

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Y USO INTEGRAL DEL AGUA

ANÁLISIS DE UN MODELO MATEMÁTICO
COMO BASE DE UN SIMULADOR DE CLIMA DE
INVERNADEROS

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

VALENCIA ISLAS JOSÉ OLAF

FEBRERO 2016

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO



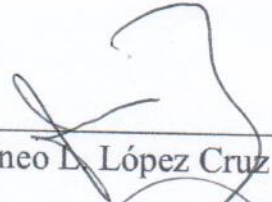
DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

ANÁLISIS DE UN MODELO MATEMÁTICO COMO BASE DE UN SIMULADOR DE CLIMA DE INVERNADEROS

Tesis realizada por José Olaf Valencia Islas bajo la dirección del comité asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

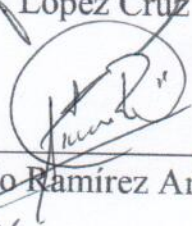
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA
ORIENTACIÓN: BIOSISTEMAS**

DIRECTOR:



Dr. Irineo D. López Cruz

ASESOR:



Dr. Armando Ramírez Arias

ASESOR:



Dr. Efrén Fitz Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por el apoyo brindado en cada etapa de mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo para realizar mis estudios de maestría.

A mis asesores, Dr. Irineo, Dr. Efrén y Dr. Armando por su amable disposición y tiempo en todo momento durante la investigación.

Al Dr. Agustín Ruíz García por su tiempo, comentarios y por los datos proporcionados de su experimento.

Al coordinador del Programa, Dr. Mauricio Carrillo y a Mayra Luna por su apoyo y amabilidad en todo momento.

DEDICATORIA

A mis padres, Rufino y Judith.

A mis hermanos, Katherine y Edwin.

A mis amigos.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

José Olaf Valencia Islas nace en Texcoco, Estado de México un 19 de noviembre de 1991. Realizó sus estudios de primaria en la escuela Juan Ruíz de Alarcón y posteriormente sus estudios de secundaria en el Instituto Hidalgo, ambos en el municipio de Texcoco. En el año 2006, aprueba el examen de ingreso a la Universidad Autónoma Chapingo en donde culmina exitosamente sus estudios de nivel superior y consecutivamente la licenciatura en Ingeniería Mecánica Agrícola egresando en el año 2013. Durante ese mismo año se postula para ingresar en el Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, donde es aceptado y decide tomar la orientación de biosistemas con la investigación simulador de clima en invernaderos.

RESUMEN

Para entender el comportamiento del ambiente del sistema invernadero bajo los diferentes climas que prevalecen en México, un simulador climático puede ser de gran ayuda. El objetivo de la investigación fue modificar, analizar y evaluar el comportamiento de un modelo matemático dinámico como base para la construcción de un simulador del clima de invernaderos establecidos en México. Primeramente se investigaron los requerimientos de control de clima para invernaderos usando diagramas de equipamiento y gráficas de temperaturas máximas y mínimas. En segundo lugar se propuso modificar un modelo matemático dinámico que contiene como variables de estado la temperatura del aire, temperatura de la masa térmica, humedad específica y biomasa de un cultivo de lechuga. Contiene además veintinueve parámetros y seis variables de entrada. En tercer lugar, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad global para conocer los parámetros más influyentes sobre las variables de salida del modelo. En cuarto lugar, se llevó a cabo un análisis de incertidumbre para los parámetros, lo que permitió obtener funciones de distribución de probabilidades de cada variable de salida y cuantificar su variabilidad cuando cambia el valor nominal de los parámetros, suponiendo que tienen una distribución uniforme. Posteriormente el modelo se calibró por el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales y se evaluó su desempeño con datos de un invernadero tipo sierra encontrando un buen ajuste entre las predicciones y mediciones. Finalmente, para explorar la posibilidad de mejoramiento de las predicciones del modelo mediante asimilación de datos, se diseñó un Filtro de Kalman Extendido.

Palabras clave: Estimación de parámetros, Filtro de Kalman Extendido, Análisis de sensibilidad global, Análisis de incertidumbre.

ABSTRACT

To understand the behavior of the greenhouse environment system under several climates that prevail in Mexico, a climate simulator could be helpfully. The general objective of the research was to modify, analyze and evaluate the behavior of a dynamic mathematical model as the basis for the construction of a greenhouse climate simulator for greenhouses established in Mexico. Firstly, it was investigated the requirements for greenhouse climate control using the equipment diagrams and the maximum and minimum temperature plots. Secondly, was proposed modify a dynamic mathematical model which contains as state variables the air temperature, the thermic mass temperature, the specific humidity and the biomass of a crop. Also contains twenty nine parameters and six input variables. Third, a global sensitivity analysis was carried out to know the most influential parameters on the output variables of the model. Fourth, was carried out an uncertainty analysis for the parameters which allow to obtain the probability distribution functions of each output variable and quantify its variability when their nominal value change assuming that they have an uniform distribution. Next, the model was calibrated by the least-squared procedure and its performance was evaluated with data from a saw type greenhouse founding a good fitting between the predictions and measurements. Finally, to explore the possibility of improvement the model predictions by data assimilation an Extended Kalman Filter was designed.

Keywords: Parameter estimation, Extended Kalman Filter, Global sensitivity analysis, Uncertainty analysis.

Contenido

CAPÍTULO 1 Introducción general	1
1.1 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2 Requerimientos de control de clima en México	4
2.1 Introducción	4
2.1.1 Estructuras para climas cálidos húmedos (Am)	7
2.1.2 Estructuras para climas cálidos subhúmedos (Aw).....	8
2.1.3 Estructuras para climas templados húmedos (Cm)	8
2.1.4 Estructuras para climas templados subhúmedos (Cw).....	9
2.1.5 Estructuras para climas secos (Bs y Bw)	9
2.2 Materiales y métodos	10
2.3 Resultados y discusión	12
2.3.1 Estado de Baja California	21
2.3.2 Estado de Chihuahua.....	21
2.3.3 Estado de Jalisco	22
2.3.4 Estado de México.....	22
2.3.5 Estado de Sinaloa	23
2.4 Conclusiones	23
CAPÍTULO 3 El modelo matemático como base de un simulador de clima para invernaderos	25
3.1 Introducción	25
3.2 Materiales y métodos	25
3.2.1 El modelo de clima	26
3.2.2 El modelo de cultivo	27
3.2.3 El modelo en conjunto	28
3.2.4 Los datos	28
3.2.5 Implementación de los modelos.....	29
3.2.6 Evaluación de los modelos.....	29
3.3 Resultados y discusión	29
3.3.1 Comportamiento del modelo de clima	29

3.3.2 Comportamiento del modelo de clima y de cultivo como sistemas seriados.....	32
3.3.3 Comportamiento del modelo de clima y de cultivo como un solo sistema acoplado .	36
3.3.4 Evaluación.....	41
3.4 Conclusiones	42
CAPÍTULO 4 Análisis de sensibilidad global	43
4.1 Introducción	43
4.2 Materiales y métodos	44
4.2.1 El modelo	44
4.2.2 Metodología del análisis de sensibilidad global.....	44
4.2.3 Paso 1. Especificación de objetivos	45
4.2.4 Paso 2. Selección de los factores a analizar	45
4.2.5 Paso 3. Selección de las funciones de densidad de probabilidad para cada factor.....	47
4.2.6 Paso 4. Selección del método de análisis de sensibilidad	48
4.2.7 Paso 5. Generación de la muestra de entrada	49
4.2.8 Paso 6. Evaluación del modelo	50
4.2.9 Paso 7. Análisis de las salidas del modelo y conclusiones.....	50
4.3 Resultados y discusión	51
4.4 Conclusiones	56
Capítulo 5 Estimación de parámetros y evaluación del modelo	58
5.1 Introducción	58
5.2 Materiales y métodos	59
5.2.1 Estimación de parámetros	60
5.2.2 Validación del modelo	61
5.3 Resultados y discusión	62
5.3.1 Estimación de parámetros	62
5.3.2 Validación	64
5.4 Conclusiones	66
Capítulo 6 Análisis de incertidumbre.....	68
6.1 Introducción	68
6.2 Materiales y métodos	69

6.2.1	Definición de la distribución de incertidumbre asociada a cada factor de entrada	71
6.2.2	Generación de N escenarios de los factores de entrada $z_k = z_k, 1, \dots, z_k, n, k = 1, \dots, N$.	71
6.2.3	Simulación del comportamiento de las variables de salida del modelo para cada escenario, $fz_k, k = 1, \dots, N$.	72
6.2.4	Análisis de las distribuciones de las variables de salida del modelo (medias, medianas, varianzas)	72
6.3	Resultados y discusión	72
6.3.1	Análisis de la integral de cada variable de salida	72
6.3.2	Analizando la media de las variables de clima y el valor final de la biomasa	79
6.4	Conclusiones	83
Capítulo 7	Linealización y análisis de las constantes tiempo	85
7.1	Introducción	85
7.2	Materiales y métodos	86
7.3	Resultados y discusión	88
7.3.1	Elementos de la matriz A	88
7.3.2	Elementos de la matriz B	93
7.3.3	Elementos de la matriz C	100
7.3.4	Elementos de la matriz D	102
7.3.5	Cálculo de las constantes tiempo	103
7.4	Conclusiones	104
Capítulo 8	Asimilación de datos para estimación de estados mediante un filtro de Kalman extendido	105
8.1	Introducción	105
8.2	Materiales y métodos	106
8.2.1	Modelo	106
8.2.2	Diseño del Filtro de Kalman Extendido	107
8.2.3	Evaluación de desempeño	109
8.3	Resultados y discusión	109
8.4	Conclusiones	117

Capítulo 9 Conclusiones generales	118
Referencias.....	120
10.1 Páginas web:	124
APÉNDICE I Requerimientos de control de clima en México (continuación).....	126
I.1 Aguascalientes.....	126
I.2 Baja California	131
I.3 Baja California Sur	137
I.4 Campeche.....	142
I.5 Chiapas.....	147
I.6 Chihuahua.....	152
I. 7 Coahuila	157
I.8 Colima	162
I.9 Distrito federal.....	167
I.10 Durango.....	172
I.11 Estado de México.....	177
I. 12 Guanajuato.....	183
I.13 Guerrero.....	188
I.14 Hidalgo	193
I.15 Jalisco	198
I.16 Michoacán.....	202
I.17 Morelos.....	207
I.18 Nayarit.....	213
I.19 Nuevo León	219
I.20 Oaxaca	225
I.21 Puebla	231
I.22 Querétaro	237
I.23 Quintana Roo.....	244
I.24 San Luis Potosí.....	250
I.25 Sinaloa	255
I.26 Sonora.....	261

I.27 Tabasco.....	267
I.28 Tamaulipas.....	272
I.29 Tlaxcala	278
I.30 Veracruz.....	284
I.31 Yucatán.....	290
I.32 Zacatecas	297
APÉNDICE II Ecuaciones del modelo	305
II.1 Ecuaciones complementarias	305
II.2 Parámetros del modelo.....	308
II.3 Entradas.....	310
II.4 Estados	311
II.5 Representación en forma de espacio de estados.....	312
APÉNDICE III Información adicional del análisis de sensibilidad global usando el método de Coeficientes de Regresión Estandarizados	313

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación sugerida de acuerdo al nivel de intervención del clima.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Cuadro 2. Clasificación del nivel tecnológico en invernaderos (García et al., 2011).....	12
Cuadro 3. Estadísticas para evaluar el desempeño de los modelos vistos en diferentes combinaciones considerando las variables de salida únicamente para el modelo de clima.....	41
Cuadro 4. Parámetros del modelo como factores de entrada para el análisis de sensibilidad global.	46
Cuadro 5. Parámetros más relevantes considerando los índices de primer orden para los tres métodos.	55
Cuadro 6. Parámetros más relevantes considerando los índices de efectos totales para los métodos EFAST y Sobol.	56
Cuadro 7. Valores estimados de los parámetros a los que es más sensible el modelo.....	62
Cuadro 8. Valores del Error Cuadrático Medio de Predicción para diferente número de parámetros estimados.....	63
Cuadro 9. Estadísticas de bondad de ajuste del modelo calibrado.....	66
Cuadro 10. Parámetros del modelo como factores para el análisis de incertidumbre con 20% de variación.....	70
Cuadro 11. Estadísticas calculadas para las variables de salida del modelo asociadas con el análisis de sensibilidad, usando 5 000 muestras obtenidas mediante muestreo aleatorio.....	77
Cuadro 12. Estadísticas calculadas para las variables de salida del modelo asociadas con el análisis de sensibilidad, usando 5 000 muestras obtenidas mediante muestreo hipercubo latino.....	77
Cuadro 13. Pruebas de bondad de ajuste para cada variable considerando muestreo aleatorio...	78
Cuadro 14. Pruebas de bondad de ajuste para cada variable considerando muestreo hipercubo latino.	78
Cuadro 15. Estadísticas asociadas con el análisis de incertidumbre con muestreo aleatorio considerando la media de las variables de salida.	82
Cuadro 16. Pruebas de bondad de ajuste para las temperaturas de salida del modelo considerando la media y el valor final de la biomasa.....	82
Cuadro 17. Percentiles de las variables de salida considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.	83
Cuadro 18. Valores propios, valores de los estados del modelo en estado estacionario y constantes tiempo del sistema.	103
Cuadro 19. Estadísticas de evaluación del desempeño del modelo sin calibrar, calibrado y con la implementación del filtro EKF.	110
Cuadro 20. Estadísticas de evaluación del desempeño del modelo calibrado y con la implementación del filtro EKF con los datos de Puebla.	115
Cuadro 21. Valores de R para cada variable de salida.....	313

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Entidades con mayor participación por superficie en agricultura protegida nacional (porcentaje).	13
Figura 2. Radiación solar total mensual y temperatura mensual promedio para los Estados de México (línea azul), Jalisco (línea verde), y Sinaloa (línea anaranjada).....	15
Figura 3. Radiación solar total mensual y temperatura mensual promedio para los Estados de Baja California (línea negra) y Chihuahua (línea gris).	16
Figura 4. Precipitación y temperaturas máximas y mínimas para los Estados de Jalisco (líneas en verde), el Estado de México (líneas en amarillo) y Sinaloa (líneas en anaranjado).....	17
Figura 5. Precipitación y temperaturas máximas y mínimas para los Estados de Baja California (líneas en anaranjado) y Chihuahua (líneas en verde).	18
Figura 6. Temperaturas máximas y mínimas exteriores mensuales promedio para los Estados de Jalisco (líneas en azul), México (líneas en anaranjado) y Sinaloa (líneas en gris).	19
Figura 7. Temperaturas máximas y mínimas exteriores mensuales promedio para los Estados de Baja California (línea en anaranjado) y Chihuahua (línea en azul).	20
Figura 8. Temperatura del aire (°C) dentro del invernadero durante cuatro días de simulación con el modelo (línea continua azul) comparada con las mediciones (puntos en negro).	31
Figura 9. Temperatura de la masa térmica (°C) dentro del invernadero durante cuatro días de simulación con el modelo (línea continua azul) comparada con las mediciones (puntos en negro).	31
Figura 10. Humedad relativa (%) del aire del invernadero durante cuatro días de simulación con el modelo (línea continua azul) comparada con las mediciones (puntos en negro).	32
Figura 11a. Temperatura del aire (°C) con el modelo de clima (línea continua verde), de clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro) y las mediciones (línea continua en azul).	33
Figura 12a. Temperatura de la masa térmica (°C) con el modelo de clima (línea continua verde), de clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro) y las mediciones (línea continua en azul).	34
Figura 13a. Humedad relativa (%) del aire dentro del invernadero con el modelo de clima (línea continua verde), de clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro) y las mediciones (línea continua en azul).	35
Figura 14. Materia seca (kg m^{-2}) del cultivo con del modelo de clima y cultivo como sistemas independientes.....	36
Figura 15a. Temperatura del aire (°C) con el modelo de clima (línea continua en verde), clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro), como un solo sistema (cruces en rojo) y las mediciones (línea continua en azul).	37
Figura 16a. Temperatura de la masa térmica (°C) con el modelo de clima (línea continua en verde), clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro), como un solo sistema (cruces en rojo) y las mediciones (línea continua en azul).	38

Figura 17a. Humedad relativa (%) del aire dentro del invernadero (%) con el modelo de clima (línea continua en verde), clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro), como un solo sistema (cruces en rojo) y las mediciones (línea continua en azul).....	39
Figura 18. Materia seca total para los cuatro días de simulación de los modelos de clima y cultivo como sistemas independientes (línea continua en azul) y como un solo sistema (cruces en rojo).....	40
Figura 19. Índices de primer orden para la temperatura del aire obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.	51
Figura 20. Índices de efectos totales para la temperatura del aire obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.	52
Figura 21. Índices de primer orden para la temperatura de la masa térmica obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.....	52
Figura 22. Índices de efectos totales para la temperatura de la masa térmica obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.	53
Figura 23. Índices de primer orden para la humedad relativa obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.	53
Figura 24. Índices de efectos totales para la humedad relativa obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.	54
Figura 25. Índices de primer orden para la biomasa obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.	54
Figura 26. Índices de efectos totales para la biomasa obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.	55
Figura 27. Temperatura del aire para el modelo calibrado (línea continua verde), no calibrado (línea continua vino) y las mediciones (línea punteada anaranjada) de los 7 días para validación.	64
Figura 28. Temperatura de la masa térmica para el modelo calibrado (línea continua verde), no calibrado (línea continua vino) y las mediciones (línea punteada anaranjada) de los 7 días para validación.....	65
Figura 29. Humedad relativa para el modelo calibrado (línea continua verde), no calibrado (línea continua vino) y las mediciones (línea punteada anaranjada) de los 7 días para validación.	65
Figura 30. Temperatura, Humedad relativa y radiación exterior.	69
Figura 31. Velocidad del viento exterior y áreas lateral y cenital de las ventanas del invernadero.	70
Figura 32. Doscintas simulaciones de la temperatura del aire con muestreo aleatorio.	73
Figura 33. Doscintas simulaciones de la temperatura del aire con muestreo hipercubo latino. .	73
Figura 34. Doscintas simulaciones de la temperatura de la masa térmica con muestreo aleatorio.	73
Figura 35. Doscintas simulaciones de la temperatura de la masa térmica con muestreo hipercubo latino.	73
Figura 36. Doscintas simulaciones de la humedad relativa con muestreo aleatorio.	74
Figura 37. Doscintas simulaciones de la humedad relativa con muestreo hipercubo latino.	74

Figura 38. Doscintas simulaciones de la biomasa con muestreo aleatorio.....	74
Figura 39. Doscintas simulaciones de la biomasa con muestreo hipercubo latino.	74
Figura 40. Histograma de la temperatura del aire para muestreo aleatorio.....	75
Figura 41. Histograma de la temperatura del aire para muestreo hipercubo latino.....	75
Figura 42. Histograma de la temperatura de la masa térmica con muestreo aleatorio.....	75
Figura 43. Histograma de la temperatura de la masa térmica con muestreo hipercubo latino.	75
Figura 44. Histograma de la humedad relativa con muestreo aleatorio.	76
Figura 45. Histograma de la humedad relativa con muestreo hipercubo latino.	76
Figura 46. Histograma de la biomasa con muestreo aleatorio.	76
Figura 47. Histograma de la biomasa con muestreo hipercubo latino.	76
Figura 48. Histograma de la temperatura del aire con muestreo aleatorio considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.....	80
Figura 49. Histograma de la temperatura de la masa térmica con muestreo aleatorio considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.	80
Figura 50. Histograma de la humedad relativa con muestreo aleatorio y considerando el valor medio de las variables y el valor final de la biomasa.....	81
Figura 51. Histograma de la biomasa con muestreo aleatorio y considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.....	81
Figura 52a. Temperatura del aire con el modelo calibrado (línea continua en azul), con el modelo y el filtro (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).	112
Figura 53a. Temperatura de la masa térmica con el modelo calibrado (línea continua en negro), con el modelo y el filtro (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).....	113
Figura 54a. Humedad relativa con el modelo calibrado (línea continua en azul), con el modelo y el filtro (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).	114
Figura 55. Temperatura del aire con el modelo calibrado (línea continua en azul), el modelo con el filtro EKF (cruces en rojo) y mediciones (línea discontinua en negro) para el caso Puebla..	116
Figura 56. Temperatura de la masa térmica con el modelo calibrado (línea continua en azul), el modelo con el filtro EKF (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).	116
Figura 57. Humedad relativa con el modelo calibrado (línea continua en azul), el modelo con el filtro EKF (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).....	117
Figura 58. Radiación solar total mensual contra temperatura mensual promedio para el estado de Aguascalientes, México.	126
Figura 59. Precipitación mensual (línea continua), temperaturas mínimas mensuales (línea discontinua) y temperaturas máximas (línea punteada) para Aguascalientes, México.....	127
Figura 60. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Aguascalientes, México.....	128
Figura 61. Radiación solar total mensual y temperatura mensual promedio para los municipios de Aguascalientes (línea con cuadrados) y Asientos (línea con círculos) en el Estado de Aguascalientes.	129

Figura 62. Precipitación mensual, temperaturas mínimas y máximas mensuales para los municipios de Aguascalientes y Asientos en el Estado de Aguascalientes.....	130
Figura 63. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Aguascalientes y Asientos en el Estado de Aguascalientes.	131
Figura 64. Radiación total mensual y temperatura mensual promedio para el Estado de Baja California, México.	132
Figura 65. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Baja California, México.....	133
Figura 66. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Baja California, México.	134
Figura 67. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Ensenada y Tijuana en el Estado de Baja California.	135
Figura 68. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Ensenada y Tijuana en el Estado de Baja California.....	136
Figura 69. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Ensenada y Tijuana en el Estado de Baja California.....	137
Figura 70. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para Baja California Sur.....	138
Figura 71. Precipitación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas promedio para Baja California Sur, México.	139
Figura 72. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Baja California Sur, México.	139
Figura 73. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio del municipio de La Paz en Baja California Sur.	140
Figura 74. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas para el municipio de La Paz en Baja California Sur.....	141
Figura 75. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el municipio de La Paz en el Estado de Baja California Sur, México.....	141
Figura 76. Radiación solar mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Campeche, México.	142
Figura 77. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Campeche, México.	143
Figura 78. Temperatura mínima mensual promedio y máxima mensual promedio para el Estado de Campeche, México.....	144
Figura 79. Radiación mensual promedio temperatura mensual promedio para el municipio de Campeche en Campeche.....	145
Figura 80. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Campeche.....	146
Figura 81. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el municipio de Campeche.....	146

Figura 82. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Chiapas, México.	147
Figura 83. Precipitación mensual promedio, temperatura máxima y mínima mensual para el Estado de Chiapas, México.	148
Figura 84. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Chiapas.	149
Figura 85. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de San Cristóbal y La Trinitaria, Chiapas.	150
Figura 86. Precipitación mensual, temperaturas mínima y máxima para los municipios de San Cristóbal y La Trinitaria, Chiapas.	151
Figura 87. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de San Cristóbal (azul) y La Trinitaria (verde) en el Estado de Chiapas.	151
Figura 88. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Chihuahua, México.	152
Figura 89. Precipitación y temperaturas mínima y máxima para el Estado de Chihuahua, México.	153
Figura 90. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Chihuahua, México.	154
Figura 91. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el municipio de Bachiniva, Chihuahua.	155
Figura 92. Precipitación y temperaturas mínima y máxima para el municipio de Bachiniva en el Estado de Chihuahua, México.	156
Figura 93. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el municipio de Bachiniva, Chihuahua, México.	156
Figura 94. Radiación global promedio por mes (izquierda) y por día (derecha) contra la temperatura mensual promedio para el Estado de Coahuila, México.	157
Figura 95. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Coahuila, México.	158
Figura 96. Temperatura mínima promedio y temperatura máxima promedio para el Estado de Coahuila, México.	159
Figura 97. Radiación solar mensual y temperatura mensual promedio para el municipio de Lamadrid en Coahuila.	160
Figura 98. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Lamadrid, Coahuila.	161
Figura 99. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Lamadrid en Coahuila.	161
Figura 100. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Colima, México.	162
Figura 101. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Colima, México.	163

Figura 102. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Colima, México.	164
Figura 103. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Colima y Coquimatlán en Colima.	165
Figura 104. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Colima y Coquimatlán en Colima.	166
Figura 105. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Colima y Coquimatlán en el Estado de Colima.	167
Figura 106. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Distrito Federal, México.	168
Figura 107. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas para el Distrito Federal, México.	168
Figura 108. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Distrito Federal, México.	169
Figura 109. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Xochimilco y Tláhuac.	170
Figura 110. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas de los municipios de Xochimilco y Tláhuac.	171
Figura 111. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para las delegaciones de Tláhuac y Xochimilco en el Distrito Federal, México.	172
Figura 112. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Durango, México.	173
Figura 113. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Durango, México.	174
Figura 114. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Durango, México.	174
Figura 115. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Pueblo Nuevo en Durango.	176
Figura 116. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el municipio de Pueblo Nuevo en el Estado de Durango, México.	177
Figura 117. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de México, México.	178
Figura 118. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de México, México.	178
Figura 119. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de México, México.	179
Figura 120. Radiación mensual promedio para los municipios de Villa Guerrero y Texcoco en el Estado de México.	181
Figura 121. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Villa Guerrero y Texcoco en el Estado de México, México.	182

Figura 122. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas promedio para el Estado de Guanajuato.	184
Figura 123. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Guanajuato.....	185
Figura 124. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el municipio de Irapuato en Guanajuato.	186
Figura 125. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas para el municipio de Irapuato, Guanajuato.	187
Figura 126. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Irapuato, Guanajuato.....	187
Figura 127. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Guerrero, México.	188
Figura 128. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Guerrero, México.	189
Figura 129. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Guerrero, México.	189
Figura 130. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Acapulco y Chilapa en el Estado de Guerrero.	191
Figura 131. Precipitación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Acapulco y Chilapa en Guerrero.	192
Figura 132. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Acapulco y Chilapa en el Estado de Guerrero.	192
Figura 133. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Hidalgo, México.	194
Figura 134. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Hidalgo.	195
Figura 135. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Acaxochitlán y Mineral del Chico en Hidalgo.	196
Figura 136. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Acaxochitlán y Mineral del Chico, Hidalgo.	197
Figura 137. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Acaxochitlán y Mineral del Chico, Hidalgo.	197
Figura 138. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Jalisco, México.	198
Figura 139. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Jalisco, México.	199
Figura 140. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Jalisco, México.	199
Figura 141. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el municipio de Tlajomulco, Jalisco.	200
Figura 142. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Tlajomulco, Jalisco.	201

Figura 143. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Tlajomulco, Jalisco.	202
Figura 144. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Michoacán, México.....	203
Figura 145. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Michoacán, México.	203
Figura 146. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Michoacán, México.....	204
Figura 147. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Jacona y Zitácuaro, Michoacán.	206
Figura 148. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Jacona y Zitácuaro, Michoacán.	206
Figura 149. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Jacona y Zitácuaro, Michoacán.....	207
Figura 150. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Morelos.	209
Figura 151. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Morelos.....	210
Figura 152. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Morelos.	210
Figura 153. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Cuautla y Yautepec, Morelos.	212
Figura 154. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Cuautla y Yautepec, Morelos.	212
Figura 155. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Cuautla y Yautepec en el Estado de Morelos.....	213
Figura 156. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Nayarit, México.	214
Figura 157. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nayarit.	215
Figura 158. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nayarit.	215
Figura 159. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Ixcuintla y San Blas, Nayarit.....	217
Figura 160. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Ixcuintla y San Blas, Nayarit.	218
Figura 161. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Santiago Ixcuintla y San Blas en el Estado de Nayarit, México.	218
Figura 162. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nuevo León.	220

Figura 163. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nuevo León.	221
Figura 164. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Montemorelos y Galeana, Nuevo León.	223
Figura 165. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Montemorelos y Galeana, Nuevo León.	224
Figura 166. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Montemorelos (azul) y Galeana (anaranjado) en el Estado de Nuevo León, México.	225
Figura 167. Precipitación mensual temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Oaxaca.	227
Figura 168. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Oaxaca.	228
Figura 169. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Tlacolula y Río Hondo, Oaxaca.	229
Figura 170. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Tlacolula y Río Hondo, Oaxaca.	230
Figura 171. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Tlacolula y Río Hondo, Oaxaca.	231
Figura 172. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Puebla.	232
Figura 173. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Puebla.	233
Figura 174. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Puebla.	234
Figura 175. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Atlixco y Tetela, Puebla.	235
Figura 176. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Atlixco y Tetela, Puebla.	236
Figura 177. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Atlixco y Tetela, Puebla.	237
Figura 178. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Querétaro.	238
Figura 179. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Querétaro.	239
Figura 180. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Querétaro.	240
Figura 181. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Amealco, San Juan del Río y Colón, Querétaro.	242
Figura 182. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Amealco, Colón y San Juan del Río.	243

Figura 183. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Amealco, San Juan del Río y Colón en el Estado de Querétaro.	244
Figura 184. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Quintana Roo, México.	245
Figura 185. Precipitación mensual promedio, Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Quintana Roo.....	246
Figura 186. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Quintana Roo.....	246
Figura 187. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas, Quintana Roo.	248
Figura 188. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas para los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas, Quintana Roo.....	249
Figura 189. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas en el Estado de Quintana Roo.	250
Figura 190. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de San Luis Potosí.	251
Figura 191. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de San Luis Potosí.....	252
Figura 192. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de San Luis Potosí.	253
Figura 193. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el municipio de Río verde, SLP.	254
Figura 194. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Río verde, SLP.	254
Figura 195. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el municipio de Río verde, SLP.	255
Figura 196. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Sinaloa, México.	256
Figura 197. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Sinaloa.....	257
Figura 198. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Sinaloa.	258
Figura 199. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios del Rosario y Culiacán.	259
Figura 200. Precipitación mensual y temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios del Rosario y Culiacán.	260
Figura 201. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de El Rosario y Culiacán en el Estado de Sinaloa.	260
Figura 202. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Sonora.	262

Figura 203. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Sonora.....	262
Figura 204. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Sonora.	263
Figura 205. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Hermosillo y Cajeme, Sonora.....	265
Figura 206. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Hermosillo y Cajeme, Sonora.....	266
Figura 207. Temperaturas máximas y mínimas para los municipios de Hermosillo y Cajeme, Sonora.	266
Figura 208. Precipitación mensual promedio, temperaturas mensuales promedio para el Estado de Tabasco.	268
Figura 209. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tabasco.	269
Figura 210. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Mascupana y Teapa, Tabasco.....	270
Figura 211. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Mascupana y Teapa.	271
Figura 212. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Mascupana y Teapa en el Estado de Tabasco.	272
Figura 213. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Tamaulipas.....	273
Figura 214. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tamaulipas.	274
Figura 215. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tamaulipas.....	274
Figura 216. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Altamira y el Mante.....	276
Figura 217. Precipitación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Altamira y El Mante.	277
Figura 218. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Altamira (azul) y El Mante (anaranjado) en el Estado de Tamaulipas.	278
Figura 219. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Tlaxcala.....	279
Figura 220. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tlaxcala.	280
Figura 221. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Tlaxcala.....	280
Figura 222. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Altzayanca y Españita.	282

Figura 223. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Altzayanca y Españita.....	283
Figura 224. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Altzayanca (azul) y Españita (anaranjado) en el Estado de Tlaxcala, México.	284
Figura 225. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Veracruz.....	285
Figura 226. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Veracruz.	286
Figura 227. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Veracruz.....	287
Figura 228. Radiación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Jalacingo y Huatusco.	288
Figura 229. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Jalacingo y Huatusco.	289
Figura 230. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Jalacingo (azul) y Huatusco (anaranjado) en el Estado de Veracruz. ...	290
Figura 231. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Yucatán.	291
Figura 232 Precipitación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Yucatán.....	292
Figura 233. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Yucatán, México.	293
Figura 234. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Mérida y Tizimín.	295
Figura 235. Precipitación y temperaturas mínimas y máximas para los municipios de Mérida y Tizimín en el Estado de Yucatán, México.	296
Figura 236. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Mérida y Tizimín en el Estado de Yucatán, México.	297
Figura 237. Radiación mensual promedio y tempraturas mensuales promedio para el Estado de Zacatecas.....	298
Figura 238. Precipitación y temperaturas mínimas y máximas para el Estado de Zacatecas, México.	299
Figura 239. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Zacatecas, México.....	300
Figura 240. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Fresnillo y Río grande.	302
Figura 241. Precipitación y temperaturas mínimas y máximas para los municipios de Fresnillo y Río Grande en el Estado de Zacatecas, México.....	303

Figura 242. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Fresnillo (azul) y Río Grande (anaranjado) en el Estado de Zacatecas, México.	304
Figura 243. Gráficas de dispersión de la temperatura del aire con respecto a cada parámetro del modelo.	314
Figura 244. Gráficas de dispersión de la temperatura de la masa térmica con respecto a cada parámetro del modelo.	315
Figura 245. Gráficas de dispersión de la humedad relativa con respecto a cada parámetro del modelo.	317
Figura 246. Dispersión de biomasa con respecto a cada parámetro del modelo.....	318

Abreviaturas

NASA – National Aeronautics and Space Administration

SMN – Servicio Meteorológico Nacional

INEGI – Instituto Nacional de Estadística y Geografía (antes Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática).

SAGARPA – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

RMSE – Root Mean Squared Error (Raíz del error cuadrático medio).

MAE – Mean Absolute Error (Error medio absoluto).

EF – Eficiencia de Modelación.

EKF – Extended Kalman Filter (Filtro de Kalaman Extendido).

MSE – Mean Squared Error (Error cuadrático medio).

MSEP – Mean Squared Error Predictor (Error cuadrático medio de predicción).

CRE – Coeficientes de Regresión Estandarizados.

EFAST – Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (Prueba de sensibilidad de amplitud de Fourier extendido).

r – Coeficiente de correlación.

CAPÍTULO 1

Introducción general

Los invernaderos son construcciones agrícolas que permiten a los productores modificar el ambiente aéreo interno de las paredes que lo delimitan. El objetivo de estos es mejorar las condiciones internas, en comparación con las externas, lo cual permite cultivar plantas fuera de su temporada e incluso de su tipo de clima, además de protegerlas de los efectos del viento y la lluvia.

Existen diferentes tipos de invernaderos con diferentes niveles de equipamiento, dependiendo de las condiciones climáticas de donde se ubican. Por ejemplo, los invernaderos Chinos cuentan con paredes que permiten almacenar energía para elevar la temperatura (Sun et al., 2006; Tong et al., 2009), los invernaderos holandeses tipo venlo, son de alta tecnología (en su mayoría) con cubierta de vidrio y equipados con calefacción de tubería radiante (de Gelder et al., 2012; van Beveren et al., 2015) o los invernaderos españoles de tipo parral que tienen cubierta de plástico y baja tecnología (Perdigones et al., 2008).

La diferencia tecnológica debido a la ubicación geográfica es de vital importancia cuando se compara el total de superficie cubierta por invernaderos. Menor equipamiento para el control de clima se refleja en un bajo costo de producción, pero se ve afectada la calidad de los productos (BCMA, 2003; Castilla y Hernández, 2006).

Los cinco países con mayor superficie de producción en invernaderos son: China con 2 760 000 ha, Korea del Sur con 57 444 ha, España con 52 170 ha, Japón con 49 049 ha y Turquía con 33 515 ha (Kacira, 2011).

México ha tomado un rol importante en cuanto a la cantidad de superficie que se cultiva bajo invernaderos con 11 759 ha, superando a los Estados Unidos quienes cuentan con 8 425 ha y recientemente a los Países bajos con 10 370 ha (BCMA, 2003; Kacira, 2011; AMHPAC, 2013). Sin embargo, debido a que la gran mayoría de invernaderos en México son de baja tecnología (Cuadro 1), resultando en rendimientos muy bajos, 213 t/ha para el caso de jitomate de tipo bola (SAGARPA, 2013), en comparación con los rendimientos obtenidos en los Países bajos, que es de (803 t/ha).

Cuadro 1. Clasificación del nivel tecnológico de la horticultura protegida en México (AMHPAC, 2009).

Nivel tecnológico	Horticultura activa	Horticultura semi-activa	Horticultura pasiva
Tipo de invernadero	Plástico o vidrio	Techo plástico, paredes de malla	Casa sombra
Áreas	Norte, Torreón, Coahuila, México, Jalisco	Todo el país	Áreas tropicales (Sinaloa, Colima)
Sistema de producción	Hidroponía, control de clima	Hidroponía	Suelo
% de calidad US \$1*	90%	60-70%	40%

*Calidad US \$1 se refiere al porcentaje mayor de producción que coincide con la mayor calidad de exportación en la demanda.

Una forma de mejorar los rendimientos es usar modelos matemáticos de clima en el invernadero y de crecimiento de cultivos, ya que permiten comprender el funcionamiento del invernadero, se pueden usar para desarrollar algoritmos de control e incluso permiten diseñar estrategias óptimas para obtener mayores rendimientos o reducir el costo de la producción (van Straten et al., 2000; López-Cruz et al., 2008; López-Cruz y Hernández-Larragoiti, 2010; van Beveren et al., 2015).

El control del clima en los invernaderos es determinante en la calidad y rendimiento de los cultivos, sin embargo existen muy pocas investigaciones relacionadas con la modelación del clima en invernaderos para las condiciones de México (Castañeda-Miranda et al., 2007; Leal, 2008; López-Cruz et al., 2008; Guzmán-Cruz et al., 2009; López-Cruz y Hernández-Larragoiti, 2010; Ruíz-García, 2014).

Por lo tanto, se planteó como objetivo general la modificación, el análisis y la evaluación de un modelo matemático dinámico del clima de invernaderos, como base para la construcción de un simulador que permita evaluar su funcionamiento en diferentes condiciones climáticas de México

1.1 Objetivos específicos

- 1.- Presentar los diagramas de equipamiento y gráficas de temperaturas y precipitación para los requerimientos de clima de México, a fin de identificar el tipo de control (en promedio) requerido en los invernaderos para las condiciones de cada uno de los Estados del país.
- 2.- Analizar y modificar un modelo simple de la dinámica del sistema invernadero considerando el comportamiento de la temperatura y humedad dentro del invernadero.
- 3.- Evaluar el modelo seleccionado para determinar su fiabilidad y capacidad de predicción en diferentes escenarios: diferentes climas y diferentes configuraciones de invernadero.

CAPÍTULO 2

Requerimientos de control de clima en México

2.1 Introducción

El clima es un factor importante que influye en la estructura y en las características funcionales de los invernaderos, tal como lo mencionan von Elsner et al. (2000) y Vanthoor (2011).

En el diseño de los invernaderos se debe tomar en cuenta el contexto climático en el que operarán y esto resulta en que los parámetros de diseño son diferentes de acuerdo a su ubicación geográfica.

La mayoría de los cultivos bajo invernadero son especies de estaciones cálidas. Los vegetales y flores tienen requerimientos climáticos diferentes. Los requerimientos principales del crecimiento de cultivos se pueden definir y resumirse como sigue (Nisen et al. 1984; Sirjacobs 1989; Nisen et al. 1990; Baudoin et al. 1991; Verlodt 1999; Krug et al. 2002; Castilla y Hernández 2007; Baudoin et al. 2013):

- 1) El crecimiento de los cultivos se puede detener debido a las heladas. La temperatura mínima absoluta en el invernadero tiene que estar por encima de 0°C. El riesgo de temperaturas bajo cero puede ser ignorado cuando la temperatura exterior mínima diaria supera los 7°C.
- 2) El crecimiento, rendimiento y calidad de las hortalizas de fruto en invernadero se ven afectadas cuando las temperaturas están por debajo de los 12°C o exceden los 30°C. Los cultivos en horticultura protegida se adaptan, principalmente, a las temperaturas medias que oscilan entre los 17 a 27°C. Las temperaturas óptimas

oscilan entre los 22y 28°C durante el día y de 15 a 20°C en la noche. Teniendo en cuenta que el material de la cubierta permite el paso de radiación solar pero impide que la radiación infrarroja escape (efecto invernadero), se pueden definir los límites climáticos apropiados a ser de 12 a 22°C de temperatura media diaria si los invernaderos no se calientan.

- 3) Si la temperatura media diaria exterior es inferior a los 12°C, los invernaderos necesitan de calefacción, sobre todo por la noche. Con la temperatura media diaria supera los 22°C se necesita de enfriamiento artificial o el cultivo en invernaderos debe abandonarse (dependiendo además de la humedad relativa exterior). Con temperaturas medias entre los 12 y 22°C la ventilación natural es suficiente.
- 4) La temperatura máxima absoluta media no debe ser superior a los 35 a 40°C. La temperatura máxima para el caso de tomate no debe superar los 35°C.
- 5) Se estima que los requerimientos diarios de radiación mínimos de la mayoría de los cultivos son alrededor de los 8.5 MJ/m²/día (equivalente a 2.34 kWh/m²/día) durante los tres meses más cortos del año (noviembre diciembre y enero en el Norte del Hemisferio; Mayo, junio y julio en el Hemisferio sur). Esto significa alrededor de seis horas de luz por día, hasta un total mínimo de 500-550 horas de luz durante estos tres meses. El límite para una producción efectiva es de 1.0kWh/m²/día. La luz artificial debe usarse para una producción intensiva.
- 6) El umbral inferior para la temperatura del suelo es de 14°C.
- 7) Las temperaturas mínimas en la noche dependen del tipo de especie, sin embargo el umbral de la temperatura promedio nocturna se encuentra alrededor de los 15 a 18.5°C para plantas que requieren de calor tal como tomate, pimiento, pepino, melón y frijoles. Para el caso de otras especies, chile 12°C, melón, pimiento y

berenjena, 14°C, fresa 7 y 8°C. La temperatura mínima diaria para el cultivo de tomate no debe ser menor a los 15°C.

- 8) Una humedad relativa de 70 a 90% puede considerarse que está dentro de un rango seguro.

De acuerdo con von Zabeltitz (2011), las justificaciones para implementar un sistema de producción en invernaderos, incluyendo el control de temperatura del aire son:

1. Si la temperatura promedio es de alrededor de 7°C, no hay riesgo de heladas. La calefacción es absolutamente necesaria si las temperaturas caen debajo de los 0°C y es necesario considerar que para algunos cultivos el crecimiento y/o desarrollo se detiene a los 4°C.
2. Si la temperatura exterior mínima promedio está por debajo de los 10°C en el mes más frío y si el cultivo necesita de temperaturas superiores (pepino 18°C), la calefacción será necesaria para mejorar la calidad y rendimiento.
3. Si la temperatura exterior mínima promedio es <12°C (temperatura mínima absoluta <9 a 10°C), apertura de ventilas (ventiladores) de invernaderos tiene que quedarse cerrado para mantener la temperatura superior interna. La calefacción puede ser necesaria.
4. Si la temperatura mínima promedio es >12°C, los ventiladores pueden estar abiertas permanentemente. La ventilación se convierte en necesaria si la temperatura interna es >18 a 20°C.

5. Si la temperatura máxima promedio es $>27^{\circ}\text{C}$ la ventilación mediante ventilas rígidas o en el techo es necesaria en un clima húmedo y cálido y para invernaderos con varias naves.
6. Si la temperatura exterior máxima promedio es $>36^{\circ}\text{C}$ el enfriamiento artificial evaporativo es necesario si la humedad exterior es lo suficientemente baja.
7. Si la humedad relativa durante el día es <55 a 60% , la humedad interna debe incrementarse por sistemas nebulizadores o enfriamiento evaporativo.

En las siguientes secciones se presentan las recomendaciones sobre el tipo de estructuras para los invernaderos de acuerdo al tipo de clima, de acuerdo a von Zabeltitz (2011).

2.1.1 Estructuras para climas cálidos húmedos (Am)

En este tipo de clima solo se necesita de protección contra la precipitación y la alta radiación solar a lo largo del año. Es suficiente con cubrir el área del techo para proteger contra la lluvia, radiación solar y viento. El material de cubierta tiene que reducir la radiación solar y dar sombra al cultivo. Dado que las temperaturas exteriores son constantemente altas, las paredes laterales y ventilas pueden permanecer abiertas. Esto resulta en una buena ventilación. La temperatura del aire y contenido de humedad no deben incrementarse por encima de las del aire exterior. Si es necesario, las aperturas de ventanas deben estar equipadas con una malla antiáfidos para reducir su ingreso, pero se debe considerar que esta reducirá la ventilación. El agua de lluvia no debe penetrar el invernadero pero debe drenarse por medio de canales.

2.1.2 Estructuras para climas cálidos subhúmedos (Aw)

El cultivo debe protegerse de la alta radiación solar a lo largo del año. La protección contra lluvias sólo es necesaria durante el período de lluvias. Se puede coleccionar el agua de lluvia para usarse durante el período de sequías. Los invernaderos deben contar con canaletas y reservorios para el agua. En la temporada de sequías, la humedad puede reducirse a niveles muy bajos durante el día. Las condiciones de temperatura no deben demandar que las ventilas cierren. Deben, en todo caso, volverse necesario cerrarlas en caso de una humedad baja en extremo. En el caso de ventilas cerradas la humedad real del invernadero incrementa debido a la evapotranspiración, al igual que la temperatura del aire. Si la humedad es demasiado baja un equipo de enfriamiento evaporativo o sistemas de nebulización son opciones para crear un clima favorable.

2.1.3 Estructuras para climas templados húmedos (Cm)

La precipitación es un problema en este tipo de climas a lo largo del año. Los invernaderos sirven para proteger el cultivo de la lluvia demasiado pesada. Las canaletas son necesarias para descargar el agua de lluvia. La radiación solar es un problema sólo durante los meses del período de verano. En invierno, la radiación solar es un 50 a 70% menor en comparación con los niveles en el verano. Los invernaderos son un poco altos; los invernaderos deben tener una buena eficiencia de ventilación. Durante la noche, las temperaturas pueden descender considerablemente; de cualquier manera, los invernaderos deben tener ventilas que puedan cerrarse durante la noche. Además, el material de cubierta debe tener una transmisividad mínima para radiación de onda larga, con el fin de reducir la radiación térmica sobre las plantas.

En verano, las temperaturas y la suma de la radiación solar diaria son superiores a las que se presentan en zonas tropicales. Por lo tanto, se requiere de malla sombra y de una buena ventilación. Las mallas sombra deben poder removerse con el fin de permitir el paso de la luz en lo más posible durante el invierno.

2.1.4 Estructuras para climas templados subhúmedos (Cw)

Los invernaderos deben contar con ventilas que puedan cerrarse y ser estrechos con el fin de proteger a los cultivos de las bajas temperaturas en invierno. Usualmente, es necesario calentar los invernaderos. El material de cubierta debe permitir el paso de la radiación de onda larga para minimizar la radiación térmica fuera del invernadero. Las canaletas son ventajosas para coleccionar agua de lluvia y usarla con fines de riego. Durante los meses de verano con altas temperaturas no es usual que los vegetales se cultiven en invernaderos.

2.1.5 Estructuras para climas secos (Bs y Bw)

Los invernaderos tienen que proteger a los cultivos de la excesiva radiación, viento, tormentas de arena y la humedad demasiado baja. Deben tener ventilas eficientes que puedan cerrarse durante la noche. En el caso de humedad demasiado baja y altas temperaturas el enfriamiento evaporativo puede instalarse para operar con agua salobre (si está disponible).

Para determinar los requerimientos de control climático de invernaderos en México, considerando las temperaturas promedio del aire, máxima y mínima, precipitación y

radiación, se construyeron las gráficas de cada Estado y de sus municipios con mayor cantidad de superficie de invernaderos.

2.2 Materiales y métodos

Para elaborar los diagramas de control y las gráficas que contienen la información climática de cada uno de los Estados en México se condensaron los datos reportados por la NASA y el SMN sobre estas variables considerando registros de varios años. Además se obtuvieron los datos meteorológicos de los municipios con mayor superficie cultivada en invernaderos en cada Estado y se realizó una comparación de los requerimientos de control climático.

Los datos de radiación solar se obtuvieron de la página web de la NASA (NASA, 2015), las unidades en que se presentan son kWh/m²/día sin embargo se realizó una transformación de unidades a MJ/m²/mes. Se promediaron los datos mensuales de los años 1983 a 2005.

Los datos de temperatura promedio, máxima, mínima del aire y precipitación para cada Estado en México se obtuvieron de la página web del Servicio Meteorológico Nacional, asimismo los datos de temperatura promedio, máxima y mínima del aire y la precipitación de cada municipio se obtuvieron de las normales climatológicas (SMN, 2015). Los datos mensuales se promediaron para el período de 1981 a 2010 en el caso de las normales y para el período de 2004 a 2014 en el caso de los Estados.

Se siguió la clasificación de climas del INEGI (2015a) y García (2004), para cada Estado y los municipios con mayor cantidad de unidades de producción.

Los datos de número de áreas de control y unidades de producción además del nombre de los municipios que tienen unidades de producción se obtuvieron del Sistema de Consulta e Información Geográfica (INEGI, 2015b). Un área de control se entenderá como la superficie en la que se llevan a cabo las mediciones y recopilación de datos sobre un Estado.

Se elaboraron los diagramas de equipamiento y las gráficas de temperatura máxima, mínima, promedio mensual del aire y precipitación mensual para cada Estado de la República. De igual manera para los municipios con mayor cantidad de unidades de producción de cada Estado. Esto se realizó para entender qué tipo de control se necesita, de manera general, para los invernaderos en cada lugar. Además, se completó la información con las recomendaciones de von Zabeltitz (2011) sobre el tipo de estructura de los invernaderos en los diferentes tipos de clima.

El único criterio que se cambió fue el umbral para luz artificial debido a que el valor de $2.2 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ se estableció para invernaderos de cubierta de vidrio. Debido a la degradación del plástico con los años el umbral se cambió a $3.3 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$.

No se obtuvieron datos de humedad relativa por lo que no se pudo concluir sobre el tipo de sistema de enfriamiento.

Los datos de la cantidad de superficie total en invernaderos y la participación de cada uno de los Estados en la superficie total, así como los más relevantes para este sector se obtuvo del Atlas Agroalimentario (SAGARPA, 2013).

2.3 Resultados y discusión

Existen en la actualidad 20 675 unidades de cultivo protegido en México, el 68.5% del total, se encuentran en operación y sólo el 56.7% de ellas están en buenas condiciones (SAGARPA, 2013).

La clasificación de nivel tecnológico de los invernaderos es un tema aún no resuelto, por una parte la clasificación simple de baja, media y alta tecnología no provee información adicional para entender el tipo de invernadero ideal en cada escalón. Por otra parte, en el mercado hay una diversidad de equipos para control de invernaderos pudiendo tener en un invernadero sencillo un equipo de control sofisticado complicando la clasificación. No es parte de este estudio proveer de una propuesta de clasificación para el nivel tecnológico en invernaderos por lo que se usará la clasificación (Cuadro 2) propuesta por García et al. (2011).

Las entidades con mayor participación nacional (Figura 1) por superficie en la agricultura protegida (en porcentajes) son: Sinaloa (19.5%), Baja California (10.9%), Estado de México (9.9%), Jalisco (13.6%) y Chihuahua (6.1%) (SAGARPA, 2013).

Cuadro 2. Clasificación del nivel tecnológico en invernaderos (García et al., 2011)

	Nivel tecnológico		
	Alta tecnología	Tecnología media	Baja tecnología
Tipo de Construcción	Invernaderos	Invernaderos de plástico	Invernaderos de plástico o malla sombra.
Instalaciones incluidas	Hidropónia, riego por goteos con fertilizadores, control de clima computarizado, fertilización, calefacción por tubos radiantes, pantallas térmicas, instalación de CO ₂ , certificación de calidad.	Hidropónia, control de clima manual o compitarizado por apertura de ventilas, calefacción por calentadores aéreos.	Sin hidropónia. Sin control de clima.

Otros Estados con menor cantidad de superficie en agricultura protegida, pero caracterizados por altos niveles de tecnología (Cuadro 2) son: Coahuila, Guanajuato, Michoacán, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas (García et al., 2011).



Figura 1. Entidades con mayor participación por superficie en agricultura protegida nacional (porcentaje).

A continuación se presentan las gráficas de requerimientos de control de clima para los 5 Estados con mayor participación por superficie en el país (Figura 1).

