eh	96.22	135.52	99.94	54.54	149.99	74.92	194.00	398.54	40.04	71.10	104.94	128.20	66.84
M4599_eh	94.37	133.58	99.91	42.02	149.98	74.89	191.29	397.86	-1.08	66.33	104.91	127.40	65.48
M8539_eh	98.83	136.50	99.97	65.00	149.99	74.95	197.67	399.31	84.94	77.21	104.96	128.50	68.65
M8569_eh	96.31	135.99	99.94	58.65	149.99	74.93	194.24	398.52	39.35	70.68	104.94	128.23	66.92

M8599_eh	94.48	135.12	99.90	50.02	149.99	74.91	192.10	397.98	-1.80	65.08	104.91	127.53	65.85
-----------------	-------	--------	-------	-------	--------	-------	--------	--------	-------	-------	--------	--------	-------

ANEXO 4 Cartografía







Anexo 5 Resultados modelos base

Cultivo	SMN	Estudio de caso	Series	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Promedio	Diferencia (tn/ha)	Diferencia (%)
Cebada	15101	Tlaixpan, Texcoco, Edo de Mex.	O ²⁷	2.13	2.5	1.24	3.73	1.68	1.49	1.81	1.4	2	2.15	2	1.9	2	0.01	0.70%
			M ²⁸	2.72	2.26	1	3.96	2.71	1.21	0.14	2.83	3.31	2.65	0.48	1.09	2.03		
Cebada	13012	Huichapan, Hidalgo	O	0.99	0.66	1.29	1.25	0.65	0.65	0.75	0.8	0.65	0.6	0.8	0.48	0.8	0.12	15.50%
			M	2.13	1.45	0.07	0.32	0	0.63	1.46	1.95	2.21	0	0.49	0.35	0.92		
Frijol	32059	Villa de Cos, Zacatecas	O	0.22	0.2	0.53	0.42	0.41	0.1	0.51	0.24	0.37	0.09	0.16	0.1	0.28	0.22	78.40%
			M	0.31	0.1	0.16	0.48	0.34	0.17	1.54	0.31	1.48	0.67	0.39	0	0.5		
Frijol	12161	Atoyac, Guerrero	O	0.57	0.6	0.6	0.65	0.55	0.6	0.6	0.65	0.6	0.6	0.5	0.5	0.58	0.12	21.00%
			M	0.67	0.68	0.68	0.61	0.72	0.73	0.73	0.73	0.74	0.74	0.74	0.72	0.74		
Maíz	14017	Atotonilco, Jalisco	O	4.96	6.51	7.38	7.56	8.47	7.6	6.85	7.74	7.77	7.51	8.54	5.72	7.22	-0.64	-8.80%
			M	0.92	6.4	6.2	13.5	10.05	6.58	6.62	2.5	5.83	7.5	5.82	7.06	6.58		
Maíz	20048	Juchitán de Zaragoza, Oaxaca	O	1.2	1.2	1.15	0.95	0.87	0.95	0.7	1	1.2	1.5	0.51	0.66	0.99	0.35	35.00%
			M	1.23	1.38	1.36	1.25	1.19	1.27	1.18	1.44	1.45	1.29	1.52	1.49	1.34		
Maíz	10012	Cuencamé, Durango	O	0.56	0.5	0.81	1.2	1.1	0	1.1	0.85	1.1	-	-	-	0.8	0.01	0.80%
			M	0.29	0.53	0.27	1.09	0.33	0.29	2.4	0.56	1.52	-	-	-	0.81		
Sorgo	20039	Ciudad Ixtepec, Oaxaca	O	2.5	2.8	3.03	1.7	1.2	1.2	1	1	3	3	2.41	1.9	2.06	0.05	2.30%
			M	2.39	2.22	2.04	1.92	2.27	2.52	1.86	2	1.94	1.95	2.05	2.14	2.11		
Sorgo	28035	González, Tamaulipas	O	2.1	2.22	1.57	1.92	1.05	2.11	0.96	1.68	2.5	2.9	1.2	1.3	1.79	0.28	15.40%
			M	2.19	2.35	2.37	2.5	1.11	2.53	2.41	1.05	1.85	1.6	2.52	2.35	2.07		
Soya	7191	Malpaso, Tapachula, Chiapas	O	2.39	2.3	2.34	2.5	2.35	1.8	1.93	1.93	2.52	0	1.75	-	1.98	-0.02	-1.00%
			M	1.92	1.93	1.94	1.95	1.96	1.97	1.98	1.98	1.98	1.99	2	-	1.96		

²⁷ Rendimiento observado por SIAP²⁸ Rendimiento modelado por *Aquacrop*

Soya	4001	Hopelchén, Bolonchén, Campeche	O	2.46	1.49	1.8	1.1	2.5	1.51	0.65	1.64	2.29	2.45	1.53	2.25	1.81	0.24	13.50%
			M	2.58	0.25	0.91	2.05	0.52	3.22	0.44	2.64	2.95	1.23	1.14	3.27	1.77		
Trigo	11050	Ocampo, Guanajuato	O	0.24	0.85	0.97	0.9	2	1.5	3	1.3	1.2	0.6	0.7	1	1.19	0.14	11.80%
			M	0.35	0.58	2.72	2.78	2.64	0.45	0.79	0.37	1.1	2.1	0.71	1.35	1.33		
Trigo	26102	Tres Hermanos, Navojoa, Sonora	O	5.4	5.68	5.92	5	6.1	5.2	6	6.1	6.1	5.38	6.26	5.49	5.72	-0.31	-5.40%
			M	4.9	5.2	5.4	5.6	5.7	6.04	5.1	5.4	5.3	5.2	5.8	5.3	5.41		



Plataforma de colaboración sobre
**CAMBIO CLIMÁTICO
Y CRECIMIENTO VERDE**
entre Canadá y México

Este documento fue desarrollado en el marco de la Plataforma de
Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá
y México, todos los derechos reservados

Derechos Reservados © 2017
Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)
Montes Urales 440, Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CDMX. C.P.11000
www.mx.undp.org

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)
Periférico sur 5000, Insurgentes Cuicuilco, CDMX. C.P. 04530
www.gob.mx/inecc

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



 **INECC**
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio
de las personas
y las naciones