En la Figura 2 se muestra la radiación total y temperatura promedio para los Estados de Jalisco, México y Sinaloa. Jalisco tiene un clima predominante cálido subhúmedo (Aw) por lo que las temperaturas a lo largo del año se encuentran entre los 16 y 25°C. La

radiación solar total es superior a los 500 MJ/m²/mes durante todo el año. Según los criterios de requerimientos presentados en la introducción, los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre (en especial durante verano) se requiere de enfriamiento artificial para reducir la temperatura del aire dentro de los invernaderos, el resto del año, especialmente en invierno, basta con tener ventilación natural para mantener una temperatura en un rango aceptable para la mayoría de los cultivos. No se requiere de luz artificial para este Estado. El Estado de México tiene un clima predominante templado subhúmedo (Cw) y sus temperaturas a lo largo del año se encuentran entre los 11 y 18°C. La radiación promedio es superior a los 480 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial. El mes de enero y tal vez diciembre, presentan temperaturas muy cercanas o por debajo a los 12°C por tanto se necesita de calefacción durante este período, el resto del año basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura dentro del invernadero. Sinaloa tiene un clima predominante semiárido y árido (Bs), las temperaturas a lo largo del año van de los 18 a 30°C. La radiación es superior a los 400 MJ/m²/mes por lo que no requiere de luz artificial. Los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre presenta temperaturas excesivas (verano especialmente) por lo que es recomendable no cultivar durante este período dado que mantener una temperatura por debajo de los 27°C puede ser muy costoso. Los meses de abril y noviembre, la temperatura se reduce drásticamente y basta con enfriamiento artificial para poder cultivar. El resto del año, lo que corresponde a invierno, es suficiente tener ventilación natural para poder cultivar.

En la Figura 3 se muestra la radiación y temperatura mensual promedio para los Estados de Baja California y Chihuahua. Baja California tiene un clima predominante muy árido (BW), las temperaturas durante todo el año se encuentran entre los 13 y 28°C. La radiación

promedio es superior a los 300 MJ/m²/mes siendo probable que se necesite de luz artificial durante diciembre.

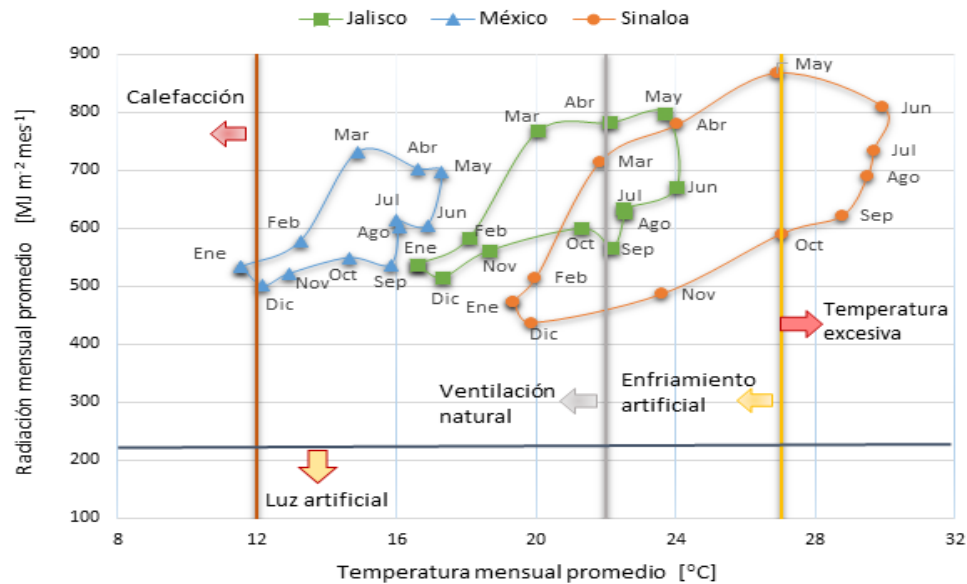


Figura 2. Radiación solar total mensual y temperatura mensual promedio para los Estados de México (línea azul), Jalisco (línea verde), y Sinaloa (línea anaranjada).

El mes de agosto tiene temperaturas excesivas por lo que no se recomienda cultivar durante este mes, los meses de junio, julio y septiembre requiere de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro del invernadero, el resto del año, en especial durante el invierno, basta con tener ventilación natural para enfriar el invernadero. Chihuahua tiene un clima predominante muy árido (BW), con temperaturas en el rango de 9 a 27°C. La radiación es superior a los 390 MJ/m²/mes por lo que no necesita de luz artificial. Durante el invierno, en los meses de enero y diciembre se presentan temperaturas promedio por debajo de los 10°C requiriendo de calefacción. Los meses de febrero, marzo, octubre y noviembre basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura dentro del

invernadero. Los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, principalmente en verano, se necesita de enfriamiento artificial para poder cultivar dentro del invernadero.

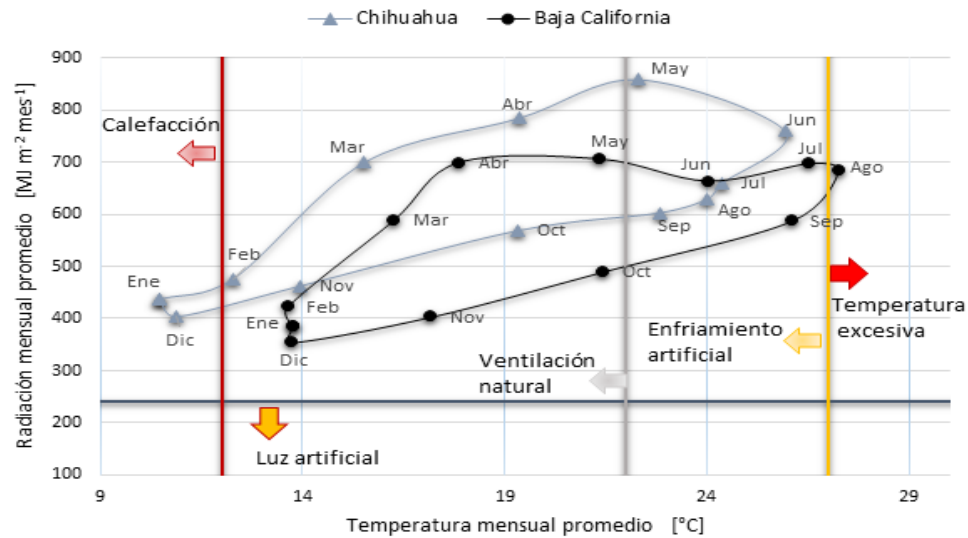


Figura 3. Radiación solar total mensual y temperatura mensual promedio para los Estados de Baja California (línea negra) y Chihuahua (línea gris).

En la Figura 4 se muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas mensuales para los Estados de Jalisco, México y Sinaloa. Se observa una notoria diferencia entre los tres Estados, Sinaloa tiene mayores temperaturas, seguido de Jalisco y por último el Estado de México. Las temperaturas máximas de Sinaloa se encuentran entre los 26 a 37°C, las temperaturas mínimas entre los 10 y 25°C. Las temperaturas máximas de Jalisco se encuentran entre los 25 y 34°C, las temperaturas mínimas entre los 6 y 16°C. Por último las temperaturas máximas de México están entre los 19 y 25°C, las temperaturas mínimas entre los 4 y 10°C. Sinaloa y Jalisco presentan mayores precipitaciones que México, sin embargo la temporada de lluvias de este último es más extensa. Sinaloa presenta precipitaciones en los meses de junio a octubre con un máximo de 209 mm en agosto. Jalisco por otra parte presenta lluvias de junio a octubre con un máximo de 208 mm en

julio. México presenta lluvias en los meses de mayo a octubre con un máximo de 165 mm en julio. La presencia de lluvias de Sinaloa se debe a que en parte tiene un clima cálido subhúmedo.

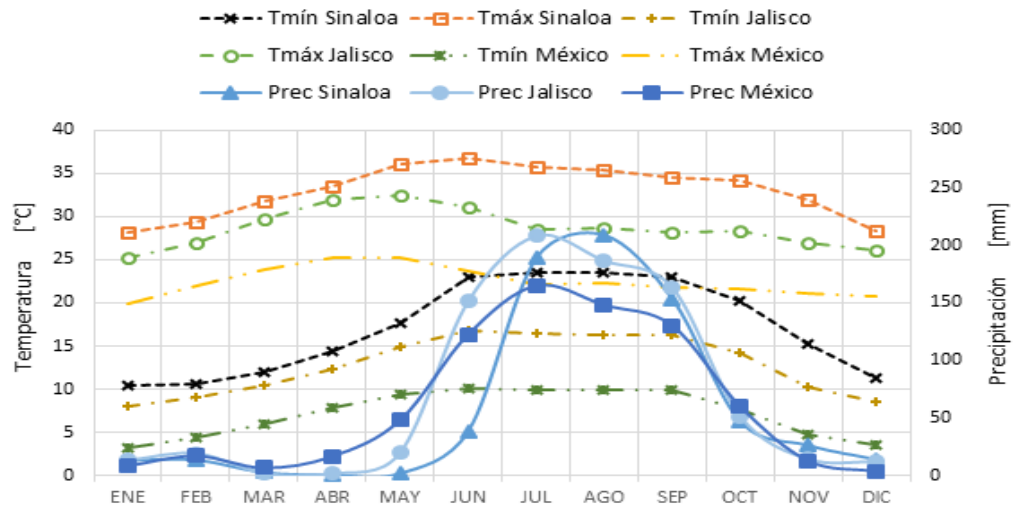


Figura 4. Precipitación y temperaturas máximas y mínimas para los Estados de Jalisco (líneas en verde), el Estado de México (líneas en amarillo) y Sinaloa (líneas en anaranjado).

Para el caso de Baja California y Chihuahua el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas es similar para ambos Estados, sin embargo es Chihuahua quien presenta temperaturas mínimas menores a las de Baja California, especialmente en invierno. A pesar de que ambos Estados tienen climas secos, Chihuahua tiene mayores precipitaciones a las de Baja California. La temporada de lluvias de Chihuahua se extiende del mes de junio a octubre con un máximo de 140 mm en el mes de julio. Baja California no presenta precipitaciones mayores a los 55 mm y es cero de los meses de marzo a septiembre (Figura 5).

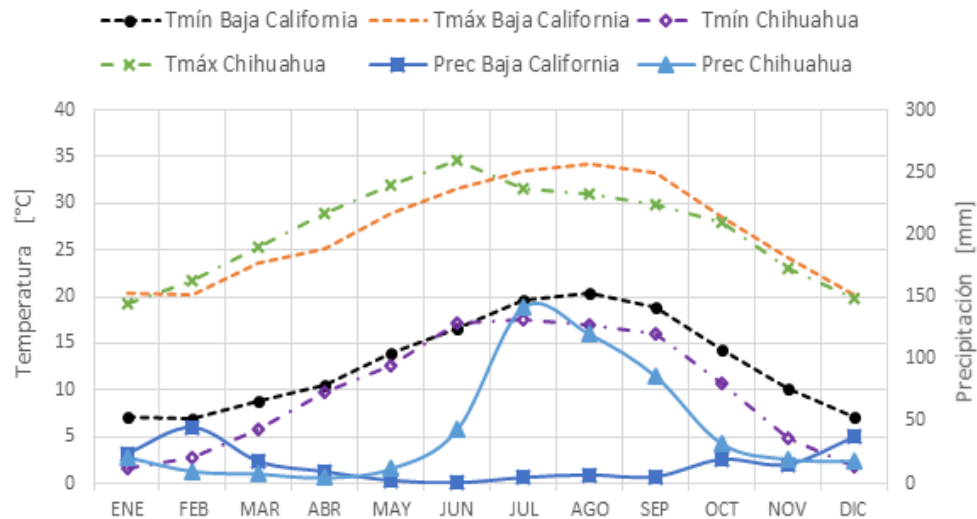


Figura 5. Precipitación y temperaturas máximas y mínimas para los Estados de Baja California (líneas en anaranjado) y Chihuahua (líneas en verde).

Los períodos de precipitación pueden ser muy útiles para considerar las acciones que se realizan a la cubierta del invernadero. Lluvias torrenciales pueden ocasionar la opacidad de la cubierta, crecimiento de algas, rotura de la cubierta y congelamiento, si las temperaturas mínimas son bajas, se debe considerar limpieza de canales, estiramiento del plástico y limpieza de las cubiertas. Además, un período de grandes precipitaciones puede servir para captar agua y usarla para la calefacción o riego.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas exteriores mensuales promedio para los Estados de Jalisco, México y Sinaloa. Este tipo de gráficas nos permite visualizar qué tipo de acción de control debe ejecutarse en función de las temperaturas, funciona como un complemento a las Figuras 2 y 3 y evitan el sesgo que pueden generarse por considerar sólo la temperatura promedio. El Estado de México es el que presenta menores temperaturas de los tres, Sinaloa y Jalisco muestran temperaturas similares. Para el Estado de México en todo el año se puede requerir de

calefacción y enfriamiento mediante ventilación natural. Jalisco requiere de calefacción para los meses de enero, febrero y diciembre si las temperaturas son menores a los 10°C, para estos mismos meses puede bastar con ventilación natural si las temperaturas máximas son menores a los 27°C. Sinaloa puede requerir de calefacción para los meses de enero y diciembre, el resto del año se necesita de enfriamiento artificial según como lo muestran sus temperaturas máximas, incluso puede tener temperaturas excesivas durante el verano.

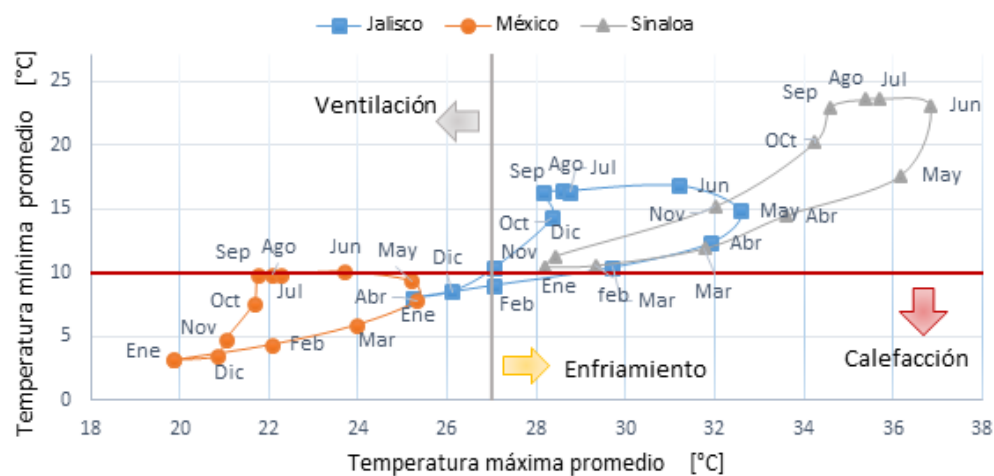


Figura 6. Temperaturas máximas y mínimas exteriores mensuales promedio para los Estados de Jalisco (líneas en azul), México (líneas en anaranjado) y Sinaloa (líneas en gris).

En la Figura 7 se muestra el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas exteriores mensuales promedio para los Estados de Baja California y Chihuahua. Las temperaturas máximas de ambos Estados son muy similares sin embargo Chihuahua presenta menores temperaturas mínimas. Baja California puede requerir de calefacción para los meses de invierno, enero, febrero y diciembre dado que las temperaturas mínimas pueden estar por debajo de los 10°C. Los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre tienen temperaturas máximas menores a 27°C por lo que basta con ventilación

natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos. El resto del año, se requiere de enfriamiento artificial dadas las altas temperaturas. En agosto y septiembre pueden darse temperaturas excesivas limitando la posibilidad de cultivar en estos meses. Chihuahua presenta temperaturas mínimas menores a los 10°C en los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre por lo que es posible que durante estos meses se requiera de calefacción, además estos mismo meses, las temperaturas máximas son menores a los 27°C por lo que bastaría con ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos, el resto del año se necesita de enfriamiento artificial.

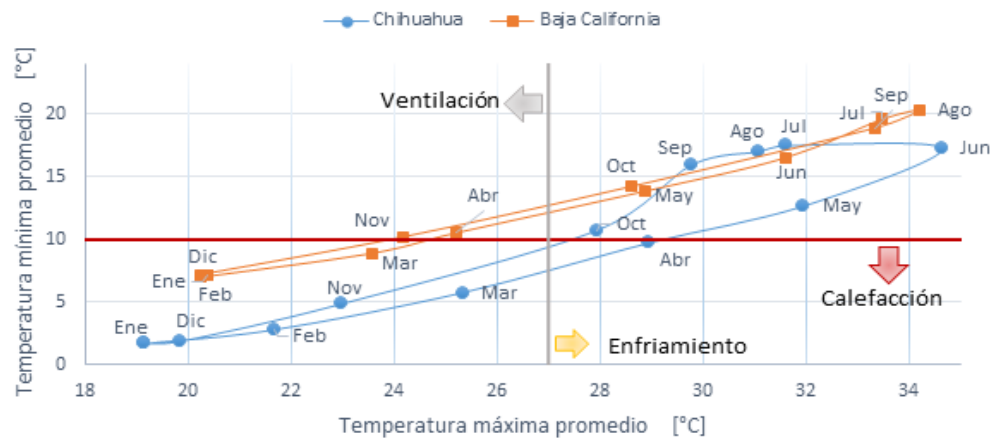


Figura 7. Temperaturas máximas y mínimas exteriores mensuales promedio para los Estados de Baja California (línea en anaranjado) y Chihuahua (línea en azul).

Comparando lo que se obtuvo de los diagramas, gráficas y las recomendaciones sobre las estructuras que deben contener los invernaderos para diferentes climas se obtiene lo siguiente:

2.3.1 Estado de Baja California

Tiene un clima seco y muy seco (Bs y Bw) extendido en su territorio. Siguiendo los diagramas y las gráficas, los invernaderos deben contar con ventilación natural útil la mitad del año, el resto se necesita de enfriamiento artificial para reducir la temperatura del aire dentro del invernadero. Pueden presentarse temperaturas excesivas durante el verano por lo que es probable que no se use el invernadero durante estos meses. Además deben de contar con ventilas que se pueden cerrar durante la noche. Se puede usar enfriamiento evaporativo como sistema de enfriamiento artificial aunque debe investigarse el comportamiento de la humedad relativa del aire exterior al invernadero para poder concluir sobre este aspecto. Se necesita un sistema de calefacción durante el invierno debido a las bajas temperaturas en este período. Si se va a utilizar una cubierta de vidrio no se requiere de luz artificial; sin embargo si se quiere utilizar una cubierta de plástico se necesita considerar luz artificial en diciembre y enero (considerando la pérdida en la transmisividad de la cubierta por el paso de los años).

2.3.2 Estado de Chihuahua

Tiene un clima seco y muy seco (Bs y Bw) en su mayoría. Siguiendo los diagramas y gráficas, los invernaderos deben contar con calefacción, ventilación natural y enfriamiento artificial, sobre todo durante el verano. Debe tener ventilas rígidas que se pueden cerrar durante la noche. El enfriamiento evaporativo es una opción para reducir las temperaturas dentro de los invernaderos sin embargo se necesita de datos sobre la humedad relativa del aire exterior al invernadero para concluir sobre este tipo de sistemas.

Si se va a utilizar una cubierta de vidrio no se requiere de luz artificial; sin embargo si se quiere utilizar una cubierta de plástico se necesita considerar luz artificial en diciembre y enero (considerando la pérdida en la transmisividad de la cubierta por el paso de los años).

2.3.3 Estado de Jalisco

Tiene un clima cálido subhúmedo (Aw) en la mayor parte de su territorio, siguiendo los diagramas y gráficas, los invernaderos requieren de ventilación natural (durante el invierno) y enfriamiento artificial (durante el verano), además de necesitar calefacción en invierno. Tiene precipitaciones fuertes durante el verano y se recomienda que se tengan canaletas para drenar el agua de lluvia. Si la humedad relativa exterior es baja se pueden instalar equipos de enfriamiento evaporativo o sistemas de nebulización, sin embargo no se puede concluir sobre este punto.

2.3.4 Estado de México

Tiene un clima templado subhúmedo (Cw) presente en la mayor parte de su territorio. Siguiendo los diagramas y las gráficas, los invernaderos necesitan de calefacción durante el invierno. El resto del año basta con ventilación natural para reducir la temperatura interna del invernadero, además se recomienda usar ventilas que puedan cerrarse. La captación de agua es posible durante el período de lluvias. No se requiere de luz artificial aun cuando se ponga una cubierta de plástico.

2.3.5 Estado de Sinaloa

El clima que presenta es principalmente seco (Bs). Siguiendo los diagramas y las gráficas los invernaderos necesitan de ventilación natural y enfriamiento artificial. Pueden presentarse períodos de temperaturas excesivas en el Estado provocando una limitante para tener cultivos dentro de los invernaderos. Dada las diferencias entre las temperaturas diarias se requiere de ventilas que puedan cerrarse durante la noche. Se puede usar enfriamiento evaporativo como sistema de enfriamiento aunque se requiere de datos de la humedad relativa del aire en el exterior del invernadero para poder concluir sobre este punto. No se necesita de luz artificial para este Estado.

En el Apéndice I se encuentran las gráficas de cada uno de los Estados del país y de los municipios con mayor cantidad de unidades de producción dentro de estos. Debido a la cantidad de gráficas este Apéndice sólo está disponible en la versión en disco.

2.4 Conclusiones

En general los requerimientos de control coinciden con las recomendaciones presentadas por von Zabeltitz (2011) para cada invernadero en los diferentes climas.

Se requiere de una mayor cantidad de datos a fin de concluir sobre cada Estado o municipio en lo referente a sus requerimientos de control. Tomar como base las gráficas de cada Estado para una localidad en específico puede ser una primera aproximación, sin embargo, es mejor si se consideran los datos del lugar en donde se quiere construir un invernadero y se construyen las gráficas de requerimientos de control de clima.

La falta de datos de humedad relativa mensual no permite concluir sobre los sistemas de enfriamiento.

No se encontraron trabajos similares donde se analicen todos los Estados del país y donde se observe cómo cambian los requerimientos para cada lugar aún con el mismo tipo de clima.

A pesar de que en la mayoría de los Estados no se presentó la necesidad de implementar luz artificial, no quiere decir que no se requiera como estrategia para un mayor crecimiento y calidad en ciertos cultivos.

CAPÍTULO 3

El modelo matemático como base de un simulador de clima para invernaderos

3.1 Introducción

Los modelos matemáticos de un sistema nos permiten aproximar, tanto como se quiera y según el objetivo del modelo, la representación del comportamiento de los elementos que componen el sistema en estudio.

La dinámica del clima de los invernaderos es compleja. Esto se debe a las interacciones entre los parámetros, por ejemplo la temperatura del aire y la humedad relativa. Cuando se perturba cualquiera de estas variables, se provoca un cambio significativo sobre la otra.

Definir el objetivo de un modelo matemático es una etapa crucial en la construcción del mismo. Sin embargo, es necesario verificar si ya existe algún modelo que pueda utilizarse como base y que este tenga un comportamiento aceptable para nuestro fin. Generar un modelo conlleva a condensar una gran cantidad de conocimientos sobre el sistema y considerar los procesos que intervienen en este.

En esta sección se presenta un modelo matemático simple, para simular el comportamiento de la dinámica del clima de un invernadero, considerando la temperatura del aire, la temperatura de la masa térmica, la humedad relativa y la influencia del cultivo.

3.2 Materiales y métodos

El modelo está compuesto por tres ecuaciones diferenciales y que describen el comportamiento del clima en el invernadero. Además, se incluye otra ecuación que

describe el crecimiento del cultivo, simulando la biomasa acumulada, en este caso para un cultivo de lechuga. A continuación se describe cada uno de los modelos.

3.2.1 El modelo de clima

El modelo usado para simular el clima fue desarrollado por Ruíz-García (2014a), se le hicieron algunas modificaciones a la forma en la que se modela la evapotranspiración.

El modelo implementado consta de tres variables de estado: la temperatura del aire (T_g), la temperatura de la masa térmica (T_m) y la humedad específica del aire (w_g).

El segundo estado se refiere a la forma en la que actúan el aire contenido en el invernadero junto con los sólidos dentro del mismo funcionando como una masa térmica (Ruíz-García, 2014).

Las tres ecuaciones diferenciales que explican el comportamiento de las variables de estado son las siguientes:

La tasa de cambio de la temperatura del aire:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{K_g} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p] \quad (1)$$

Donde K_g es la capacidad virtual de calor del invernadero, q_{rg} es la energía solar absorbida por el invernadero, q_v es el flujo de calor por infiltración y ventilación, q_{cc} es el flujo de calor por conducción y convección a través de la cubierta, q_{mg} es el calor intercambio entre la masa térmica y el aire interior del invernadero, q_h es el flujo del

sistema de calefacción, λ es el calor latente de vaporización del agua, E_p es la tasa de transpiración de las plantas.

La tasa de cambio de la temperatura de la masa térmica:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{K_m} [q_{rm} - q_{mg} - q_d] \quad (2)$$

Donde K_m es la capacidad virtual de calor de la masa térmica, q_{rm} es la energía almacenada por la masa térmica durante el día, q_d es la pérdida de calor de la masa térmica hacia el subsuelo.

La tasa de cambio del contenido de humedad del aire:

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} [E_p - E_v] \quad (3)$$

Donde A_g es el área del suelo, ρ_a es la densidad del aire, V_g es el volumen del invernadero, E_v es el vapor de agua removido por infiltración y ventilación.

Las variables de salida son la temperatura del aire (T_g), temperatura de la masa térmica (T_m), humedad relativa (w_g) y biomasa (w_b). Las variables de entrada son radiación exterior (I_o), temperatura del aire exterior (T_o), humedad relativa exterior (W_o), velocidad del viento (v) y las variables de control son el área de apertura de las ventanas laterales y cenitales (A_g/V_g).

3.2.2 El modelo de cultivo

Se implementó el modelo propuesto por Seginer et al. (1991) de una variable de estado para describir el comportamiento del cultivo dentro del invernadero.

La tasa de cambio de la acumulación del peso seco (biomasa) se expresa como:

$$\frac{dD_m}{dt} = f_r * L_{inter} - M_r * D_m, \quad (4)$$

donde f_r es la tasa fotosintética de un dosel cerrado, L_{inter} es la fracción por la que debe multiplicarse la tasa fotosintética, si el cultivo no cubre completamente el suelo, M_r es la tasa de respiración de mantenimiento de una unidad de materia seca del tejido, y D_m es la materia seca acumulada del cultivo.

3.2.3 El modelo en conjunto

Finalmente, el modelo en conjunto consta de cuatro variables de estado. Las entradas del modelo son la temperatura del aire fuera del invernadero (T_o), velocidad del viento exterior (v), humedad relativa exterior (w_o), área de ventanas (A_g/V_g), flujo de calefacción (q_h) y la radiación solar incidente (I_o).

Las variables de salida del modelo son iguales a las variables de estado para el caso de la temperatura del aire (T_g), temperatura de la masa térmica (T_m) y la biomasa (w_b); la humedad específica (w_g) se transforma en humedad relativa (W_g) como variable de salida.

El modelo se representa en espacio de estados y se detalla en el Apéndice II.

3.2.4 Los datos

Todos los datos utilizados en para implementar las simulaciones, el proceso de calibración y validación del modelo se obtuvieron de experimentos realizados en un invernadero ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, México, con una ubicación de 19°29'N y longitud 98°53'O a una altitud de 2240 m (Ruíz-García,

2014). La estructura del invernadero es de tipo sierra formado por tres naves, con orientación SO-NE, con 75.5 m de largo por 25.5 m de ancho, una altura de la cumbrera de 6.48 m y un volumen de 1 1295.56 m³. La ventilación del invernadero se efectuó por medio de ventanas cenitales y laterales que se abren al enrollar la película de polietileno por medio de motoredutores. Las ventanas cuentan con una malla anti-insectos con una porosidad de 0.38m² m⁻². La cubierta es una película de polietileno con tratamiento ultravioleta de 180 μ m de espesor.

3.2.5 Implementación de los modelos

Ambos modelos se programaron en el ambiente Matlab-Simulink (The Mathworks INC., Natick, MA) con funciones en C para hacer eficiente la simulación.

3.2.6 Evaluación de los modelos

Para determinar qué tipo de situación es la más conveniente para el simulador se consideraron las estadísticas de Sesgo (Bias), RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio), MAE (Error Medio Absoluto) y EF (Eficiencia de modelación).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Comportamiento del modelo de clima

El modelo de clima por sí solo puede simular las condiciones de la temperatura del aire (T_g), la temperatura de la masa térmica (T_m) y la humedad relativa (w_g), sin embargo en

una situación real, el invernadero tiene un cultivo, el cual responde a las condiciones climáticas y se ve afectado por las mismas.

En una primera etapa se analiza el comportamiento del modelo del clima del invernadero, sin incluir la influencia del cultivo. La simulación se realizó para un intervalo de cuatro días. Los parámetros de la simulación incluyen: tolerancia relativa 1×10^{-9} y tolerancia absoluta 1×10^{-12} , método de integración Runge-Kutta de cuarto orden de paso variable.

Como condiciones iniciales se considera el primer dato de temperatura del aire fuera del invernadero ($T_{g0} = T_{o0}$) para la temperatura del aire dentro del invernadero y la humedad absoluta fuera del aire fuera del invernadero ($w_{g0} = w_{o0}$) para la humedad absoluta interna. Para el caso de la temperatura de la masa térmica se calculó el valor inicial con las ecuaciones del modelo considerando la temperatura y la humedad relativa fuera del invernadero ($T_{m0} = T_{m0}(T_o, w_o)$).

De los resultados de la simulación, para la temperatura del aire (Figura 8), se observa que el primero y último día las mediciones y el modelo tienen un comportamiento muy similar, pero en el segundo y tercer día el modelo tiende a sobreestimar los valores.

Por otro lado, el comportamiento de la temperatura de la masa térmica (Figura 9) es marcadamente diferente para los cuatro días, subestimando en la mayoría de los casos la temperatura.

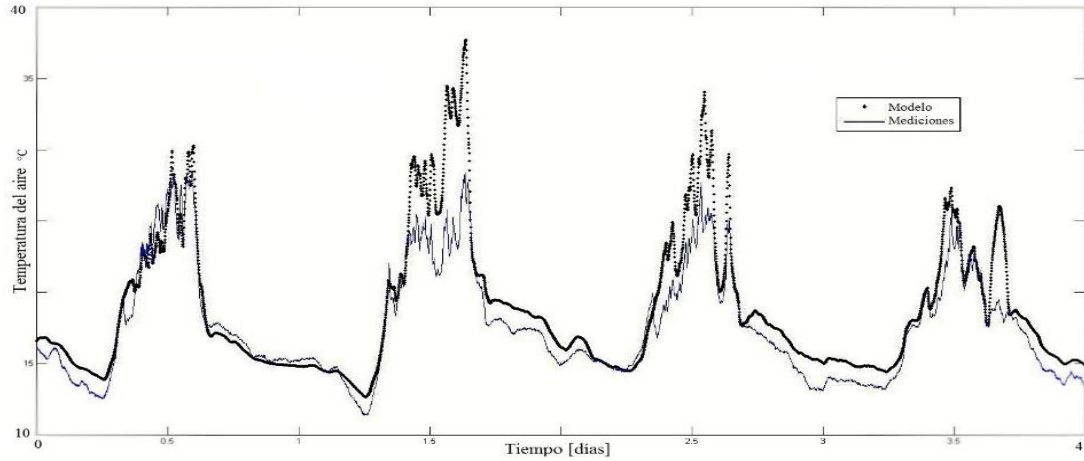


Figura 8. Temperatura del aire (°C) dentro del invernadero durante cuatro días de simulación con el modelo (línea continua azul) comparada con las mediciones (puntos en negro).

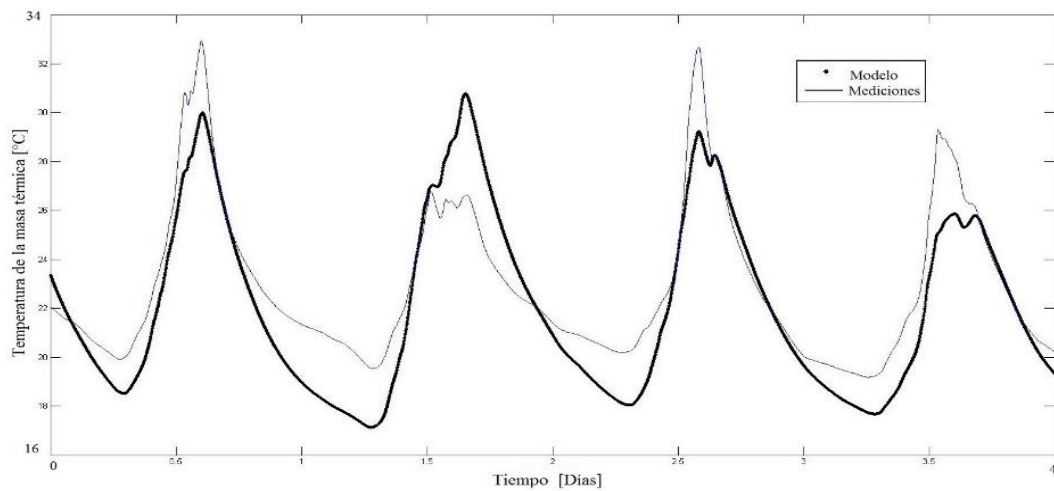


Figura 9. Temperatura de la masa térmica (°C) dentro del invernadero durante cuatro días de simulación con el modelo (línea continua azul) comparada con las mediciones (puntos en negro).

Para el caso de humedad relativa (Figura 10), el comportamiento es muy similar en los cuatro días entre las mediciones y los resultados del modelo.

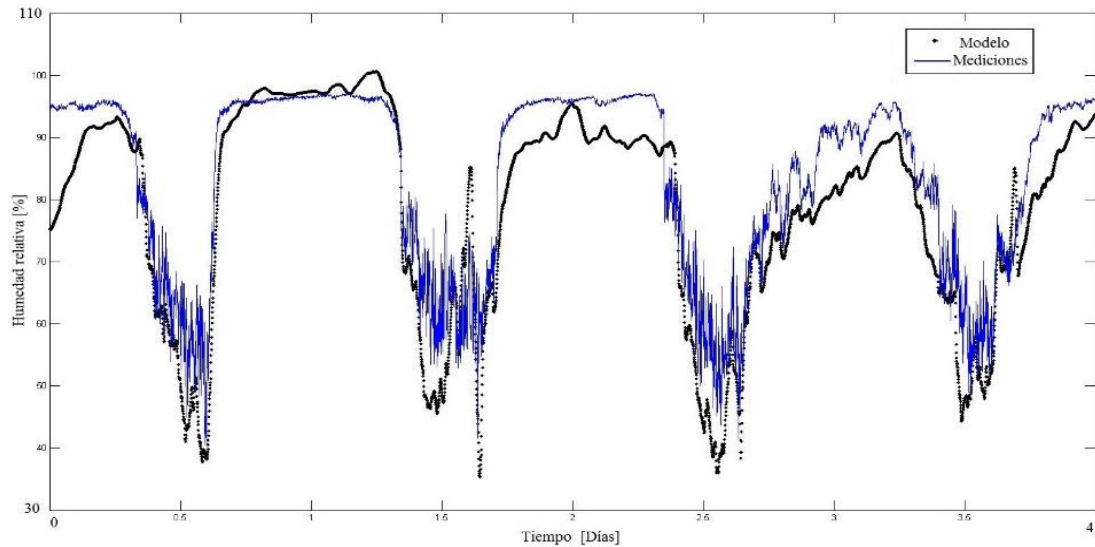


Figura 10. Humedad relativa (%) del aire del invernadero durante cuatro días de simulación con el modelo (línea continua azul) comparada con las mediciones (puntos en negro).

En general el comportamiento del modelo, de acuerdo a las tres variables simuladas, es muy similar a los obtenidos con mediciones. Numéricamente hay diferencias entre los valores medidos y los simulados en los tres casos. Sin embargo, para tener un mejor resultado en la simulación, es necesario calibrar el modelo.

3.3.2 Comportamiento del modelo de clima y de cultivo como sistemas seriados

Una forma de simular el comportamiento del invernadero es considerar los modelos del clima y del cultivo como sistemas independientes, es decir, las variables de entrada afectan a los dos sistemas, sin embargo la salida de temperatura del aire del modelo de clima funciona como entrada al modelo de cultivo.

Los parámetros y el tiempo de simulación son los mismos que en la etapa anterior, se usaron los mismos datos de entrada y se compararon con las mediciones realizadas.

La temperatura del aire resultado de este nuevo modelo no muestra diferencias con la temperatura simulada con el modelo anterior sin embargo ambos tienen comportamientos diferentes a las mediciones (Figura 11a y 11b).

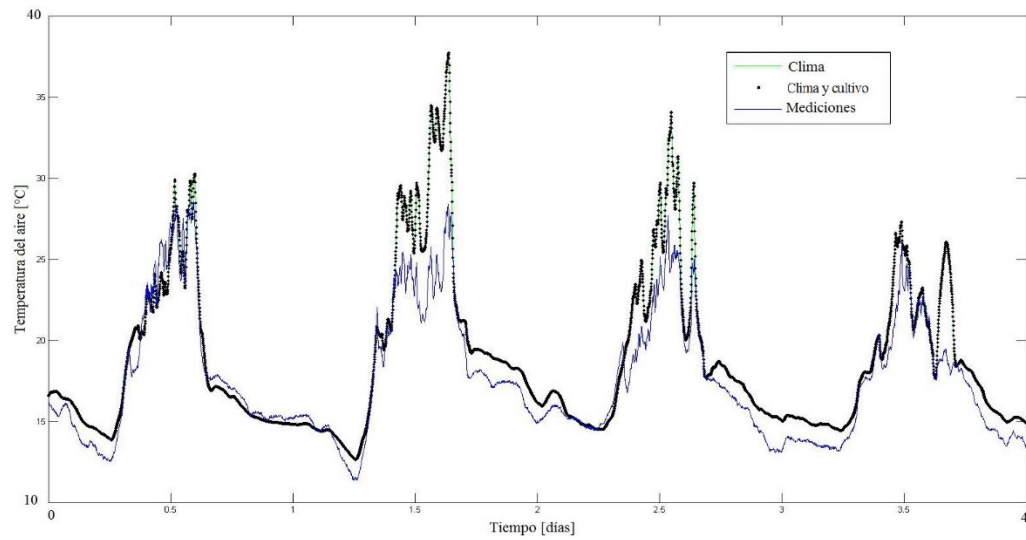


Figura 11a. Temperatura del aire (°C) con el modelo de clima (línea continua verde), de clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro) y las mediciones (línea continua en azul).

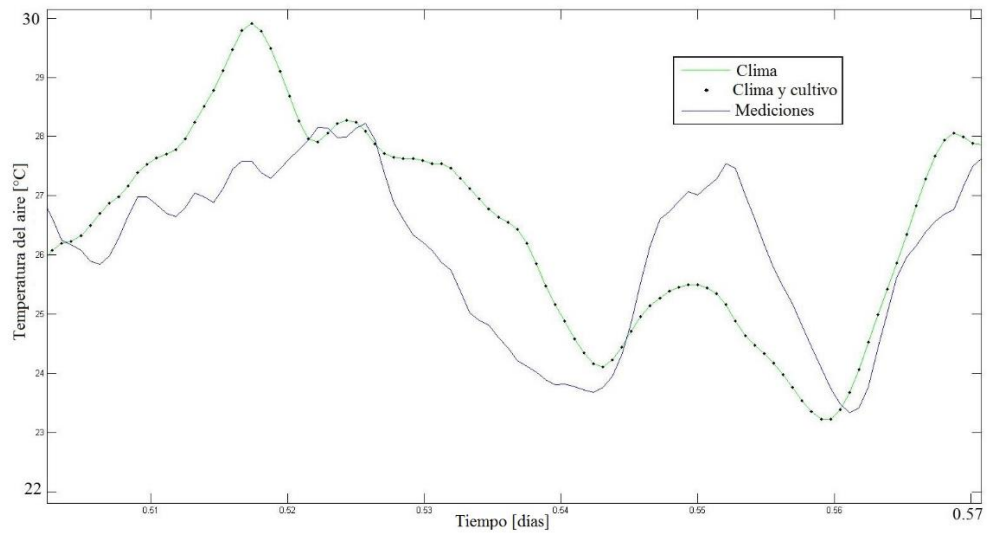


Figura 11b. Acercamiento de la Figura 11a.

De igual manera, la temperatura de la masa térmica (Figura 12a y 12b) y la humedad relativa (Figura 13) simuladas con este modelo no muestra diferencias con el anterior pero si con las mediciones.

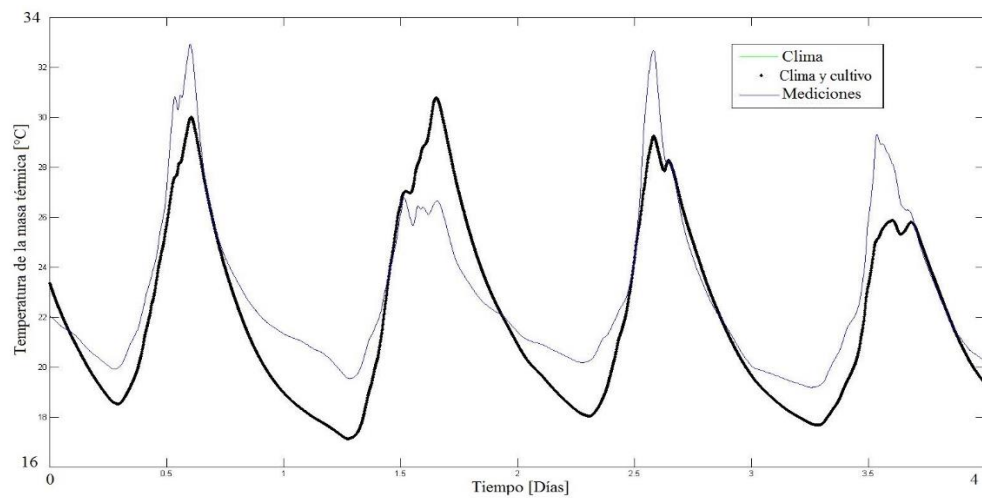


Figura 12a. Temperatura de la masa térmica (°C) con el modelo de clima (línea continua verde), de clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro) y las mediciones (línea continua en azul).

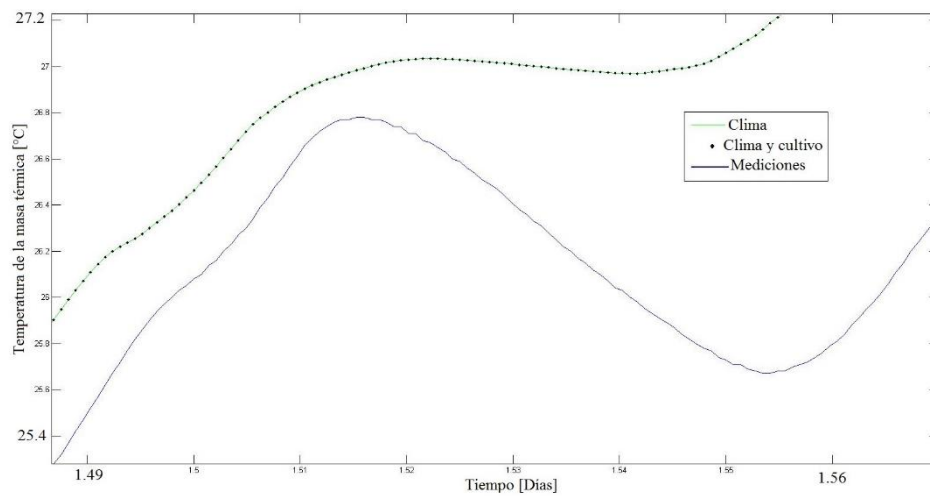


Figura 12b. Acercamiento de la Figura 12a.

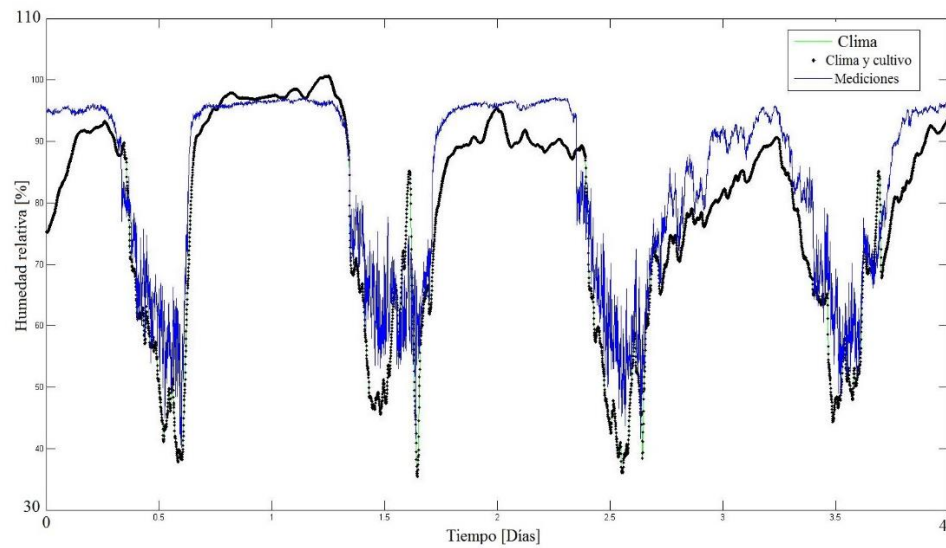


Figura 13a. Humedad relativa (%) del aire dentro del invernadero con el modelo de clima (línea continua verde), de clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro) y las mediciones (línea continua en azul).

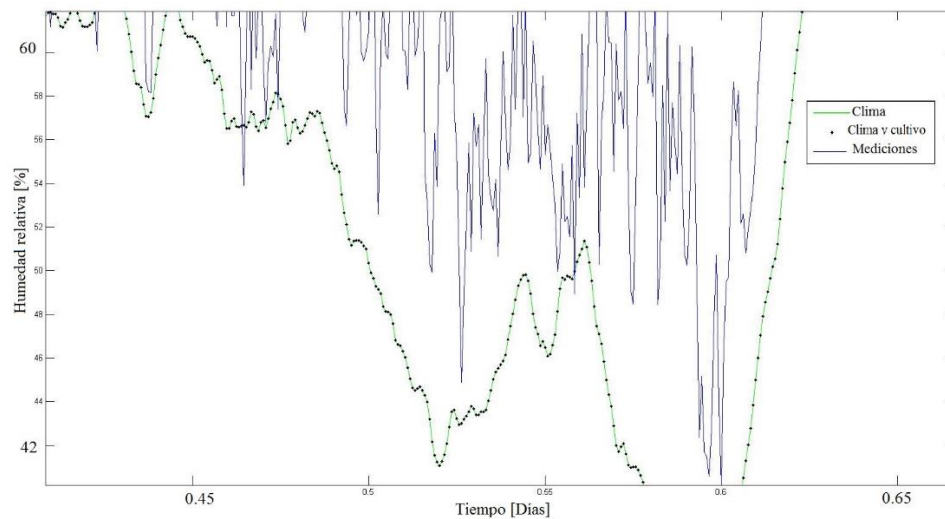


Figura 13b. Acercamiento de la Figura 13a.

En la Figura 14 se muestra la materia seca total (kg m^{-2}) para los cuatro días de simulación. No se tienen datos de biomasa para poder comparar lo que produce el modelo con mediciones, sin embargo una disminución en la biomasa se puede explicar si la

temperatura y radiación son muy bajas y el cultivo necesita de valores mayores para vivir y continuar creciendo.

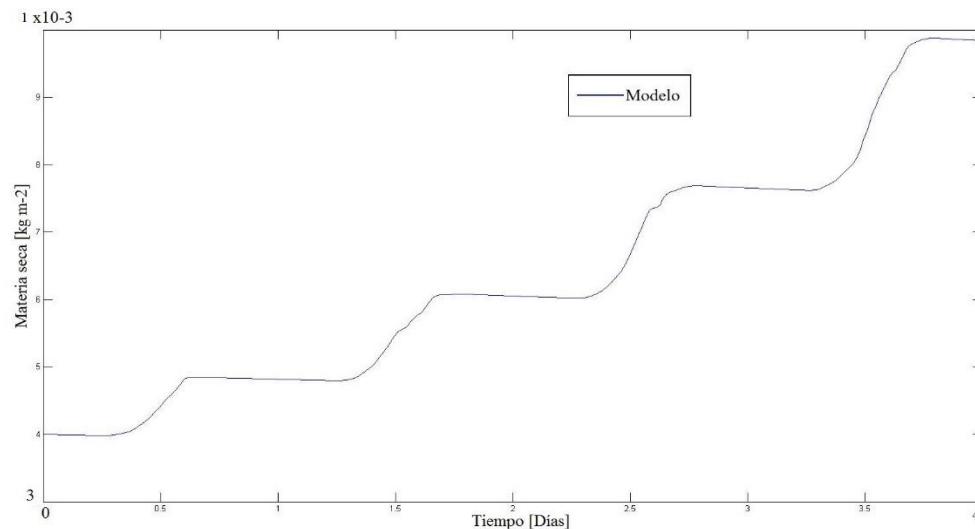


Figura 14. Materia seca (kg m^{-2}) del cultivo con del modelo de clima y cultivo como sistemas independientes.

No se presentaron diferencias entre los modelos para ninguna de las variables climáticas, esto puede explicarse por el desacoplamiento de las ecuaciones de clima y de cultivo. Al no estar relacionadas la influencia del clima resulta en una entrada al cultivo y por tanto no modifica el comportamiento del clima. Se ha usado este tipo de simulación ya que representa un ahorro en el costo computacional sin embargo como se observó no es conveniente dado que el cultivo no tiene influencia en las variables del clima dentro del invernadero y deriva en una representación pobre del sistema real.

3.3.3 Comportamiento del modelo de clima y de cultivo como un solo sistema acoplado

Dado que el cultivo está dentro del invernadero y se ve afectado por el mismo e incluso reacciona al mismo (caso de la evapotranspiración), es posible considerarlo como un solo modelo y no por separado como en el caso anterior. Este enfoque tiene la desventaja que

se deben añadir al modelo de clima las ecuaciones del modelo del cultivo y esto resultará en un sistema rígido.

Realizando una simulación para un modelo acoplado y comparándolo con el modelo desacoplado, se puede analizar el comportamiento de cada una de las variables de estado. Para el caso de temperatura del aire (Figura 15a y 15b) se observa una clara diferencia entre ambos modelos siendo mayor la temperatura en el modelo acoplado.

Para la masa térmica (Figura 16) se tiene que es mayor el valor con el modelo acoplado, la humedad relativa (Figura 17) presenta valores menores a las mediciones, finalmente la biomasa (Figura 18) presenta un valor menor en el caso de considerar el sistema acoplado. Es claro que acoplar las ecuaciones produce un cambio en el comportamiento de las variables dentro del invernadero, las diferencias se deben a que el experimento se realizó con melón y el modelo utilizado es para lechugas, por otro lado el área foliar del melón es considerablemente mayor al de la lechuga reaccionando diferente a la temperatura y humedad del aire.

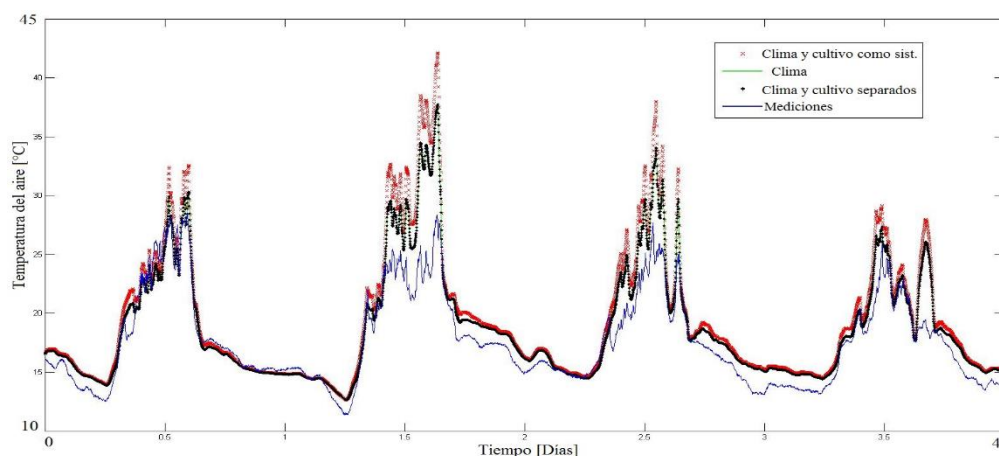


Figura 15a. Temperatura del aire (°C) con el modelo de clima (línea continua en verde), clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro), como un solo sistema (cruces en rojo) y las mediciones (línea continua en azul).

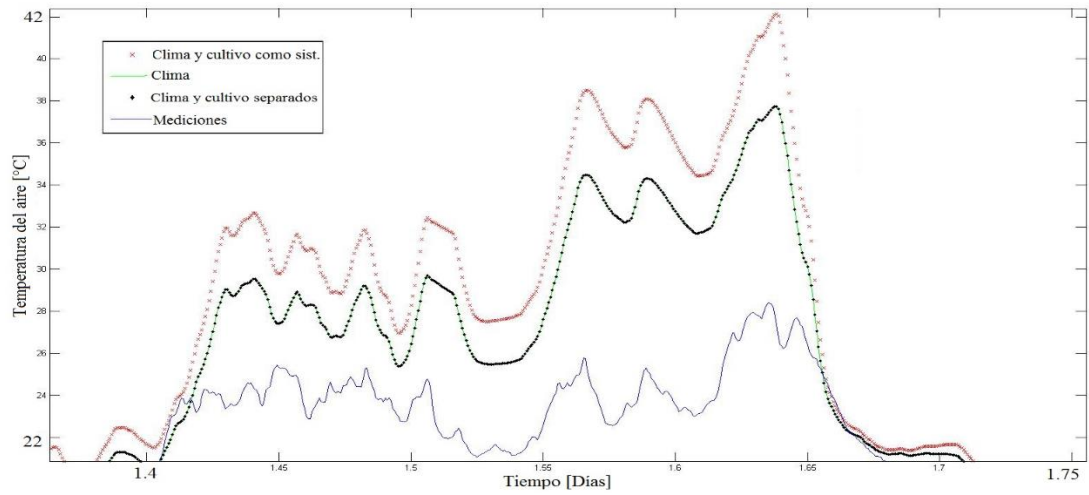


Figura 15b. Acercamiento de la Figura 15a.

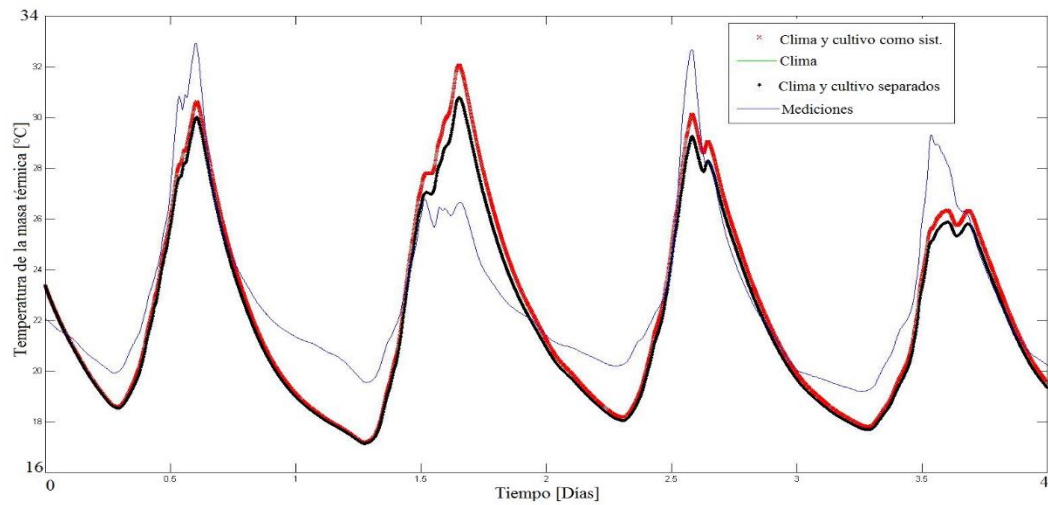


Figura 16a. Temperatura de la masa térmica (°C) con el modelo de clima (línea continua en verde), clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro), como un solo sistema (cruces en rojo) y las mediciones (línea continua en azul).

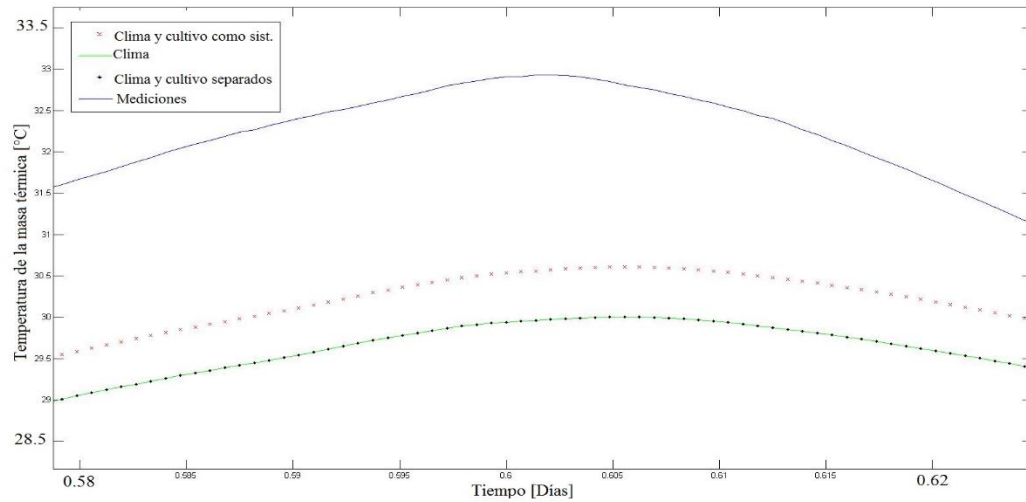


Figura 16b. Acercamiento de la Figura 16a.

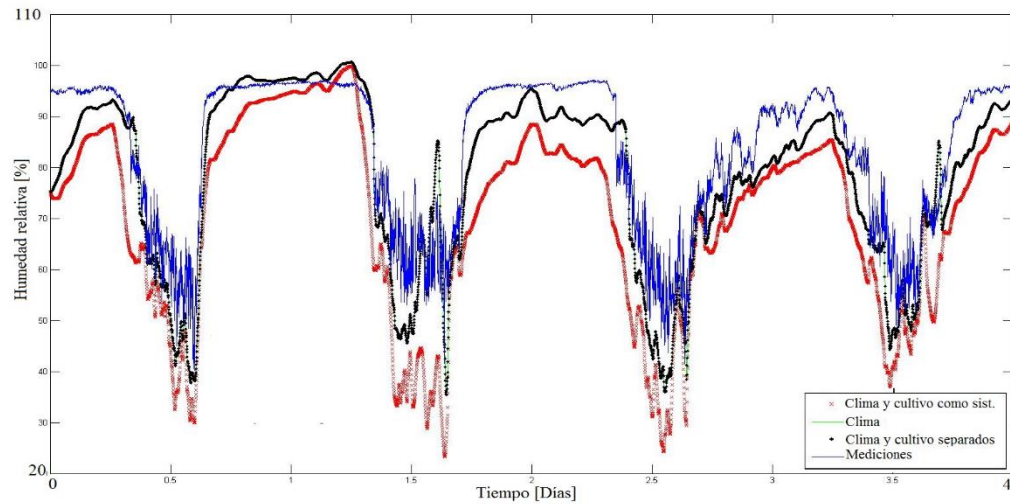


Figura 17a. Humedad relativa (%) del aire dentro del invernadero (%) con el modelo de clima (línea continua en verde), clima y cultivo como sistemas independientes (puntos en negro), como un solo sistema (cruces en rojo) y las mediciones (línea continua en azul).

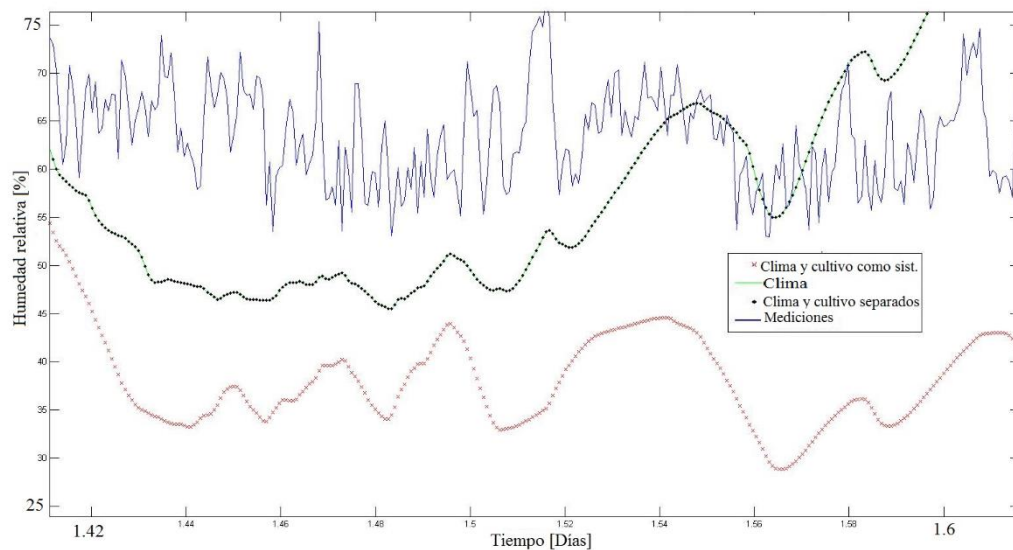


Figura 17b. Acercamiento de la Figura 17a.

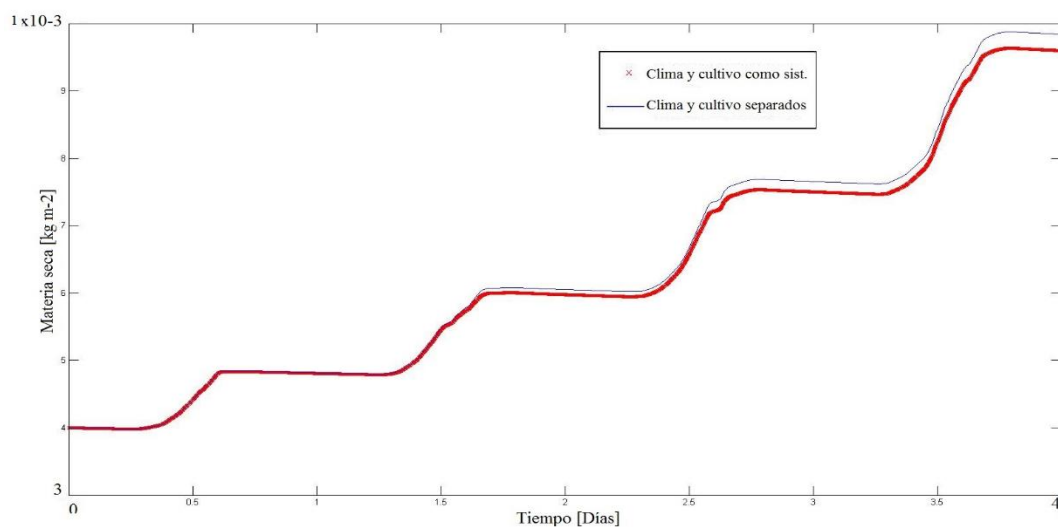


Figura 18. Materia seca total para los cuatro días de simulación de los modelos de clima y cultivo como sistemas independientes (línea continua en azul) y como un solo sistema (cruces en rojo).

A pesar de que se identifican las diferencias en los valores todos los modelos siguen la tendencia de las mediciones, lo que es deseable en un modelo. En el proceso de calibración se buscará que la diferencia sea mínima.

Hay una diferencia entre el comportamiento del modelo de clima en todos los casos comparado con los resultados obtenidos por Ruíz García (2014), esto se debe a que hasta este punto el modelo no estaba calibrado.

3.3.4 Evaluación

El Cuadro 3 muestra las estadísticas de cada uno de los modelos sin calibrar para evaluar su desempeño simulando las variables de temperatura del aire (°C), temperatura de la masa térmica (°C) y humedad relativa (%). Es fácil corroborar que el modelo de clima y cultivo como un solo sistema sobreestima la de temperatura del aire y subestima la humedad relativa y la temperatura de la masa térmica. La variable que presenta un mayor error absoluto es la humedad relativa y esto se debe a la influencia del cultivo en el comportamiento de esta variable.

Cuadro 3. Estadísticas para evaluar el desempeño de los modelos vistos en diferentes combinaciones considerando las variables de salida únicamente para el modelo de clima.

Estadística	Modelo de clima	Modelo de clima y cultivo como sistemas seriados	Modelo de clima y cultivo como un solo sistema acoplado
Temperatura del aire (°C)			
Sesgo (Bias)	-1.23	-1.23	-1.87
RMSE	2.24	2.24	3.16
MAE	1.46	1.46	1.99
EF	0.66	0.66	0.33
Temperatura de la masa térmica (°C)			
Sesgo (Bias)	0.86	0.86	0.51
RMSE	1.72	1.72	1.74

MAE	1.40	1.40	1.39
EF	0.70	0.70	0.69
Humedad relativa (%)			
Sesgo (Bias)	5.27	5.27	13.06
RMSE	8.06	8.06	15.18
MAE	6.47	6.47	13.17
EF	0.69	0.69	-0.09

3.4 Conclusiones

Es importante considerar al cultivo cuando se quiere modelar el comportamiento de un invernadero ya que este se ve afectado por el clima y, a su vez, influye en las condiciones internas del mismo.

Considerar al clima y cultivo como un solo sistema afecta cómo se comportan las variables de temperatura del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa dentro del invernadero y es una aproximación más precisa al sistema real.

El modelo de clima sigue la tendencia de las mediciones, aunque hay una diferencia entre los valores y las mediciones, por lo tanto el modelo es una buena aproximación del sistema y bastaría con realizar el proceso de calibración para mejorar su desempeño.

CAPÍTULO 4

Análisis de sensibilidad global

4.1 Introducción

De acuerdo a la definición de Saltelli (2008), el análisis de sensibilidad es: *“el estudio de cómo la incertidumbre en la salida de un modelo puede ser asignada a diferentes fuentes de incertidumbre en la entrada del modelo”*.

Se distinguen dos métodos para el análisis de sensibilidad, el local y global, cada uno de ellos con ventajas y desventajas, las cuales se describen con detalle en Saltelli (1999). La principal limitante del enfoque local es que las derivadas parciales proporcionan información solamente del punto de operación donde son calculadas, además si el modelo contiene funciones discontinuas, las derivadas no se pueden calcular (López-Cruz et al., 2012). En contraste con los métodos locales, los métodos referidos como globales consideran el rango de variación completo de las entradas (Saltelli et al., 2000). Basta con asignar una distribución de probabilidad a cada factor de entrada y realizar un muestreo sobre ellas para analizar la incertidumbre sobre la variable de salida.

Existen diversas técnicas para el cálculo de los índices asociados con la sensibilidad de cada factor de entrada, sin embargo los tres más importantes son: 1) el método de proyección (screening), clasificación basta de las entradas más influyentes entre un gran número de ellas; 2) el método de las medidas de importancia, índices de sensibilidad cuantitativos y 3) el método de exploración profunda del comportamiento del modelo, midiendo los efectos de las entradas sobre todo su rango de variación (Iooss y Lemaître, 2015).

En Iooss y Lemaître (2015) se puede encontrar una síntesis gráfica de los métodos globales. Los métodos basados en la descomposición de la varianza de las variables de salida requieren de un gran número de evaluaciones del modelo, mientras que los métodos de proyección o los métodos uno-a-la vez (OAT, por sus siglas en inglés) requieren de una cantidad menor de evaluaciones.

El objetivo del estudio fue determinar los parámetros más influyentes para el modelo modificado mediante el análisis de sensibilidad global por los métodos de: coeficientes de regresión estandarizados, método de sensibilidad de amplitud de Fourier extendido y método de Sobol.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 El modelo

El modelo utilizado se describió en el capítulo 3, donde las variables de salida que predice el modelo son la temperatura del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa del aire dentro del invernadero, en función de las condiciones externas y la influencia de un cultivo con una ecuación diferencial para la biomasa. Los parámetros del modelo se enlistan en el Cuadro 4.

4.2.2 Metodología del análisis de sensibilidad global

Para el análisis de sensibilidad global se aplicó la metodología descrita por Saltelli et al.(2004):

- 1) Establecer el objetivo del análisis y definir la forma de la función de salida.

- 2) Decidir los factores de entrada necesarios para el análisis.
- 3) Elegir la función de distribución para cada factor de entrada, la cual puede ser:
 - a. Tomada de la literatura
 - b. Derivada de datos ajustando de una función de distribución empírica derivada de datos experimentales
 - c. Basada en opiniones de expertos
 - d. Definida como una distribución normal truncada, donde el truncamiento sirve para evitar valores atípicos de muestreo
 - e. De una correlación entre los factores de entrada, si es apropiado.
- 4) Elegir un método de análisis de sensibilidad.
- 5) Generar la muestra de entrada de acuerdo al método elegido para el análisis de sensibilidad.
- 6) Evaluar el modelo con la muestra generada y producir la(s) salida(s).
- 7) Analizar las salidas del modelo y sacar conclusiones.

4.2.3 Paso 1. Especificación de objetivos

El objetivo del análisis fue determinar que parámetros del modelo tienen mayor influencia sobre las variables de salida: temperatura del aire (T_g), temperatura de la masa térmica (T_m), humedad relativa (W_g) y biomasa (w_b).

4.2.4 Paso 2. Selección de los factores a analizar

Los factores de entrada son los parámetros del modelo (Cuadro 4), y los factores de salida son las variables de salida del modelo: temperatura del aire, temperatura de la masa térmica, humedad relativa y biomasa. Los parámetros C_w y C_d , que representan el

coeficiente de efecto del viento y el coeficiente de descarga, se encuentran contenidos en el parámetro C_v .

El volumen (V_g), áreas de suelo (A_g) y de la cubierta del invernadero (A_c), la densidad del aire (ρ_a) y la altitud del lugar (z) son constantes sin embargo con el fin de analizar su efecto y por consiguiente su importancia en las salidas del modelo se consideraron como parámetros.

Cuadro 4. Parámetros del modelo como factores de entrada para el análisis de sensibilidad global.

No.	Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor nominal	Valor mínimo	Valor máximo
1	Volumen del invernadero	V_g	m^3	11296.0	9036.8	13555.2
2	Área del suelo del invernadero	A_g	m^2	1925.25	1540.2	2310.3
3	Área de la cubierta del invernadero	A_c	m^2	4487.0	3589.6	5384.4
4	Capacidad virtual del calor del invernadero	K_g	$W \cdot s \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$	27500.0	22000.0	33000.0
5	Capacidad virtual de la masa térmica del invernadero	K_m	$W s m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$	70000.0	56000.0	84000.0
6	Factor de conversión de radiación	μ_g	[1]	0.70	0.56	0.84
7	Eficiencia térmica de la masa térmica	μ_m	[1]	0.10	0.08	0.12
8	Densidad del aire	ρ_a	$kg m^{-3}$	1.204	0.9632	1.4448
9	Capacidad del calor específico del aire a presión constante	C_p	$J kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	1010.0	808.0	1212.0
10	Temperatura del subsuelo	T_d	$^\circ C$	20.0	16.0	24
11	Coeficiente de conductividad entre la masa térmica y el subsuelo	U_d	$W m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$	2.0	1.6	2.4
12	Coeficiente global de transferencia de calor de la cubierta	U_c	$W m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$	6.5	5.2	7.8
13	Coeficiente de extinción del cultivo	k_e	[1]	0.8	0.64	0.96
14	Coeficiente de ventilación	C_v	m^{-2}	0.18	0.144	0.216
15	Tasa de infiltración	F_{v0}	$m^3 s^{-1}$	1.5	1.2	1.8
16	Coeficiente global de transferencia de calor	U_{mg}	[1]	2.5	2.0	3.0

	entre el aire exterior y la masa térmica					
17	Fracción destinada a materia seca total	m	[1]	0.83	0.664	0.996
18	Eficiencia fotosintética	ε	kg kg^{-1}	5×10^{-9}	4×10^{-9}	6.0×10^{-9}
19	Coeficiente	R_r	s^{-1}	0.427×10^{-6}	3.41×10^{-7}	5.12×10^{-7}
20	Coeficiente	b	[1]	0.0693	0.05544	0.08316
21	Temperatura de referencia	T_{ref}	$^{\circ}\text{C}$	25.0	20.0	30.0
22	Coeficiente	B_r	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	1.43×10^{-6}	1.14×10^{-6}	1.71×10^{-6}
23	Coeficiente	α	$\text{kg m}^{-2} ^{\circ}\text{C}^{-1}$	-5.46×10^{-9}	-6.55×10^{-9}	-4.36×10^{-9}
24	Coeficiente	β	$\text{kg m}^{-2} ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{s}^{-1}$	-2.99×10^{-9}	- 3.588×10^{-9}	-2.39×10^{-9}
25	Coeficiente	λ_{LAI}	$\text{m}^2 \text{kg}$	54.8	43.84	65.76
26	Altitud del lugar	z	m	2240	1792.0	2688.0
27	Coeficiente	A	[1]	0.21	0.168	0.252
	correspondiente a la parte de radiación.					
28	Coeficiente	B_d	$\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$	13.1×10^{-3}	0.01048	0.01572
	correspondiente a la parte de advección para el día.					
29	Coeficiente	B_n	$\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$	6.5×10^{-3}	0.0052	0.0078
	correspondiente a la parte de advección para la noche.					

4.2.5 Paso 3. Selección de las funciones de densidad de probabilidad para cada factor

Debido a que no se dispone de información adicional sobre los parámetros, como primera aproximación se seleccionó una función de densidad de probabilidades de tipo uniforme para cada uno de los factores de entrada. Los límites superior e inferior se obtuvieron considerando un 20% de variación alrededor de su valor nominal. Porcentajes mayores producían errores en la simulación del modelo. Una práctica usual es considerar un 10% de variación en el valor de los parámetros (López-Cruz et al., 2012; Vazquez-Cruz et al., 2014).

4.2.6 Paso 4. Selección del método de análisis de sensibilidad

Se utilizaron tres métodos de análisis de sensibilidad global, dos basados en varianzas: el método ampliado de Fourier (EFAST) y el método de Sobol, y otro basado en una regresión simple sobre el muestreo: el método de Coeficientes de regresión estandarizados (Saltelli *et al.*, 2008). El método EFAST y Sobol permiten obtener los índices de primer orden y de efectos totales mientras que el de regresión sólo permite el cálculo de los índices de primer orden.

Para el uso de los métodos basados en varianza, el índice de primer orden representa la contribución de cada parámetro a la varianza total de la variable de salida y se denota por:

$$S_i = \frac{V[E|X_i]}{V(Y)} \quad (5)$$

Donde $V[E|X_i]$ es la cantidad de varianza esperada debida al efecto principal que se removería de la varianza total $V(Y)$ si se pudiera determinar el verdadero valor del factor X_i .

La varianza incondicional total de la variable de salida Y se define como:

$$V(Y) = E[V(Y|X_i)] + V[E(Y|X_i)] \quad (6)$$

Donde $E[V(Y|X_i)]$ es la varianza esperada en la salida que permanecería sin explicación, si el factor X_i fuera dejado en libertad sobre su rango de incertidumbre. El índice de sensibilidad de efecto total (S_{Ti}) que da cuenta de la contribución total de la salida Y debido al factor X_i esto es, su efecto de primero orden más todos los efectos de orden superior producto de las interacciones, se obtiene como:

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V[E(Y|X_{-i})]}{V(Y)} = \frac{E[V(Y|X_{-i})]}{V(Y)} \quad (7)$$

El método de cálculo de ambos índices se realizó de acuerdo al método computacional propuesto por Saltelli et al. (2008).

El método de coeficientes de regresión estandarizados se basa en realizar una regresión simple sobre los muestreos realizados mediante muestreo Monte Carlo de los parámetros, quedando de la forma:

$$y(i) = b_0 + \sum_{j=1}^r b_{z_j} z_j^{(i)} \quad (8)$$

Donde r es el número de muestras de cada parámetro y los coeficientes b_0 y b_{z_j} , se obtienen mediante el cálculo por mínimos cuadrados basado en la diferencia entre los valores de y , producidos por la regresión y el modelo real producido por la simulación Monte Carlo.

Sus equivalentes estandarizados son:

$$\hat{\beta}_{z_i} = \frac{\hat{b}_{z_i} \sigma_{z_i}}{\sigma_Y} \quad (9)$$

Estos también se conocen como coeficientes de regresión estandarizados (SRC, por sus siglas en inglés). Estos valores al cuadrado se consideran como los índices de sensibilidad.

4.2.7 Paso 5. Generación de la muestra de entrada

Se generó una muestra de tamaño $N = 2000$ para el método de muestreo ampliado de Fourier (EFAST) y de $N = 200$ para el método de Sobol, para garantizar una buena

estimación de los índices de sensibilidad. Para realizar ambos muestreos se usó el programa para análisis de sensibilidad Simlab versión 3.2 (Simlab, 2011).

Para el método de coeficientes de regresión estandarizados se generó una muestra de $N = 8000$, usando el algoritmo presentado en Saltelli *et al.* (2008) y se programó una subrutina en Matlab-Simulink.

4.2.8 Paso 6. Evaluación del modelo

El modelo se programó en el ambiente Matlab-Simulink (The Mathworks INC. Natick, MA, USA). Usando las muestras de tamaño 8000, 2000 y 200, respectivamente, para los factores de entrada, se ejecutaron las simulaciones correspondientes, se integraron los valores de las variables de salida para el tiempo de simulación y se almacenaron los valores obtenidos para la temperatura del aire, temperatura de la masa térmica, humedad relativa y biomasa en cada escenario. Se usó el método de Runge-Kutta con tamaño de paso variable, con una tolerancia relativa de 1×10^{-9} y una tolerancia absoluta de 1×10^{-12} para llevar a cabo la integración numérica. Las variables de entrada fueron: temperatura del aire afuera del invernadero ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa afuera del invernadero (%), radiación afuera del invernadero (W m^{-2}), Velocidad del viento (m s^{-1}) y apertura de las ventanas del invernadero (m^{-2}). Para la implementación de los modelos se utilizaron datos experimentales reportados por Ruíz-García (2014).

4.2.9 Paso 7. Análisis de las salidas del modelo y conclusiones

Los valores de los índices de sensibilidad estimados S_i y S_{Ti} (Ecuaciones 5 y 7), se utilizaron para evaluar la influencia de cada parámetro sobre cada variable de salida. Para presentar los valores de los índices de sensibilidad se generaron gráficas de barras.

4.3 Resultados y discusión

Con respecto a los índices de primer orden para los tres métodos, para la temperatura del aire (Figura 19) el parámetro más relevante, según el método EFAST es μ_g , transmisividad de la cubierta (adimensional) con un valor de 0.56, mientras que para el método de Sobol es A_g , área de piso del invernadero (m^2) con 0.24. Por otra parte para el método de Coeficientes de Regresión Estandarizados (CRE) es A_g con 0.27. Con respecto a los índices de efectos totales el parámetro más influyente para el método EFAST y Sobol es μ_g con valores de 0.58 y 0.27, respectivamente (Figura 20). Se observa que el método EFAST produce valores más grandes en los índices comparados con los otros dos métodos.

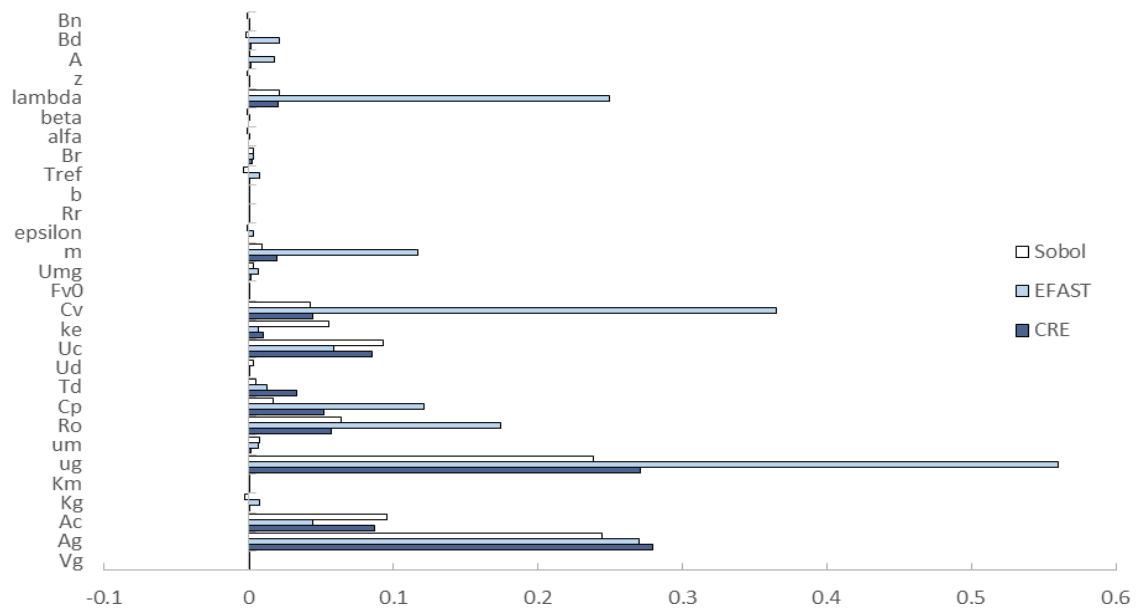


Figura 19. Índices de primer orden para la temperatura del aire obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.

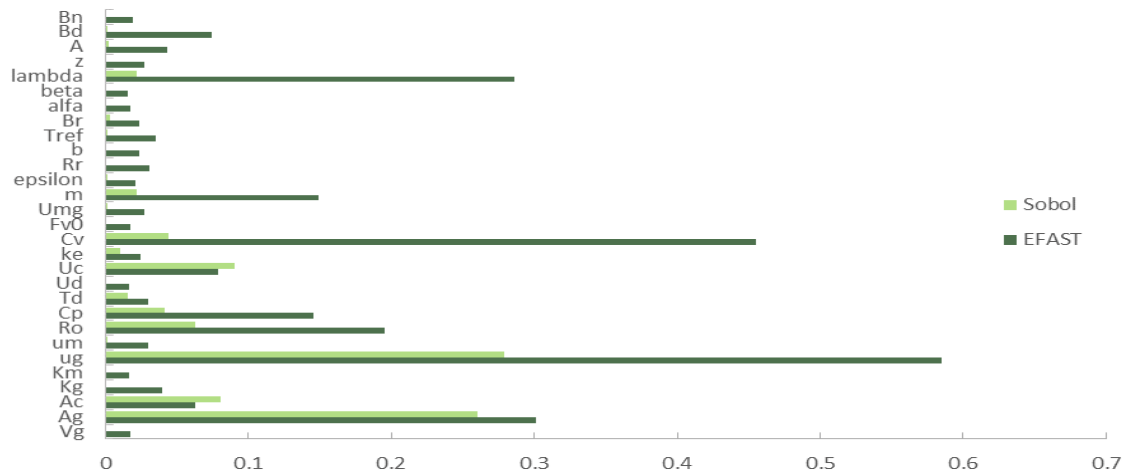


Figura 20. Índices de efectos totales para la temperatura del aire obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.

En los resultados de los índices de sensibilidad de primer orden, para la temperatura de la masa térmica con los tres métodos, el parámetro más influyente para los tres métodos es T_d , temperatura del subsuelo ($^{\circ}\text{C}$), con valores de 0.73 para el método CRE, 0.59 para EFAST y 0.29 para el método de Sobol (Figura 21). Para el caso de los índices de sensibilidad de efectos totales para los métodos de EFAST y Sobol, que son los que permiten su cálculo (Figura 22), el parámetro más influyente es T_d con valores de 0.61 y 0.31, respectivamente.

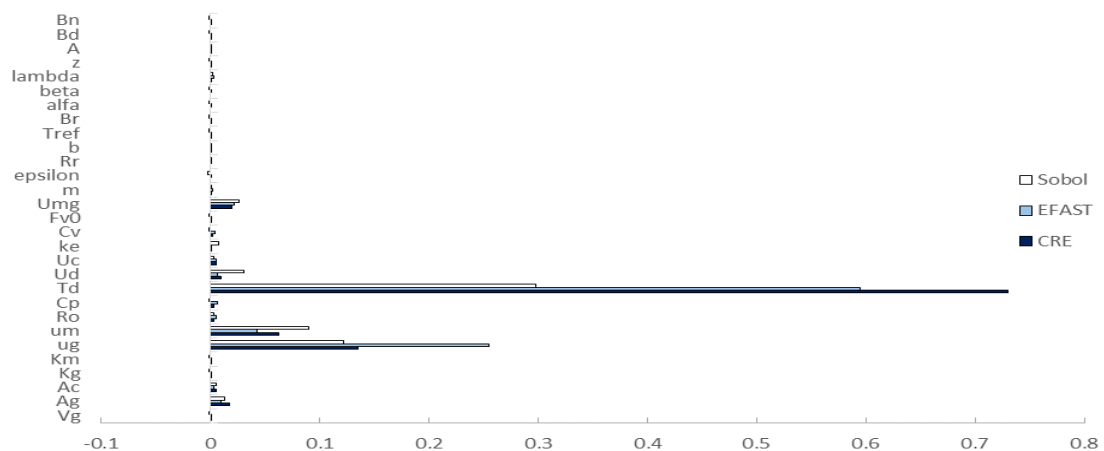


Figura 21. Índices de primer orden para la temperatura de la masa térmica obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.

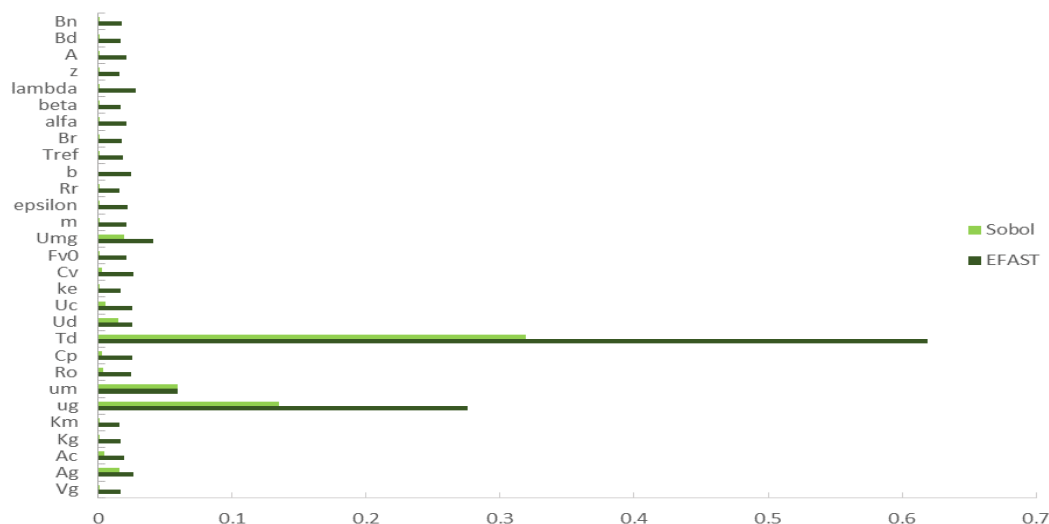


Figura 22. Índices de efectos totales para la temperatura de la masa térmica obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.

Para la humedad relativa el parámetro más influyente según los tres métodos es λ_{LAI} , coeficiente usado para el cálculo del índice de área foliar ($m^2 \text{ kg}$), con valores de 0.22 para el método CRE, 0.71 para el método EFAST y 0.24 para el método de Sobol (Figura 23).

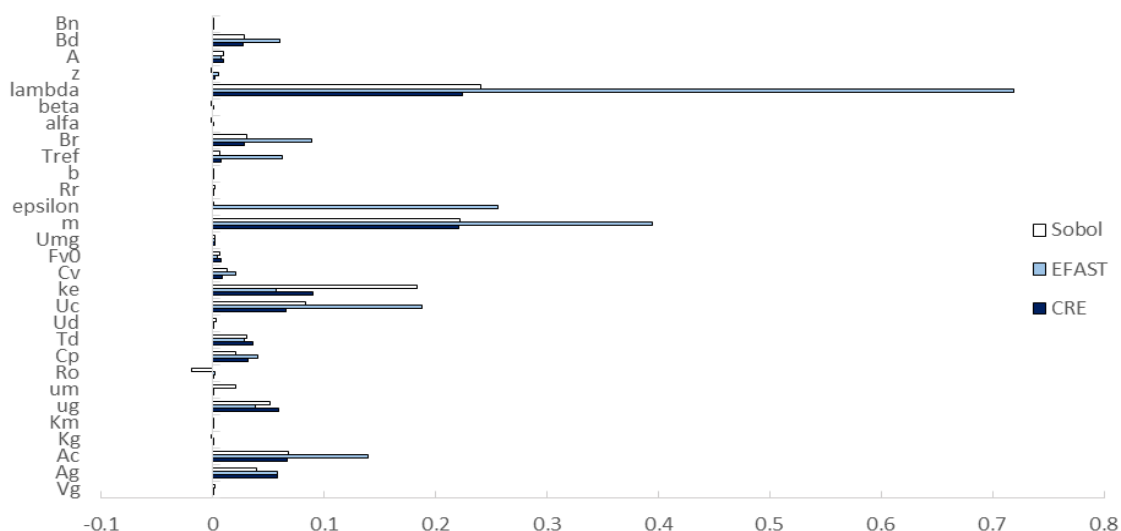


Figura 23. Índices de primer orden para la humedad relativa obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.

Considerando los índices de efectos totales el parámetro más influyente para el método EFAST es λ_{LAI} , con un valor de 0.74 mientras que para el método de Sobol es m , fracción

destinada a materia seca total (adimensional) con un valor de 0.24 (Figura24). Se observa que para el método de Sobol hay una pequeña diferencia entre λ_{LAI} y m .

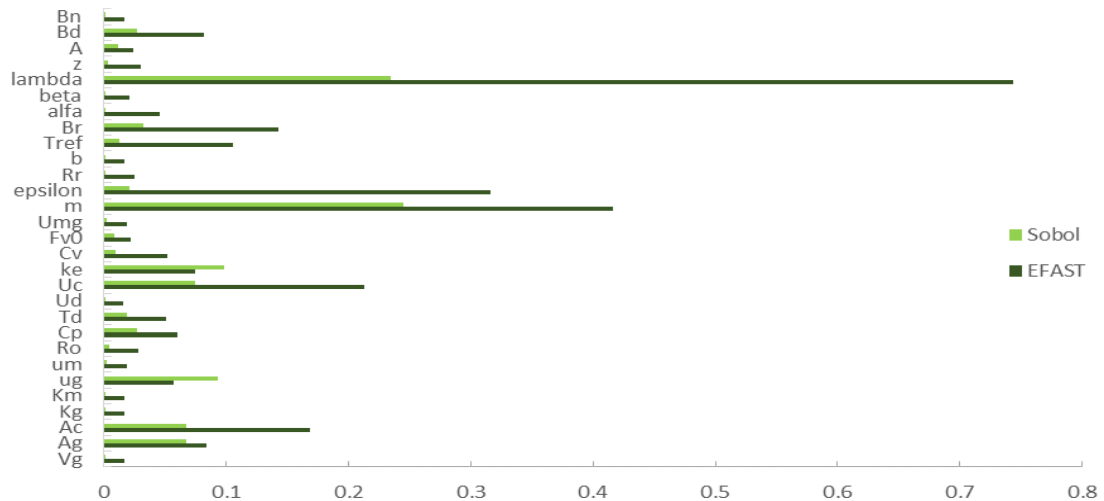


Figura 24. Índices de efectos totales para la humedad relativa obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.

El parámetro más relevante para la biomasa considerando los índices de primer orden por el método EFAST y CRE es λ_{LAI} con un valor de 0.72 y 0.22, respectivamente. Para el caso del método de Sobol, el parámetro más influyente es k_e , coeficiente de extinción del cultivo (adimensional), con un valor de 0.28 (Figura 25).

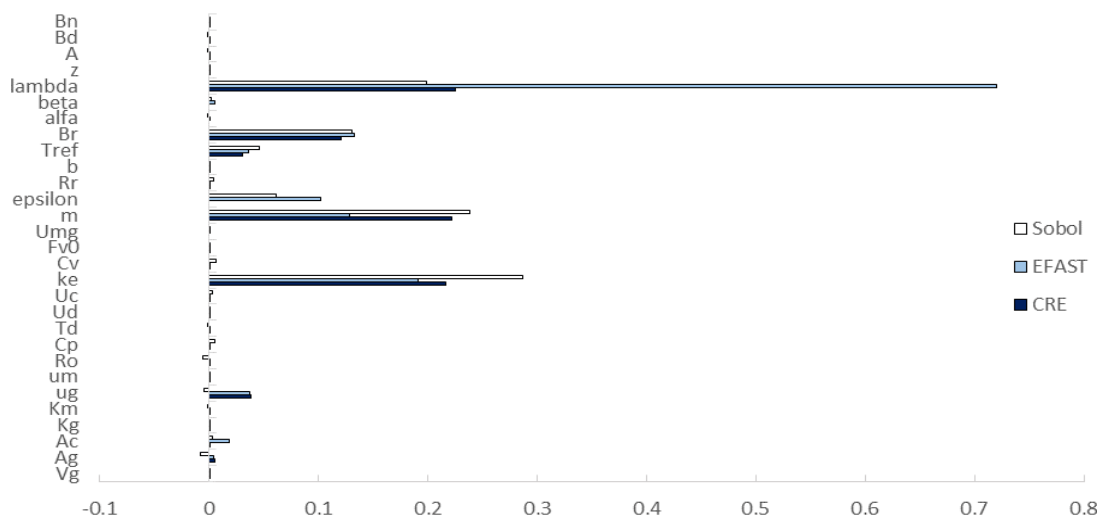


Figura 25. Índices de primer orden para la biomasa obtenidos por los métodos EFAST, Sobol y Coeficientes de Regresión Estandarizados.

El parámetro más influyente considerando los índices de efectos totales para el método EFAST es λ_{LAI} , con un valor de 0.75. Para el método de Sobol el más importante es m , con un valor de 0.24. Para el método de Sobol la diferencia entre λ_{LAI} y m es muy pequeña (Figura 26).

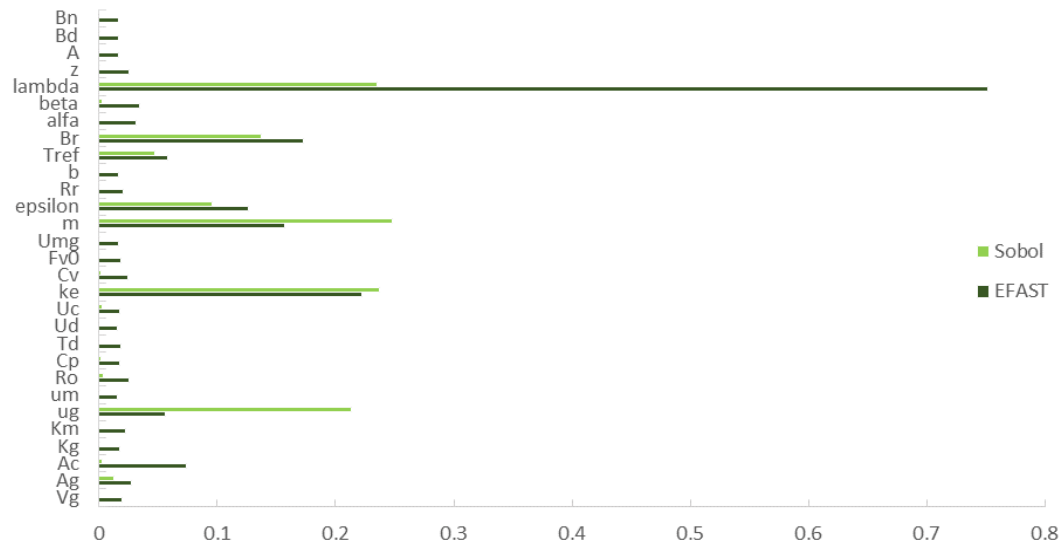


Figura 26. Índices de efectos totales para la biomasa obtenidos por los métodos EFAST y Sobol.

La transmisividad de la cubierta y el coeficiente de transferencia de calor entre el aire y la masa térmica juegan un papel importante en el comportamiento de las salidas, resulta interesante observar que el área del invernadero y de la cubierta también influyen su comportamiento. Es por esta razón que se consideraron en el análisis como parámetros (Cuadro 5). Por otra parte la fracción destinada a materia seca por parte del cultivo y el coeficiente usado para el cálculo del índice de área foliar son los más importantes para la biomasa y humedad relativa (Cuadro 6).

Cuadro 5. Parámetros más relevantes considerando los índices de primer orden para los tres métodos.

Temperatura del aire			Temperatura de la masa térmica			Humedad relativa			Biomasa		
EFAST	Sobol	CRE	EFAST	Sobol	CRE	EFAST	Sobol	CRE	EFAST	Sobol	CRE
μ_g	A_g	A_g	T_d	T_d	T_d	λ_{LAI}	λ_{LAI}	λ_{LAI}	λ_{LAI}	k_e	λ_{LAI}
C_v	μ_g	μ_g	μ_g	μ_g	μ_g	m	m	m	k_e	m	m
A_g	A_c	A_c	μ_m	μ_m	μ_m	ε	k_e	k_e	B_r	λ_{LAI}	k_e

Cuadro 6. Parámetros más relevantes considerando los índices de efectos totales para los métodos EFAST y Sobol.

Temperatura del aire		Temperatura de la masa térmica		Humedad relativa		Biomasa	
EFAST	Sobol	EFAST	Sobol	EFAST	Sobol	EFAST	Sobol
μ_g	μ_g	T_d	T_d	λ_{LAI}	m	λ_{LAI}	m
C_v	A_g	μ_g	μ_g	m	λ_{LAI}	k_e	λ_{LAI}
A_g	U_c	μ_m	μ_m	ε	k_e	B_r	k_e

4.4 Conclusiones

La mitad de los parámetros se relacionan con elementos del invernadero o son características del mismo e influyen sobre las variables de temperatura. Algunos ejemplos son μ_g , transmisividad de la cubierta (adimensional) o las áreas A_g , área de piso del invernadero (m^2) y el área de la cubierta A_c . Sin embargo para el caso de la humedad relativa y biomasa los parámetros que resultaron más influyentes están relacionados con las ecuaciones del cultivo como λ_{LAI} , Coeficiente usado para el cálculo del índice de área foliar (m^2kg) o k_e , el coeficiente de extinción del cultivo (adimensional).

El parámetro más relevante para la temperatura de la masa térmica es T_d , la temperatura del subsuelo ($^{\circ}C$).

Los tres métodos muestran similitudes en los parámetros más influyentes para cada variable de salida del modelo. Los métodos EFAST y Sobol nos permiten observar que parámetros deben ser considerados por sus interacciones con otros parámetros mediante el índice de efectos totales. El único parámetro que es diferente considerando el índice de efectos totales es U_c , que afecta a la temperatura de la masa térmica.

A pesar de que el método de Coeficientes de Regresión Estandarizados no utiliza como tal la varianza, se observa que los resultados fueron muy similares en los índices de primer orden considerando los dos métodos basados en varianzas.

Capítulo 5

Estimación de parámetros y evaluación del modelo

5.1 Introducción

El problema de estimar los parámetros de un modelo mecanicista es una tarea compleja y es un tema abierto a investigación con preguntas no resueltas. La idea es mejorar la predicción del modelo con la ayuda de datos sobre el sistema y minimizar un criterio, usualmente la diferencia entre los valores medidos y los valores estimados al cuadrado.

Los algoritmos de búsqueda local empleados son: mínimos cuadrados, máxima verosimilitud y programación cuadrática secuencial. Estos funcionan de forma adecuada cuando los modelos tienen pocos parámetros (menos de 10), pero generan estimaciones imprecisas cuando el modelo tiene muchos parámetros (López-Cruz et al., 2014).

La calibración de los modelos es necesaria porque algunos valores de los parámetros del modelo no se conocen con precisión o no hay un referente en la literatura y porque algunos de los valores que están disponibles no son aplicables directamente al modelo del sistema. Más allá, la calibración es necesaria porque necesitamos compensar por los errores en todos los parámetros que no se estiman durante el proceso de calibración (Wallach et al., 2006).

La etapa de evaluación de un modelo es necesaria para poder determinar si un modelo es adecuado o no para el objetivo para el que se diseñó. Es necesario contar con mediciones experimentales sobre el sistema real a fin de contar con datos que representen el comportamiento del sistema. La comparación entre las estimaciones del modelo y las mediciones se lleva a cabo usando varias estimaciones de concordancia. Estas se pueden

clasificar en medidas simples para cuantificar la diferencia entre valores estimados y observados, tales como el sesgo, el cuadrado medio del error (MSE), la raíz cuadrado del MSE (RMSE), el error medio absoluto (MAE), el error relativo del RMSE y el error relativo del MAE. También existen medidas normalizadas como la eficiencia de modelación, el coeficiente de correlación y un índice de concordancia. Medidas que permiten identificar diferentes fuentes de error como el coeficiente de correlación y concordancia (López-Cruz et al., 2014). Algunos ejemplos donde se llevó a cabo la validación de modelos para invernaderos se presentan en Luo et al. (2005), Singh et al. (2005), Castañeda-Miranda et al. (2007) y Baptista et al. (2010).

Los objetivos del presente Capítulo son: 1) estimar los parámetros a los que es más sensible el modelo, según los resultados del Capítulo 4; 2), evaluar la cantidad de parámetros que pueden estimarse con los datos disponibles y usar los valores estimados para mejorar la calidad de predicción del modelo y 3) evaluar el desempeño del modelo con las estadísticas de sesgo: error cuadrático medio, raíz del error cuadrático medio, error medio absoluto, eficiencia de modelación y el coeficiente de correlación.

5.2 Materiales y métodos

El modelo descrito en el Capítulo 3, cuenta con cuatro ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento del invernadero y el cultivo, con las variables de estado: temperatura del aire del invernadero, T_g (°C), temperatura de la masa térmica, T_m (°C), humedad específica, w_g (kg·kg⁻¹), y materia seca total, w_b (kg·m⁻²), acopladas como un solo sistema.

5.2.1 Estimación de parámetros

Dos preguntas relevantes en la estimación de parámetros son: ¿Qué parámetros estimar? y ¿Cuántos parámetros estimar?

La primer pregunta se respondió usando los parámetros a los que el modelo es más sensible, es decir, los parámetros que resultaron del análisis de sensibilidad global mostrado en el Capítulo 4.

La segunda pregunta se respondió con el uso del error cuadrático medio de predicción (*MSEP*, por sus siglas en inglés). Se comienza calibrando un parámetro y se estima el *MSEP*, después se calibran dos parámetros y se estima el *MSEP* para este modelo y así sucesivamente hasta que al final, el que presenta el menor *MSEP* será la cantidad de parámetros que se pueden calibrar con los datos disponibles. Un estimador no sesgado es el error cuadrático medio (*MSE*) siempre y cuando el modelo se haya desarrollado de manera independiente a los datos (Wallach et al., 2006) resultando en:

$$\hat{MSEP}(\theta) = MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Y_i - f(X_i; \hat{\theta})]^2 \quad (10)$$

El problema de optimización planteado para llevar a cabo la estimación de los parámetros fue encontrar los valores del vector $\mathbf{p}$ que es subconjunto del vector de parámetros del modelo y que contiene los parámetros a los que es más sensible el modelo tal que, la función:

$$F(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^N \left[(T_{gest}(i) - T_{gobs}(i))^2 + (T_{mest}(i) - T_{mobs}(i))^2 + (W_{gest}(i) - W_{gobs}(i))^2 \right] \quad (11)$$

Sea mínima. T_{gest} , T_{mest} y W_{gest} son la temperatura del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa del aire dentro del invernadero, estimadas por el modelo. T_{gobs} , T_{mobs} y W_{gobs} son las mediciones de temperatura del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa del aire dentro del invernadero. Donde $N = 10081$, es el número de mediciones correspondientes a 7 días (21 al 27 de junio, 2014) y por último (i) es el tiempo de muestreo en segundos. Los datos usados fueron proporcionados por Ruiz-García (2014).

La razón de que solamente se tome en cuenta las temperaturas del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa y no la biomasa es que no se tienen datos de materia seca con los cuales comparar el modelo.

El problema de optimización se implementó con la función “lsqnonlin” de la herramienta de Optimization de Matlab, utilizando el algoritmo “Levenberg-Marquardt”.

5.2.2 Validación del modelo

Una vez estimados la cantidad de parámetros, restringidos por la disponibilidad de datos y considerando aquellos a los que el modelo es más sensible, se fijaron los demás parámetros en sus valores nominales y se validó el modelo.

Se estimaron las variables de salida del modelo, temperatura del aire (°C), temperatura de la masa térmica (°C), humedad relativa (%) y materia seca total acumulada (kg m^{-2}), con nuevos datos independientes a los utilizados en la calibración. La cantidad de datos fue de $N=10081$ correspondientes a 7 días (17 al 23 de julio, 2014).

Se analizaron los resultados comparando las salidas que producía el modelo para cada variable de salida y contra las mediciones, gráficamente no es suficiente para determinar la bondad de ajuste entre el modelo y las variables por lo que se usaron estadísticos que proporcionan mayor información para poder concluir sobre el ajuste del modelo con las mediciones como son: sesgo (Bias), error cuadrático medio (MSE), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), error medio absoluto (MAE), eficiencia de modelación (EF) y coeficiente de correlación (r) (Wallach et al., 2006).

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Estimación de parámetros

Los parámetros, resultado del análisis de sensibilidad, se muestran en el Cuadro 7, con sus respectivos valores nominales y los valores estimados a partir de la calibración de los mismos. No se encuentran en orden dado que no se realizó un análisis de identificabilidad.

En el Cuadro 8 se reporta el valor del MSEP para cada variable de salida del modelo y el número de parámetros estimados, a fin de identificar la cantidad de parámetros que es posible estimar con los datos disponibles. Los datos son diferentes a los usados en la calibración siendo así independientes y permitiendo que el MSE sea un buen estimador del MSEP.

Cuadro 7. Valores estimados de los parámetros a los que es más sensible el modelo.

Parámetro	Valor nominal	Valor estimado
μ_g	0.7	0.42
C_v	0.18	0.25
T_d	20.0	21.31
μ_m	0.1	0.14
λ_{LAI}	54.8	65.73
m	0.83	0.99

ε	5×10^{-9}	3.36×10^{-9}
k_e	0.8	0.48
B_r	1.43×10^{-6}	2×10^{-6}
U_c	6.5	8.85

Cuadro 8. Valores del Error Cuadrático Medio de Predicción para diferente número de parámetros estimados.

No. Parámetros	MSEP		
	Temperatura del aire	Temperatura de la masa térmica	Humedad relativa
1	10.68	1.96	81.02
2	11.02	1.91	83.72
3	10.99	1.54	85.43
4	10.93	2.08	83.97
5	5.77	2.01	60.49
6	5.77	2.01	60.49
7	9.33	2.13	84.66
8	5.71	1.78	54.28
9	5.75	1.77	55.65
10	2.89	1.62	41.75

Para la temperatura del aire, el número de parámetros que produce el mínimo MSEP es de 10, con un valor de 2.89; sin embargo para la temperatura de la masa térmica el número de parámetros que produce el mínimo MSEP es 3. Finalmente para la humedad relativa el número de parámetros con el menor MSEP es de 10.

Considerando que dos de las variables de salida dan mejores resultados considerando los 10 parámetros se optó por calibrar los 10 más influyentes.

Es fácil verificar que el MSE es un buen estimador del MSEP para este caso, porque conforme se avanza en la tabla no se ve una disminución del MSEP tan marcada como ocurre cuando se usan los mismos datos. Un ejemplo es que para la humedad relativa es menor el MSEP considerando 5 parámetros en vez de 7.

5.3.2 Validación

Para validar el modelo se usaron datos de siete días (17 al 23 de julio, 2014), en total son $N=10081$.

En la Figura 27 se muestra la temperatura de la masa térmica para cuatro días de simulación (datos independientes a los usados en la calibración y con los que se efectuó la comparación en el Capítulo 3), con el modelo calibrado, comparada con mediciones y el modelo sin calibrar. En las Figuras 28 y 29 se puede encontrar lo mismo para el caso de la temperatura del aire y humedad relativa.

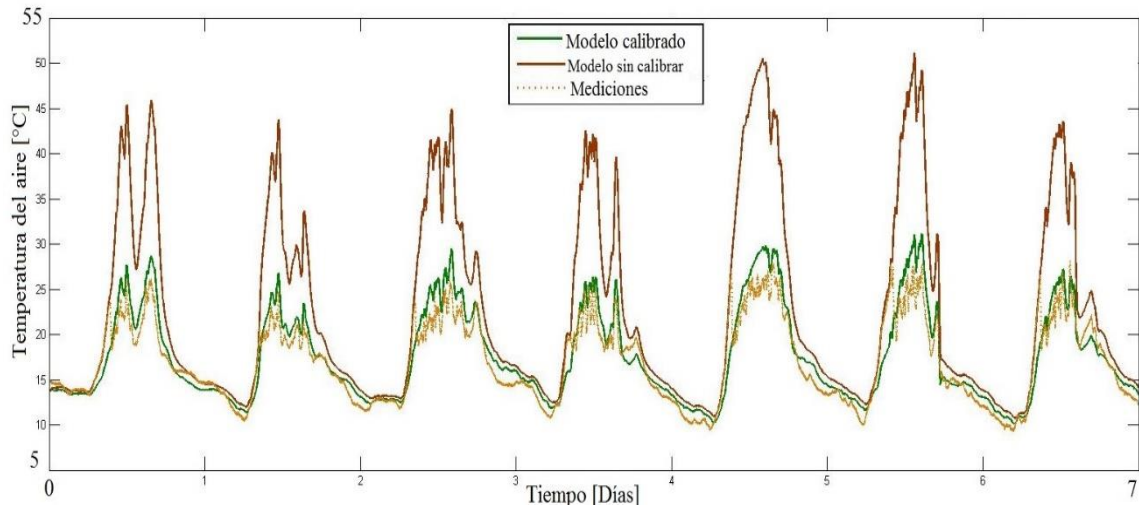


Figura 27. Temperatura del aire para el modelo calibrado (línea continua verde), no calibrado (línea continua vino) y las mediciones (línea punteada anaranjada) de los 7 días para validación.

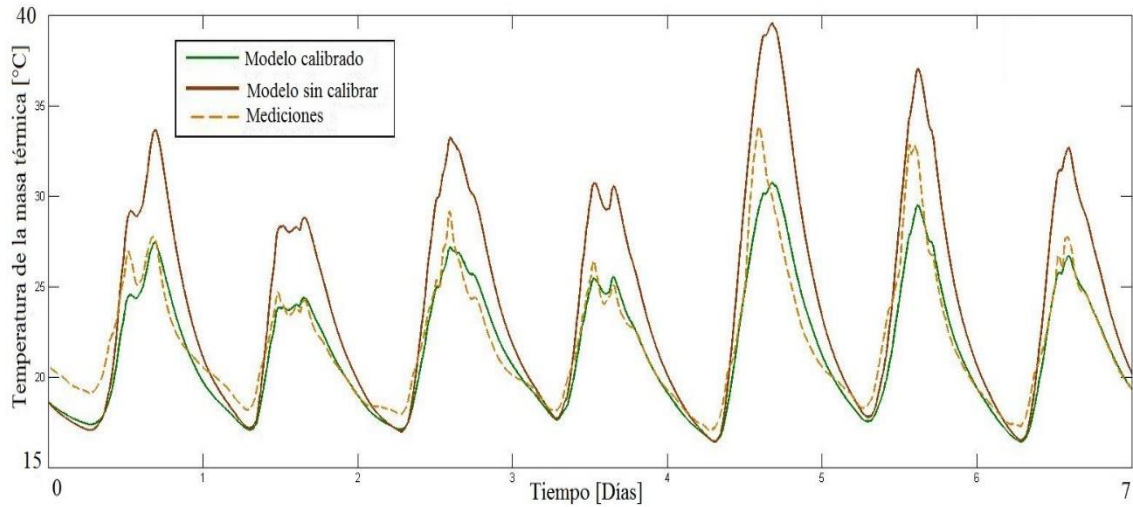


Figura 28. Temperatura de la masa térmica para el modelo calibrado (línea continua verde), no calibrado (línea continua vino) y las mediciones (línea punteada anaranjada) de los 7 días para validación.

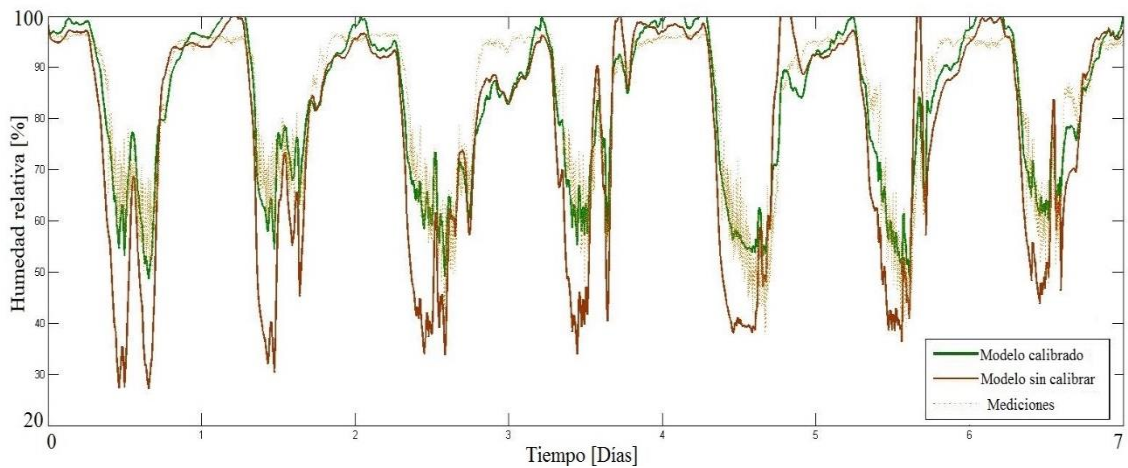


Figura 29. Humedad relativa para el modelo calibrado (línea continua verde), no calibrado (línea continua vino) y las mediciones (línea punteada anaranjada) de los 7 días para validación.

A simple vista el modelo calibrado tiene un mejor comportamiento que el modelo sin calibrar, sin embargo para determinar la bondad de ajuste es necesario calcular las estadísticas asociadas con el modelo (Cuadro 9).

Cuadro 9. Estadísticas de bondad de ajuste del modelo calibrado.

Estadística	Temperatura del aire (°C)	Temperatura de la masa térmica (°C)	Humedad relativa (%)
Sesgo (bias)	-0.64	0.46	0.78
MSE	3.50	1.53	25.91
RMSE	1.87	1.24	5.09
MAE	1.41	0.90	4.09
EF	0.83	0.87	0.88
r	0.94	0.95	0.94

El bias negativo de la temperatura del aire se refiere a una sobreestimación del estado, visible en la Figura 27. Las otras dos variables de salida son subestimadas por el modelo, tal como lo indican los valores positivos del sesgo. Los valores del RMSE para la temperatura del aire y la humedad relativa son mayores que los presentados como resultado en Ruíz-García (2014). La temperatura de la masa térmica tiene en promedio un error de un grado, la temperatura del aire aproximadamente 1.5 grados y la humedad relativa 5%. Las eficiencias para las tres variables de salida son superiores a 0.8 y el valor de r es muy cercano a 1.

5.4 Conclusiones

El valor pequeño del sesgo junto con un valor de la eficiencia mayor a 0.8 y el coeficiente de correlación (r) muy cercano a uno, nos permiten concluir que el modelo es una buena aproximación de las variables de temperatura del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa.

Al no contar con datos de materia seca total no se pudo calibrar el modelo para la estimación de biomasa, ni medir la bondad de ajuste de esta variable de salida. Esto explica

por qué no se logró un mejor ajuste en las otras variables, pues como se observó en los Capítulos 3 y 4, el cultivo afecta el comportamiento de las otras variables.

A pesar de que se probaron diferentes valores semilla durante el proceso de calibración es posible mejorar la calibración con métodos globales de búsqueda como lo han demostrado otros autores.

Capítulo 6

Análisis de incertidumbre

6.1 Introducción

El análisis de incertidumbre es una herramienta y una etapa necesaria en el proceso de modelación de sistemas. Consiste en evaluar cuantitativamente la incertidumbre o variabilidad en los componentes de un modelo (parámetros, variables de entrada, ecuaciones) para una situación dada y deducir una distribución de incertidumbre para cada variable de salida más que un solo valor. Una consecuencia esencial es que provee métodos para evaluar, por ejemplo, la probabilidad de respuesta a exceder cierto umbral (Monod et al., 2006).

Según Monod et al. (2006) los pasos a seguir para un análisis de sensibilidad son:

- i. Definición de la distribución de incertidumbre asociada a cada factor de entrada.
- ii. Generación de N escenarios de los factores de entrada $\mathbf{z}_k = (z_{k,1}, \dots, z_{k,n}), k = 1, \dots, N$.
- iii. Simulación del comportamiento de las variables de salida del modelo para cada escenario, $f(\mathbf{z}_k), k = 1, \dots, N$.
- iv. Análisis de las distribuciones de las variables de salida del modelo (medias, medianas, varianzas).

El análisis de incertidumbre se ha implementado en la agricultura, en particular en la modelación del cultivo de lechuga (Harwood et al., 2010; López-Cruz et al., 2013).

El objetivo del presente, es llevar a cabo un análisis de sensibilidad con el modelo calibrado y analizar las variables de salida considerando los parámetros como la fuente de incertidumbre.

6.2 Materiales y métodos

Para el análisis se evaluó la incertidumbre presente en los parámetros, no se consideró la incertidumbre en las entradas y ecuaciones.

Los parámetros del modelo (Cuadro 10) incluyen los valores calibrados, resultado de la estimación de parámetros tal como se desarrolló en el Capítulo 4.

En las Figuras 30 y 31 se muestra la radiación exterior (W m^{-2}), la temperatura del aire exterior ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa exterior (%), velocidad del viento (m s^{-1}) y área de ventanas lateral y cenital (m^2) para cuatro días (28 de junio al 1 de julio, 2014) tomados del experimento de Ruíz- García (2014).

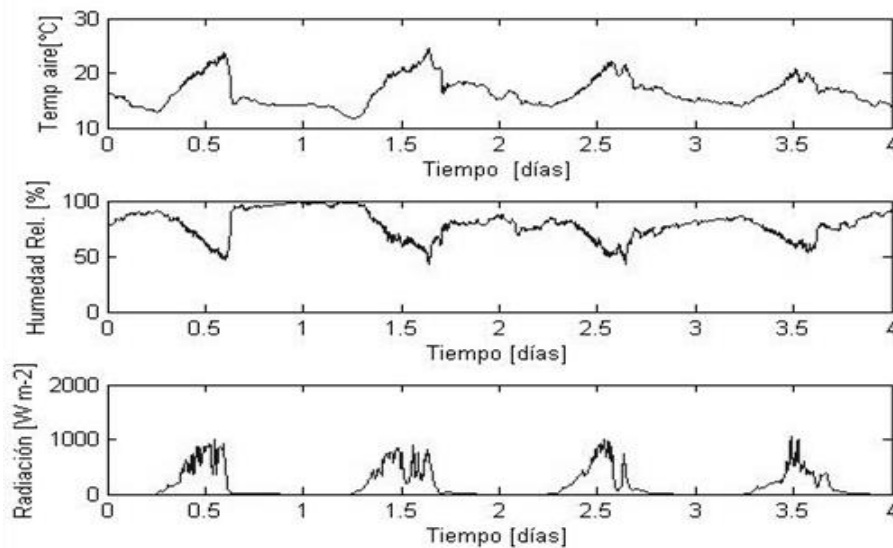


Figura 30. Temperatura, Humedad relativa y radiación exterior.

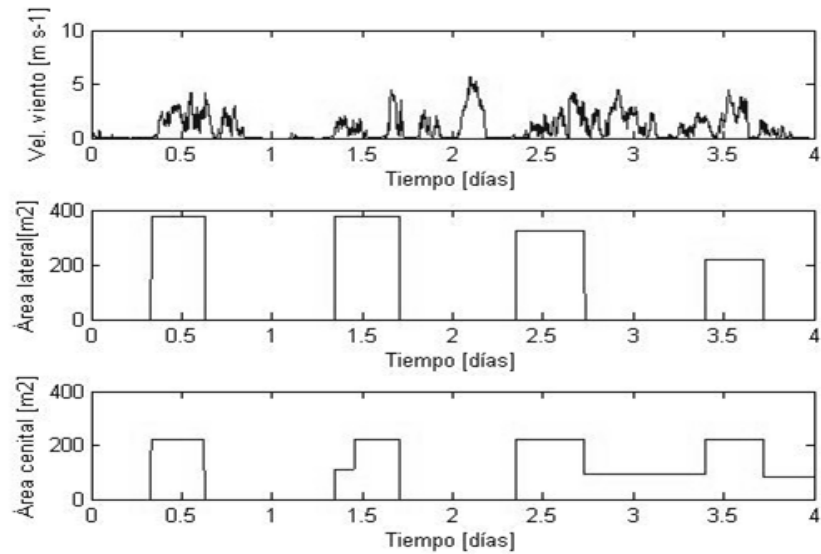


Figura 31. Velocidad del viento exterior y áreas lateral y cenital de las ventanas del invernadero.

Cuadro 10. Parámetros del modelo como factores para el análisis de incertidumbre con 20% de variación.

No.	Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor nominal	Valor mínimo	Valor máximo
1	Volumen del invernadero	V_g	m^3	11296.0	9036.8	13555.2
2	Área del suelo del invernadero	A_g	m^2	1925.25	1540.2	2310.3
3	Área de la cubierta del invernadero	A_c	m^2	4487.0	3589.6	5384.4
4	Capacidad virtual del calor del invernadero	K_g	$W s m^2 ^\circ C^{-1}$	27500.0	22000.0	33000.0
5	Capacidad virtual de la masa térmica del invernadero	K_m	$W s m^2 ^\circ C^{-1}$	70000.0	56000.0	84000.0
6	Factor de conversión de radiación	μ_g	[1]	0.4201	0.33608	0.50412
7	Eficiencia térmica de la masa térmica	μ_m	[1]	0.14	0.112	0.168
8	Densidad del aire	ρ_a	$kg m^{-3}$	1.204	0.9632	1.4448
9	Capacidad del calor específico del aire a presión constante	C_p	$J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$	1010.0	808.0	1212.0
10	Temperatura del subsuelo	T_d	$^\circ C$	21.3089	17.0471	25.5706
11	Coeficiente de conductividad entre la masa térmica y el subsuelo	U_d	$W m^2 ^\circ C^{-1}$	2.0	1.6	2.4
12	Coeficiente global de transferencia de calor de la cubierta	U_c	$W m^2 ^\circ C^{-1}$	8.8499	7.079	10.619
13	Coeficiente de extinción del cultivo	k_e	[1]	0.48	0.384	0.576
14	Coeficiente de ventilación	C_v	m^{-2}	0.2517	0.20136	0.30204
15	Tasa de infiltración	F_{v0}	$m^3 s^{-1}$	1.5	1.2	1.8
16	Coeficiente global de transferencia de calor entre el aire exterior y la masa térmica	U_{mg}	[1]	2.5	2.0	3.0

17	Fracción destinada a materia seca total	m	[1]	0.9875	0.79	1
18	Eficiencia fotosintética	ε	kg kg^{-1}	3.36×10^{-9}	2.68×10^{-9}	4.03×10^{-9}
19	Coeficiente	R_r	s^{-1}	0.427×10^{-6}	3.41×10^{-7}	5.12×10^{-7}
20	Coeficiente	b	[1]	0.0693	0.05544	0.08316
21	Temperatura de referencia	T_{ref}	$^{\circ}\text{C}$	25.0	20.0	30.0
22	Coeficiente	B_r	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	2×10^{-6}	1.6×10^{-6}	2.4×10^{-6}
23	Coeficiente	α	$\text{kg m}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$	-5.46×10^{-9}	-6.55×10^{-9}	-4.36×10^{-9}
24	Coeficiente	β	$\text{kg m}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1}$	-2.99×10^{-9}	-3.588×10^{-9}	-2.39×10^{-9}
25	Coeficiente	λ_{LAI}	$\text{m}^2 \text{kg}$	65.73	52.584	78.876
26	Altitud del lugar	z	m	2240	1792.0	2688.0
27	Coeficiente correspondiente a la parte de radiación.	A	[1]	0.21	0.168	0.252
28	Coeficiente correspondiente a la parte de advección para el día.	B_d	$\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$	13.1×10^{-3}	0.01048	0.01572
29	Coeficiente correspondiente a la parte de advección para la noche.	B_n	$\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$	6.5×10^{-3}	0.0052	0.0078

6.2.1 Definición de la distribución de incertidumbre asociada a cada factor de entrada

Existe una gama de posibilidades a usar para producir los escenarios para cada factor de entrada, sin embargo no se dispone de información suficiente para decidir sobre una distribución en específico. Es por ello que se utilizó la distribución uniforme que provee un peso igual sobre todo el rango de incertidumbre. Los límites para definir el rango de incertidumbre se tomaron considerando un 20% del valor nominal de cada factor.

6.2.2 Generación de N escenarios de los factores de entrada $z_k = (z_{k,1}, \dots, z_{k,n}), k = 1, \dots, N$.

Para llevar a cabo el análisis se generaron 5 000 muestreos para cada uno de los parámetros, con muestreo aleatorio e hipercubo latino. La rutina que genera las muestras para ambos tipos de muestreo se programó en MatlabTM.

6.2.3 Simulación del comportamiento de las variables de salida del modelo para cada escenario, $f(z_k), k = 1, \dots, N$.

Con los valores muestreados se realizaron las simulaciones correspondientes del modelo y se guardaron los valores de las integrales de la temperatura del aire, temperatura de la masa térmica, humedad relativa y biomasa con respecto al tiempo de simulación.

En otro análisis, se consideraron los valores de la media para la temperatura del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa. Para la variable de biomasa se consideró el valor final producido. Este análisis se realizó sólo con muestreo aleatorio y con el mismo número de muestreos que en el caso anterior.

6.2.4 Análisis de las distribuciones de las variables de salida del modelo (medias, medianas, varianzas)

Finalmente se calcularon las estadísticas: valor mínimo, máximo, media, desviación estándar, falta de simetría, kurtosis y varianza, además de las pruebas de bondad de ajuste y las pruebas Lilliefors y Kolmogorov-Smirnov. Para el cálculo de las estadísticas se utilizó la herramienta de estadística de Matlab™.

6.3 Resultados y discusión

6.3.1 Análisis de la integral de cada variable de salida

Se realizaron 5 000 simulaciones, de las cuales solo se muestran 200, de temperatura del aire, T_g , con el modelo de muestreo aleatorio (Figura 32) y con muestreo hipercubo latino (Figura 33), No se observan diferencias entre los dos muestreos.

En el caso de la temperatura de la masa térmica, T_m , donde se observa una ligera diferencia entre el muestreo aleatorio (Figura 34) y el muestreo hipercubo latino (Figura 35) sin embargo sólo es para algunas simulaciones de las 200 mostradas, los valores se encuentran en el mismo rango.

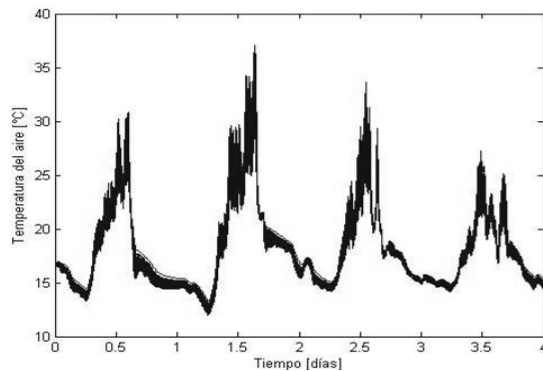


Figura 32. Doscintas simulaciones de la temperatura del aire con muestreo aleatorio.

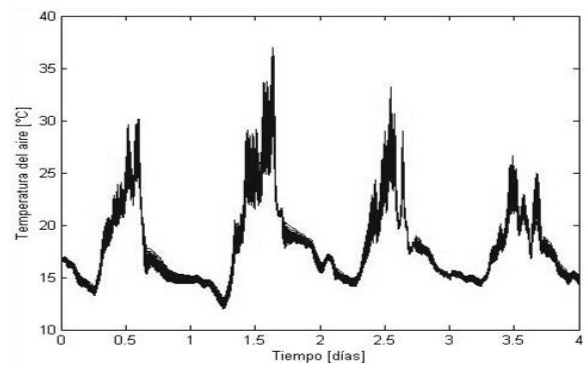


Figura 33. Doscintas simulaciones de la temperatura del aire con muestreo hipercubo latino.

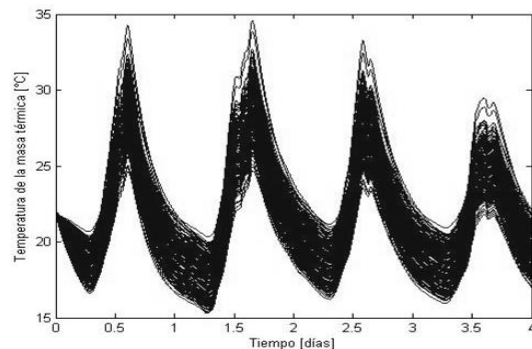


Figura 34. Doscintas simulaciones de la temperatura de la masa térmica con muestreo aleatorio.

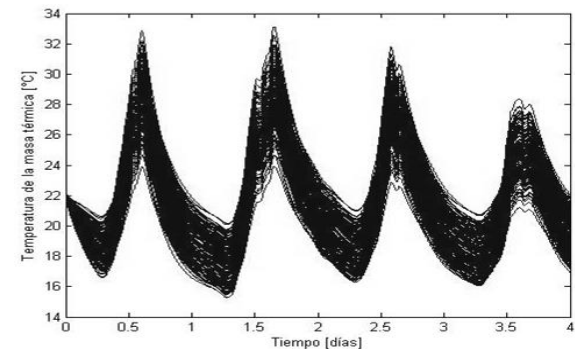


Figura 35. Doscintas simulaciones de la temperatura de la masa térmica con muestreo hipercubo latino.

Para la humedad relativa no se observan mínimas diferencias en las 200 esimulaciones con muestreo aleatorio (Figura 36) y muestreo hipercubo latino (Figura 37). En el caso de la biomasa se observa que hay una pequeña diferencia entre las 200 simulaciones con muestreo aleatorio (Figura 38) y muestreo hipercubo latino (Figura 39), sin embargo los valores se encuentran en el mismo rango en ambos casos.

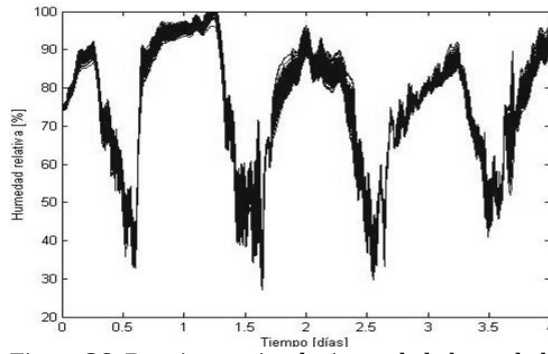


Figura 36. Doscintas simulaciones de la humedad relativa con muestreo aleatorio.

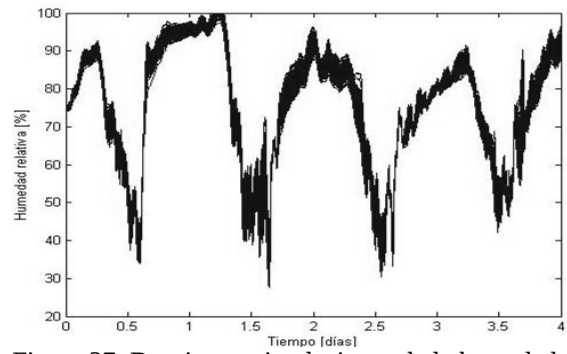


Figura 37. Doscintas simulaciones de la humedad relativa con muestreo hipercubo latino.

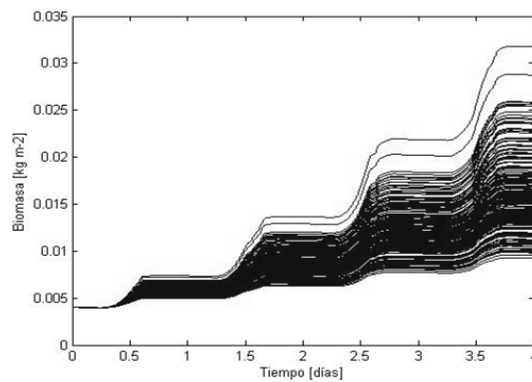


Figura 38. Doscintas simulaciones de la biomasa con muestreo aleatorio.

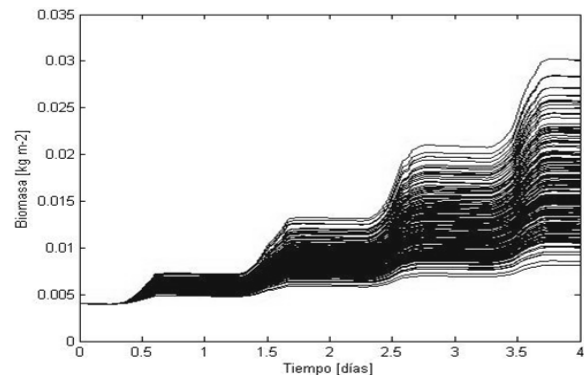


Figura 39. Doscintas simulaciones de la biomasa con muestreo hipercubo latino.

Para los dos tipos de muestreo se observa un comportamiento similar de las variables de salida del modelo, lo que nos indica que el número de simulaciones fue suficiente.

Analizando los histogramas de la temperatura del aire tenemos que hay una semejanza entre el muestreo aleatorio (Figura 40) y muestreo hipercubo latino (Figura 41), la media de ambas distribuciones es similar sin embargo el histograma del muestreo aleatorio es más ancho.

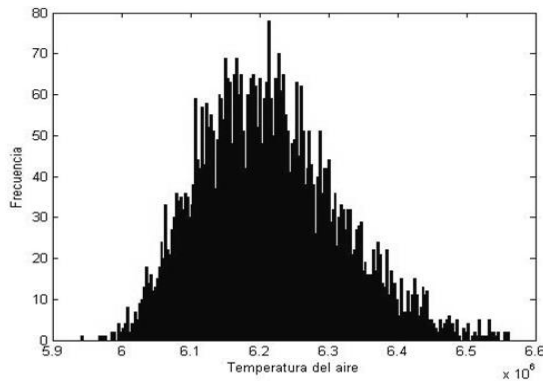


Figura 40. Histograma de la temperatura del aire para muestreo aleatorio.

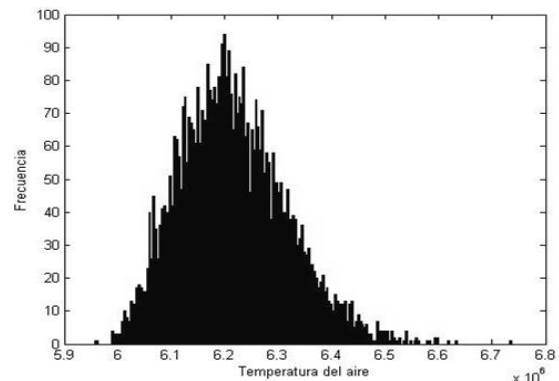


Figura 41. Histograma de la temperatura del aire para muestreo hipercubo latino.

Los histogramas de la temperatura de la masa térmica son muy similares para ambos muestreos pero al igual que en el caso anterior el histograma del muestreo hipercubo latino (Figura 43) es más compacto que el de muestreo aleatorio (Figura 42).

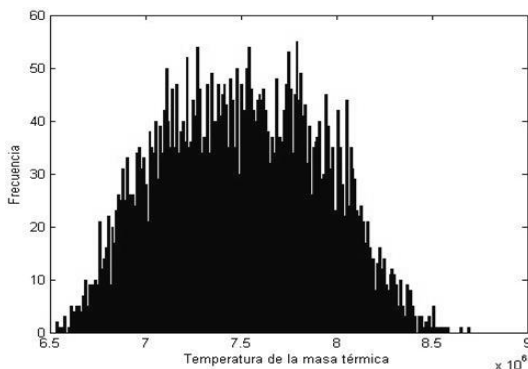


Figura 42. Histograma de la temperatura de la masa térmica con muestreo aleatorio.

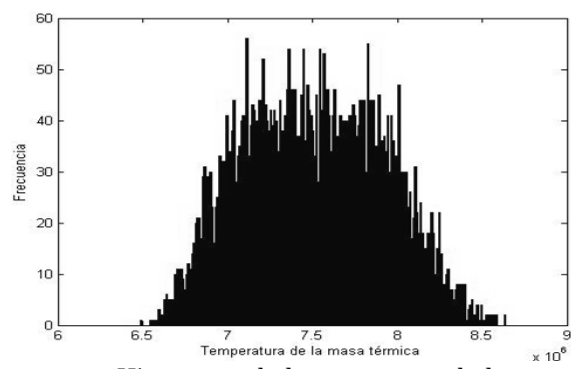


Figura 43. Histograma de la temperatura de la masa térmica con muestreo hipercubo latino.

Para el caso de la humedad relativa se observa una marcada semejanza entre el histograma producido por el muestreo aleatorio (Figura 44) e hipercubo latino (Figura 45).

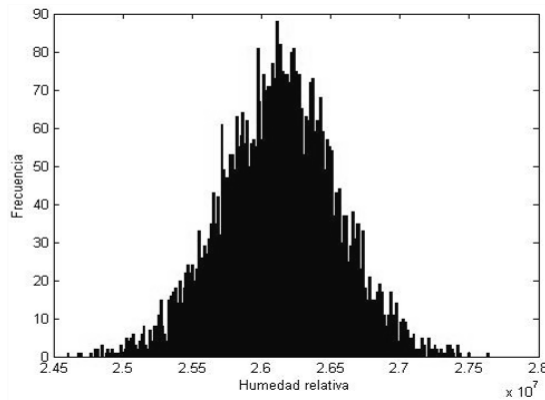


Figura 44. Histograma de la humedad relativa con muestreo aleatorio.

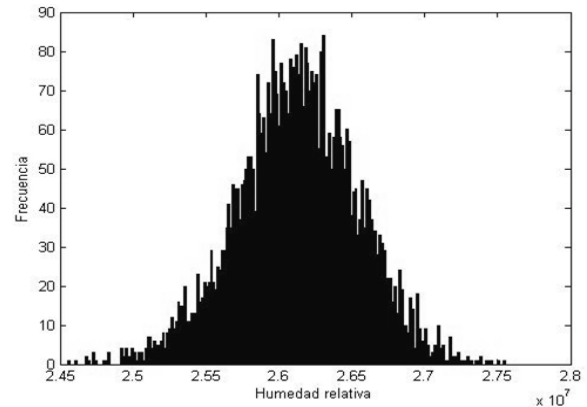


Figura 45. Histograma de la humedad relativa con muestreo hipercubo latino.

Finalmente, para el caso de la biomasa el histograma generado por el muestreo hipercubo latino (Figura 47) es más ancho que el de muestreo aleatorio (Figura 46), además el rango del histograma en la Figura 47 es menor, teniendo valores menores a 90. Sin embargo la media es similar en ambos.

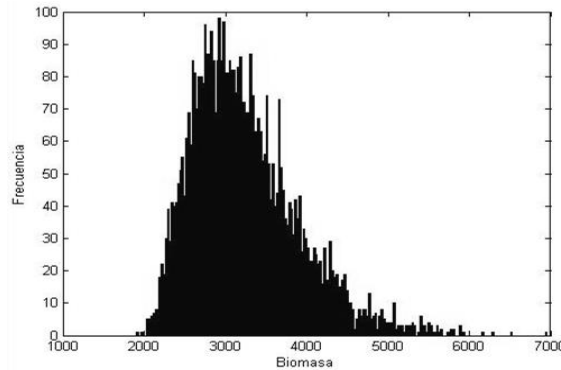


Figura 46. Histograma de la biomasa con muestreo aleatorio.

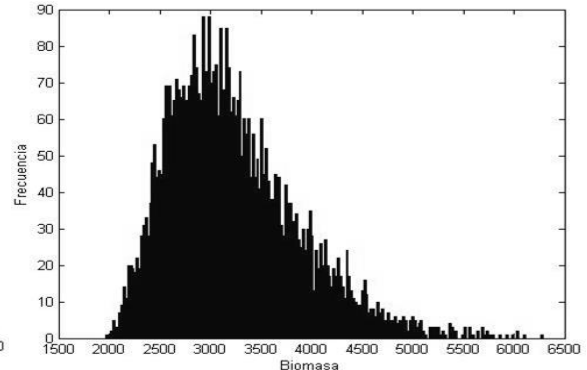


Figura 47. Histograma de la biomasa con muestreo hipercubo latino.

De acuerdo a las estadísticas, cuando se utiliza muestreo aleatorio, la mayor variabilidad la presenta la biomasa con un coeficiente de variación de 0.202, seguida de la temperatura de la masa térmica, temperatura del aire y humedad relativa, con coeficientes de variación de 0.06, 0.016 y 0.015, respectivamente (Cuadro 11). Los valores son similares para los dos casos de muestreo (Cuadro 12), lo que indica que la cantidad de simulaciones usadas fueron suficientes para evaluar en forma correcta el comportamiento del modelo. Los

valores de varianza son grandes porque se consideró la integral por los cuatro días de simulación.

Cuadro 11. Estadísticas calculadas para las variables de salida del modelo asociadas con el análisis de sensibilidad, usando 5 000 muestras obtenidas mediante muestreo aleatorio.

	Temperatura del aire	Temperatura de la masa térmica	Humedad Relativa	Biomasa
Promedio	6.22×10^6	7.51×10^6	2.61×10^7	3.24×10^3
Mínimo	5.94×10^6	6.53×10^6	2.46×10^7	1.91×10^3
Máximo	6.56×10^6	8.7×10^6	2.76×10^7	6.96×10^3
Mediana	6.21×10^6	7.5×10^6	2.61×10^7	3.13×10^3
Desviación estándar	1.01×10^5	4.13×10^5	4.2×10^5	6.56×10^2
Skewness (Asimetría)	0.46	0.05	-0.04	0.96
Kurtosis (Curtosis)	3.01	2.22	3.12	4.25
Varianza	1.03×10^{10}	1.7×10^{11}	1.76×10^{11}	4.31×10^5
Coefficiente de variación	0.016	0.055	0.016	0.202

Cuadro 12. Estadísticas calculadas para las variables de salida del modelo asociadas con el análisis de sensibilidad, usando 5 000 muestras obtenidas mediante muestreo hipercubo latino.

	Temperatura del aire	Temperatura de la masa térmica	Humedad Relativa	Biomasa
Promedio	6.2×10^6	7.51×10^6	2.61×10^7	3.23×10^3
Mínimo	5.96×10^6	6.48×10^6	2.46×10^7	1.97×10^3
Máximo	6.74×10^6	8.64×10^6	2.76×10^7	6.28×10^3
Mediana	6.21×10^6	7.49×10^6	2.61×10^7	3.13×10^3
Desviación estándar	1.01×10^5	4.15×10^5	4.16×10^5	6.53×10^2
Skewness (Asimetría)	0.50	0.083	-0.12	0.91
Kurtosis (Curtosis)	3.3	2.2	3.18	3.95
Varianza	1.01×10^{10}	1.72×10^{11}	1.73×10^{11}	426797.54
Coefficiente de variación	0.016	0.055	0.0159	0.202

Tanto para el muestreo aleatorio como para el hipercubo latino la variable de la temperatura del aire muestra una distribución sesgada a la izquierda lo que se corrobora con los valores positivos de la asimetría en ambos casos, asimismo el valor de la kurtosis está cercano a 3 lo que podría indicar una distribución normal.

Para el caso de la temperatura de la masa térmica se observa en las Figuras 42 y 43 una distribución muy parecida a una normal, corroborándose con los valores de asimetría muy cercanos a cero para ambos tipos de muestreo.

Por otra parte, la humedad relativa presenta una distribución muy parecida a una normal, según el valor de asimetría negativo está sesgada hacia la derecha sin embargo son valores muy pequeños, los valores de kurtosis son cercanos a 3, reflejo de una normal.

Por último, los histogramas de la biomasa muestran un sesgo a la izquierda que corresponde con el valor positivo de la asimetría en ambos muestreos. De igual manera como en la humedad, la kurtosis es muy superior a 3 en ambos casos lo que hace no se asemeje a una normal.

Para comprobar si las variables de salida tienen una distribución normal se realizó la prueba de bondad de ajuste considerando la prueba t, ji cuadrada, Lilliefors y Kolmogorov-Smirnov (Cuadro 13 y 14).

Cuadro 13. Pruebas de bondad de ajuste para cada variable considerando muestreo aleatorio.

	Temperatura del aire		Temperatura de la masa térmica		Humedad relativa		Biomasa	
Prueba	h	p	h	P	h	p	h	P
t	0	1	0	1	0	1	0	1
Ji-cuadrada	1	2.79×10^{-37}	1	9.13×10^{-41}	0	0.162	1	1.94×10^{-120}
Lilliefors	1	0.001	1	0.001	0	0.08	1	0.001
Kolmogorov-Smirnov	1	0	1	0	1	0	1	0

Cuadro 14. Pruebas de bondad de ajuste para cada variable considerando muestreo hipercubo latino.

	Temperatura del aire		Temperatura de la masa térmica		Humedad relativa		Biomasa	
Prueba	h	p	h	P	h	p	h	p
t	0	1	0	1	0	1	0	1
Ji-cuadrada	1	1.1×10^{-34}	1	3.51×10^{-50}	1	6.66×10^{-4}	1	2.35×10^{-125}
Lilliefors	1	0.001	1	0.001	1	0.014	1	0.001
Kolmogorov-Smirnov	1	0	1	0	1	0	1	0

$h=1$ Significa que se rechaza la hipótesis nula, por el contrario $h=0$ significa que se acepta la hipótesis nula. Para el caso de la prueba t la hipótesis nula es que los datos provienen de una distribución normal con la media de los datos y desviación estándar desconocida. Para la prueba ji cuadrada, Lilliefors y Kolmogorov-Smirnov la hipótesis nula es que los datos provienen de una distribución normal. Todas las pruebas se realizaron con un nivel de significancia del 5%.

Los resultados muestran que las variables no provienen de una distribución normal para ninguno de los casos.

6.3.2 Analizando la media de las variables de clima y el valor final de la biomasa

La idea de considerar el valor medio de las variables de salida de clima y el valor final de la biomasa es para poder concluir sobre unidades conocidas, en este caso °C para las temperaturas, % para la humedad relativa y kg m^{-2} para la materia seca total acumulada.

Solo se consideró el muestreo aleatorio dado que los resultados son muy similares en con el muestreo hipercubo latino. El histograma de la temperatura del aire se asemeja a una distribución sesgada a la izquierda (Figura 48), por otro lado el histograma de la

temperatura de la masa térmica es muy ancho, no se puede apreciar las colas de la distribución y se asemeja a una uniforme (Figura 49).

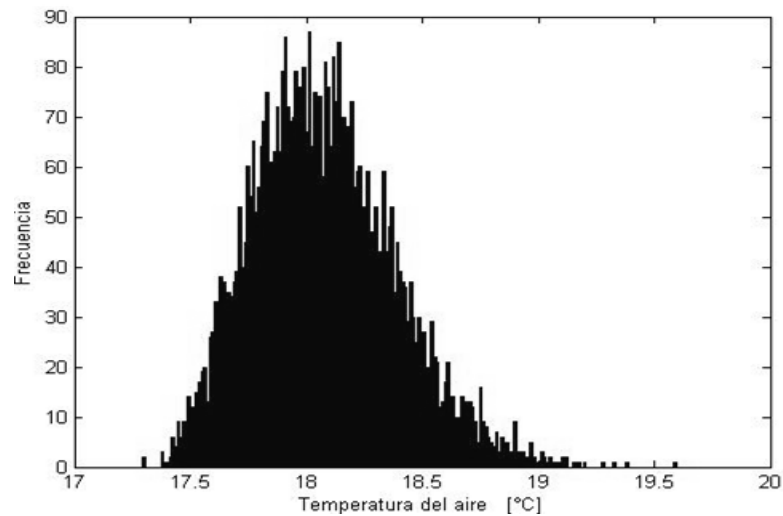


Figura 48. Histograma de la temperatura del aire con muestreo aleatorio considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.

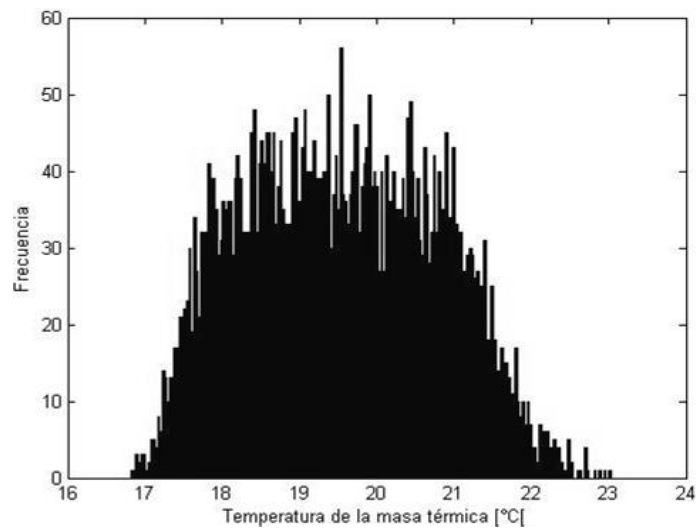


Figura 49. Histograma de la temperatura de la masa térmica con muestreo aleatorio considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.

El histograma de la humedad relativa se observa sesgado a la derecha y no muy ancho (Figura 50), finalmente, el histograma de la biomasa está marcadamente sesgado a la

izquierda con una gran cola en la parte derecha por lo que se puede suponer que no es una distribución normal lo que se comprobará con las estadísticas asociadas al análisis (Figura 51).

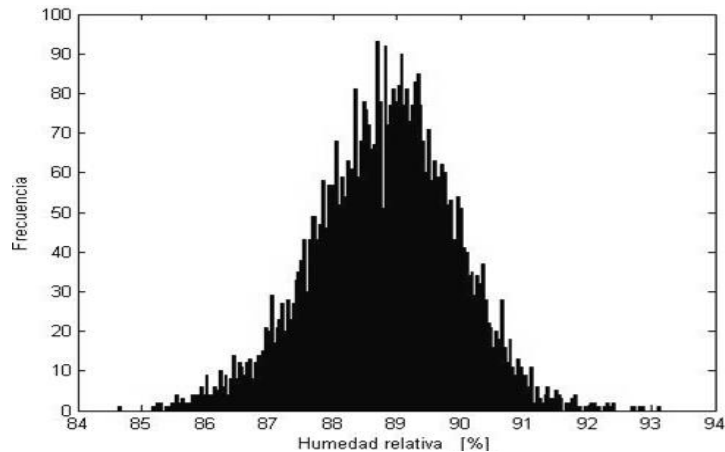


Figura 50. Histograma de la humedad relativa con muestreo aleatorio y considerando el valor medio de las variables y el valor final de la biomasa.

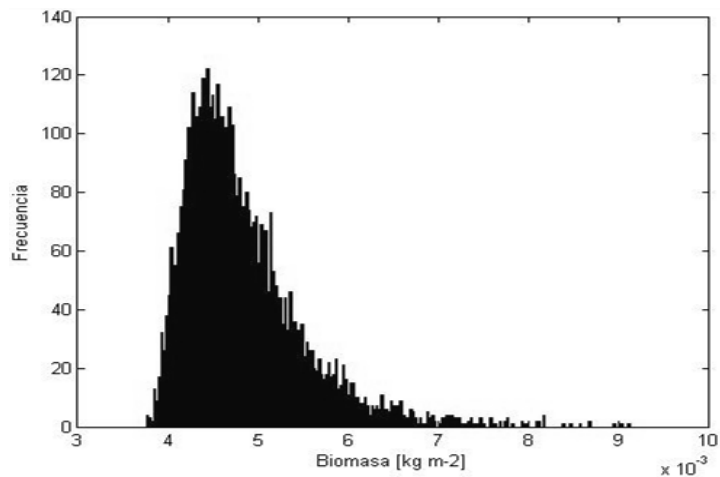


Figura 51. Histograma de la biomasa con muestreo aleatorio y considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.

La variable con más variabilidad es la biomasa, seguida de la temperatura de la masa térmica, de la temperatura del aire y finalmente de la humedad relativa (Cuadro 15).

Siendo los mismos resultados que los obtenidos cuando se consideró la integral de las variables en todo el intervalo de simulación.

Cuadro 15. Estadísticas asociadas con el análisis de incertidumbre con muestreo aleatorio considerando la media de las variables de salida.

	Temperatura del aire	Temperatura de la masa térmica	Humedad Relativa	Biomasa
Promedio	18.1	19.5	88.8	4.8×10^{-3}
Mínimo	17.3	16.8	84.6	3.7×10^{-3}
Máximo	19.6	23	93.1	9.1×10^{-3}
Mediana	18.1	19.5	88.9	4.6×10^{-3}
Desviación estándar	0.308	1.24	1.12	6×10^{-4}
Skewness (Asimetría)	0.48	0.10	-0.13	1.67
Kurtosis (Curtosis)	3.2	2.13	3.24	7.36
Varianza	0.094	1.54	1.24	4.52×10^{-7}
Coeficiente de variación	0.017	0.063	0.012	1.39×10^{-1}

A fin de corroborar si los histogramas se asemejan a una distribución normal se realizaron las pruebas de bondad de ajuste (Cuadro 16).

Cuadro 16. Pruebas de bondad de ajuste para las temperaturas de salida del modelo considerando la media y el valor final de la biomasa.

	Temperatura del aire		Temperatura de la masa térmica		Humedad relativa		Biomasa	
Prueba	h	P	h	p	h	p	h	p
T	0	1	0	1	0	1	0	1
Ji-cuadrada	1	6.19×10^{-33}	1	6.71×10^{-67}	1	1.35×10^{-6}	1	1.1×10^{-166}
Lilliefors	1	0.001	1	0.001	1	0.001	1	0.001
Kolmogorov- Smirnov	1	0	1	0	1	0	1	0

h=1 Significa que se rechaza la hipótesis nula, por el contrario h=0 significa que se acepta la hipótesis nula. Para el caso de la prueba t la hipótesis nula es que los datos provienen de una distribución normal con la media de los datos y desviación estándar desconocida. Para la prueba ji cuadrada, Lilliefors y Kolmogorov-Smirnov la hipótesis nula es que los

datos provienen de una distribución normal. Todas las pruebas se realizaron con un nivel de significancia del 5%.

Los resultados muestran, al igual que considerando la integral de las variables de salida del modelo, que ninguna de las funciones de densidad de probabilidades es una normal.

Se analizaron los percentiles de cada variable de salida para las 5 000 simulaciones. Para las cuatro variables hay 95% de posibilidades que el modelo estime cerca de la media de los datos usados en el análisis (Cuadro 17).

Cuadro 17. Percentiles de las variables de salida considerando la media de las variables y el valor final de la biomasa.

Percentil	1%	5%	95%	99%
Temperatura del aire	17.49	17.62	18.63	18.90
Temperatura de la masa térmica	17.23	17.59	21.53	22.15
Humedad relativa	86.01	86.92	90.59	91.39
Biomasa	0.004	0.004	0.006	0.007

6.4 Conclusiones

Los dos análisis de incertidumbre dieron resultados similares con muestreo aleatorio e hipercubo latino. Como es la primera vez que se lleva a cabo un análisis de incertidumbre para este modelo no hay forma de comparar con la literatura los valores obtenidos aquí.

Las variables que presentan la mayor variabilidad son la biomasa y temperatura de la masa térmica, en ese orden.

Todas las variables de salida del modelo tienen distribuciones diferentes a una normal según las pruebas de bondad de ajuste.

Los resultados del análisis de sensibilidad para los 4 días simulados muestran que hay un 99% de posibilidades que la temperatura del aire exceda los 17.5°C, la temperatura de la masa térmica los 17.2°C, la humedad relativa el 86% y la biomasa 0.004 kg m⁻². Y sólo 1% de posibilidades que la temperatura del aire exceda los 18.9°C, la temperatura de la masa térmica exceda los 22.15°C, la humedad relativa el 91% y la biomasa 0.007 kg m⁻².

Una variabilidad baja como lo es $\pm 20\%$ en los valores nominales de los parámetros genera una variabilidad de 1°C para la temperatura del aire, 5°C para la temperatura de la masa térmica, 5% de la humedad relativa y 0.003 kg m⁻² de la biomasa. Por lo que la variable que se ve más afectada por la variabilidad de los parámetros es la temperatura de la masa térmica.

Capítulo 7

Linealización y análisis de las constantes tiempo

7.1 Introducción

Una característica importante en los sistemas dinámicos es la(s) constante(s) tiempo. Estas determinan cómo se comporta la respuesta del sistema a una perturbación.

Una definición matemática de las constantes tiempo es la inversa del valor absoluto de los valores propios del sistema.

Si el modelo que describe el sistemas es lineal, encontrar los valores propios del sistema es sencillo, sin embargo la mayoría de los modelos usados en sistemas agrícolas son altamente no lineales y, por lo tanto, se debe primero llevar a cabo la linealización del modelo para posteriormente obtener los valores propios asociados con el modelo linealizado.

Van Straten (2008) menciona la importancia de estudiar las constantes tiempo:

1. Saber las constantes tiempo nos ayuda a determinar el detalle necesario de las señales de entrada. En particular si el sistema es lento, no tiene mucho sentido usar datos con alta frecuencia.
2. Conociendo las distintas constantes tiempo nos ayuda a diseñar programas de muestreo para la calibración del modelo, es decir, la decisión del intervalo de muestreo. Esto puede ahorrar bastante dinero.
3. Si las constantes tiempo se encuentran muy separadas, es deseable reducir las ecuaciones asumiendo que las partes rápidas alcanzan el equilibrio en un tiempo

infinitamente corto. Estas partes entonces, se convierten en ecuaciones algebraicas y el orden del sistema se reduce.

4. Conociendo cómo evolucionan los valores propios a lo largo de la trayectoria de un modelo no lineal nos da una visión sobre posibles regiones de inestabilidad. Esto es particularmente relevante en sistemas con retroalimentación inherente o construida.

Los objetivos del presente Capítulo son linealizar el modelo presentado en el Capítulo 2 y analizar el modelo lineal, en especial las constantes tiempo.

7.2 Materiales y métodos

Las matrices A, B, C y D resultado de la linealización del modelo se calcularon como sigue:

$$\begin{aligned}
 a_{i,j} &= \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{x_s, u_s} \\
 b_{i,j} &= \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right|_{x_s, u_s} \\
 c_{i,j} &= \left. \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right|_{x_s, u_s} \\
 d_{i,j} &= \left. \frac{\partial g_i}{\partial u_j} \right|_{x_s, u_s}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Donde f y g son funciones no lineales que dependen de las variables de estado x , de las entradas del modelo u y de los parámetros p y componen al modelo no lineal como:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= f(x, u, p) \\
 y &= g(x, u, p)
 \end{aligned}$$

Para $i = 1, \dots, n$ y $j = 1, \dots, n$, donde n es el número de ecuaciones del modelo.

La transformación de similaridad está dada como:

$$AV = V\Lambda \rightarrow A = V\Lambda V^{-1}$$

Donde Λ es una matriz cuya diagonal contiene los valores propios y cero en todo lo demás y V es una matriz que contiene en cada columna los valores propios de A .

Los nuevos estados pueden definirse como:

$$z = V^{-1}x \quad (13)$$

Y el modelo

$$\dot{z} = \Lambda z \quad (14)$$

Con solución del tipo

$$z_i(t) = z_{i,0} \exp(\lambda_i t)$$

El cálculo de las constantes tiempo del sistema se define como:

$$\tau_i = \frac{1}{|\lambda_i|} \quad (15)$$

Donde λ_i son los valores propios del modelo linealizado.

Las matrices se obtuvieron de manera analítica, para los valores estacionarios de las entradas se consideró el promedio de cada una de las variables de entrada, los valores estacionarios de las variables de estado se encontraron con el modelo programado en Matlab-Simulink (The Mathworks, INC.). La linealización se llevó a cabo alrededor de los valores estacionarios de las entradas y de las variables de estado.

7.3 Resultados y discusión

7.3.1 Elementos de la matriz A

$$a_{1,1} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{x_s, u_s}$$

$$f_1 = \frac{1}{K_g} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p]$$

$$x_1 = T_g$$

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= \frac{1}{K_g} \frac{\partial}{\partial T_g} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p] \\ &\Rightarrow \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial T_g} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial T_g} q_v - \frac{\partial}{\partial T_g} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial T_g} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial T_g} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial T_g} E_p \right] \end{aligned}$$

Para el caso de día,

$$a_{1,1} = \frac{1}{K_g} \left[-\frac{\rho_a c_p F_v}{A_g} - U_c \left(\frac{A_c}{A_g} \right) - U_{mg} - B_d LAIP_s \frac{(17.502)(240.97)}{(T_g + 240.97)^2} \right] x_s, u_s \quad (16)$$

Para el caso de noche,

$$a_{1,1} = \frac{1}{K_g} \left[-\frac{\rho_a c_p F_v}{A_g} - U_c \left(\frac{A_c}{A_g} \right) - U_{mg} - B_n LAIP_s \frac{(17.502)(240.97)}{(T_g + 240.97)^2} \right] x_s, u_s \quad (17)$$

Para $a_{1,2}$

$$a_{1,2} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{x_s, u_s}$$

$$x_2 = T_m$$

$$\begin{aligned} a_{1,2} &= \frac{1}{K_g} \frac{\partial}{\partial T_m} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p] x_s, u_s \\ &\Rightarrow \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial T_m} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial T_m} q_v - \frac{\partial}{\partial T_m} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial T_m} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial T_m} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial T_m} E_p \right] x_s, u_s \end{aligned}$$

Para el caso de día

$$a_{1,2} = \left. \frac{U_{mg}}{K_g} \right|_{x_s, u_s} \quad (18)$$

Para el caso de noche,

$$a_{1,2} = \left. \frac{U_{mg}}{K_g} \right|_{x_s, u_s} \quad (19)$$

Ahora para $a_{1,3}$

$$a_{1,3} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \right| x_s, u_s$$

$$x_3 = W_g$$

$$a_{1,3} = \frac{1}{K_g} \frac{\partial}{\partial W_g} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p] x_s, u_s$$

$$\Rightarrow \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial W_g} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial W_g} q_v - \frac{\partial}{\partial W_g} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial W_g} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial W_g} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial W_g} E_p \right] x_s, u_s$$

Para el caso de día

$$a_{1,3} = \left. \frac{B_d LAI 0.6219 P_{atm}}{K_g (W_g + 0.6219)^2} \right| x_s, u_s \quad (20)$$

Para el caso de la noche,

$$a_{1,3} = \left. \frac{B_n LAI 0.6219 P_{atm}}{K_g (W_g + 0.6219)^2} \right| x_s, u_s \quad (21)$$

Para $a_{1,4}$,

$$a_{1,4} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \right| x_s, u_s$$

$$x_4 = D_m$$

$$a_{1,4} = \frac{1}{K_g} \frac{\partial}{\partial D_m} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p] x_s, u_s$$

$$\Rightarrow \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial D_m} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial D_m} q_v - \frac{\partial}{\partial D_m} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial D_m} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial D_m} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial D_m} E_p \right] x_s, u_s$$

Para el caso de día,

$$a_{1,4} = \frac{1}{K_g} [-A I_o K \lambda_{LAI} m \exp(-K LAI) - B_d D_i \lambda_{LAI} m] x_s, u_s \quad (22)$$

Para el caso de la noche,

$$a_{1,4} = \frac{1}{K_g} [-B_n D_i \lambda_{LAI} m] x_s, u_s \quad (23)$$

Para $a_{2,1}$

$$a_{2,1} = \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right| x_s, u_s$$

$$x_1 = T_g$$

$$a_{2,1} = \frac{\partial}{\partial T_g} \frac{1}{K_m} [q_{rm} - q_{mg} - q_d] x_s, u_s$$

$$a_{2,1} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial T_g} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial T_g} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial T_g} q_d \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{2,1} = \frac{U_{mg}}{K_m} \Big| x_s, u_s \quad (24)$$

Para $a_{2,2}$

$$a_{2,2} = \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big| x_s, u_s$$

$$a_{2,2} = \frac{\partial}{\partial T_m} \frac{1}{K_m} [q_{rm} - q_{mg} - q_d] x_s, u_s$$

$$a_{2,2} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial T_m} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial T_m} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial T_m} q_d \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{2,2} = \frac{1}{K_m} [-U_{mg} - U_d] x_s, u_s \quad (25)$$

Para $a_{2,3}$,

$$a_{2,3} = \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \Big| x_s, u_s$$

$$a_{2,3} = \frac{\partial}{\partial W_g} \frac{1}{K_m} [q_{rm} - q_{mg} - q_d] x_s, u_s$$

$$a_{2,3} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial W_g} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial W_g} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial W_g} q_d \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{2,3} = \frac{1}{K_m} [0] = 0 \quad (26)$$

Para $a_{2,4}$,

$$a_{2,4} = \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \Big| x_s, u_s$$

$$a_{2,4} = \frac{\partial}{\partial D_m} \frac{1}{K_m} [q_{rm} - q_{mg} - q_d] x_s, u_s$$

$$a_{2,4} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial D_m} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial D_m} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial D_m} q_d \right]$$

Finalmente,

$$a_{2,4} = \frac{1}{K_m} [0] = 0 \quad (27)$$

Para $a_{3,1}$,

$$a_{3,1} = \frac{\partial f_3}{\partial x_1} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$a_{3,1} = \frac{\partial}{\partial T_g} \left[\frac{A_g}{\rho_a V_g} (E_p - E_v) \right] x_s, u_s$$

Para el caso de día

$$a_{3,1} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{B_d LAI}{\lambda} P_s \frac{(17.502)(240.97)}{(T_g + 240.97)^2} \right] x_s, u_s \quad (28)$$

Para el caso de noche,

$$a_{3,1} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{B_n LAI}{\lambda} P_s \frac{(17.502)(240.97)}{(T_g + 240.97)^2} \right] x_s, u_s \quad (29)$$

Ahora para $a_{3,2}$

$$a_{3,2} = \frac{\partial f_3}{\partial x_2} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$a_{3,2} = \frac{\partial}{\partial T_m} \left[\frac{A_g}{\rho_a V_g} (E_p - E_v) \right] x_s, u_s$$

$$a_{3,2} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial T_m} E_p - \frac{\partial}{\partial T_m} E_v \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{3,2} = 0 \quad (30)$$

Ahora, $a_{3,3}$

$$a_{3,3} = \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$a_{3,3} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial W_g} E_p - \frac{\partial}{\partial W_g} E_v \right] x_s, u_s$$

Para el caso de día

$$a_{3,3} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[-\frac{B_d LAI}{\lambda} \frac{0.6219 P_{atm}}{(W_g + 0.6219)^2} - \frac{\rho_a F_v}{A_g} \right] x_s, u_s \quad (31)$$

Para el caso de noche,

$$a_{3,3} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[-\frac{B_n LAI}{\lambda} \frac{0.6219 P_{atm}}{(W_g + 0.6219)^2} - \frac{\rho_a F_v}{A_g} \right] x_s, u_s \quad (32)$$

Para el caso de $a_{3,4}$

$$a_{3,4} = \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$a_{3,4} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial D_m} E_p - \frac{\partial}{\partial D_m} E_v \right] x_s, u_s$$

Para el caso de día

$$a_{3,4} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{AI_o K \lambda_{LAI} m}{\lambda} \exp(-KLAI) + \frac{B_d D_i}{\lambda} \lambda_{LAI} m \right] x_s, u_s \quad (33)$$

Para el caso de noche

$$a_{3,4} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{B_n D_i}{\lambda} \lambda_{LAI} m \right] x_s, u_s \quad (34)$$

Para $a_{4,1}$

$$a_{4,1} = \frac{\partial f_4}{\partial x_1} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$a_{4,1} = \frac{\partial}{\partial T_g} [f_r * L_{inter} - M_r * D_m] x_s, u_s$$

$$a_{4,1} = \left\{ \frac{\partial}{\partial T_g} [f_r * L_{inter}] - \frac{\partial}{\partial T_g} [M_r * D_m] \right\} x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{4,1} = \left\{ (1 - e^{-K*LA I}) \frac{\varepsilon^2 R_n^2}{(\varepsilon R_n + f_{phot1})^2} [\alpha + 2\beta(T_g - T_{ref})] - R_r D_m b \exp(b(T_g - T_{ref})) \right\} x_s, u_s \quad (35)$$

Para $a_{4,2}$

$$a_{4,2} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial x_2} \right|_{x_s, u_s}$$

$$a_{4,2} = \frac{\partial}{\partial T_m} [f_r * L_{inter} - M_r * D_m] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{4,2} = 0 \quad (36)$$

Para $a_{4,3}$

$$a_{4,3} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial x_3} \right|_{x_s, u_s}$$

$$a_{4,3} = \frac{\partial}{\partial W_g} [f_r L_{inter} - M_r D_m] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{4,3} = 0 \quad (37)$$

Para $a_{4,4}$

$$a_{4,4} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \right|_{x_s, u_s}$$

$$a_{4,4} = \frac{\partial}{\partial D_m} [f_r L_{inter} - M_r D_m] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$a_{4,4} = \left\{ f_{phot1} \left[1 - \frac{f_{phot1}^2}{(\varepsilon L_{inter} \mu_g I_o + f_{phot1})^2} \right] \lambda_{LAI} m K e^{-K * LAI} - R_r \exp[b(T_g - T_{ref})] \right\} x_s, u_s \quad (38)$$

7.3.2 Elementos de la matriz B

$$b_{i,j} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{x_s, u_s}$$

Primer elemento de B,

$$b_{1,1} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{1,1} = \frac{\partial}{\partial I_o} \left\{ \frac{1}{K_g} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p] \right\}$$

$$b_{1,1} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial I_o} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial I_o} q_v - \frac{\partial}{\partial I_o} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial I_o} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial I_o} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial I_o} E_p \right]$$

Para el caso de día

$$b_{1,1} = \frac{1}{K_g} \left[\mu_g - AL_{inter} \right] x_s, u_s \quad (39)$$

Para el caso de noche

$$b_{1,1} = \frac{\mu_g}{K_g} \Big| x_s, u_s \quad (40)$$

Para $b_{1,2}$

$$b_{1,2} = \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \Big| x_s, u_s$$

$$b_{1,2} = \frac{\partial f_1}{\partial T_o} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial T_o} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial T_o} q_v - \frac{\partial}{\partial T_o} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial T_o} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial T_o} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial T_o} E_p \right] x_s, u_s$$

Para el caso de noche,

$$\frac{\partial}{\partial T_o} E_{pn} = \frac{\partial}{\partial T_o} \left[\frac{B_n LAID_i}{\lambda} \right] = 0$$

Finalmente,

$$b_{1,2} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{\rho_a c_p F_v}{A_g} + U_c \left(\frac{A_c}{A_g} \right) \right] x_s, u_s \quad (41)$$

Ahora, para $b_{1,3}$

$$b_{1,3} = \frac{\partial f_1}{\partial u_3} \Big| x_s, u_s$$

$$b_{1,3} = \frac{\partial f_1}{\partial v_o} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial v_o} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial v_o} q_v - \frac{\partial}{\partial v_o} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial v_o} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial v_o} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial v_o} E_p \right] x_s, u_s$$

Para el caso de noche,

$$\frac{\partial}{\partial v_o} E_{pn} = \frac{\partial}{\partial v_o} \left[\frac{B_n LAID_i}{\lambda} \right] = 0$$

Finalmente,

$$b_{1,3} = \frac{1}{K_g} \left[-\frac{\rho_a c_p}{A_g} (T_g - T_o) \left(\frac{A_w}{2} \right) C_d (C_w)^{0.5} \right] x_s, u_s \quad (42)$$

Ahora, para $b_{1,4}$

$$b_{1,4} = \frac{\partial f_1}{\partial u_4} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{1,4} = \frac{\partial f_1}{\partial W_o} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial W_o} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial W_o} q_v - \frac{\partial}{\partial W_o} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial W_o} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial W_o} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial W_o} E_p \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{1,4} = 0 \quad (43)$$

Ahora, para $b_{1,5}$

$$b_{1,5} = \frac{\partial f_1}{\partial u_5} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{1,5} = \frac{\partial f_1}{\partial A_w} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial A_w} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial A_w} q_v - \frac{\partial}{\partial A_w} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial A_w} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial A_w} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial A_w} E_p \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{1,5} = \frac{1}{K_g} \left[-\frac{\rho_a c_p}{A_g} (T_g - T_o) \frac{1}{2} C_d (C_w)^{0.5} v_o \right] x_s, u_s \quad (44)$$

Ahora, para $b_{1,6}$

$$b_{1,6} = \frac{\partial f_1}{\partial u_6} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{1,6} = \frac{\partial f_1}{\partial q_h} = \frac{1}{K_g} \left[\frac{\partial}{\partial q_h} q_{rg} - \frac{\partial}{\partial q_h} q_v - \frac{\partial}{\partial q_h} q_{cc} + \frac{\partial}{\partial q_h} q_{mg} + \frac{\partial}{\partial q_h} q_h - \lambda \frac{\partial}{\partial q_h} E_p \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{1,6} = \frac{1}{K_g} \quad (45)$$

Ahora, para $b_{2,1}$

$$b_{2,1} = \frac{\partial f_2}{\partial u_1} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{2,1} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial I_o} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial I_o} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial I_o} q_d \right] x_s, u_s$$

$$b_{2,1} = \frac{1}{K_m} [\mu_m \mu_g] x_s, u_s \quad (46)$$

Ahora, para $b_{2,2}$

$$b_{2,2} = \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{2,2} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial T_o} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial T_o} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial T_o} q_d \right] x_s, u_s$$

$$b_{2,2} = 0 \quad (47)$$

Ahora, para $b_{2,3}$

$$b_{2,3} = \frac{\partial f_2}{\partial u_3} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{2,3} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial v_o} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial v_o} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial v_o} q_d \right] x_s, u_s$$

$$b_{2,3} = 0 \quad (48)$$

Ahora, para $b_{2,4}$

$$b_{2,4} = \frac{\partial f_2}{\partial u_4} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{2,4} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial W_o} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial W_o} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial W_o} q_d \right] x_s, u_s$$

$$b_{2,4} = 0 \quad (49)$$

Ahora, para $b_{2,5}$

$$b_{2,5} = \frac{\partial f_2}{\partial u_5} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{2,5} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial A_w} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial A_w} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial A_w} q_d \right] x_s, u_s$$

$$b_{2,5} = 0 \quad (50)$$

Ahora, para $b_{2,6}$

$$b_{2,6} = \frac{\partial f_2}{\partial u_6} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{2,6} = \frac{1}{K_m} \left[\frac{\partial}{\partial q_h} q_{rm} - \frac{\partial}{\partial q_h} q_{mg} - \frac{\partial}{\partial q_h} q_d \right] x_s, u_s$$

$$b_{2,6} = 0 \quad (51)$$

Ahora, para $b_{3,1}$

$$b_{3,1} = \frac{\partial f_3}{\partial u_1} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{3,1} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial I_o} E_p - \frac{\partial}{\partial I_o} E_v \right]$$

Para el caso de día

$$b_{3,1} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{A[1 - \exp(-KLA I)]}{\lambda} \right] x_s, u_s \quad (52)$$

Para el caso de noche,

$$b_{3,1} = 0 \quad (53)$$

Para $b_{3,2}$

$$b_{3,2} = \frac{\partial f_3}{\partial u_2} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{3,2} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial T_o} E_p - \frac{\partial}{\partial T_o} E_v \right]$$

$$b_{3,2} = 0 \quad (54)$$

Para $b_{3,3}$

$$b_{3,3} = \frac{\partial f_3}{\partial u_3} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{3,3} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial v_o} E_p - \frac{\partial}{\partial v_o} E_v \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{3,3} = \frac{A_g}{V_g} \left[-\frac{(W_g - W_o)}{A_g} \left(\frac{A_w}{2} \right) C_d (C_w)^{0.5} \right] x_s, u_s \quad (55)$$

Ahora, para $b_{3,4}$

$$b_{3,4} = \frac{\partial f_3}{\partial u_4} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$b_{3,4} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial W_o} E_p - \frac{\partial}{\partial W_o} E_v \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{3,4} = \left. \frac{F_v}{V_g} \right|_{x_s, u_s} \quad (56)$$

Ahora, para $b_{3,5}$

$$b_{3,5} = \left. \frac{\partial f_3}{\partial u_5} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{3,5} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial A_w} E_p - \frac{\partial}{\partial A_w} E_v \right]_{x_s, u_s}$$

Finalmente,

$$b_{3,5} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[-\frac{\rho_a}{A_g} (W_g - W_o) \frac{1}{2} C_d (C_w)^{0.5} v_o \right]_{x_s, u_s} \quad (57)$$

Ahora, para $b_{3,6}$

$$b_{3,6} = \left. \frac{\partial f_3}{\partial u_6} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{3,6} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} \left[\frac{\partial}{\partial q_h} E_p - \frac{\partial}{\partial q_h} E_v \right]_{x_s, u_s}$$

$$b_{3,6} = 0 \quad (58)$$

Ahora, para $b_{4,1}$

$$b_{4,1} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial u_1} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{4,1} = \frac{\partial}{\partial I_o} [f_r * L_{inter} - M_r * D_m]_{x_s, u_s}$$

Finalmente,

$$b_{4,1} = \left[\frac{\varepsilon L_{inter}^2 \mu_g f_{phot1}^2}{(\varepsilon R_n + f_{phot1})^2} \right] = \varepsilon \mu_g \left(\frac{L_{inter} f_{phot1}}{\varepsilon R_n + f_{phot1}} \right)^2 \Big|_{x_s, u_s} \quad (59)$$

Ahora, para $b_{4,2}$

$$b_{4,2} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial u_2} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{4,2} = \left[\frac{\partial}{\partial T_o} (f_r * L_{inter}) - \frac{\partial}{\partial T_o} (M_r * D_m) \right]$$

Finalmente,

$$b_{4,2} = 0 \quad (60)$$

Ahora, para $b_{4,3}$

$$b_{4,3} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial u_3} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{4,3} = \left[\frac{\partial}{\partial v_o} (f_r * L_{inter}) - \frac{\partial}{\partial v_o} (M_r * D_m) \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{4,3} = 0 \quad (61)$$

Ahora, para $b_{4,4}$

$$b_{4,4} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial u_4} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{4,4} = \left[\frac{\partial}{\partial W_o} (f_r * L_{inter}) - \frac{\partial}{\partial W_o} (M_r * D_m) \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{4,4} = 0 \quad (62)$$

Ahora, para $b_{4,5}$

$$b_{4,5} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial u_5} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{4,5} = \left[\frac{\partial}{\partial A_w} (f_r * L_{inter}) - \frac{\partial}{\partial A_w} (M_r * D_m) \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{4,5} = 0 \quad (63)$$

Ahora, para $b_{4,6}$

$$b_{4,6} = \left. \frac{\partial f_4}{\partial u_6} \right|_{x_s, u_s}$$

$$b_{4,6} = \left[\frac{\partial}{\partial q_h} (f_r * L_{inter}) - \frac{\partial}{\partial q_h} (M_r * D_m) \right] x_s, u_s$$

Finalmente,

$$b_{4,6} = 0 \quad (64)$$

Los coeficientes de C y D se relacionan con las variables de salida.

Las salidas están dadas por:

$$g_1(x, u, p) = T_g$$

$$g_2(x, u, p) = T_m$$

$$g_3(x, u, p) = 100 \frac{P_v}{P_s} = \frac{100 \left(\frac{W_g P_{atm}}{0.622 + W_g} \right)}{611 \exp \left(\frac{17.502 T_g}{T_g + 240.97} \right)}$$

$$g_4(x, u, p) = D_m$$

7.3.3 Elementos de la matriz C

$$c_{i,j} = \left. \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right|_{x_s, u_s}$$

El primer coeficiente es,

$$c_{1,1} = \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{1,1} = \frac{\partial}{\partial T_g}(T_g) = 1 \quad (65)$$

Los demás coeficientes,

$$c_{1,2} = \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{1,2} = \frac{\partial}{\partial T_m}(T_g) = 0 \quad (66)$$

$$c_{1,3} = \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_3} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{1,3} = \frac{\partial}{\partial W_g}(T_g) = 0 \quad (67)$$

$$c_{1,4} = \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_4} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{1,4} = \frac{\partial}{\partial D_m}(T_g) = 0 \quad (68)$$

Ahora para el segundo renglón,

$$c_{2,1} = \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_1} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{2,1} = \frac{\partial}{\partial T_g}(T_m) = 0 \quad (69)$$

$$c_{2,2} = \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{2,2} = \frac{\partial}{\partial T_m}(T_m) = 1 \quad (70)$$

$$c_{2,3} = \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_3} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{2,3} = \frac{\partial}{\partial W_g}(T_m) = 0 \quad (71)$$

$$c_{2,4} = \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_4} \right|_{x_s, u_s} \quad c_{2,4} = \frac{\partial}{\partial D_m} (T_m) = 0 \quad (72)$$

Para el tercer renglón,

$$c_{3,1} = \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_1} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{3,1} = \frac{\partial}{\partial T_g} \left[\frac{100 \left(\frac{W_g P_{atm}}{0.622 + W_g} \right)}{611 \exp \left(\frac{17.502 T_g}{T_g + 240.97} \right)} \right] = 100 P_v \frac{\partial}{\partial T_g} \left(\frac{1}{P_s} \right)$$

$$c_{3,1} = - \frac{100 P_v}{P_s} \left[\frac{(17.502) 240.97}{(T_g + 240.97)^2} \right] x_s, u_s \quad (73)$$

Continuando,

$$c_{3,2} = \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_2} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{3,2} = \frac{\partial}{\partial T_m} \left[\frac{100 \left(\frac{W_g P_{atm}}{0.622 + W_g} \right)}{611 \exp \left(\frac{17.502 T_g}{T_g + 240.97} \right)} \right] = 0 \quad (74)$$

Para el siguiente,

$$c_{3,3} = \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_3} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{3,3} = \frac{\partial}{\partial W_g} \left[\frac{100 \left(\frac{W_g P_{atm}}{0.622 + W_g} \right)}{611 \exp \left(\frac{17.502 T_g}{T_g + 240.97} \right)} \right] x_s, u_s = \frac{100}{P_s} \frac{\partial}{\partial W_g} P_v$$

Finalmente,

$$c_{3,3} = \frac{100}{P_s} \frac{P_{atm} 0.622}{(0.622 + W_g)^2} \left| x_s, u_s \right. \quad (75)$$

Para el siguiente coeficiente,

$$c_{3,4} = \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_4} \right|_{x_s, u_s}$$

$$c_{3,4} = \frac{\partial}{\partial D_m} \left[\frac{100 \left(\frac{W_g P_{atm}}{0.622 + W_g} \right)}{611 \exp \left(\frac{17.502 T_g}{T_g + 240.97} \right)} \right] x_s, u_s = 0 \quad (76)$$

Para el siguiente renglón,

$$c_{4,1} = \frac{\partial g_4}{\partial T_g} \Big| x_s, u_s \quad c_{4,1} = \frac{\partial}{\partial T_g} (D_m) = 0 \quad (77)$$

$$c_{4,2} = \frac{\partial g_4}{\partial T_m} \Big| x_s, u_s \quad c_{4,2} = \frac{\partial}{\partial T_m} (D_m) = 0 \quad (78)$$

$$c_{4,3} = \frac{\partial g_4}{\partial W_g} \Big| x_s, u_s \quad c_{4,3} = \frac{\partial}{\partial W_g} (D_m) = 0 \quad (79)$$

$$c_{4,4} = \frac{\partial g_4}{\partial D_m} \Big| x_s, u_s \quad c_{4,4} = \frac{\partial}{\partial D_m} (D_m) = 1 \quad (80)$$

7.3.4 Elementos de la matriz D

$$d_{i,j} = \frac{\partial g_i}{\partial u_j} \Big| x_s, u_s$$

$$d_{i,j} = 0, \text{ para } i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 6 \quad (81)$$

Resumiendo, las matrices A, B, C y D tienen los siguientes elementos:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & 0 & 0 \\ a_{3,1} & 0 & a_{3,3} & a_{3,4} \\ a_{4,1} & 0 & 0 & a_{4,4} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} & 0 & b_{1,5} & b_{1,6} \\ b_{2,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{3,3} & b_{3,4} & b_{3,5} & 0 \\ b_{4,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ c_{3,1} & 0 & c_{3,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

7.3.5 Cálculo de las constantes tiempo

Con los valores estacionarios de los estados y de las entradas, además de la matriz A, se obtuvieron las siguientes constantes tiempo para cada variable de salida del modelo (Cuadro 18).

Cuadro 18. Valores propios, valores de los estados del modelo en estado estacionario y constantes tiempo del sistema.

Variable de salida	Valores propios	Valor en estado estacionario	Constantes tiempo			
			Segundos	Minutos	Horas	Días
Temperatura del aire	-3.6×10^{-3}	57.76 °C	276.89	4.61	0.08	0.003
Temperatura de la masa térmica	-2.28×10^{-3}	44.20 °C	437.35	7.29	0.12	0.005
Humedad relativa	-6.33×10^{-5}	0.25 kg kg ⁻¹	15791.15	263.19	4.39	0.18
Biomasa	-1.6×10^{-6}	0.05 kg m ⁻²	623051.09	10384.18	173.07	7.21

De acuerdo a los valores de las constantes tiempo, hay una respuesta rápida en la temperatura del aire (valor propio grande, constante tiempo muy pequeña, 276s) y una respuesta lenta (valor propio muy pequeño, constante tiempo muy grande 7.2 días) en la biomasa. Esto tiene sentido ya que el cambio en la temperatura ocurre rápido mientras que la acumulación de biomasa de un cultivo tarda días.

Los valores propios son negativos y reales por lo que el sistema es estable y no hay oscilaciones. La diferencia en magnitud, entre la constante tiempo de la biomasa y de la temperatura del aire (la constante tiempo mayor y la menor, respectivamente) es mayor a 1 por lo que el microclima del invernadero-cultivo es rígido.

Las variables transformadas son:

$$\begin{aligned}
z_1 &= -0.9356T_g + 0.0239T_m + 66.78W_g + 34.03D_m \\
z_2 &= 0.0642T_g - 0.0026T_m + 66.79W_g + 0.107D_m \\
z_3 &= -0.0105T_g - 1.0002T_m - 0.4045W_g + 19.98D_m \\
z_4 &= -0.0001T_g - 0.0002T_m - 0.0072W_g + 39.67D_m
\end{aligned}$$

Es fácil notar que aunque las funciones dependen de las cuatro variables en el caso de z_1 el comportamiento es regido principalmente por la humedad relativa y la biomasa, en el caso de z_2 , es la humedad relativa quien determina el comportamiento, en el caso de z_3 , y z_4 la biomasa tiene una gran influencia.

Dado que la biomasa es la que tiene valores grandes en la mayoría de las variables transformadas se debe incluir en la modelación del sistema invernadero, tal como se mostró en el Capítulo 4 hay una gran influencia de esta variable en el comportamiento del clima dentro del invernadero.

7.4 Conclusiones

Si se desea conocer el comportamiento de cada variable de manera precisa en el sistema real, el intervalo de muestreo de datos debe ser de 3 minutos o menos para el caso de las temperaturas, para la humedad relativa de 2 horas o menos y para la biomasa de 4 días o menos. La temperatura del aire tiene la respuesta más rápida del sistema por lo que se debe tomar especial atención en la toma de datos, seguida por la temperatura de la masa térmica, humedad relativa y finalmente la biomasa.

El sistema es estable y no tiene oscilaciones, además es altamente rígido por la diferencia de magnitud en las constantes tiempo de las temperaturas, la humedad y la biomasa

Considerar el cultivo en la modelación del invernadero es importante para tener una buena aproximación del sistema real.

Capítulo 8

Asimilación de datos para estimación de estados mediante un filtro de Kalman extendido

8.1 Introducción

Hasta ahora se ha asumido que la estimación de parámetros está basada en un muestreo aleatorio de la población objetivo del sistema tratado. Teniendo esto en cuenta queremos que los parámetros sean representativos de la población objetivo porque permiten que el modelo sea así un buen estimador de las variables de estado del sistema. Incluso, se ha enfatizado en el error cuadrático medio de predicción (MSEP) y el error cuadrático medio (MSE) para evaluar el modelo, ya que este criterio mide que tan bien se ajustan las predicciones al comportamiento de las poblaciones objetivos. Sin embargo, en este Capítulo se considera modificar la población del modelo para hacerlo un mejor predictor para una situación específica, se asume que tenemos información que permite modificar el modelo para una situación específica de interés. A esta modificación basada en mediciones se le conoce como asimilación de datos y los Filtros de Kalman entran dentro de estos métodos (Makowski et al., 2006).

El filtro de Kalman Extendido (EKF, Extended Kalman Filter en inglés), es un algoritmo ampliamente utilizado para estimación de estados y parámetros de un modelo dinámico usando mediciones llevando a cabo una aproximación mediante series de Taylor de primer orden (linealización). Se ha usado para estimar parámetros y estados de una turbina eólica (Mateljak et al., 2011), usado como estimación de tráfico (Antoniou et al., 2007), utilizado como un filtro dual de estimación de parámetros y estados en vehículos (Wenzel et al., 2006), en control de clima en invernaderos (Shi et al., 2012; Hameed, 2010) e incluso la

identificación de la matriz de covarianza para el proceso y las mediciones (Bavdekar et al., 2011). Sin embargo varios autores han mencionado las desventajas de usar el filtro de Kalman Extendido, algunos de estos problemas son la limitación para incorporar restricciones físicas a los estados, el pobre uso del modelo no lineal, no es recomendable usarlo en modelos de alta dimensionalidad por el costo computacional y la cantidad de integraciones que se requieren durante la actualización de la matriz de covarianzas del error y en modelos que contienen funciones no derivables provocan inestabilidades (Wilson et al., 1998; Reichle et al., 2002; Haseltine y Rawlings, 2003; Antoniou et al., 2007).

Los objetivos de este Capítulo son implementar el filtro de Kalman Extendido para estimar los estados utilizando mediciones junto con el modelo calibrado y evaluado en el Capítulo 5 a fin de mejorar su desempeño al simular las variables de salida y mejorar la predicción del modelo para datos de otro invernadero sin volver a calibrar el modelo.

8.2 Materiales y métodos

8.2.1 Modelo

El modelo utilizado para simular el clima dentro del invernadero se describe en el Capítulo 2, con cuatro variables de estado siendo temperatura del aire, temperatura de la masa térmica, humedad específica y biomasa.

El modelo se calibró y validó en el Capítulo 5.

A pesar de que el modelo mostró un buen comportamiento, como lo muestran las estadísticas presentadas en el Capítulo 5, para poder aplicarlo en otras condiciones es

necesario volver calibrar el modelo a fin de contar con una mejor aproximación de los estados.

8.2.2 Diseño del Filtro de Kalman Extendido

Como respuesta al problema de tener que volver a calibrar los parámetros en caso de contar con nuevos datos, se optó por usar una técnica de asimilación de datos como lo es el Filtro de Kalman Extendido (EKF, por sus siglas en inglés).

La idea de usar un Filtro de Kalman Extendido fue estimar los estados mediante el uso de mediciones. La metodología seguida propuesta por Ribeiro (2004) para el uso del Filtro de Kalman Extendido:

1. Considerar la estimación filtrada anterior de los estados $\hat{x}(k|k)$,
2. Linealizar la dinámica del sistema, $x_{k+1} = f(x_k) + w_k$ alrededor de $\hat{x}(k|k)$,
3. Aplicar la etapa de predicción del Filtro de Kalman al sistema linealizado, resultando en $\hat{x}(k+1|k)$ y $P(k+1|k)$,
4. Linealizar la dinámica de las observaciones, $y_k = h(x_k) + v_k$ alrededor de $\hat{x}(k+1|k)$,
5. Aplicar la etapa de filtrado o actualización del Filtro de Kalman a las observaciones linealizadas, resultando en $\hat{x}(k+1|k+1)$ y $P(k+1|k+1)$.
6. Regresar al paso 1.

Sean $F(k)$ y $H(k)$ las matrices Jacobianas de $f(\cdot)$ y $h(\cdot)$, denotadas por:

$$F(k) = \nabla f_k|_{\hat{x}(k|k)}$$

$$H(k+1) = \nabla h|_{\hat{x}(k+1|k)}$$

Las matrices F y H son las matrices A y C obtenidas en el Capítulo 6 de linealización del modelo.

El algoritmo del filtro de Kalman se presenta como:

Etapa de Predicción

$$\hat{x}(k+1|k) = f_k(\hat{x}(k|k))$$

$$P(k+1|k) = F(k)P(k|k)F^T(k) + Q(k)$$

Etapa de Filtrado

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)[y_{k+1} - h_{k+1}(\hat{x}(k+1|k))]$$

$$K(k+1) = P(k+1|k)H^T(k+1)[H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) + R(k+1)]^{-1}$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1|k)$$

El modelo es no lineal y continuo por lo que se debe discretizar y linealizar para poder utilizar el filtro.

La discretización se llevó a cabo con el método de integración de Euler con un paso de 1/60 (debido a que las mediciones se realizaron cada minuto), quedando el modelo de forma general:

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1},$$

$$y_k = h(x_k) + v_k$$

Donde w_k y v_k son el ruido del proceso y las mediciones, respectivamente, considerados como variables estocásticas con media cero y con una distribución normal, es decir,

$$w_k \sim (0, Q_k)$$

$$v_k \sim (0, R_k)$$

Donde Q_k y R_k son las correspondientes covarianzas.

Los valores de las matrices de covarianzas Q y R se establecieron manualmente en un proceso iterativo (sintonización) hasta que se observó una mejora en la estimación de los estados. Los datos para evaluar el desempeño del filtro son los mismos que se usaron en el Capítulo 5 de validación del modelo.

8.2.3 Evaluación de desempeño

Se utilizaron dos juegos de datos para la implementación del filtro, el primer conjunto corresponde a los 7 días usados para evaluación y el segundo datos de un invernadero en Aquixtla, Puebla.

Para evaluar las predicciones del Filtro de Kalman Extendido con respecto a los estados se usaron las estadísticas RMSE (Raíz del error cuadrático medio), MAE (Error medio absoluto), EF (Eficiencia de modelación) y el Sesgo (Bias).

8.3 Resultados y discusión

Las variables de salida, temperatura del aire (°C), temperatura de la masa térmica (°C) y humedad relativa (%), fueron simuladas con el modelo sin calibrar, calibrado y el Filtro de Kalman Extendido y se compararon las estadísticas asociadas con cada una de las simulaciones (Cuadro 19). Las condiciones iniciales fueron las mismas para los tres casos. No se consideró la variable biomasa dado que no se tienen datos para poder usar el filtro.

Para probar la robustez del filtro se variaron las condiciones iniciales para las variables de estado en un 500%, además de los valores de las matrices Q, R y P en un 200%, estos valores no modificaron el comportamiento del Filtro en gran medida, se observan estadísticas mayores pero en general el comportamiento es mejor que el modelo calibrado y sigue siendo un buen estimador el EKF de los estados y por tanto, de las variables de salida del modelo.

La matriz de varianzas asociada a las mediciones fue:

$$R_k = \begin{bmatrix} 0.4^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}$$

La matriz de varianzas asociada con el modelo fue:

$$Q_k = \begin{bmatrix} 0.09^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.09^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03^2 \end{bmatrix}$$

La matriz de covarianzas de error inicial fue:

$$P_k = \begin{bmatrix} 2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2^2 \end{bmatrix}$$

Cuadro 19. Estadísticas de evaluación del desempeño del modelo sin calibrar, calibrado y con la implementación del filtro EKF.

Estadística	Modelo sin calibrar	Modelo calibrado	Modelo con EKF
Temperatura del aire (°C)			
Sesgo (Bias)	-1.87	-0.64	-0.0009
RMSE	3.16	1.87	0.32
MAE	1.99	1.41	0.19
EF	0.33	0.83	0.99
Temperatura de la masa térmica (°C)			
Sesgo (Bias)	0.51	0.46	-0.0002
RMSE	1.74	1.24	0.04
MAE	1.39	0.90	0.03
EF	0.69	0.87	0.99

	Humedad relativa (%)		
Sesgo (Bias)	13.06	0.78	0.0004
RMSE	15.18	5.09	0.02
MAE	13.17	4.09	0.006
EF	-0.09	0.88	0.99

De acuerdo al sesgo el modelo con el filtro EKF se sobreestima la temperatura del aire y la temperatura de la masa térmica, sin embargo los valores son muy pequeños indicando que es mínima la diferencia entre las mediciones y los valores simulados, la humedad relativa es subestimada dado el sesgo positivo y tiene un valor pequeño. Se puede apreciar que el modelo con el filtro tiene un mejor desempeño comparado con el modelo calibrado y el modelo sin calibrar, además se nota la ventaja de calibrar los parámetros. La eficiencia de modelación es superior a 0.98 para el caso del modelo con filtro, mucho mayor que la del modelo calibrado que no sobrepasa 0.88, de igual manera que el modelo sin calibrar donde la máxima eficiencia se presenta en la temperatura de la masa térmica con 0.69.

La variable que presenta mayor Error absoluto medio (MAE) con el filtro fue la temperatura del aire con 0.19, seguida de la temperatura de la masa térmica con 0.03 y finalmente la humedad relativa con 0.006, todos ellos valores menores que los que se presentan en el modelo calibrado y sin calibrar. La razón de que la temperatura del aire tenga un error mayor que las otras dos variables se debe a que la incertidumbre que presenta es mayor provocando que el Filtro confíe un poco menos en las mediciones de esta temperatura.

El modelo calibrado sobre estima la temperatura, tal como se corrobora con el sesgo, las mediciones y el modelo con el filtro son muy parecidos pero no iguales, esto se debe a

que la matriz Q tiene valores muy pequeños para esta variable provocando que no se confíe del todo en las mediciones (Figura 52a y 52b).

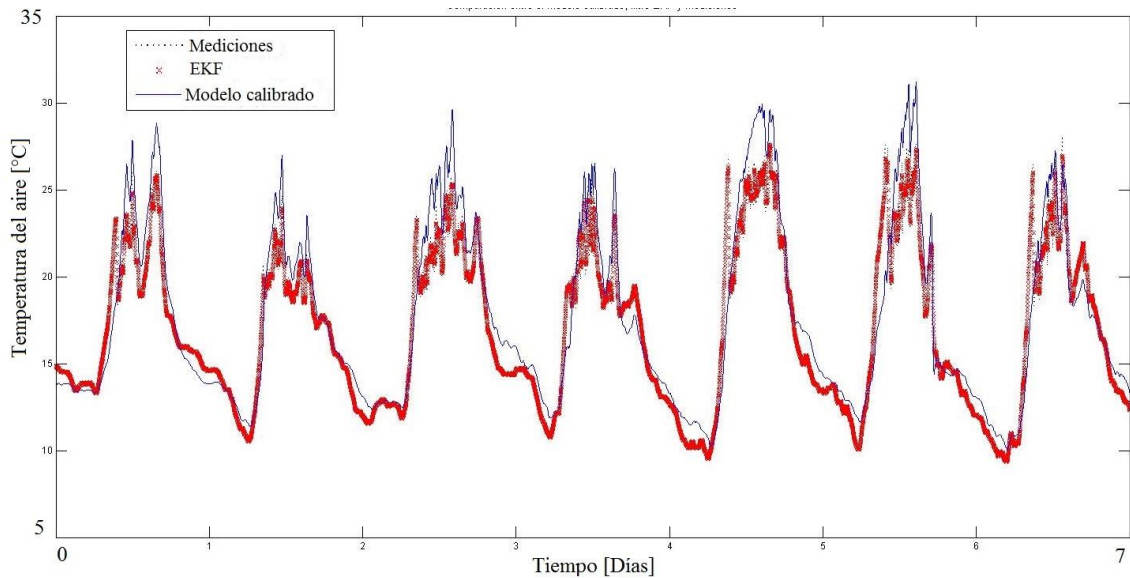


Figura 52a. Temperatura del aire con el modelo calibrado (línea continua en azul), con el modelo y el filtro (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).

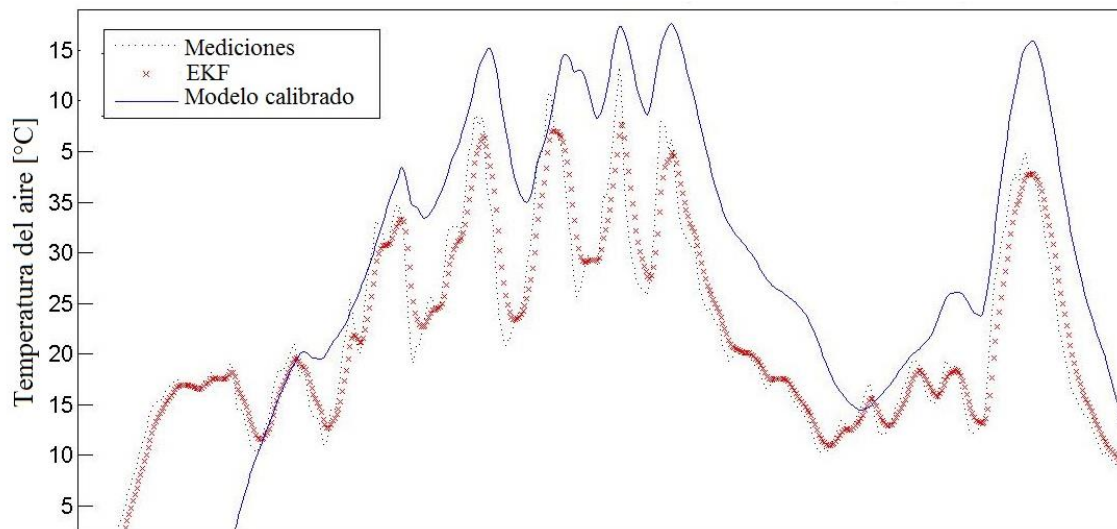


Figura 52b. Acercamiento de la Figura 52a.

La temperatura es subestimada por el modelo calibrado, tal como lo comprueba el sesgo, las mediciones y el filtro tienen comportamientos similares y valores cercanos (Figura 53a y 53b).

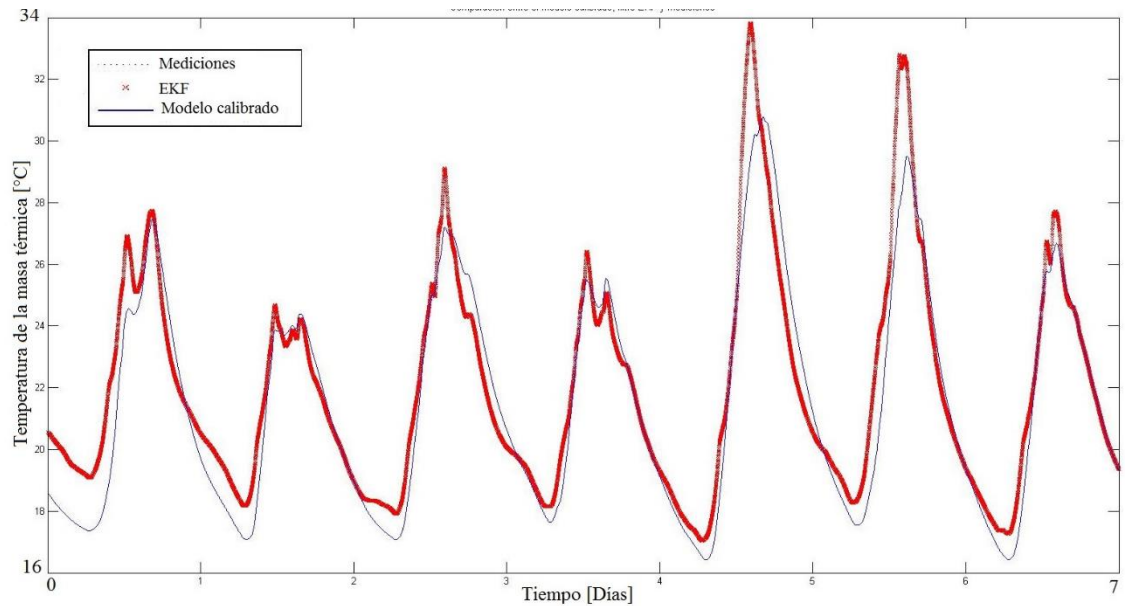


Figura 53a. Temperatura de la masa térmica con el modelo calibrado (línea continua en negro), con el modelo y el filtro (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).

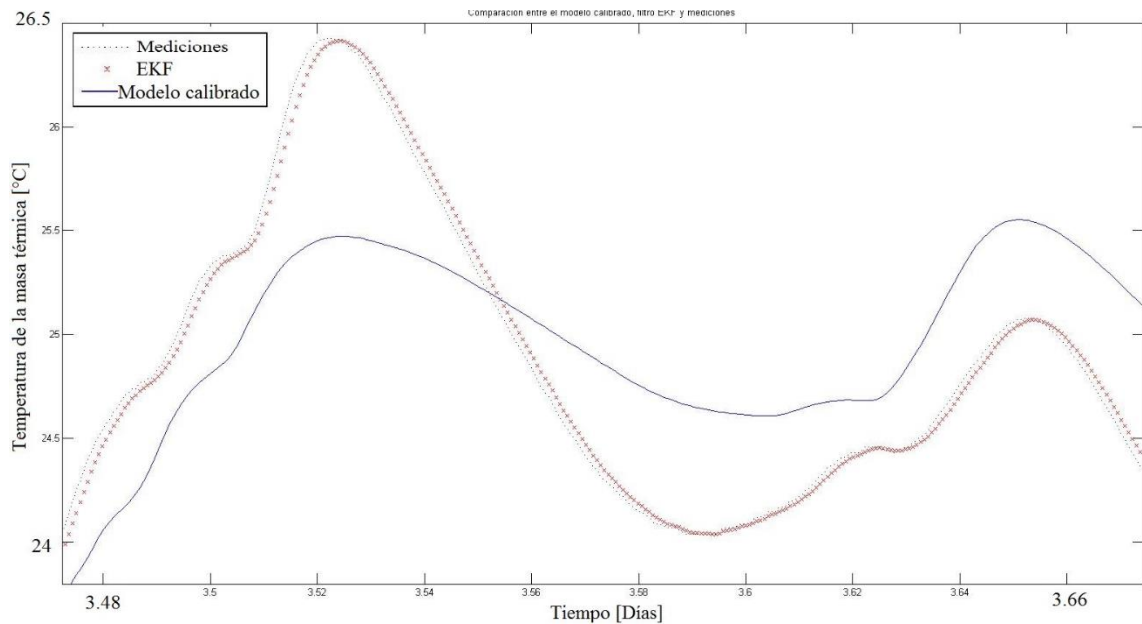


Figura 53b. Acercamiento de la Figura 53a.

En el caso de la humedad relativa es donde se observa un gran mejoramiento en la simulación, en promedio el modelo calibrado subestima la variable, los valores simulados con el filtro se acercan demasiado a las mediciones dado que el modelo calibrado no puede estimar mejor la humedad (Figura 54a y 54b).

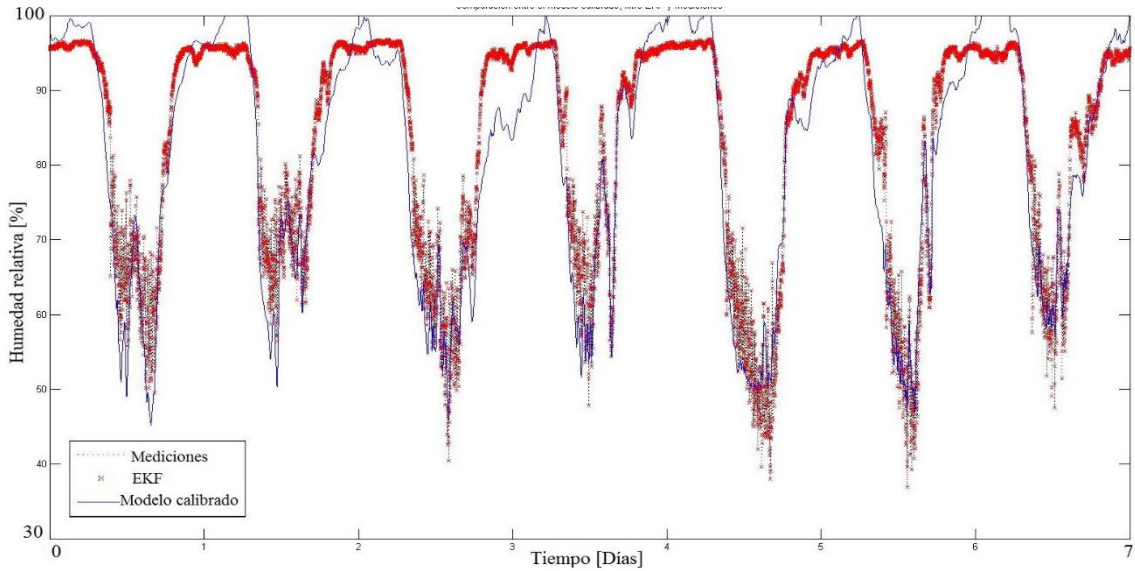


Figura 54a. Humedad relativa con el modelo calibrado (línea continua en azul), con el modelo y el filtro (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).

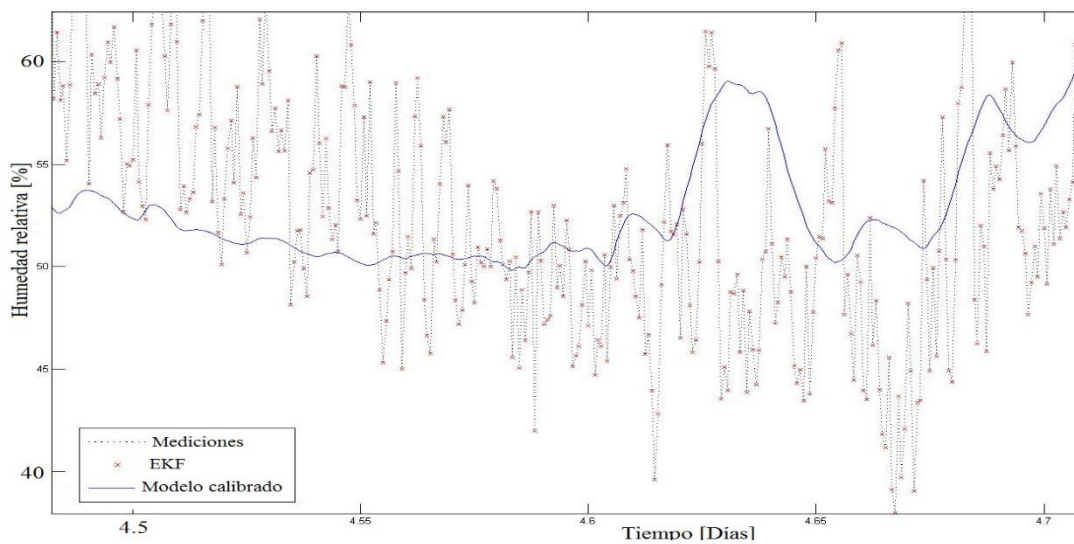


Figura 54b. Acercamiento de la Figura 54a.

Al someter el modelo calibrado a nuevos datos de Puebla y sin calibrarlo para estas nuevas condiciones se realizaron simulaciones para evaluar su comportamiento comparado con la implementación del Filtro de Kalman Extendido. El sesgo se ve reducido con el modelo acoplado con el filtro que sólo calibrado para las tres variables del clima. Además la eficiencia de modelación es superior al 97%, una mejora considerable con respecto al modelo calibrado (Cuadro 20).

Cuadro 20. Estadísticas de evaluación del desempeño del modelo calibrado y con la implementación del filtro EKF con los datos de Puebla.

Estadística	Modelo calibrado	Modelo con EKF
Temperatura del aire (°C)		
Sesgo (Bias)	1.34	0.04
RMSE	3.2	1.26
MAE	2.46	0.80
EF	0.83	0.97
Temperatura de la masa térmica (°C)		
Sesgo (Bias)	-4.21	0.01
RMSE	6.52	0.18
MAE	4.70	0.13
EF	0.63	0.99
Humedad relativa (%)		
Sesgo (Bias)	7.13	0.007
RMSE	13.64	0.28
MAE	12.01	0.035
EF	0.63	0.99

El comportamiento de la temperatura del aire simulada con el modelo calibrado es muy cercano al de las mediciones (Figura 55) aunque los valores difieren en gran medida como lo muestra el error absoluto medio de 2.46. La eficiencia de esta variable es alta con 0.83 (Cuadro 20).

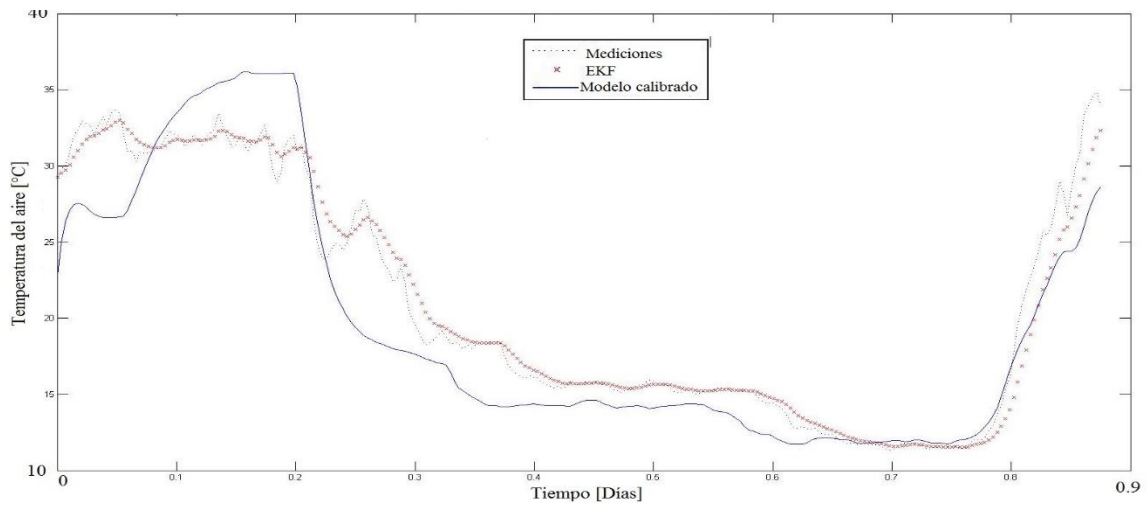


Figura 55. Temperatura del aire con el modelo calibrado (línea continua en azul), el modelo con el filtro EKF (cruces en rojo) y mediciones (línea discontinua en negro) para el caso Puebla.

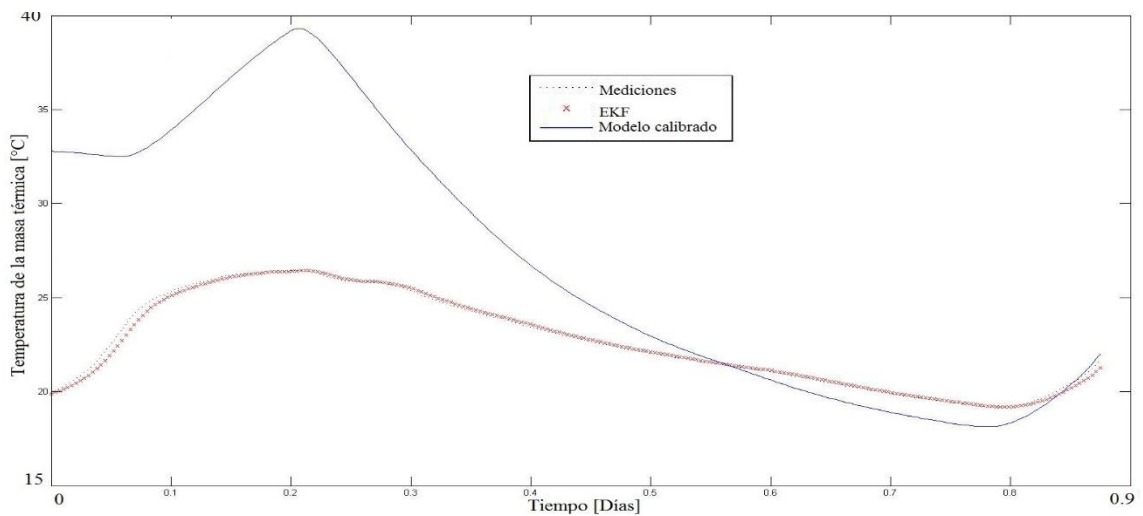


Figura 56. Temperatura de la masa térmica con el modelo calibrado (línea continua en azul), el modelo con el filtro EKF (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).

El comportamiento de la masa térmica con los nuevos datos es muy distinto entre el modelo calibrado y las mediciones (Figura 56). Esta variable es la que presenta más incertidumbre en la simulación con un error medio absoluto del modelo calibrado de 4.7.

La humedad relativa simulada es muy similar a las mediciones lo que es una buena señal del correcto desempeño del modelo (Figura 57). La eficiencia es baja, de tan solo 0.69, el error medio absoluto de 12%.

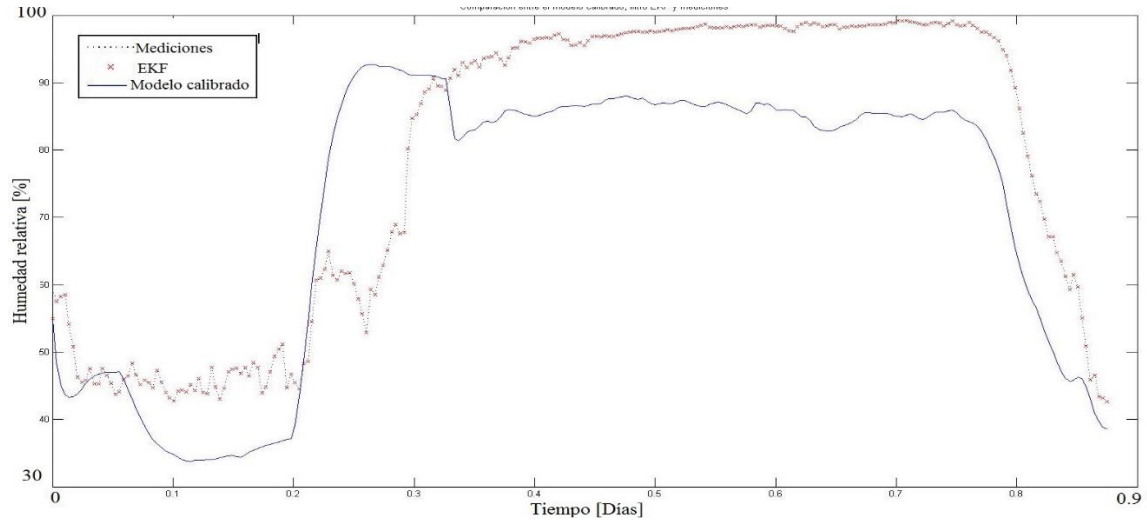


Figura 57. Humedad relativa con el modelo calibrado (línea continua en azul), el modelo con el filtro EKF (cruces en rojo) y las mediciones (línea discontinua en negro).

8.4 Conclusiones

El filtro de Kalman Extendido presentó una mejora en la simulación de las variables de salida: temperatura del aire, temperatura de la masa térmica y humedad relativa. A pesar de que es un filtro que puede divergir en el caso de modelos altamente no lineales, el modelo, al ser simple y no altamente no lineal, permite su uso con facilidad. El cálculo de las matrices F y H no fue una complicación puesto que las funciones eran derivables y continuas.

El uso del filtro de Kalman Extendido para estimar los estados en condiciones diferentes para los que se generó el modelo es una buena herramienta.

Capítulo 9

Conclusiones generales

1.- Los diagramas de control y gráficas mostradas sobre los requerimientos de clima son herramientas útiles e indispensables para comprender cómo deben establecerse los invernaderos en función de las condiciones meteorológicas en las que trabajará. Hace falta evaluar si los invernaderos actuales en México cumplen con lo recomendado en las gráficas.

2.- Considerar la ecuación de la biomasa dentro del modelo como un sistema acoplado presenta una aproximación más real al comportamiento del sistema. Hay una gran influencia del cultivo sobre las variables de estado del modelo.

3.- El método de coeficientes de regresión estandarizado proporcionó un análisis confiable al ser comparado con los métodos de Sobol y el método eFAST. Los parámetros más relevantes para las temperaturas son los que se asocian con los coeficientes de transferencia y las áreas, lo que es racional. Para el caso de la humedad y la biomasa son los parámetros asociados con el cultivo, en especial con el índice de área foliar, corroborando la importancia de considerar el cultivo.

4.- El modelo calibrado es una buena estimación del sistema. El modelo tiende a sobreestimar la temperatura del aire, subestimar la temperatura de la masa térmica y subestimar la humedad relativa. El error medio absoluto es de 1.41 °C para la temperatura del aire, 0.9°C para la temperatura de la masa térmica y 4.09% de la humedad relativa. Sin embargo se requieren de más datos para poder evaluar el desempeño del modelo por un periodo mayor de tiempo, por ejemplo, un año.

5.- Las variables que presentan mayor variabilidad en el modelo es la biomasa seguida de la temperatura de la masa térmica. Una variabilidad pequeña como lo es $\pm 20\%$ en el valor nominal de los parámetros genera una baja variabilidad en la temperatura del aire, humedad relativa y biomasa pero no así en la temperatura de la masa térmica.

6.- El modelo es estable y no tiene oscilaciones, es altamente rígido debido a la diferencia entre las constantes tiempo. El intervalo de muestreo para datos debe ser de 3 minutos o menos para la temperatura del aire y de la masa térmica, 2 horas o menos de la humedad relativa y de 4 días o menos para la biomasa.

7.- El modelo con el filtro de Kalman Extendido mejoró la simulación de las variables de salida del modelo. La temperatura del aire presentó un error medio absoluto de 0.19°C , la temperatura de la masa térmica de 0.03°C y la humedad relativa de 0.006% . No hubo necesidad de calibrar el modelo para nuevos datos, bastó con utilizar el filtro para obtener una mejora en las estimaciones con el modelo calibrado.

Referencias

- Antoniou C., Koutsopoulos H., N., Yannis G. 2007. An efficient non-linear Kalman filter algorithm using simultaneous perturbation and applications in traffic estimation and prediction. Intelligence transportation systems conference. Seattle. 217-222 pp.
- Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC), 2009. Estudio de oportunidades externas para el desarrollo de la inteligencia comercial del Mercado de exportación de la horticultura protegida.
- Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC), 2013. Agricultura protegida en México. Disponible en <http://www.amhpac.org/es/index.php/homepage/agricultura-protegida-en-mexico>.
- Baille, M., A. Baille, and J.C. Laury. 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae* 59: 217-232.
- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Meneses, J. F., Navas, I. M. 2010. Greenhouse climate modelling. Tests, adaption and validation of a dynamic climate model. *Spanish journal of agricultural research*. 8(2): 285-298.
- Baudoin W., Grafiadellis M., Jiminez R., La Malfa G., Martinez-Garcia P. F., Garnaud J. C., Montero A. A., Nisen A., Verlodt H., de Villele O., von Zabeltitz C. 1991. Protected cultivation in the Mediterranean climate. FAO plant production and protection paper no. 90.
- Baudoin W., Nono-Womdim R., Lutaladio N., Hodder A., Castilla N., Leonardi C., De Pascale S., Qaryouti M. 2013. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetables crops, principles for Mediterranean climate areas. FAO plant production and protection paper 217.
- Bavdekar, V. A., Deshpande, A. P., Patwardhan, S. C. 2011. Identification of process and measurement noise covariance for state and parameter estimation using extended Kalman filter. *Journal of process control*. 21:585-601.
- Blasco, X., Martínez, M., Herrero, J. M., Ramos, C., Sanchis, J. 2007. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and electronics in agriculture*. 55: 49-70.
- BCMA (British Columbia Ministry of Agriculture, Food and Fisheries Industry Competitiveness Branch). 2003. An Overview of the BC Greenhouse Vegetable Industry. Columbia. 11 p.
- Castañeda-Miranda, R., E. Jr. Ventura-Ramos, R.R. Peniche-Vera, and G. Herrera-Ruiz. 2007. Analysis and simulation of a greenhouse physical model under weather conditions of the central region of Mexico. *Agrociencia* 41: 317-335.
- Castilla N., Hernandez J. 2007. Greenhouse technological packages for high quality production. *Acta Hort* 761: 285-297.

De Gelder A., E., H. Poot, J., A. Dielemen, H., F. de Zwart. A concept for reduced energy demand of greenhouse: the next generation greenhouse cultivation in the Netherlands. 2012. *Acta Hortic.* 952: 539-544.

Fatnassi, H., Boulard, T., Bouriden, L. 2013. Development, validation and use of a dynamic model for simulate the climate conditions in a large scale greenhouse equipped with insect-proof nets. *Computers and electronics in agriculture.* 98: 54-61.

Fitz-Rodríguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G. A., Tignor, M. E., Wilson, S. B., McMahon, M. 2010. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and electronics in agriculture.* 70: 105-116.

García Enriqueta. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. 246 pp.

García V. N., van der Valk O., Elings A. 2011. Mexican protected horticulture. Report GTB-1126. Wageningen UR Greenhouse Horticulture.

Guzmán-Cruz, R., R. Castañeda-Miranda, J.J. García-Escalante, I.L. López-Cruz, A. Lara-Herrera, and J.I. de la Rosa. 2009 Calibration of a greenhouse climate model using evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering* 104: 135-142.

Hameed, I. A. 2010. Using the Extended Kalman Filtering to improve the efficiency of greenhouse climate control. *International journal of innovative computing.* 6(6): 2671-2680.

Harwood, T. D., Al Said, F. A., Pearson, S., Houghton, S. J. and Hadley, P. 2010. Modelling uncertainty in field grown iceberg lettuce production for decision support. *Computers and electronics in agriculture.* 71:57-63.

Haseltine, E. L. y Rawlings, J. B. 2003. A critical evaluation of Extended Kalman Filtering and moving horizon estimation. Technical report number 2002-03. Texas. 48 pp.

Hosney, F. F., Mohamed, H. F., Mohamed, N. A., Nafeh, A. A. 2012. Modeling and simulation of evaporative cooling systema in controlled environment greenhouse. *Smart grid and renewable energy.* 3: 67-71.

Iooss B. & Lemaître P. 2015. A review on global sensitivity analysis methods. Meloni C. & Dellino G. *Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications.* Springer.

Kacira, M. 2011. Greenhouse Production in US: Status, Challenges, and Opportunities. Presented at CIGR 2011 conference on Sustainable Bioproduction WEF 2011, September 19-23, 2011. Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan.

Leal, J. I. 2008. Modeling of the climate for a greenhouse in the north-east of México. *Proceedings of the 17th world congress.* IFAC. 9558-9563.

López-Cruz, I. L., A. Ramírez-Arias, A. Rojano-Aguilar, A. Ruíz-García. 2008 Modeling of greenhouse climate using evolutionary algorithms. *Acta Hortic.* 801: 401-408.

- López-Cruz, I.L. y Hernández-Larragoiti, L. 2010. Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México. *Agrociencia* 44: 791-805.
- López-Cruz I. L., Salazar-Moreno R., Rojano-Aguilar A., Ruíz-García A. 2012. Global sensitivity analysis of a greenhouse lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop model. *Agrociencia* 46: 383-397.
- López-Cruz, I. L., Ruíz-García, A., Ramírez-Arias, A. y Vázquez-Peña, M. A. 2013. Análisis de incertidumbre de un modelo para lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en invernadero. *Revista Chapingo serie Horticultura*. 19(1): 33-47.
- López-Cruz I. L., Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar A., Ruíz-García A., Trejo-Zúñiga E., C. 2014. Metodología en modelación matemática dinámica en ambientes agrícolas controlados: avances y retos. En: Pérez S., F., Figueroa H., E., Godínez M., L., García N., R. M. (Compilación y edición) *Investigación en matemáticas, economía y ciencias sociales*. Universidad Autónoma Chapingo. 34-47 pp.
- Luo W., de Zwart H. F., Dail J., Wang X., Stanghellini C., Bu C. 2005. Simulation of greenhouse management in the subtropics, Part I: Model validation and scenario study for winter season. *Biosystems engineering*. 90(3): 307-318.
- Makowski, D., Guérif, M., Jones, J. W., Graham, W. 2006. Data assimilation with crop models. In Wallach, D., D. Makowski and J. W. Jones (eds). *Working with Dynamic Crop Models: Evaluation, Analysis, Parametrization, and Applications*. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands 447 pp.
- Mateljak P., Petrovic V., Baotic M. 2011. Dual Kalman estimation of wind turbine states and parameters. 18th International conference on process control. Slovakia 85-91 pp.
- Misra, D., Ghosh, S. 2013. Thermal modeling of a rigid-ventilated greenhouse equipped with longitudinally distributed evaporative cooling pads. *International journal of emerging, technology and advanced engineering*. 3: 348-353.
- Monod, H., C. Naud, and D. Makowski. 2006. Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. In Wallach, D., D. Makowski and J. W. Jones (eds). *Working with Dynamic Crop Models: Evaluation, Analysis, Parametrization, and Applications*. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands 447 pp.
- Nisen A, Sirjacobs M, von Zabeltitz C. 1984. Protected cultivation in Mediterranean climate, greenhouses in Egypt. FAO, Rome.
- Nisen A, Olympios C, Verlodt H, von Zabeltitz C. 1990. Protected cultivation in the Mediterranean climate. Greenhouses for Cyprus. FAO, Rome.
- Reichle, R. H., Walker, J. P., Koster, R. D., Houser, P. R. 2002. Extended versus Ensemble Kalman filtering for land data assimilation. *Journal of hydrometeorology*. 3: 728-740.
- Ribeiro, M.I. 2004. Kalman and Extended Kalman Filters: concept, deviation and properties. Institute for systems and robotics. Portugal. 42 pp.

- Romero, P., Giacomelli, G. A., Choi, C. Y., López-Cruz I. 2006. Ventilation rates for naturally-ventilated greenhouse in central Mexico. *Acta Hort.* 719: 65-72.
- Ruíz-García, A. 2014. Modelación y análisis del ambiente de un invernadero con ventilación natural. Tesis doctoral. Universidad Autónoma Chapingo. 93 pp.
- SAGARPA. 2013. Atlas agroalimentario. Primera edición. México. 192 pp.
- Saltelli A. 1999. Sensitivity Analysis: Could better methods be used? *Journal of Geophysical Research.* 140: 3789-3793.
- Saltelli, A., K. Chan, and E. M. Scott (eds). 2000. *Sensitivity Analysis.* John Wiley & Sons Ltd. Chichester. UK. 475 pp.
- Saltelli A., Ratto, M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M. y Tarantola S. 2008. *Global Sensitivity Analysis. The primer.* John Wiley & Sons, Ltd. Chichester England. 292 pp.
- Seginer I., Shina G., Albright L. A., Marsh L. S. 1991. Optimal temperature setpoint for greenhouse lettuce. *J. Agric. Engng. Res.* 49: 209-226.
- Shi P., Luan X., Liu F., Karimi, H. R. 2012. Kalman filtering on greenhouse climate control. *Proceedings of the 31st Chinese control conference.* China. 779-784 pp.
- Sirjacobs M. 1989. Greenhouses in Egypt, protected cultivation in the Mediterranean climate. FAO, Rome, Italy.
- Simlab. 2011. Software package for uncertainty and sensitivity analysis. Joint Research Centre of the European Commission.
- Sinh G., Pal S., P., Singh L., P. P., Singh K. G. 2005. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable energy.* 31: 1541-1560.
- Sun X., Zhang, W., Wang, Z., Cao, Q., Gus S. 2006. Vegetable production in solar plastic greenhouses: past present and future in Shandong Province. *Acta Hort.* 299-303
- The Mathworks INC. 1984-2009. *Matlab 7. The Getting Started guide* 272 p.
- Tong, G., D. M. Christopher, B. Li. 2009. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture.* 68: 129-139.
- Ursem, R. K., Krink, T., Filipic, B. 2002. A numerical simulator of a crop-producing greenhouse. *EVALife technical report no.* 2002-01.
- van Beveren, P.J.M, Bontsema J., van Straten G., van Henten E.J. 2015. Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied energy.* 152:509-519.
- van Straten, G. 2008. What can systems and control theory do for agricultural science? *Automatika.* 49(3-4): 105-117.
- van Straten G. 2012. *Systems dynamics for bio-engineers. Lectures Notes.* University of Chapingo, Chapingo, Mexico. 146 pp.

Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., van Henten, E. J., de Visser, P. H. B. 2011. A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering* 110(4): 363-377.

Vazquez-Cruz, M., A., Guzman-Cruz R., Lopez-Cruz, I. L., Cornejo-Perez, O., Torres-Pacheco, I., Guevara-Gonzalez, R. G. 2014. Global sensitivity analysis by means of EFAST and Sobol methods and calibration of reduced state-variable TOMGRO model using genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 100: 1-12.

Verlodt H. 1999. Climate and vegetable management under greenhouse conditions. In: *Greenhouse vegetable production and protection in Albania*. Proceedings of FAO workshop in Tirana, 9–11.

Villareal-Guerrero, F., Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Linker, R., Kubota, C. Giacomelli, G. A., Arbel, A. Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosystems engineering*, 3: 217-228.

von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., von Zabeltitz, C., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R. 2000. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European union countries, part I: design requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research* 75(2): 111-126.

Von Zabeltitz C., Baudoin W. 1999. Greenhouses and shelter structures for tropical regions. FAO plant production and protection paper no. 154, p 122.

Von Zabeltitz C. 2011. Integrated Greenhouse systems for Mild climates. Climate conditions, design, construction, maintenance, climate control. Germany. Springer. 363 pp.

Wallach D. 2006. Evaluating crop models. En: Wallach, D., Makowski, D. & Jones, J. W. (Editors). *Working with dynamic crop models*. Evaluation, analysis, parametrization and applications. Elsevier, Amsterdam. 11-53 pp.

Wang, S., and T. Boulard. 2000. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a Mediterranean climate. *J. Agric. Engng. Res.* 75: 27-38.

Wenzel, T. A., Burnham, K. J., Blundell, M. V., Williams, R. A. 2006. Dual Extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation. *Vehicle system dynamics*. 44(2): 153-171.

Wilson, D. I., Agarwal, M. y Rippin D. W. T. 1998. Experiences implementing the extended Kalman filter on an industrial batch reactor, *Comput. Chem. Eng.*, 22(11):1653-1672.

10.1 Páginas web:

NASA. 2015. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>

SMN.2015.http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=77

INEGI 2015a: www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/

INEGI 2015b: <http://gaia.inegi.org.mx/sciga/viewer.html#>

APÉNDICE I

Requerimientos de control de clima en México (continuación)

I.1 Aguascalientes

Predomina el clima semi-seco (Bs) en el 86% de su territorio, el 14% presenta clima templado subhúmedo (Cw) localizado en el suroeste y noroeste del estado, ya que la sierra El Laurel y la Sierra Fría respectivamente, propician que la humedad aumente y la temperatura disminuya.

Los principales cultivos en el estado son maíz, frijol, chile, vid, árboles frutales (en especial la guayaba), hortalizas y papas. La zona agrícola más importante es la parte centro. (INEGI, 2013) El comportamiento promedio de las temperaturas supera los 12 °C y son inferiores a los 22°C, por lo que mantener la temperatura interna sólo requiere de ventilación natural. La Radiación es suficiente para todo el año, siendo más de 500 MJ/m²/mes, por lo cual no se requiere de luz artificial para el invernadero (Figura 58).

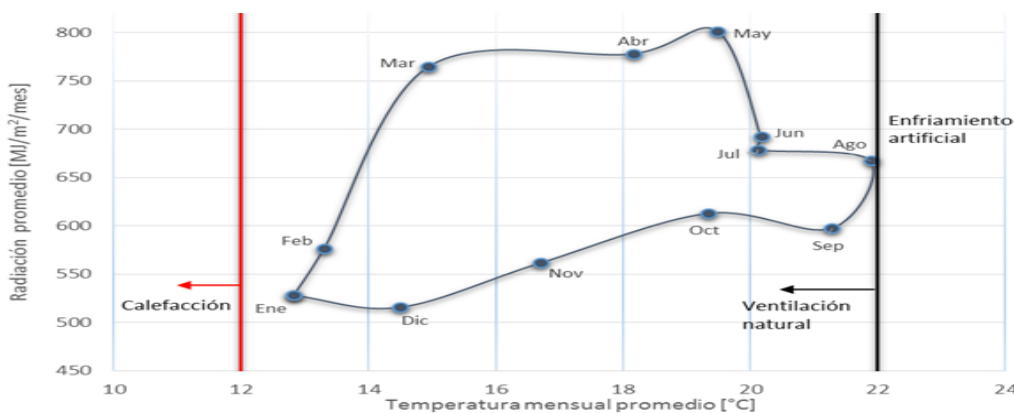


Figura 58. Radiación solar total mensual contra temperatura mensual promedio para el estado de Aguascalientes, México.

Durante el verano y parte del otoño es que se presenta la mayor cantidad de precipitación, las temperaturas para este período superan los 12 °C sin embargo pueden llegar a los 27 °C por lo que es recomendable considerar una forma de enfriar el invernadero durante el período de lluvia (Figura 59).

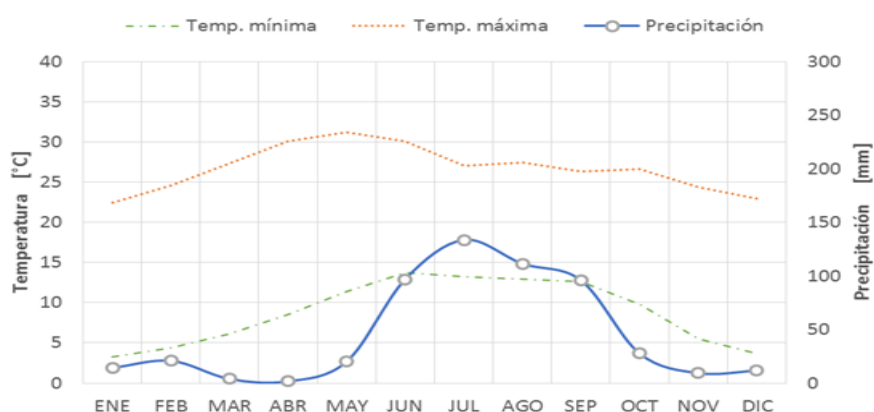


Figura 59. Precipitación mensual (línea continua), temperaturas mínimas mensuales (línea discontinua) y temperaturas máximas (línea punteada) para Aguascalientes, México.

Con ayuda de las temperaturas mínimas y máximas (Figura 60) podemos concluir sobre los resultados de la Figura 58. Para este caso, en algunos meses es posible considerar la calefacción, en especial para invierno. Para el verano enfriamiento mediante ventilas rígidas o algún otro método. Durante esta época hay presencia de lluvias por lo que se necesita evaluar si el tipo de enfriamiento será por nebulización o pared húmeda, esto implica que se ingresará agua dentro del invernadero (INEGI, 2015).

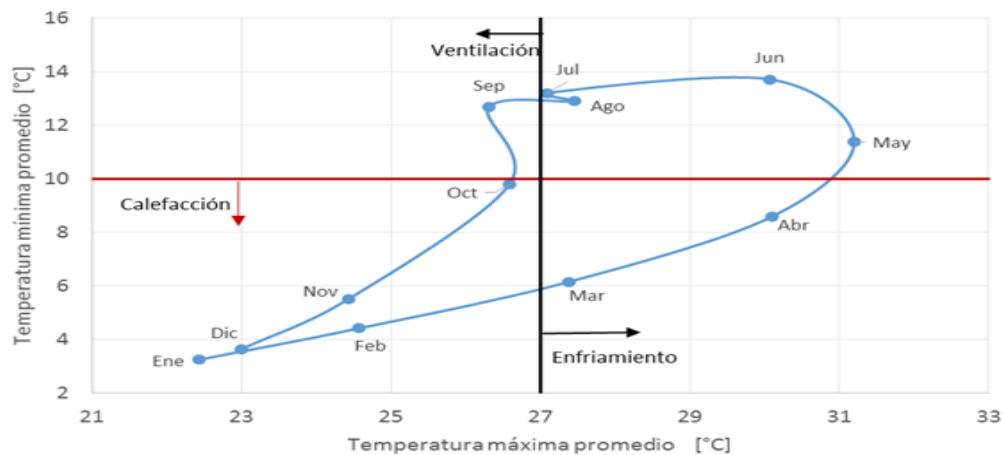


Figura 60. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Aguascalientes, México.

La recomendación sobre el invernadero al ser un clima predominantemente seco proteger a los cultivos de la alta radiación y el estrés por altas temperaturas. El invernadero debe contar con ventilas que se puedan cerrar por la noche.

Existen 23 áreas de control de agricultura protegida en el Estado y 17 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es Asientos, seguido de Aguascalientes. El municipio de Aguascalientes se ubica a una latitud de 21° 53' 44'' N y longitud de 102° 18' 31'' O, el municipio de Asientos en una latitud de 21° 12' 30'' N y longitud de 102° 01' 20'' O. Los números de las estaciones donde se obtuvieron datos meteorológicos son 1030 y 1084, respectivamente. Los datos de radiación para Aguascalientes se pueden encontrar en la siguiente página web:

[https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.8955&lon=-102.3086&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.8955&lon=-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.8955&lon=-102.3086&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[102.3086&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.8955&lon=-102.3086&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

Mientras que para Asientos, los datos de radiación se pueden encontrar en:

[https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.2083&lon=-102.02&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.2083&lon=-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.2083&lon=-102.02&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[102.02&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.2083&lon=-102.02&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

El municipio de Asientos presenta menores temperaturas y podría pensarse en el uso de calefacción para alguna temporada, el resto del año si las temperaturas se elevan puede controlarse con ventilación natural. El caso de Aguascalientes requiere contemplar enfriamiento artificial en verano (Figura 61).

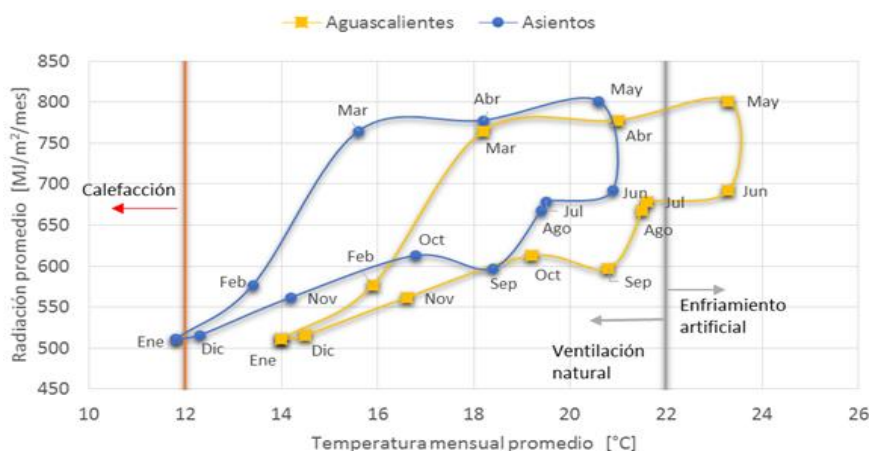


Figura 61. Radiación solar total mensual y temperatura mensual promedio para los municipios de Aguascalientes (línea con cuadrados) y Asientos (línea con círculos) en el Estado de Aguascalientes.

Para ambos municipios hay en promedio una diferencia entre sus temperaturas de 2 °C y en el período de lluvias de 20 mm. Asientos presenta una temperatura menor que la de Aguascalientes y menores lluvias en verano (Figura 62). La temporada de lluvias en ambos es en verano con hasta un máximo de 150 mm. El municipio de Asientos tiene menores temperaturas que Aguascalientes, sin embargo, el comportamiento es muy similar en ambos (Figura 63). Se observa que para ambos municipios es posible considerar calefacción, ventilación natural e incluso un sistema de enfriamiento artificial.

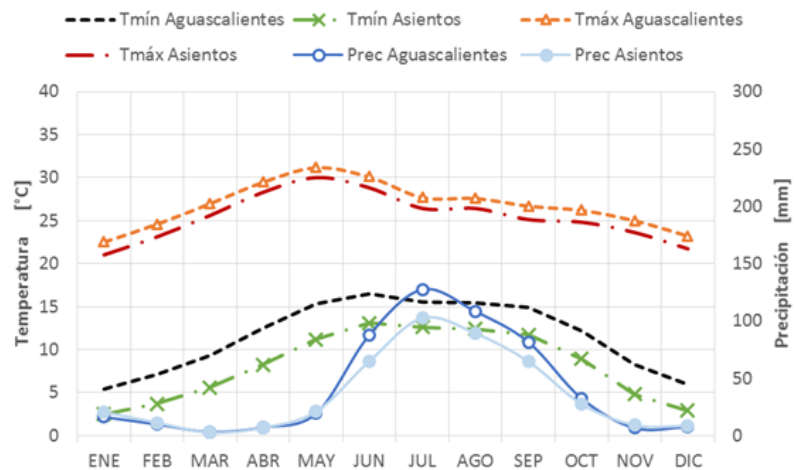


Figura 62. Precipitación mensual, temperaturas mínimas y máximas mensuales para los municipios de Aguascalientes y Asientos en el Estado de Aguascalientes.

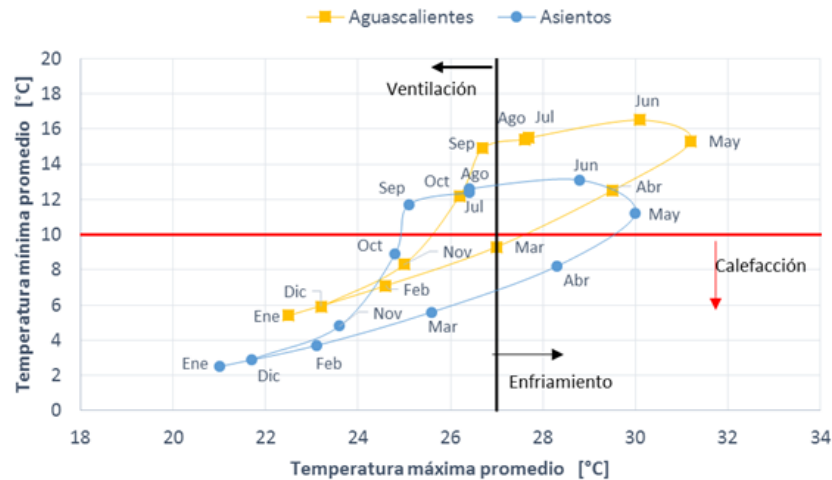


Figura 63. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Aguascalientes y Asientos en el Estado de Aguascalientes.

El municipio de Asientos presenta un clima templado cálido mientras que el municipio de Aguascalientes un clima semiseco; Sin embargo, la principal diferencia es la presencia de mayores temperaturas en Aguascalientes y la radiación solar incidente. En ambos casos se presentan los mismos requerimientos de control que para el caso del Estado completo, es decir, aplican las condiciones promedio para estos dos municipios que resultan ser los más productivos en el Estado.

I.2 Baja California

Predomina el clima muy seco (Bw) en el 60 % del estado, aunque también se encuentra el seco (Bs) con un 24%. Las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir presentan un clima templado subhúmedo y semifrío 7% (Cw y Cfb').

Debido a la escasa precipitación la actividad agrícola es baja pero en la región se cultiva: algodón, trigo, aceituna, la vid, jitomate y el ajonjolí. (INEGI, 2013).

La radiación fluctúa entre 300 a 700 MJ/m²/mes de ahí que la figura se vea un poco alargada hacia arriba en verano, principalmente. Dado que la temperatura varía entre los 12 a 28 °C para la mayoría del año se puede mantener la temperatura por debajo de los 22 °C con ventilación natural sin embargo en verano las temperaturas pueden ser excesivas o requerir de un sistema de enfriamiento más sofisticado (Figura 64).

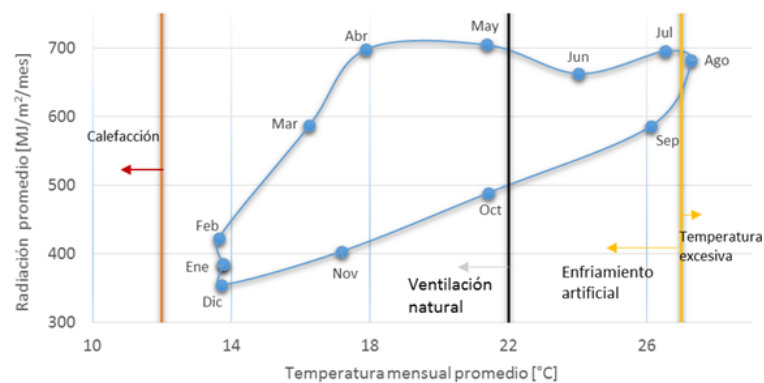


Figura 64. Radiación total mensual y temperatura mensual promedio para el Estado de Baja California, México.

En el Estado hay una diferencia de aproximadamente 15 °C entre la temperatura mínima y máxima y se mantiene a lo largo del año. Al ser un clima seco el que predomina en el Estado las precipitaciones son pequeñas legando a su máximo en invierno y con tan sólo 50 mm aproximadamente. En verano es cuando se producen las mayores temperaturas

por lo que no es de extrañarse que se requiera de enfriamiento artificial para mantener bajo 27 °C las temperaturas dentro del invernadero (Figura 65).

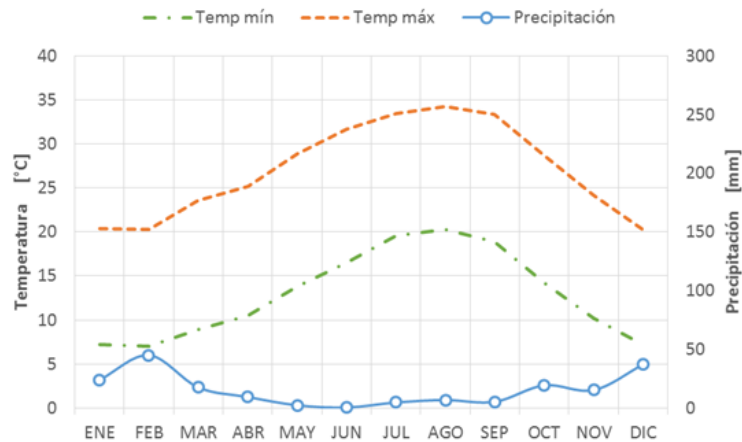


Figura 65. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Baja California, México.

Las temperaturas de Baja California se mantienen elevadas durante el verano y muy bajas durante el invierno. Se necesita considerar calefacción durante los meses de invierno y en otoño y verano las temperaturas son bastante elevadas, no es recomendable tener un cultivo en esta temporada o de otra manera se requerirá de enfriamiento artificial que ayude a reducir la temperatura y se elevará el costo de producción (Figura 66).

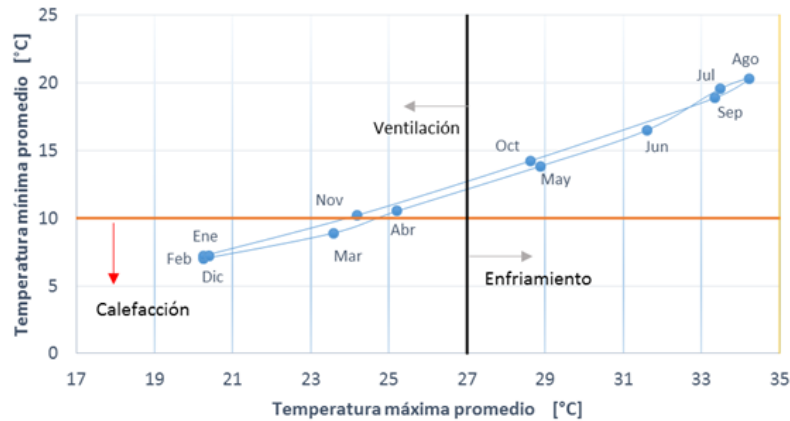


Figura 66. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Baja California, México.

Existen 14 áreas de control en el Estado y 14 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es Ensenada, seguido de Tijuana, el primero cuenta con invernaderos con productos alimenticios mientras que el segundo con invernaderos dedicados a la floricultura. El municipio de Ensenada se ubica a una latitud de 31°51'28''N y longitud de 116° 54' 28'' O, el municipio de Tijuana con latitud 32°26'49''N y longitud 116°54'28''O. Los números de las estaciones de donde se obtuvieron datos son 2035 y 2038, respectivamente. Los datos de radiación para Ensenada se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=31.8577&lon=-116.6058&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Mientras que para Tijuana, en la siguiente página:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=32.4469&lon=-116.9077&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Las temperaturas de Ensenada se mantienen en el rango de 12 a 22 °C, por lo que sólo se requiere de ventilación natural para mantener una temperatura debajo de 22°C. Para Tijuana las temperaturas sobrepasan los 22 °C en verano por lo que se necesita de enfriamiento artificial y de más equipamiento para poder reducir la temperatura dentro del invernadero. Es entendible que haya más unidades de producción en Ensenada dado que se requiere de menos control para mantener una temperatura deseable. En ninguno de los dos casos se requiere de luz artificial pues superan los 200 MJ (Figura 67).

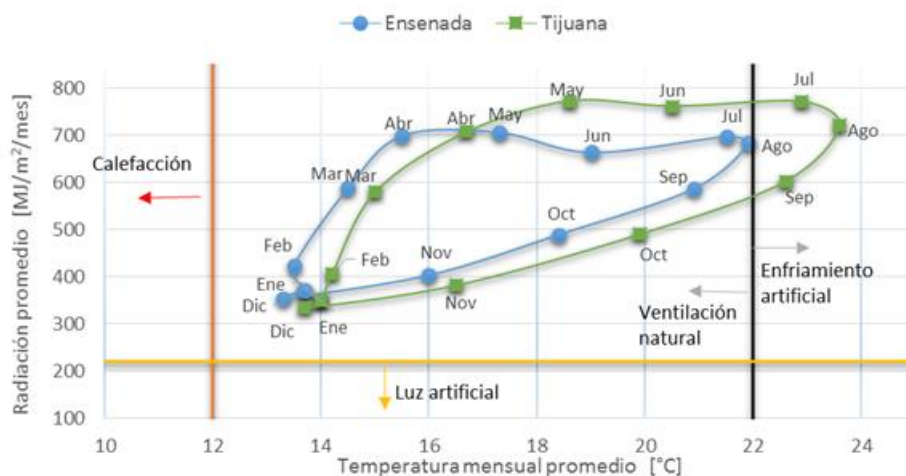


Figura 67. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Ensenada y Tijuana en el Estado de Baja California.

Las precipitaciones que se presentan en ambos municipios son similares al igual que las temperaturas mínimas, sin embargo, Tijuana presenta temperaturas máximas mayores a Ensenada (Figura 68). Debido al tipo de clima las precipitaciones son en invierno y están por debajo de los 100 mm.

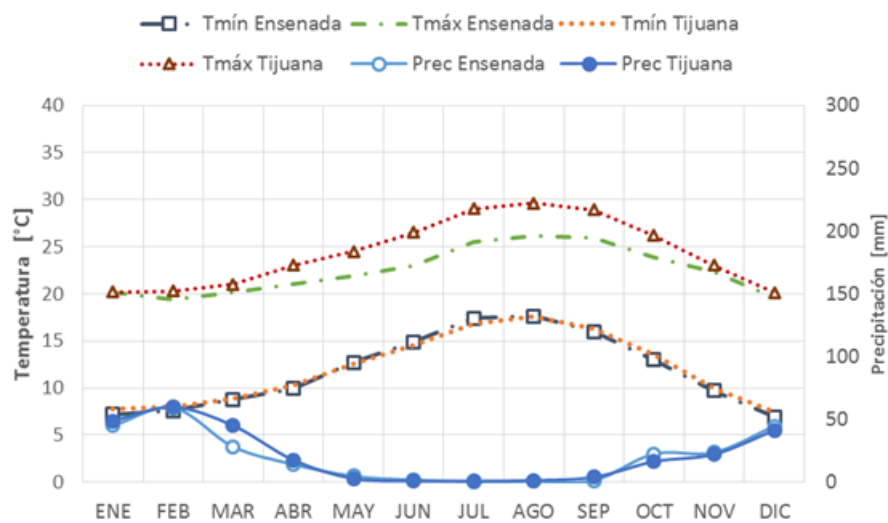


Figura 68. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Ensenada y Tijuana en el Estado de Baja California.

El comportamiento de ambos municipios es muy diferente si se consideran las temperaturas máximas y mínimas, siendo Tijuana el que presenta mayores temperaturas sobre todo en verano. La diferencia se debe principalmente a que Ensenada tiene un clima semi cálido y Tijuana un clima semi seco. En este caso a pesar de que son climas diferentes con los diagramas se puede establecer que se necesita un control similar en

ambos, con la diferencia que Tijuana presenta temperaturas excesivas y no se recomienda tener un cultivo durante el verano (Figura 69).

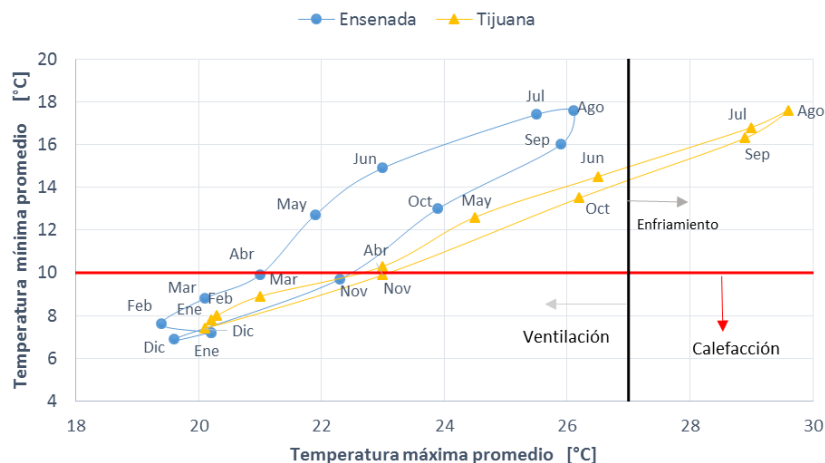


Figura 69. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Ensenada y Tijuana en el Estado de Baja California.

I.3 Baja California Sur

Predomina el clima muy seco (Bw) en un 92 % del territorio. Se encuentra también el clima seco y semiseco (Bs) en un 7 % y templado subhúmedo (Cw) en 1 % en la región de la sierra de la Laguna.

Debido a la escasa precipitación la poca actividad agrícola que se practica es de riego en el Valle de Santo Domingo donde se cultiva: algodón, trigo, alfalfa verde, frijol, jitomate, cártamo, chile verde y papa. Las temperaturas son elevadas para todo el año, incluso para el período de invierno, lo cual es natural en un clima tan seco. En el período de verano que es cuándo se presentan las temperaturas más elevadas se necesita considerar

estrategias que aunadas al enfriamiento artificial ayuden a disminuir las temperaturas, de lo contrario en esta época es conveniente no tener cultivo dentro del invernadero (Figura 70).

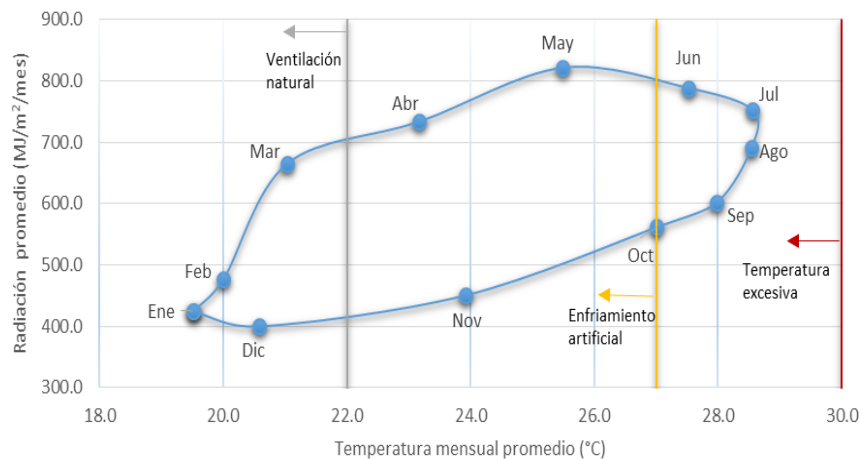


Figura 70. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para Baja California Sur.

Entre las temperaturas máximas y mínimas de Baja California hay una diferencia de aproximadamente 14 °C. La temperatura máxima se encuentra entre los 25 a 35°C y las mayores temperaturas se presentan en primavera y verano, lo que coincide con el enfriamiento artificial y la temperatura excesiva. La precipitación comienza en verano con un máximo de 80 mm en Septiembre lo cual explicaría la reducción de la temperatura sin embargo comienza a decaer para Octubre, siendo algo normal en climas secos (Figura 71).

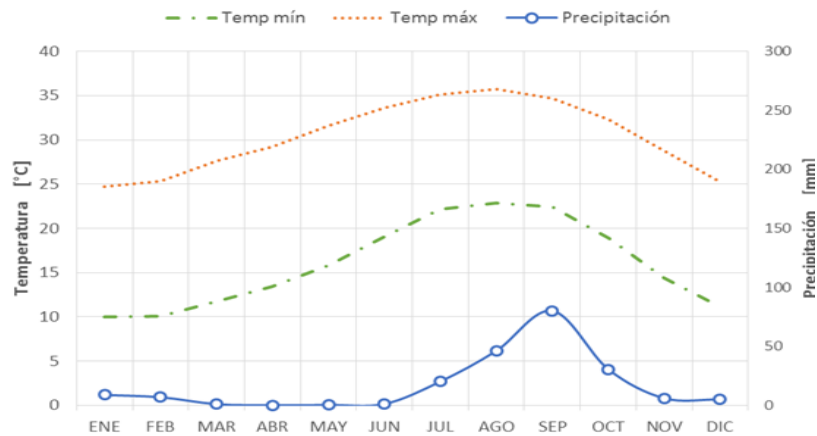


Figura 71. Precipitación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas promedio para Baja California Sur, México.

Las temperaturas mínimas sobrepasan los 10°C en promedio por lo que no se necesita de calefacción en invierno, sin embargo durante el verano las temperaturas máximas son elevadas (Figura 72).

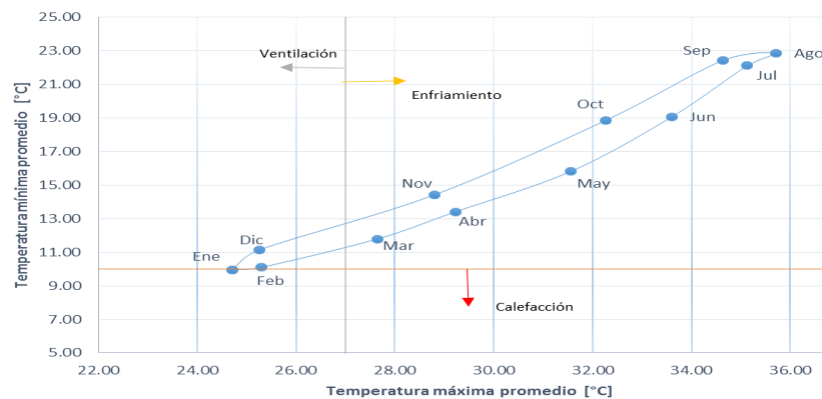


Figura 72. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Baja California Sur, México.

Existen 9 áreas de control en el Estado y 7 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es La Paz con invernaderos con productos alimenticios. El municipio se ubica a una latitud de 23°54'20''N y longitud de 110°16'14''O. El número de la estación de donde se obtuvieron datos meteorológicos es 3077. Los datos de radiación se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=23.9055&lon=-110.2705&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Para el caso de La Paz se observa que se necesita de ventilación natural para la mitad del año y para el resto de enfriamiento. Comparado con el promedio del Estado, La Paz necesita de menos control para reducir la temperatura, sólo unos meses se encuentran cerca de los 27°C (Figura 73).

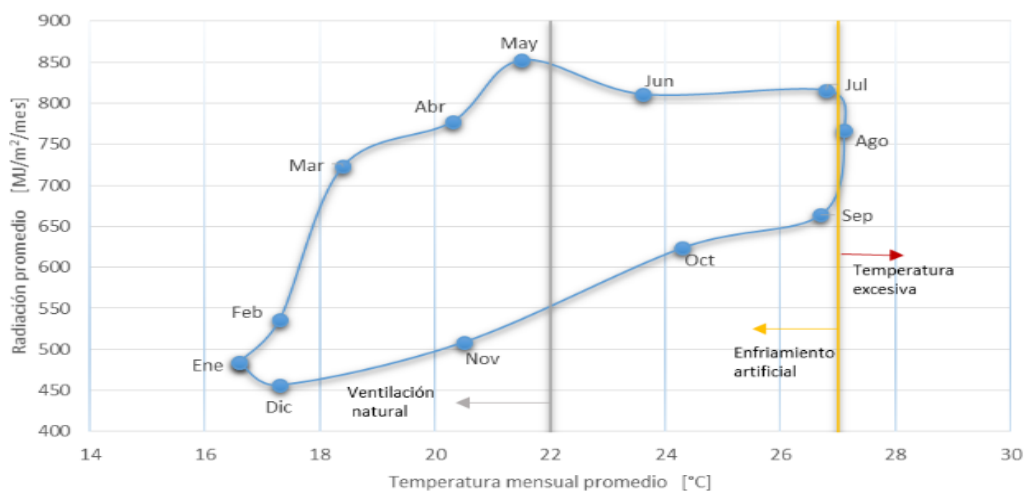


Figura 73. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio del municipio de La Paz en Baja California Sur.

El período que presenta las mayores temperaturas es Verano y el inicio de Otoño, coincide con el período con mayor precipitación con un máximo de 94.5 mm. La diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de aproximadamente 15 °C (Figura 74). La Figura 75 muestra el comportamiento de la temperatura exterior máxima y mínima mensual promedio para La Paz.

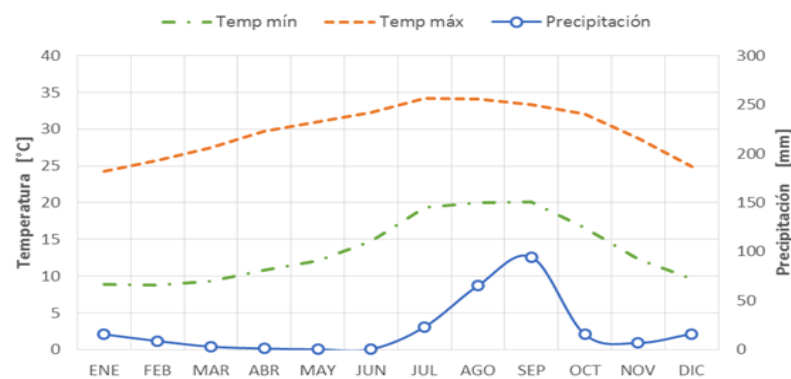


Figura 74. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas para el municipio de La Paz en Baja California Sur.

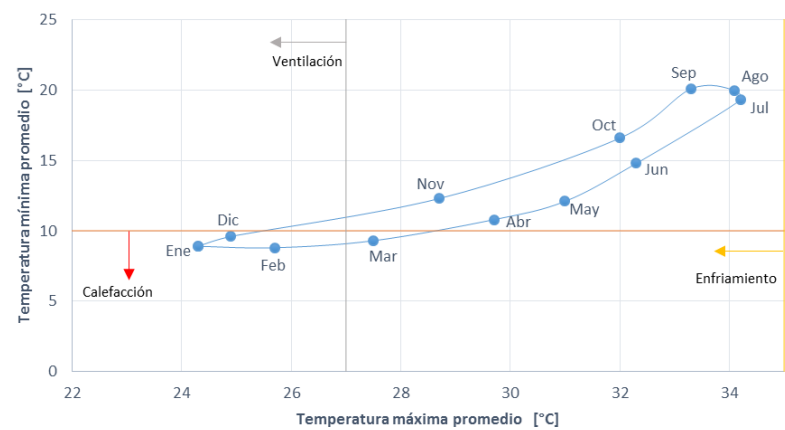


Figura 75. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el municipio de La Paz en el Estado de Baja California Sur, México.

De acuerdo con esta gráfica puede que algunos meses reduzcan demasiado su temperatura y se deba considerar calefacción. Por otra parte, gran parte del año se requiere de enfriamiento y el resto se puede mantener con ventilación natural.

I.4 Campeche

En el estado de Campeche predomina el clima cálido subhúmedo (Aw), que se presenta en el 92% de su territorio, el 7.75 % presenta clima cálido húmedo (Am) localizado en la parte Este del estado y en la parte Norte, un pequeño porcentaje del 0.05% con clima seco (Bs).

El clima cálido favorece el cultivo de frutas tropicales como: mango, chicozapote, sandía y melón. También se cultiva caña de azúcar, arroz, sorgo, frijol y hortalizas entre otros.

La Figura 76 muestra el comportamiento de la temperatura y radiación promedio para Campeche.

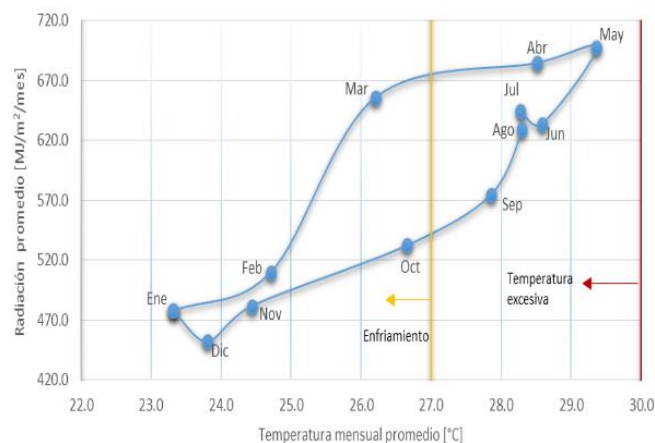


Figura 76. Radiación solar mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Campeche, México.

La mitad del año, lo que comprende invierno y otoño se necesita de enfriamiento artificial para mantener la temperatura por debajo de los 27°C, sin embargo el resto del año se tienen temperaturas excesivas que provocan que no se produzca durante esta temporada o que se necesite de tomar medidas extras para reducir la temperatura dentro del invernadero. El rango de radiación es de los 420 MJ/m²/mes, es por ello que la gráfica se visualiza estirada hacia arriba.

Por su tipo de clima predominan las lluvias en la mayor parte del año, siendo el verano y otoño en donde se concentra la mayor cantidad de precipitación con un máximo de 240 mm en Junio. Las temperaturas son elevadas con una diferencia entre ellas de aproximadamente 9°C. La temperatura máxima sobre pasa los 35°C y la mínima no baja de 15°C (Figura 77).

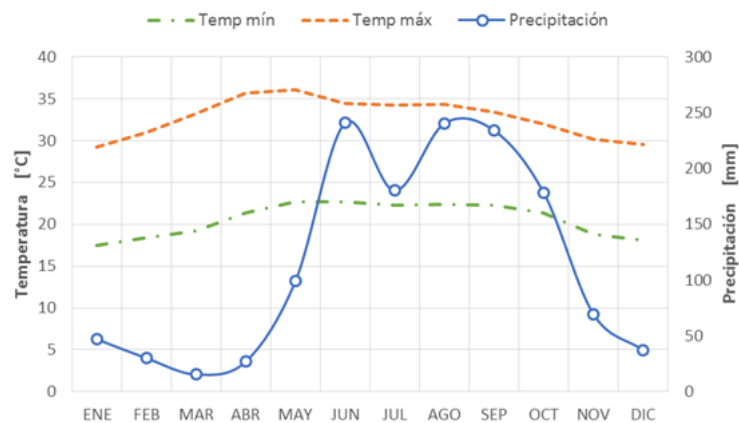


Figura 77. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Campeche, México.

Para todo el año las temperaturas son elevadas por lo que la acción a tomar en cuenta es Enfriamiento y en verano las temperaturas son excesivas por lo que no se recomienda cultivar en este período (Figura 78).

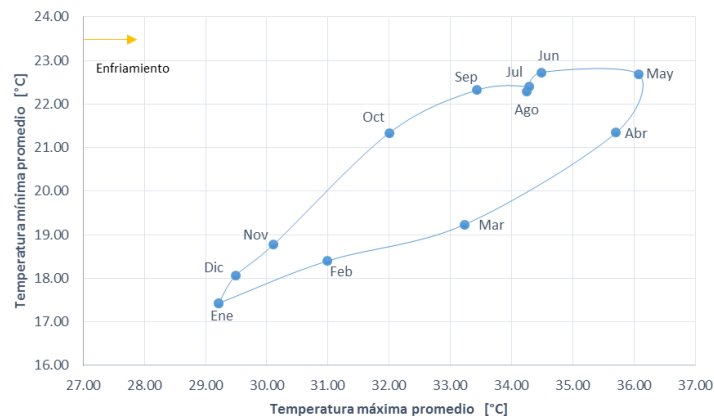


Figura 78. Temperatura mínima mensual promedio y máxima mensual promedio para el Estado de Campeche, México.

Existen 4 áreas de control en el Estado y 4 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es Campeche con invernaderos con productos alimenticios. El municipio se ubica a una latitud de 19°50'32''N y longitud de 090°31'54''O. El número de estación es 4038. Los datos de radiación se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.8422&lon=90.5316&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 79 muestra la radiación y temperatura promedio para el municipio de Campeche. La mitad del año las temperaturas son menores a 27°C y se requiere de un sistema de enfriamiento si se quiere tener un cultivo en los invernaderos, el resto del año las temperaturas son excesivas.

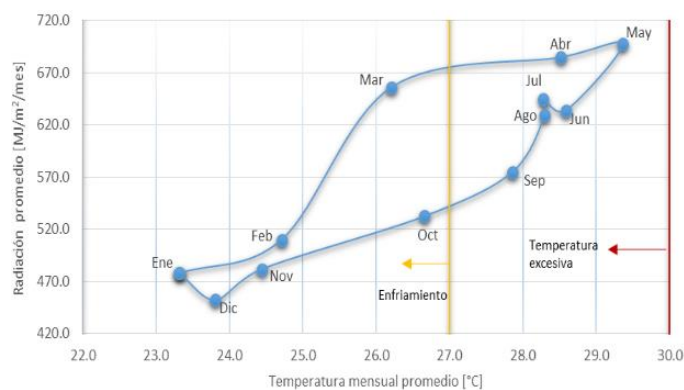


Figura 79. Radiación mensual promedio temperatura mensual promedio para el municipio de Campeche en Campeche.

La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas es de aproximadamente 10°C en este municipio. Solo en invierno se e una disminución de la temperatura el resto del año permanece casi invariable. La mayor precipitación se da en verano y parte de otoño y es menor que la precipitación promedio del Estado con tan sólo 200 mm (Figura 80).

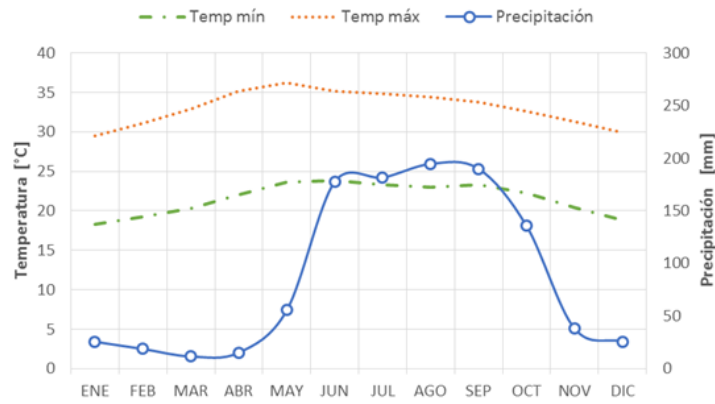


Figura 80. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Campeche.

En este municipio, las temperaturas son muy elevadas, no se necesita de calefacción en ningún mes pero además no es suficiente con tener enfriamiento artificial. Para ciertos meses, como los que comprenden verano, no se recomienda que se tengan cultivos dentro de un invernadero debido a sus temperaturas excesivas (Figura 81).

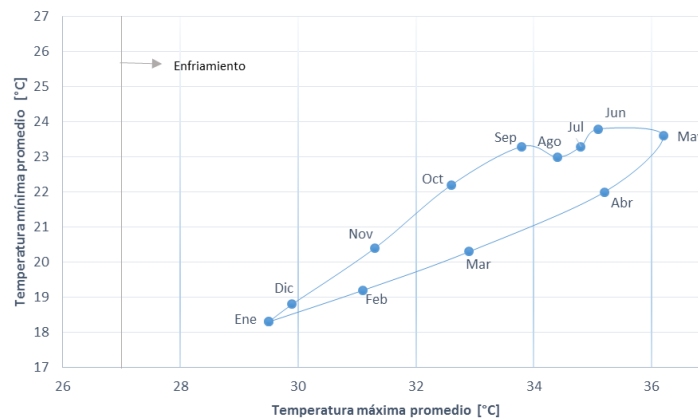


Figura 81. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el municipio de Campeche.

I.5 Chiapas

El 54 % de su territorio presenta clima Cálido subhúmedo (Aw), el 40 % cálido húmedo (Af), el 3% templado húmedo (Cm) y el 3 % restante tiene clima templado subhúmedo (Cw).

Su clima favorece el cultivo del café, por lo que es el primer productor a nivel nacional. Además se cultiva: maíz, sandía, mango, plátano, aguacate, cacao, algodón, caña de azúcar y frijol, entre otros.

La Figura 82 muestra el comportamiento de la temperatura y radiación promedio para Chiapas. Todo el año se requiere de enfriamiento debido a las altas temperaturas. La radiación oscila entre 420 MJ/m²/mes hasta 720 MJ/m²/mes.

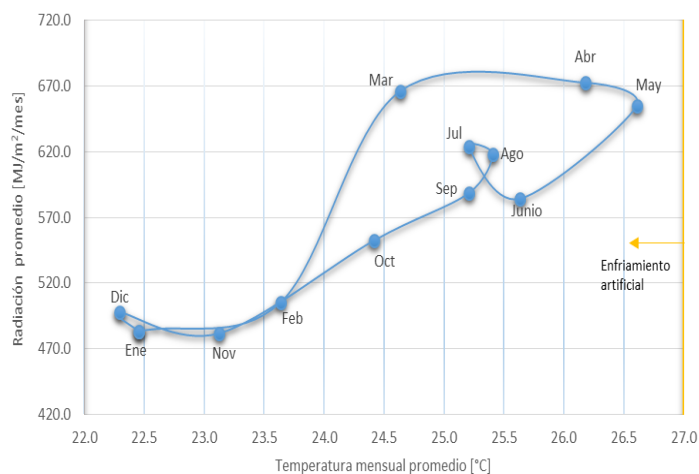


Figura 82. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Chiapas, México.

La temperatura mínima es mayor a 15°C para todo el año, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de aproximadamente 15°C. La temperatura máxima no sobrepasa los 35°C, parte de ello se debe a la gran cantidad de lluvias para el Estado, sobre todo en el período de Mayo a Octubre que coincide con alta radiación. La mayor precipitación se presenta en Agosto y Septiembre con 400 mm (Figura 83).

La Figura 84 muestra la temperatura exterior mínima y máxima mensual para el Estado de Chiapas. Para este caso como las temperaturas mínimas son mayores a los 10°C no se necesita de calefacción y al estar las temperaturas máximas entre 28 y 34 °C, se necesita de enfriamiento en todo el año.

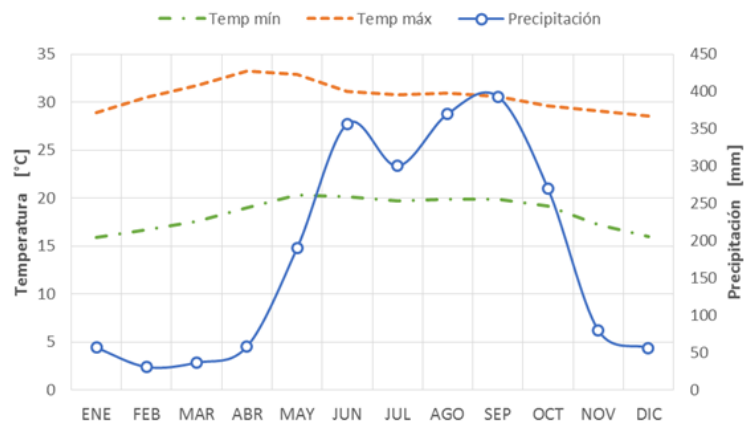


Figura 83. Precipitación mensual promedio, temperatura máxima y mínima mensual para el Estado de Chiapas, México.

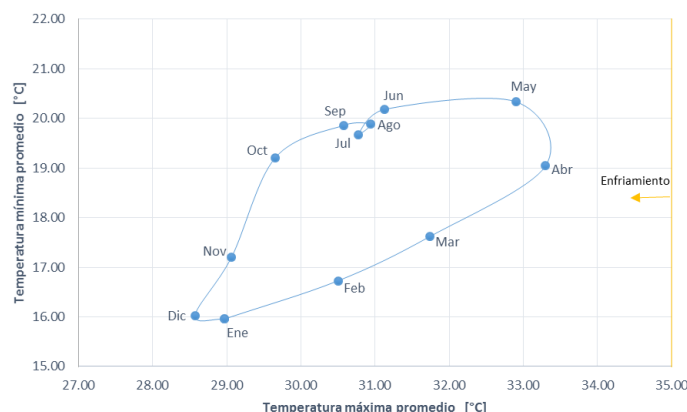


Figura 84. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Chiapas.

Existen 129 áreas de control en el Estado y 388 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es San Cristóbal seguido de La Trinitaria. El municipio de San Cristóbal se ubica a una latitud de 16°42'51''N y longitud de 092°37'44''O, mientras que el municipio de La Trinitaria se ubica a una latitud de 16°07'04''N y longitud de 092°03'06''O. Los números de las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos son 7087 y 7190. Los datos de radiación para San Cristóbal se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=16.7141&lon=-92.6288&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Y para La Trinitaria:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=16.1177&lon=-92.0516&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los municipios de San Cristóbal y La Trinitaria tienen diferentes temperaturas pero muy parecida la radiación incidente. Para los dos basta con tener ventilación natural para mantener la temperatura debajo de los 27 °C para todo el año. Ninguno de los dos necesita de luz artificial dado que la radiación promedio está por encima de los 450 MJ/m²/mes (Figura 85).

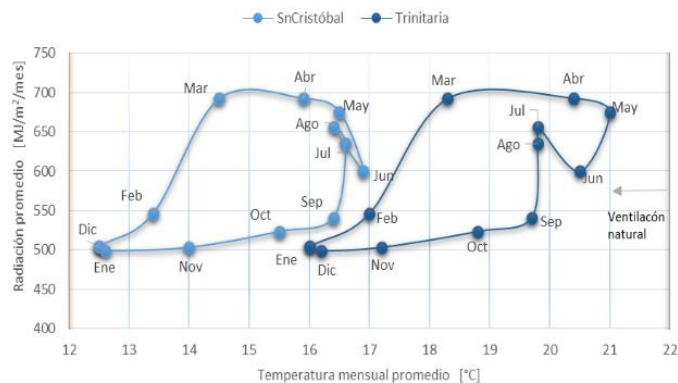


Figura 85. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de San Cristóbal y La Trinitaria, Chiapas.

Las temperaturas de La Trinitaria son mayores que las de San Cristóbal como ya se había divisado en la Figura X. San Cristóbal presenta mayor precipitación, sin embargo para ambos municipios la temporada de lluvia es la misma. La diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de aproximadamente 15°C para ambos municipios (Figura 86).

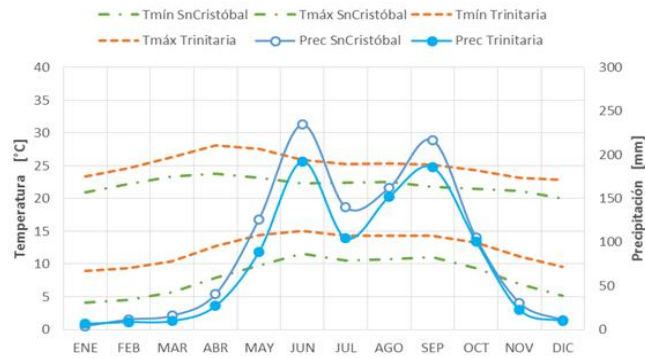


Figura 86. Precipitación mensual, temperaturas mínima y máxima para los municipios de San Cristóbal y La Trinitaria, Chiapas.

La Figura 87 muestra la temperatura exterior mensual mínima y máxima para ambos municipios, en los dos si la temperatura mínima es menor a 10 °C se requiere de calefacción, mientras que para ambos la ventilación es necesaria. Dado que la trinitaria presenta mayores temperaturas a las de San Cristóbal puede verse que es posible que llegue a necesitar enfriamiento artificial.

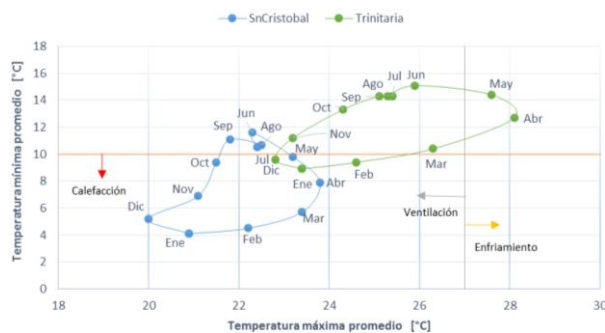


Figura 87. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de San Cristóbal (azul) y La Trinitaria (verde) en el Estado de Chiapas.

I.6 Chihuahua

En el 40 % de su territorio existe clima muy seco (Bw), localizado en las Sierras y llanuras del Norte. 33 % de clima seco y semiseco (Bs) en las partes bajas de la Sierra Madre Occidental y el 24 % templado subhúmedo (Cw), localizado en las partes altas de la misma. Sólo un 3 % presenta clima cálido subhúmedo (Aw).

A pesar de que la escasez de agua es una limitante para la actividad agrícola, esta se practica de temporal y de riego, se cultiva: maíz, frijol, avena, alfalfa, algodón, sorgo, trigo, manzana entre otros. El clima seco favorece el crecimiento de pastizales en las planicies.

La Figura 88 muestra el comportamiento de la temperatura y radiación promedio para Chihuahua.

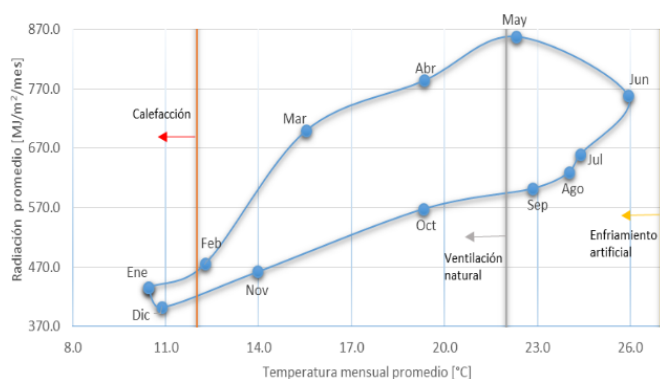


Figura 88. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Chihuahua, México.

Las temperaturas y radiación de Chihuahua están muy dispersas, originando que necesite de calefacción para el invierno, ventilación natural para el otoño y primavera y de enfriamiento artificial para el verano.

La Figura 89 muestra la precipitación y temperatura mínima y máxima para Chihuahua. La diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de aproximadamente 18°C. La mayor precipitación se presenta en Septiembre con 150 mm y la temporada de lluvias es en otoño.

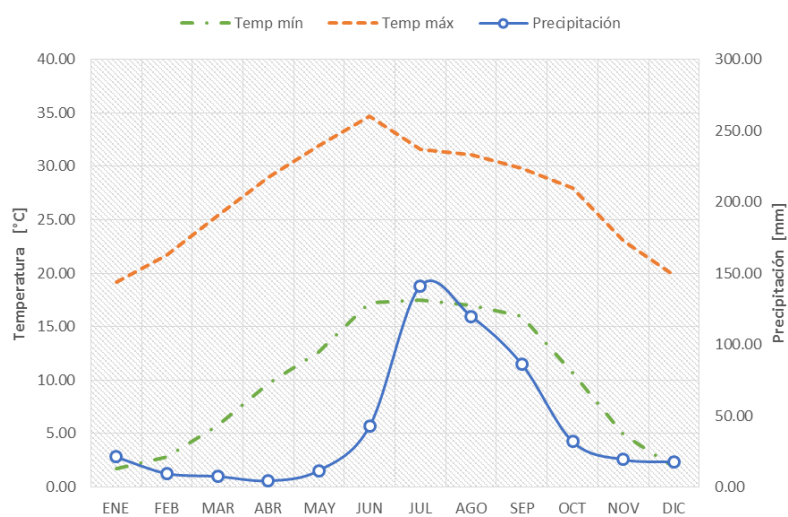


Figura 89. Precipitación y temperaturas mínima y máxima para el Estado de Chihuahua, México.

Durante el invierno es necesario considerar calefacción debido a sus bajas temperaturas, por otro lado durante el verano se tienen altas temperaturas y se necesita de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro de los invernaderos (Figura 90).

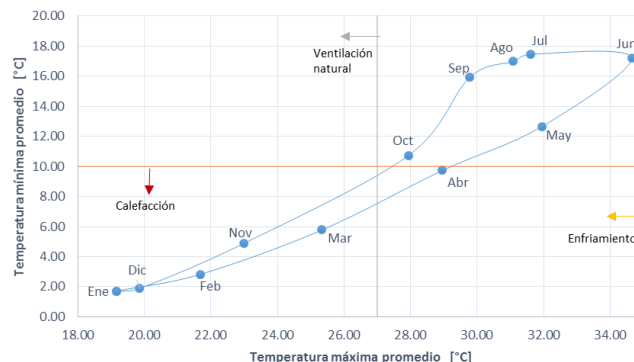


Figura 90. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Chihuahua, México.

Existen 16 áreas de control en Chihuahua y 14 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es Bachiniva. El municipio se ubica a una latitud de 28°46'18''N y longitud de 107°15'20''O. El número de la estación de donde se obtuvieron algunos datos meteorológicos es 2017. Los datos de radiación para se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=28.7716&lon=-107.2555&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 91 muestra la radiación promedio y la temperatura promedio para el municipio de Bachiniva en Chihuahua.

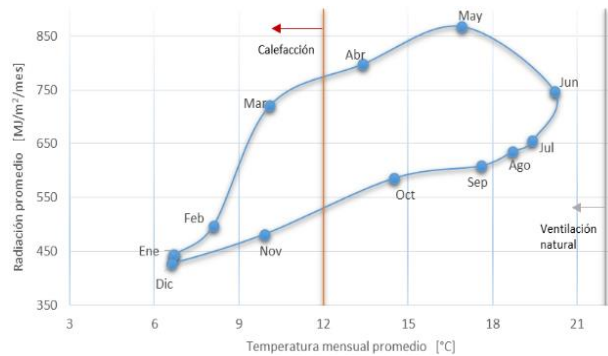


Figura 91. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el municipio de Bachiniva, Chihuahua.

Para el período de verano y parte de otoño se necesita de ventilación natural para reducir la temperatura, mientras que para invierno y parte de primavera se requiere de calefacción por las bajas temperaturas. La radiación es mayor a los 400 MJ/m²/mes, por lo que no se necesita de luz artificial para el invernadero salvo que se trate de algún requerimiento por parte del cultivo.

La Figura 92 muestra las temperaturas mínimas y máximas además de la precipitación promedio para el municipio de Bachiniva. Las temperaturas mínimas pueden llegar a estar bajo cero, lo que significa la presencia de heladas. La temperatura máxima no sobrepasa los 30 °C y se encuentra alrededor de los 15°C a 30°C. La mayor cantidad de lluvia se presenta en Agosto con 117 mm. El período de lluvias se extiende en verano y parte de otoño, el resto del año es escasa la precipitación lo cual es normal para un clima seco.

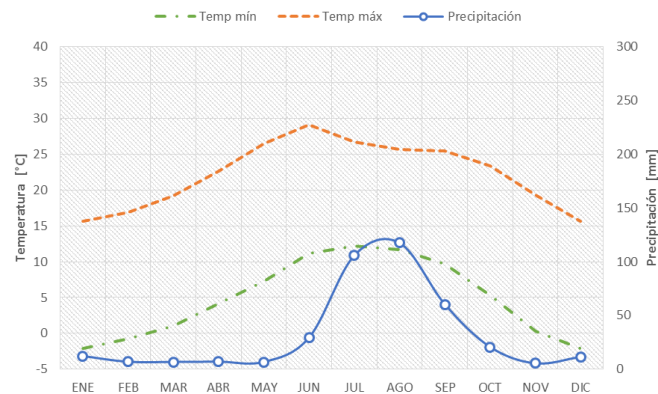


Figura 92. Precipitación y temperaturas mínima y máxima para el municipio de Bachiniva en el Estado de Chihuahua, México.

La Figura 93 muestra las temperaturas exteriores mensuales mínimas y máximas para el municipio. Se puede apreciar que algunas de ellas se encuentran debajo de 0°C por lo que es notorio la necesidad de calefacción en los invernaderos, a pesar de ello para ciertos meses también se debe contemplar la ventilación e incluso enfriamiento.

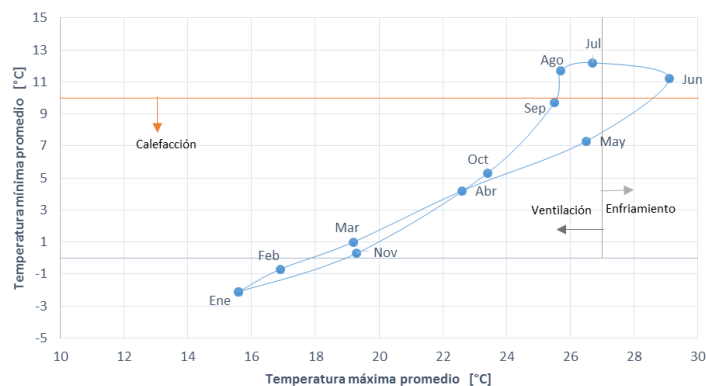


Figura 93. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el municipio de Bachiniva, Chihuahua, México.

I. 7 Coahuila

El 49 % de su territorio presenta clima seco (Bw) y semiseco (Bs), el 46 % tiene clima muy seco (Bs) y el 5% restante registra clima templado subhúmedo (Cw), localizado en las partes altas de las Sierras del Sur: San Antonio y Tampiquillo.

Los principales cultivos son algodón, alfalfa y vid. La Figura 94 muestra el comportamiento de la temperatura y radiación promedio para Coahuila.

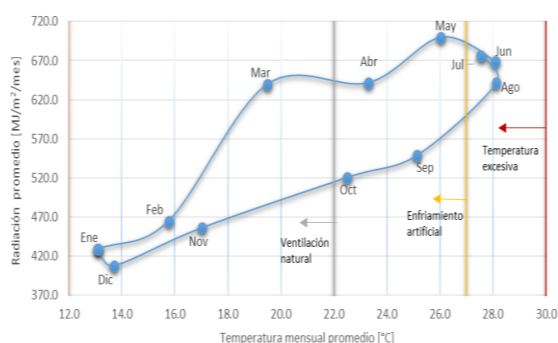


Figura 94. Radiación global promedio por mes (izquierda) y por día (derecha) contra la temperatura mensual promedio para el Estado de Coahuila, México.

Al igual que Chihuahua, Coahuila presenta un clima seco por lo que se requiere para la mitad del año, en especial invierno, de ventilación natural, el resto del año se requiere de enfriamiento artificial y para el verano se tienen temperaturas excesivas por lo que o se opta por utilizar estrategias que aunadas con el enfriamiento puedan reducir la temperatura o simplemente no se cultiva en estas fechas.

La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas es de aproximadamente 15°C.

La precipitación es menor a los 71 mm. Sin embargo, se observa que a lo largo del año

hay precipitación. La temperatura mínima sobrepasa los 5°C mientras que la temperatura máxima se encuentra por debajo de los 36°C (Figura 95).

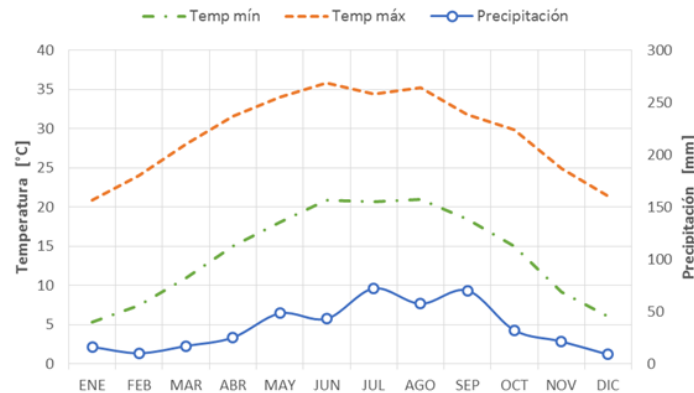


Figura 95. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Coahuila, México.

Debido a las bajas temperaturas en invierno, se debe considerar calefacción para esta temporada, además en este período es suficiente con la ventilación natural para reducir la temperatura dentro del invernadero, el resto del año las altas temperaturas provocan que se necesite de enfriamiento artificial y para los meses de abril, mayo y junio es recomendable no tener un cultivo bajo invernadero (Figura 96).

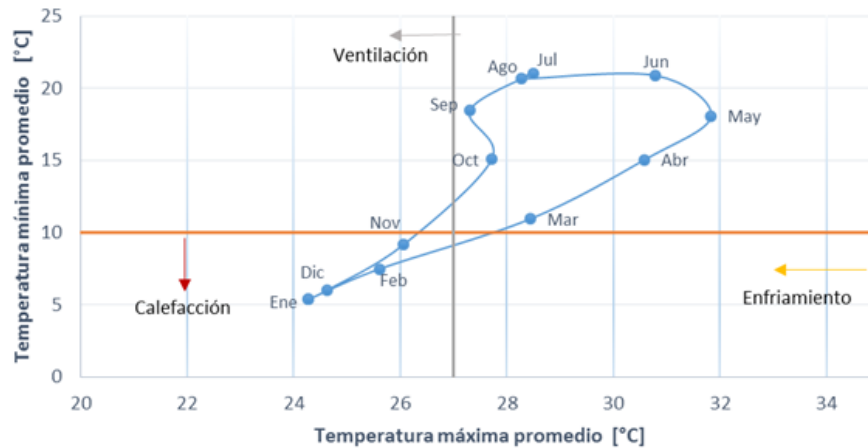


Figura 96. Temperatura mínima promedio y temperatura máxima promedio para el Estado de Coahuila, México.

Existen 5 áreas de control en el Estado y 5 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es Lamadrid. El municipio se ubica a una latitud de 27°02'46''N y longitud de 101°47'35''O. El número de la estación de donde se recopilaron algunos datos meteorológicos es 5155. Los datos de radiación para se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=27.0461&lon=-101.793&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

En el municipio de Lamadrid la mayor parte del año se puede mantener la temperatura por debajo de los 22 °C con ventilación natural sin embargo para el período de verano se requiere de un sistema de enfriamiento artificial (Figura 97).

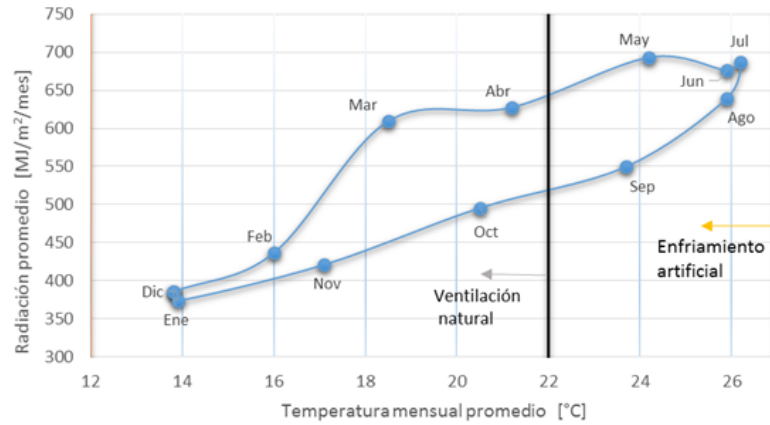


Figura 97. Radiación solar mensual y temperatura mensual promedio para el municipio de Lamadrid en Coahuila.

La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas de Lamadrid es de aproximadamente 15 °C. La temperatura máxima no rebasa los 35 °C y la mínima está por encima de los 5°C. La mayor precipitación se da en verano y parte de otoño, siendo inferior a los 70 mm (Figura 98).

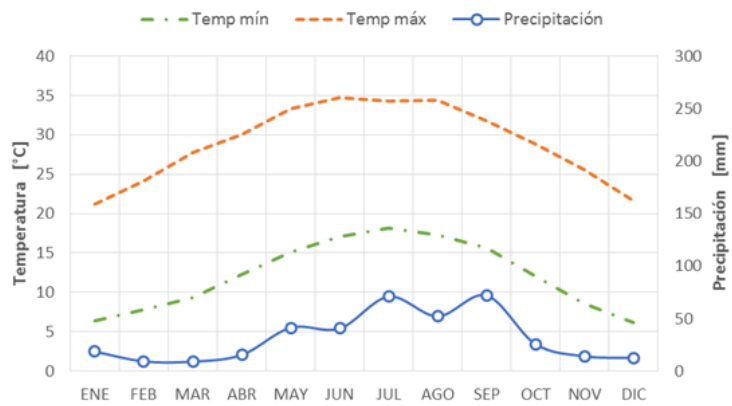


Figura 98. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Lamadrid, Coahuila.

.Considerando las temperaturas máximas y mínimas Lamadrid requiere de enfriamiento los meses que comprenden otoño y verano, y ventilación para el período de invierno. En caso de que las temperaturas mínimas disminuyan de los 10 °C se requiere de calefacción, esto ocurre en invierno, principalmente (Figura 99).

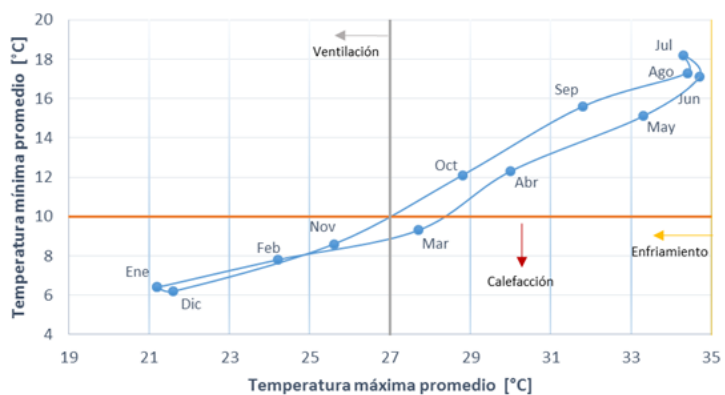


Figura 99. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Lamadrid en Coahuila.

I.8 Colima

En el estado de Colima predomina el clima cálido subhúmedo (Aw) en un 86% del territorio. Asimismo, en el 12.5% se presenta clima seco (Bw) y semiseco (Bs).

El clima favorece el cultivo de maíz, sorgo, caña de azúcar, palma de coco, tamarindo, arroz, jitomate, sorgo, limón y papaya, entre otros.

La mayor parte del año sólo se requiere de ventilación natural para mantener las temperaturas por debajo de los 22 °C. Sólo para los meses de Mayo y Junio se puede requerir de enfriamiento artificial. La radiación incidente va de los 500 MJ/m²/mes hasta los 800 MJ/m²/mes. La temperatura promedio no varía más que 8 °C por lo que la gráfica se ve compacta comparada con la de otros estados (Figura 100).

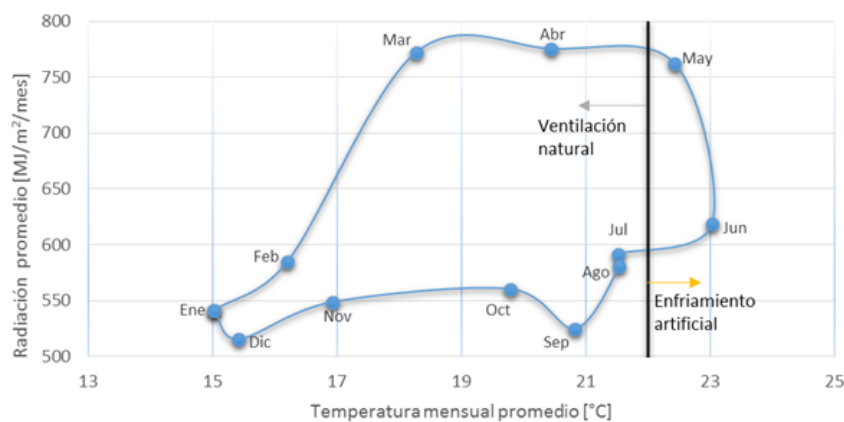


Figura 100. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Colima, México.

Al ser un Estado con un clima predominantemente cálido subhúmedo se observan precipitaciones en verano y parte de otoño con un máximo de 300 mm. La temperatura mínima es mayor a los 5 °C para todo el año y la máxima es menor a los 33°C. La mayor temperatura se presenta en primavera (Figura 101).

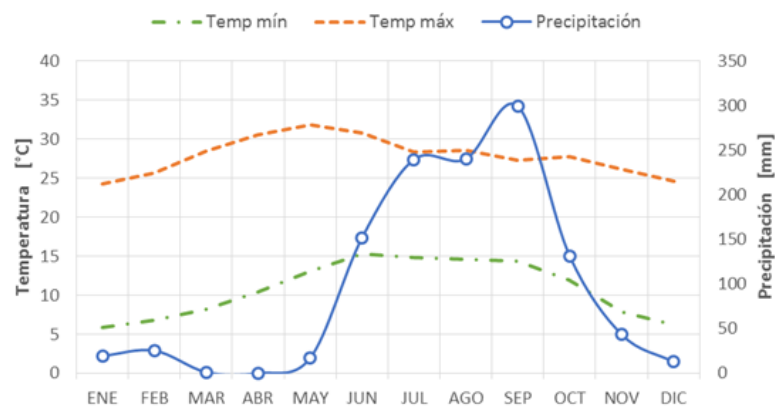


Figura 101. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Colima, México.

Considerando el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas se necesita la mayor parte del año se necesita de enfriamiento, sólo durante el invierno se pueden reducir las temperaturas con ventilación natural. Se requiere considerar la calefacción durante los meses que comprenden el invierno ya que pueden presentarse temperaturas mínimas menores a 10°C (Figura 102).

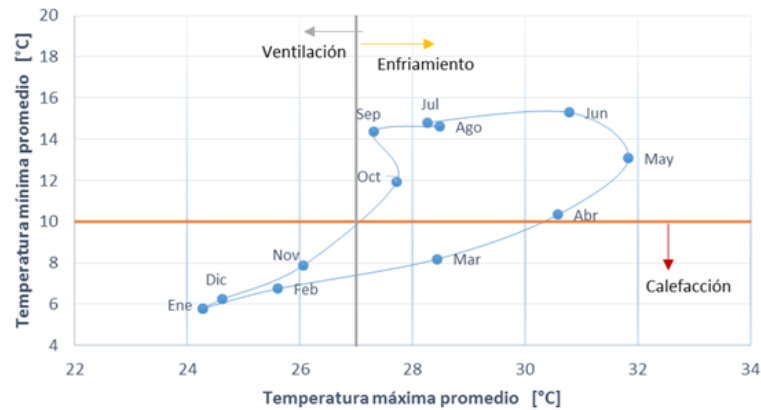


Figura 102. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Colima, México.

Existen en el Estado 30 unidades de control y 29 unidades de producción, siendo el municipio con mayores unidades de producción Colima, seguido de Coquimatlán. Colima cuenta con invernaderos con productos alimenticios, en floricultura y con cultivos no alimenticios; por otra parte Coquimatlán cuenta con invernaderos con cultivos alimenticios y en floricultura. El municipio de Colima se encuentra en la latitud 19°13'00''N y longitud 103°42'47''O, mientras que el municipio de Coquimatlán en la latitud 19°10'18''N y longitud 103°51'39''O. Los números de las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos de cada municipio son 6040 para Colima y 6056 para Coquimatlán. Los datos de radiación para Colima se pueden encontrar en la siguiente página web:

[https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.2166&lon=-103.713&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.2166&lon=-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.2166&lon=-103.713&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[103.713&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.2166&lon=-103.713&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

Los datos de radiación de Coquimatlán se pueden encontrar en la siguiente página web:

[https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.1716&lon=-103.8608&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.1716&lon=-](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.1716&lon=-103.8608&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

[103.8608&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.1716&lon=-103.8608&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit)

Para ambos municipios se requiere de enfriamiento artificial y para el caso de verano y parte de otoño se tienen temperaturas excesivas. La radiación cambia drásticamente de invierno a verano y decae en otoño es por ello que la figura se observa rectangular (Figura 103).

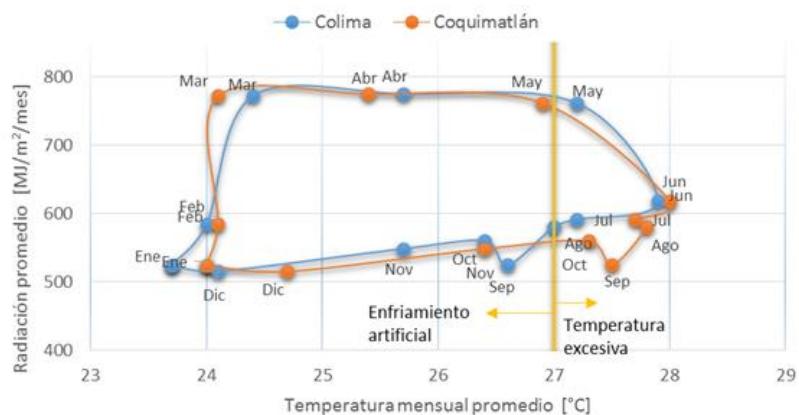


Figura 103. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Colima y Coquimatlán en Colima.

Las temperaturas máximas y mínimas tienen un comportamiento similar con diferencias de 1°C. La temporada de lluvias para ambos casos es la misma con la diferencia de que en Colima se presenta mayor precipitación (Figura 104).

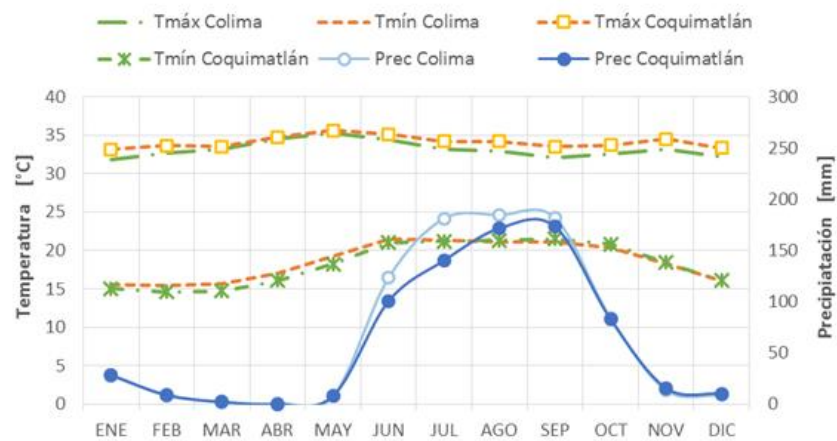


Figura 104. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Colima y Coquimatlán en Colima.

Para estos municipios se requiere de enfriamiento dado que las temperaturas máximas y mínimas son elevadas. No se necesita de calefacción y se debe considerar no tener cultivos en invernadero durante el verano (Figura 105).

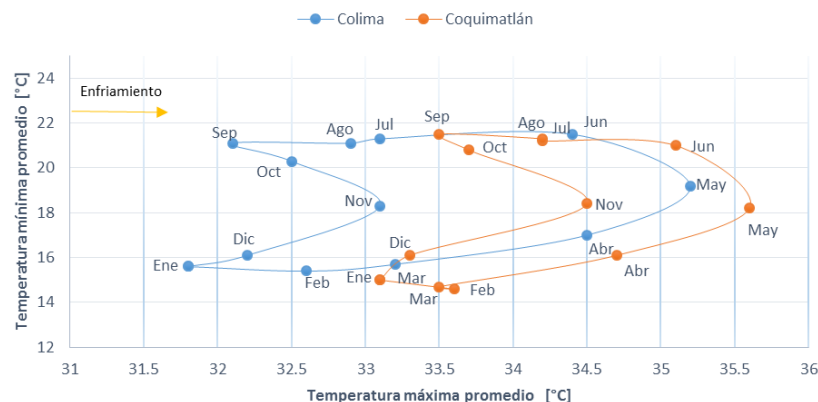


Figura 105. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Colima y Coquimatlán en el Estado de Colima.

I.9 Distrito federal

El 87% de su territorio presenta clima templado subhúmedo (Cw). En el 7% se encuentra seco (Bw) y semiseco (Bs) y en el 6% restante templado húmedo (Cf).

La zona urbana ocupa la mayor parte del territorio, pero hacia la parte Sur y Sureste se encuentran zonas agrícolas, principalmente de temporal donde se cultiva maíz, frijol, avena y nopal. Asimismo es una zona con importante actividad de hortalizas y flores.

Para todo el año basta con tener ventilación natural para mantener la temperatura por debajo de los 22°C. La radiación está por encima de los 220 MJ/m²/mes por lo que no se requiere de luz artificial a menos que el cultivo lo requiera tal como sería el caso de las flores (Figura 106).

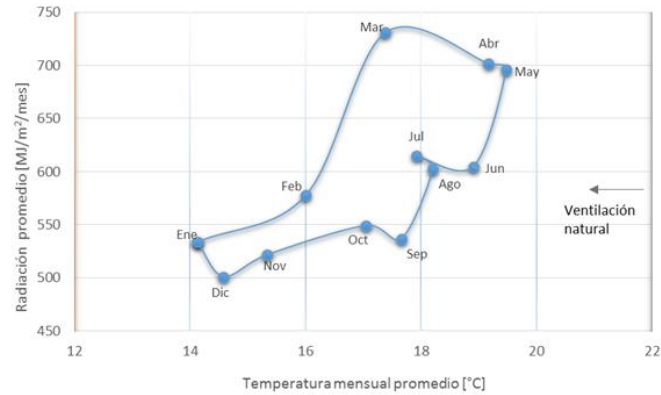


Figura 106. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Distrito Federal, México.

La temperatura mínima es mayor a los 5°C y la temperatura máxima nunca sobrepasa los 27°C en todo el año. La temporada de lluvias es de Mayo a Octubre, con precipitaciones de 150 mm (Figura 107).

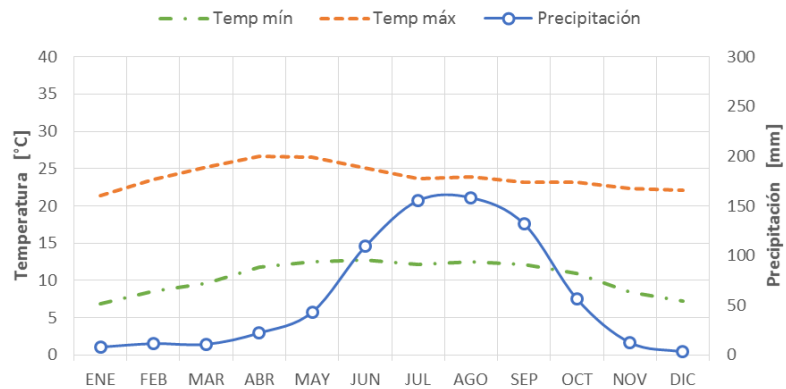


Figura 107. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas para el Distrito Federal, México.

Durante invierno se requiere de calefacción dada las bajas temperaturas mínimas que se encuentran por debajo de los 10°C. Por otra parte todo el año se requiere de ventilación para reducir las temperaturas dentro del invernadero (Figura 108).

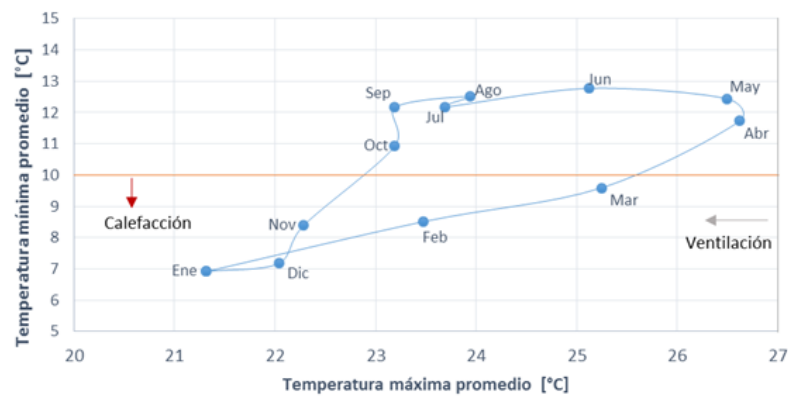


Figura 108. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Distrito Federal, México.

Existen 105 áreas de control y 296 unidades de producción. La delegación con el mayor número de unidades de producción es Xochimilco, con un gran número de invernaderos dedicados a la floricultura, seguida de la delegación Tláhuac con invernaderos destinados, principalmente, a cultivos alimenticios. Xochimilco se encuentra en la latitud 19°11'48''N y longitud 099°07'43''O mientras que Tláhuac en la latitud 19°15'46''N y longitud 099°00'13''O. Los números de las estaciones de donde se obtuvieron datos son 9041 para Xochimilco y 9051 para Tláhuac. Los datos de radiación para Xochimilco se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.1966&lon=-99.1286&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Tláhuac se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.2627&lon=-99.0036&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Xochimilco requiere de calefacción para invierno y de ventilación natural para el resto del año. Tláhuac, por otra parte necesita de ventilación natural para todo el año a fin de mantener la temperatura por debajo de los 22°C. Ambas delegaciones cuentan con radiación por encima de los 220 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial a menos que así lo requiera el cultivo o manejo del mismo (Figura 109).

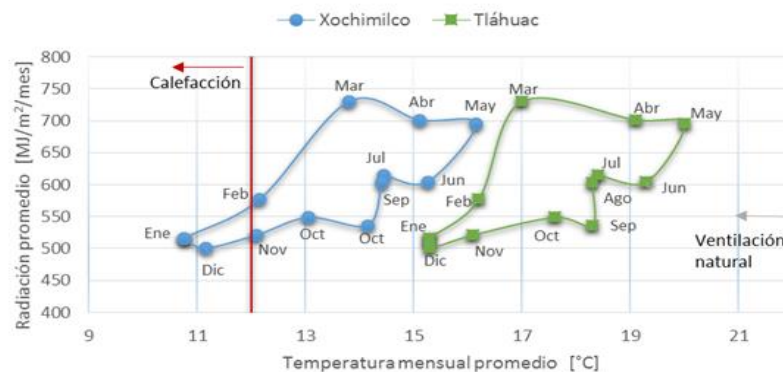


Figura 109. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Xochimilco y Tláhuac.

Xochimilco presenta menor precipitación que la de Tláhuac, en temporada de lluvias dobla la cantidad de precipitación. Ambas delegaciones presentan lluvias en verano y parte de otoño. Las temperaturas máximas para Tláhuac no sobrepasan los 30 °C y las mínimas están por encima de los 5°C. En el caso de Xochimilco las temperaturas están por encima de los 0°C y por debajo de los 25°C (Figura 110).

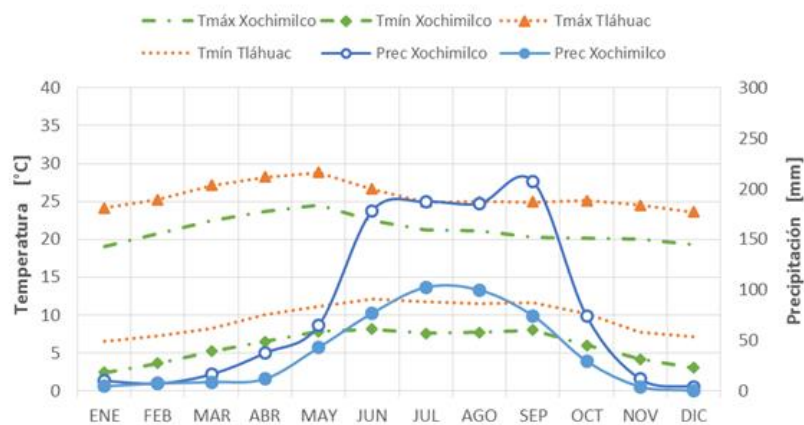


Figura 110. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas de los municipios de Xochimilco y Tláhuac.

El municipio de Xochimilco necesita de calefacción para todo el año si las temperaturas mínimas son menores a los 10°C y ventilación natural si las temperaturas máximas son menores a 27°C. Para Tláhuac sólo los meses de invierno es necesario considerar calefacción y durante verano enfriamiento artificial (Figura 111).

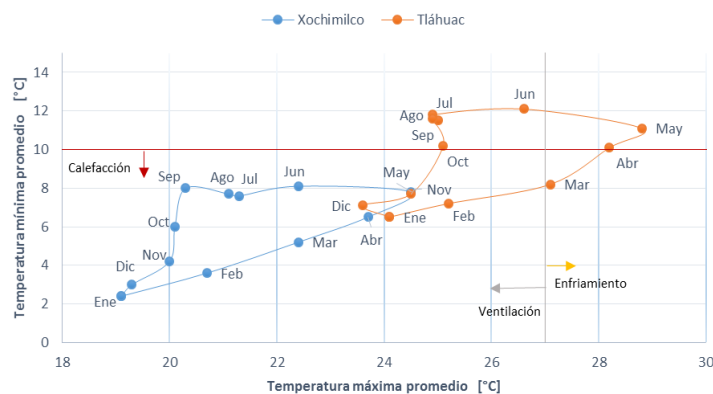


Figura 111. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para las delegaciones de Tláhuac y Xochimilco en el Distrito Federal, México.

I.10 Durango

El 40% del territorio presenta clima seco (Bw) y semiseco (Bs), el 34% clima templado subhúmedo (Cw), el 14% presenta clima muy seco (Bw), el 11% cálido subhúmedo (Aw) y en el restante 1% templado húmedo (Cm).

A pesar de que la precipitación es escasa, una parte importante de la superficie de la entidad está dedicada a la actividad agrícola de riego, sus principales cultivos son: frijol, maíz, algodón, trigo, sorgo, cebada, cártamo, alfalfa verde y hortalizas, manzana y el perón.

En el caso de verano se necesita de enfriamiento artificial y el resto del año de ventilación natural para reducir la temperatura dentro del invernadero. La radiación varía de los 400 a 850 MJ/m²/mes. La gráfica se observa alargada debido a la presencia de diferentes

climas en el Estado, lo que provoca un amplio rango tanto para la radiación como para la temperatura promedio (Figura 112).

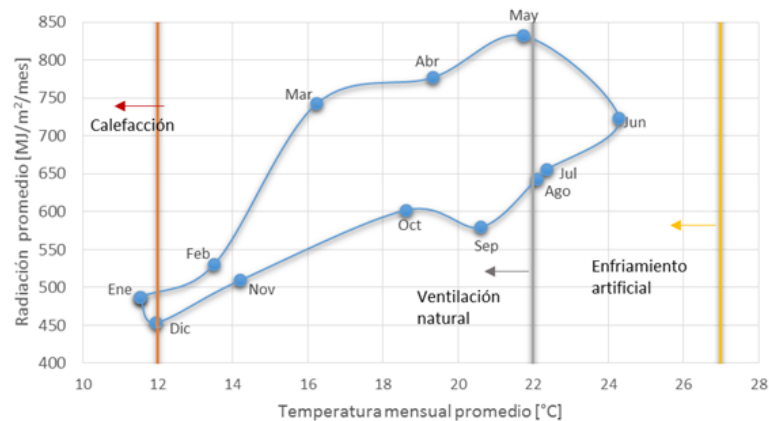


Figura 112. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Durango, México.

Las temperaturas máximas son menores a 35°C, mientras que las mínimas son mayores a 0°C. La diferencia de temperaturas máximas y mínimas es de 15°C aproximadamente, siendo menor en otoño donde se presenta la mayor cantidad de precipitación. El máximo de precipitación corresponde a Julio con 150 mm (Figura 113).

Debido a la gran diferencia entre sus temperaturas máximas y mínimas, la mitad del año puede requerirse de calefacción, el resto, que corresponde al período de verano e invierno se requiere de ventilación y enfriamiento para reducir la temperatura dentro del invernadero (Figura 114).

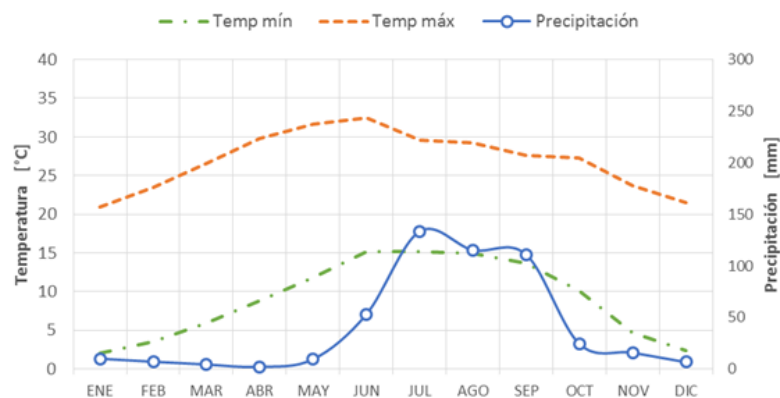


Figura 113. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Durango, México.

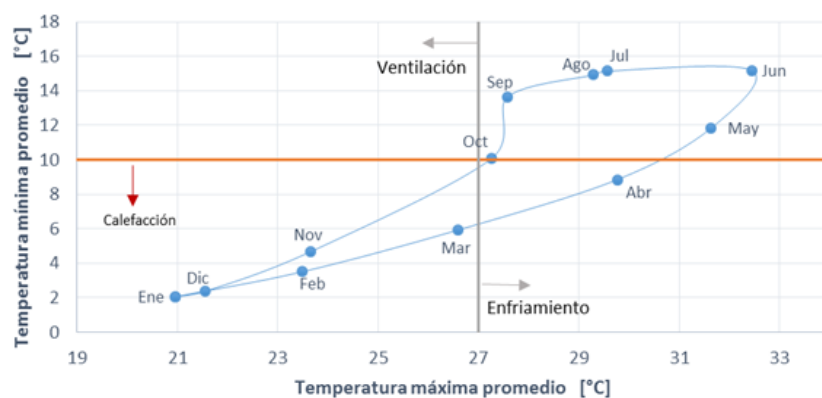


Figura 114. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Durango, México.

El Estado de Durango cuenta con 22 unidades de control y 17 unidades de producción con invernaderos con cultivo de productos alimenticios, floricultura y con cultivos no alimenticios. El municipio que cuenta con mayores unidades de producción es Poanas, sin embargo, no se pudieron obtener datos meteorológicos de este lugar y se optó por considerar el segundo municipio con mayor cantidad de unidades de producción

resultando Pueblo Nuevo. Este municipio se encuentra a una latitud de 24°01'2''N y longitud de 104°40'23''O. La estación de la que se obtuvieron datos meteorológicos fue la número 10092. Los datos de radiación se pueden encontrar en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=24.0244&lon=-104.673&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La temperatura de Pueblo Nuevo se encuentra por debajo del promedio para el período de verano y otoño, lo que se ve reflejado en tener una buena temperatura la mayor parte del año y necesitar ventilación natural para reducir la temperaturas y en el caso de invierno de calefacción (Figura 115).

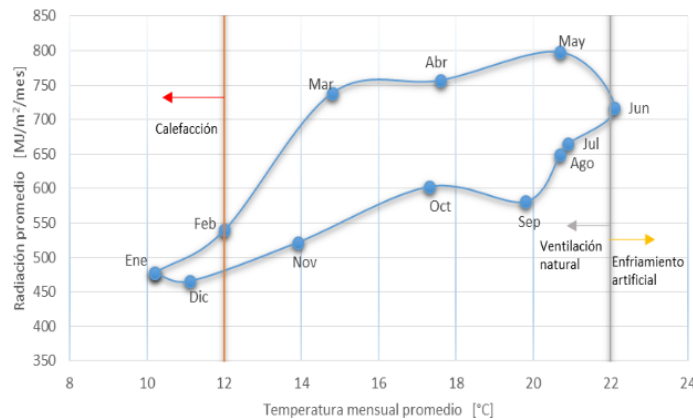


Figura 115. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

La temporada de lluvias se presenta en verano con un máximo de 115 mm. La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas es de 20°C, excepto en verano donde se reduce a 15°C. Las temperaturas máximas son menores a los 30 °C, mientras que las temperaturas mínimas se encuentran por encima de los 0°C (Figura 116).

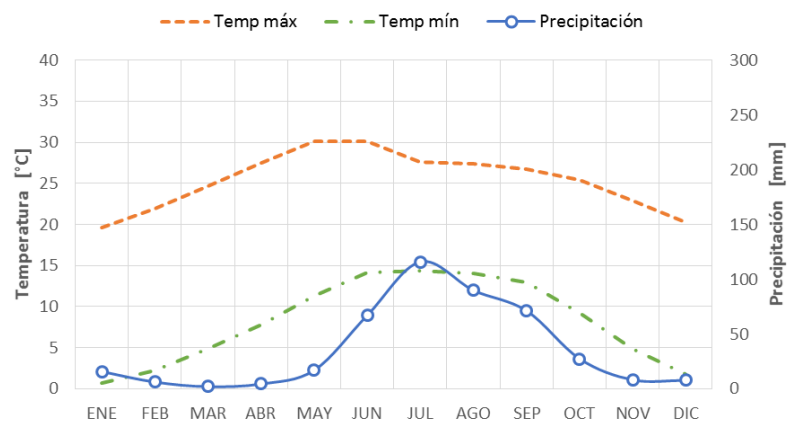


Figura 115. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Pueblo Nuevo en Durango.

Debido a que la temperatura mínima se encuentra por debajo de los 10°C, la mayor parte del año, se considera tomar en cuenta la acción de calentar el invernadero sobre todo en el período de invierno que es donde se presentan las menores temperaturas (Figura 116).

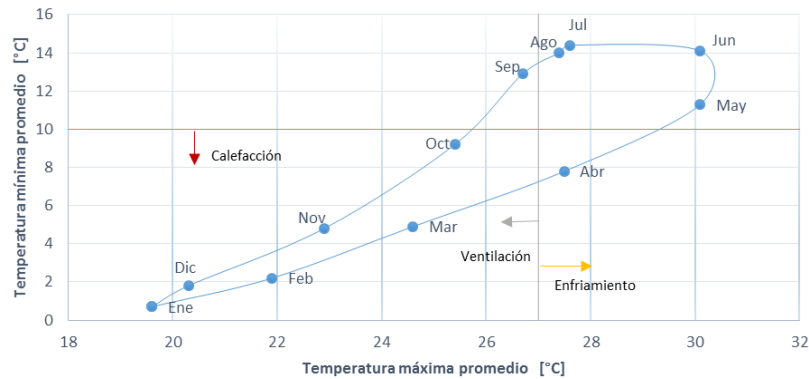


Figura 116. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el municipio de Pueblo Nuevo en el Estado de Durango, México.

I.11 Estado de México

El 73% del estado presenta clima templado subhúmedo (Cw), localizado en los valles altos del Norte, Centro y Este. El 21% es cálido subhúmedo (Aw) y se encuentra hacia el Suroeste, el 5.84% seco y semiseco (Bs) presente en el Noreste y el 0.16% clima frío (ETH) localizado en las partes altas de los volcanes.

La radiación promedio del Estado de México está por encima de los 400 MJ/m²/mes, suficiente para no considerar la luz artificial en los invernaderos. Por otra parte las temperaturas en invierno pueden llegar por debajo de los 10 °C lo que implica pensar en calefacción para este período. El resto del año la temperatura se puede mantener por debajo de los 22°C con ventilación natural (Figura 117).

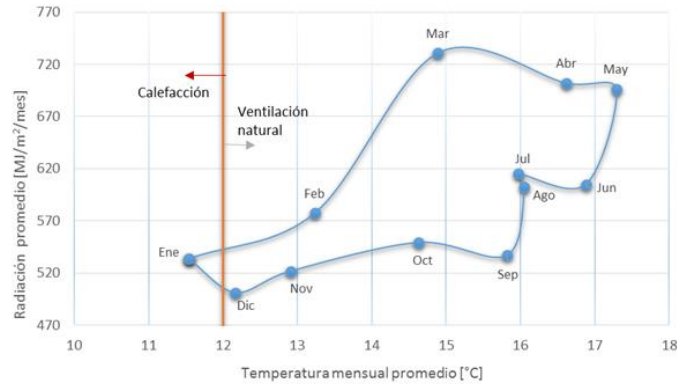


Figura 117. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de México, México.

Las temperaturas máximas son menores a los 26°C y las temperaturas mínimas son mayores a los 3°C para todo el año. La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas es de aproximadamente 12°C. La temporada de precipitación se presenta en verano y parte de otoño, con un máximo de 165 mm en Julio (Figura 118).

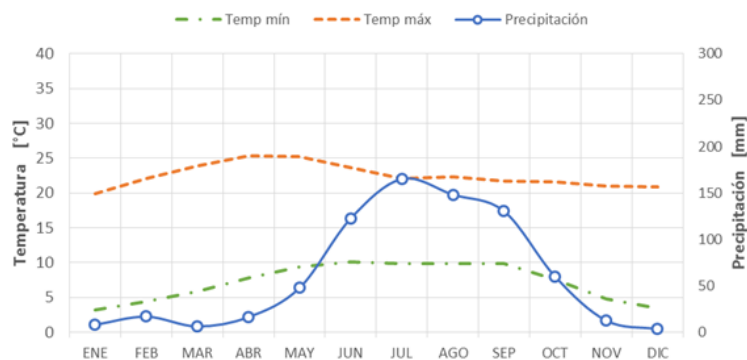


Figura 118. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de México, México.

En general las temperaturas mínimas son muy bajas por lo que es necesario considerar la calefacción para todo el año, aunque puede suceder que no se necesite en ciertos meses. Todo el año para reducir la temperatura se puede usar ventilación natural (Figura 119).

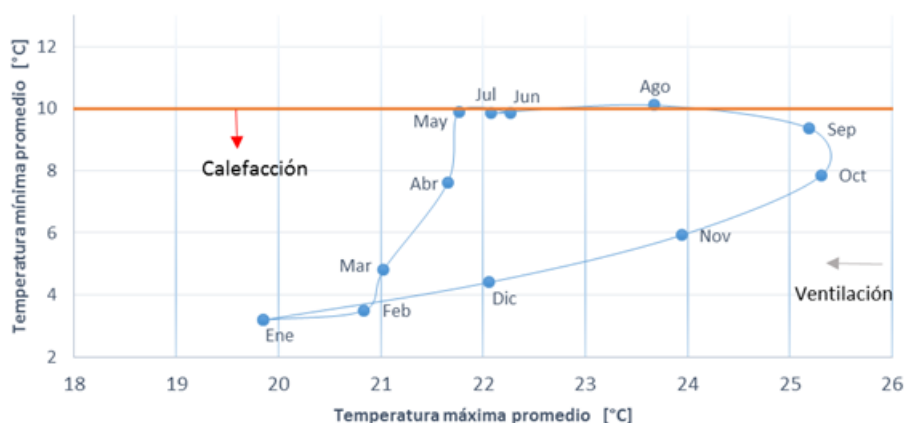


Figura 119. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de México, México.

En el Estado de México hay 551 unidades de control y 1861 unidades de producción entre invernaderos con cultivo de productos alimenticios, floricultura y cultivos no alimenticios. El municipio con mayor cantidad de unidades de producción es Villa Guerrero seguido de Tenancingo. Para el caso del estudio se consideró Texcoco, que ocupa el tercer lugar en unidades de producción, debido a que ahí se encuentra la Universidad Autónoma Chapingo. Villa Guerrero se ubica a una latitud de $18^{\circ}53'39''\text{N}$ y longitud $099^{\circ}38'35''\text{O}$, Texcoco se ubica a una latitud de $19^{\circ}29'05''\text{N}$ y longitud $098^{\circ}53'11''\text{O}$. Los números de las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos de los dos municipios son

15134, para Villa Guerrero y 15170 para Texcoco. Los datos de radiación para Villa Guerrero se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=18.8941&lon=-98.3569&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de Texcoco se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.4847&lon=-98.8863&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Ambos municipios tienen en promedio temperaturas mayores a los 10 °C por lo que en general no requieren de calefacción. Villa Guerrero puede tener temperaturas que sobrepasan los 22°C y por tanto se necesitaría de enfriamiento artificial para los meses de Abril y Mayo. Ambos municipios contemplan utilizar ventilación natural para

mantener la temperatura por debajo de los 22°C (Figura 120).

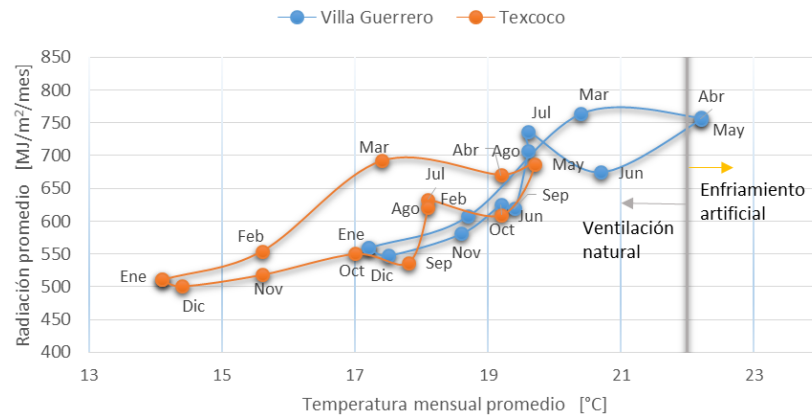


Figura 120. Radiación mensual promedio para los municipios de Villa Guerrero y Texcoco en el Estado de México.

Las temperaturas máximas de los dos municipios son similares sin embargo Texcoco presenta menores temperaturas mínimas. La temporada de lluvias se presenta en verano y parte de otoño para ambos municipios. Villa Guerrero presenta mayor precipitación con un poco más de 150 mm en promedio (Figura 121).



Figura 121. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Villa Guerrero y Texcoco en el Estado de México.

Como era de esperarse debido al comportamiento de las temperaturas mínimas se requiere de enfriamiento artificial, ventilación natural y de calefacción para Texcoco. Por otra parte, para Villa Guerrero requiere de calefacción sólo durante el invierno y de enfriamiento artificial la mayor parte del año (Figura 122).

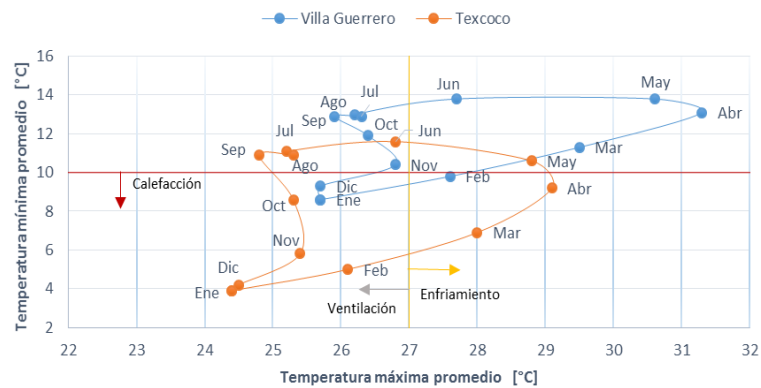


Figura 121. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Villa Guerrero y Texcoco en el Estado de México, México.

I. 12 Guanajuato

El 43% de la superficie del estado tiene clima seco y semiseco (Bs), localizado principalmente en la región Norte. El 33% de la superficie presenta clima cálido subhúmedo (Aw) hacia la parte Suroeste y Este. El 24% restante presenta clima templado subhúmedo (Cw).

Gracias al tipo de suelo y clima produce maíz, frijol, cebada, trigo, linaza, garbanzo, durazno, ajo, manzana, alfalfa, avena, cebada, centeno, jitomate, remolacha, sorgo y chabacano entre otros.

El período de verano presenta temperaturas mayores a los 22°C, por lo que se recomienda el uso de enfriamiento artificial para reducir la temperatura, el resto del año se puede utilizar ventilación natural. Ninguno de los meses en promedio necesita de calefacción. La radiación se encuentra por encima de los 400 MJ/m²/mes por lo que no es necesario el uso de luz artificial (Figura 122).

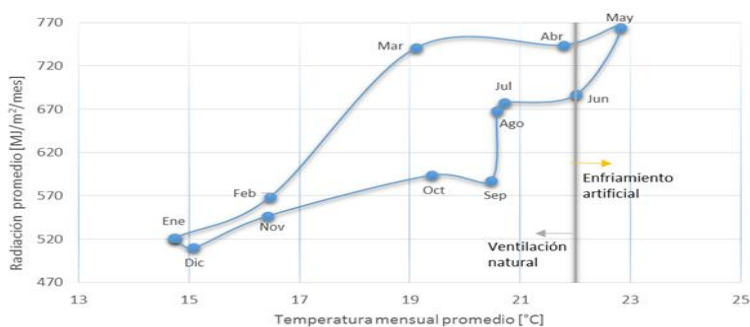


Figura 122. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Guanajuato.

Las temperaturas máximas no sobrepasan los 33°C, mientras que las temperaturas mínimas están por encima de los 5°C. La diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas es de 20°C excepto en verano con una diferencia de 10°C, aproximadamente. La temporada de lluvias se presenta en verano y parte de otoño siendo julio el mes con mayor precipitación, alrededor de 170 mm (Figura 123).

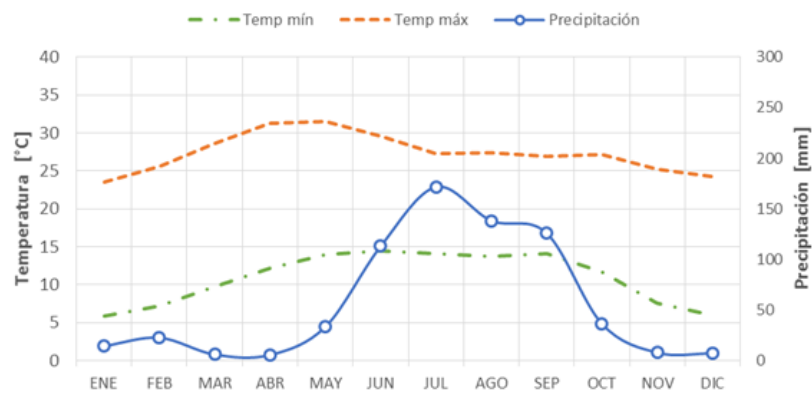


Figura 122. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas promedio para el Estado de Guanajuato.

Durante los meses de invierno es necesario considerar la calefacción. En la mayor parte del año se requiere de enfriamiento artificial para reducir la temperatura (Figura 123).

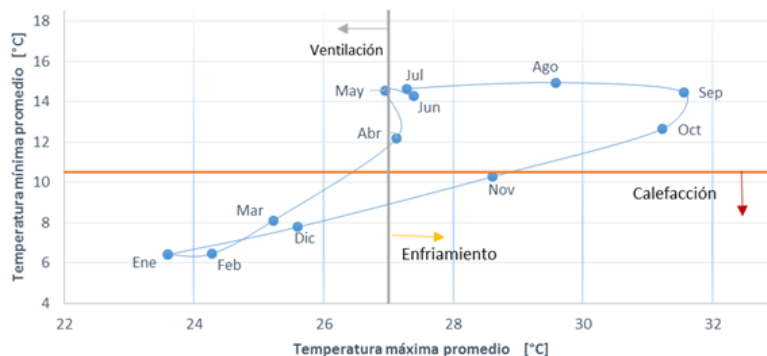


Figura 123. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Guanajuato.

En Guanajuato hay 44 áreas de control y 33 unidades de producción con invernaderos destinados a cultivos alimenticios, floricultura y cultivos no alimenticios. El municipio con mayor cantidad de unidades de producción es Irapuato y se ubica a una latitud de 20°40'08''N y longitud 101°20'14''O. La estación de la cual se obtuvieron datos meteorológicos es la número 11028. Los datos de radiación se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.6688&lon=-101.3372&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

De la misma manera que el comportamiento promedio del Estado de Guanajuato, Irapuato requiere de enfriamiento artificial para el período de verano, el resto del año se puede mantener la temperatura por debajo de los 22 °C con ventilación natural (Figura 124).

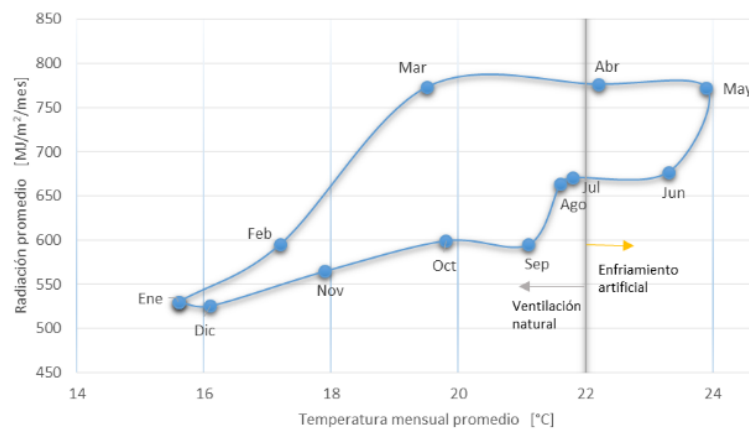


Figura 124. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el municipio de Irapuato en Guanajuato.

La diferencia entra las temperaturas máximas y mínimas es de 20°C, excepto en verano donde sólo es de 15 °C, aproximadamente. Las temperaturas máximas no sobrepasan los 33°C, mientras que las temperaturas mínimas son mayores a los 5°C para todo el año. El período de lluvias es en verano y parte de otoño. La mayor precipitación se presenta en julio con 160 mm.

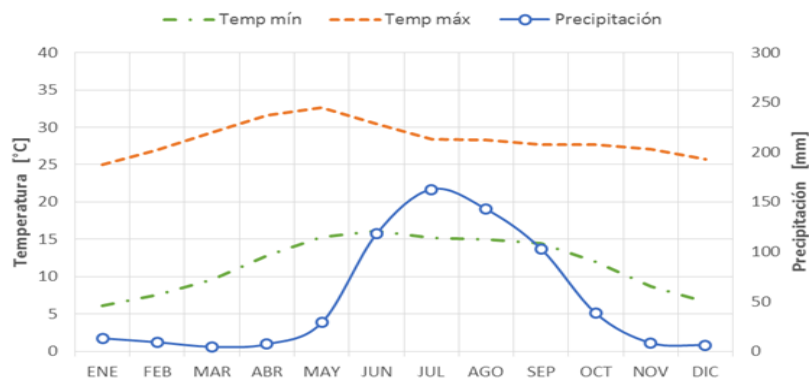


Figura 125. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas para el municipio de Irapuato, Guanajuato.

Durante el invierno es necesario considerar calefacción, en este mismo período basta con ventilación natural para enfriar el invernadero. El resto del año las temperaturas son elevadas y se necesita de un enfriamiento artificial. Estas condiciones coinciden con el promedio del Estado de Guanajuato (Figura 126).

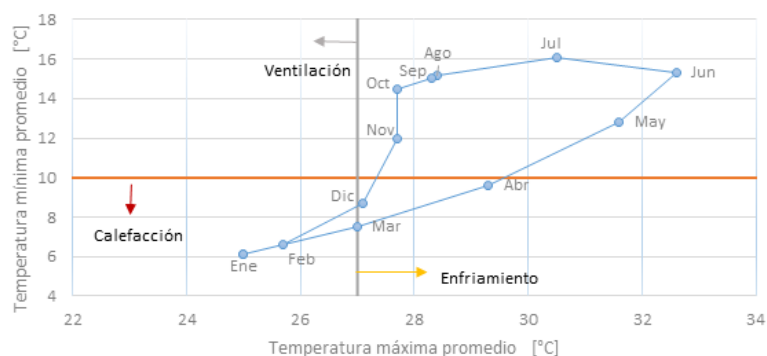


Figura 126. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Irapuato, Guanajuato.

I.13 Guerrero

El 82% del estado presenta clima cálido subhúmedo (Aw), el 9% es seco y semiseco (Bs), el 5% es templado subhúmedo (Cw), el 3% cálido húmedo (Am) y el 1% es templado húmedo (Cm).

El clima favorece el cultivo de frutas como mamey, mango, zapote y cítricos.

En general la temperatura puede mantenerse con ventilación natural a excepción de mayo en donde se presentan altas temperaturas y se requiere de enfriamiento artificial. La radiación va de los 500 $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{mes}$ a los 790 $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{mes}$ por lo tanto no se necesita de luz artificial (Figura 127).

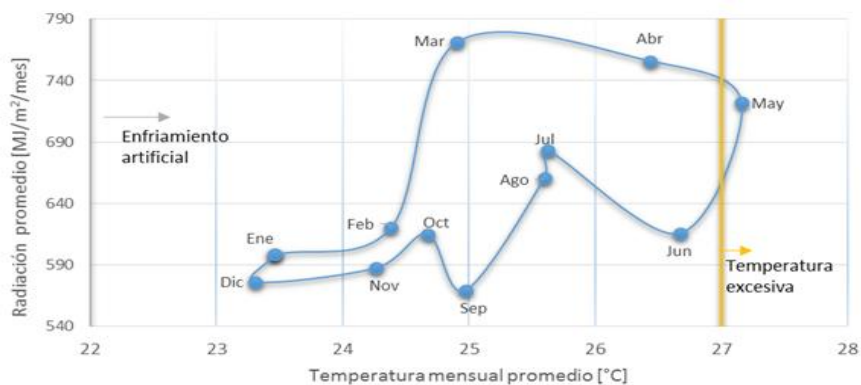


Figura 127. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Guerrero, México.

La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas es de 15 $^{\circ}\text{C}$ excepto en verano donde es de sólo 10 $^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas máximas son menores a los 35 $^{\circ}\text{C}$ y las

temperaturas mínimas son mayores a los 15°C. La temporada de lluvias se extiende de verano a otoño, con un máximo de 278 mm en agosto (Figura 128).

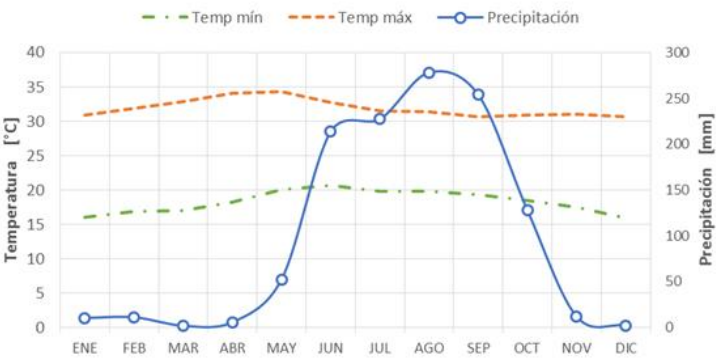


Figura 128. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Guerrero, México.

Dado el clima que posee Guerrero durante todo el año se tienen temperaturas elevadas y por tanto no se requiere de calefacción y se necesita tener enfriamiento artificial para reducir la temperatura (Figura 129).

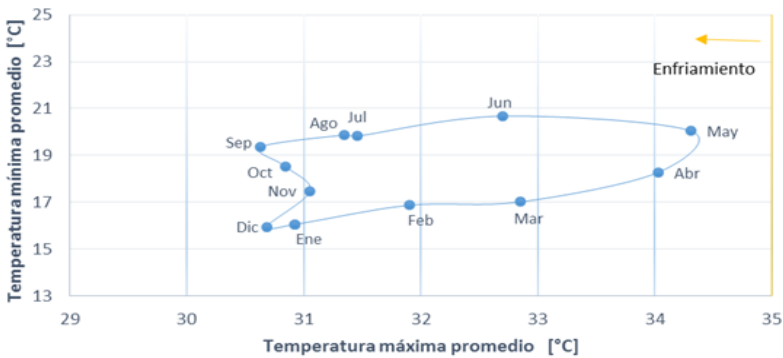


Figura 129. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Guerrero, México.

En Guerrero hay 66 áreas de control y 114 unidades de producción divididas entre invernaderos con cultivos alimenticios, floricultura y cultivos no alimenticios. Los municipios de Guerrero que presentan la mayor cantidad de unidades de producción son Acapulco y Chilapa. La ubicación de Acapulco es en una latitud de 16°51'59''N y longitud 099°54'20''O y para Chilapa una latitud de 17°36'31''N y longitud 099°10'33''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la 12142, para el caso de Acapulco y la 12110 para Chilapa. Los datos de radiación para Acapulco se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=16.8663&lon=-99.0944&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Chilapa se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=17.6086&lon=-98.8241&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La diferencia de ambos municipios es bastante notoria, Chilapa requiere de ventilación natural y en verano puede llegar a necesitar de enfriamiento artificial mientras que Acapulco tiene elevadas temperaturas superando los 27°C y no es suficiente el enfriamiento artificial, si se desea mantener una temperatura baja dentro del invernadero se necesita de otras estrategias junto con el enfriamiento artificial (Figura 130).

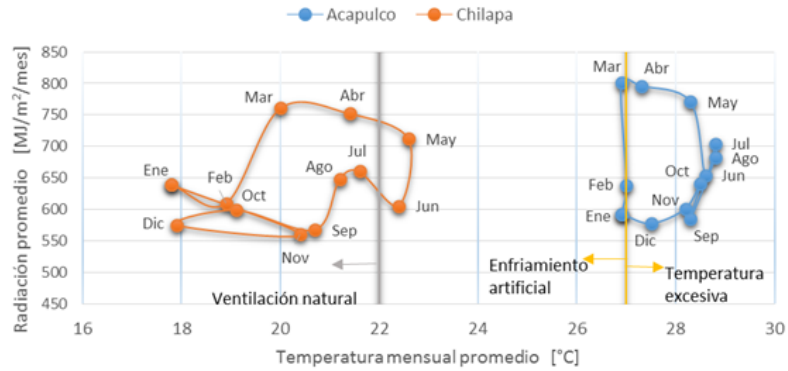


Figura 130. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Acapulco y Chilapa en el Estado de Guerrero.

Las temperaturas máximas y mínimas son muy cercanas para Acapulco. Las temperaturas máximas no sobrepasan los 34°C y las mínimas son mayores a los 22°C. Chilapa presenta mayor diferencia entre sus temperaturas máximas y mínimas, las temperaturas máximas no sobrepasan los 31°C y las mínimas son mayores a 7°C. La temporada de lluvias es la misma para ambos municipios, sin embargo Acapulco presenta mayor precipitación con 315 mm comparada con 210 mm, la máxima de Chilapa (Figura 131).

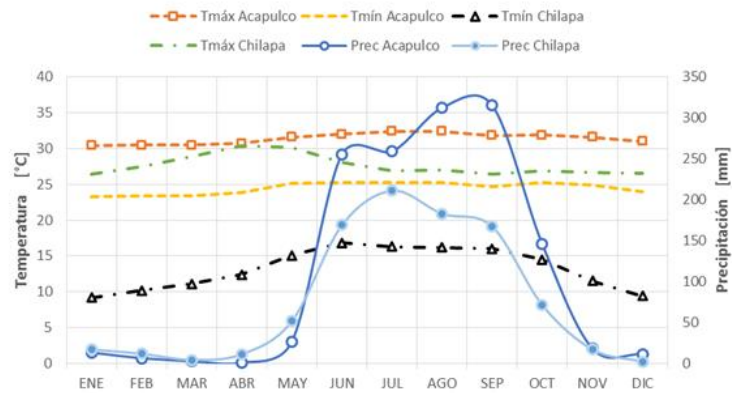


Figura 131. Precipitación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Acapulco y Chilapa en Guerrero.

Para el caso de Chilapa se necesita de enfriamiento y ventilación además de contemplar la calefacción en invierno. Acapulco, por otro lado, requiere de enfriamiento por sus altas temperaturas todo el año. La gran diferencia de temperaturas es notoria y provoca esa gran diferencia entre los requerimientos de control (Figura 132).

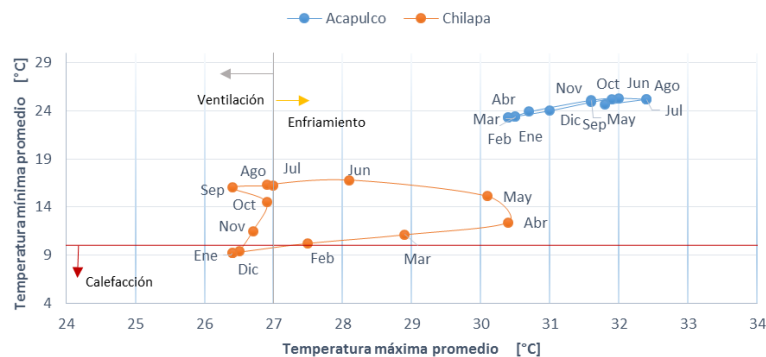


Figura 132. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Acapulco y Chilapa en el Estado de Guerrero.

I.14 Hidalgo

El 39% del estado presenta clima seco y semiseco (Bs), el 33% templado subhúmedo (Cw), el 16% cálido húmedo (Am), el 6% cálido subhúmedo (Aw) y el restante 6% templado húmedo (Cm), estos últimos se presentan en la zona huasteca.

El clima seco y semiseco favorece el crecimiento de plantas cactáceas como el maguey pulquero, tuna y nopal.

Las temperaturas promedio de Hidalgo se encuentran entre los 12 a 22°C por lo que se necesita de ventilación natural. La radiación es superior a 400 MJ/m²/mes por lo tanto no se requiere de luz artificial para los invernaderos (Figura 133).

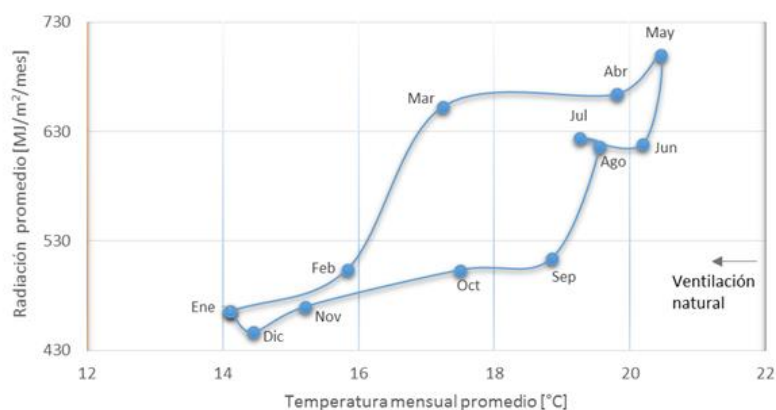


Figura 133. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Hidalgo, México.

Las temperaturas máximas están por debajo de los 30°C y las temperaturas mínimas están por encima de los 5°C. La temporada de lluvias corresponde al período de verano y parte de otoño. La mayor precipitación se presenta en septiembre con 150 mm (Figura 134).

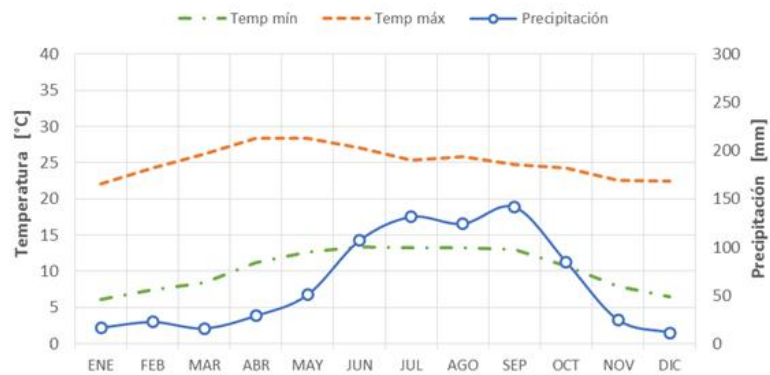


Figura 133. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Hidalgo, México.

El período de invierno se debe considerar calefacción debido a las bajas temperaturas en el Estado. Sólo durante el verano es necesario considerar un equipo de enfriamiento artificial, el resto del año se puede reducir la temperatura con ventilación natural (Figura 134).

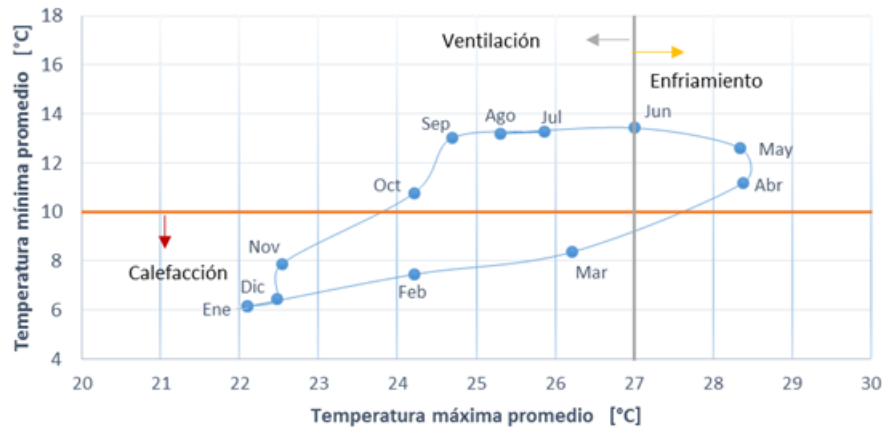


Figura 134. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Hidalgo.

Hidalgo cuenta con 120 áreas de control y 114 unidades de producción. El municipio con mayor cantidad de unidades de producción es Acaxochitlán seguido de Mineral del Chico. Acaxochitlán se ubica en la latitud 20°09'30''N y longitud 098°12'20''O, Mineral del chico se ubica en la latitud 20°12'53''N y longitud 098°43'50''O. Las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos son la 13094 para Acaxochitlán y 13112 para Mineral del Chico. Los datos de radiación de Acaxochitlán se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.1583&lon=-97.7944&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación para Mineral del Chico se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.2147&lon=-97.2694&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los dos municipios presentan temperaturas promedio similares por lo que basta con ventilación natural para mantener la temperatura dentro de los invernaderos. Mineral del Chico presenta temperaturas cercanas a los 12 °C en enero por lo que se puede considerar tener calefacción para este mes (Figura 135).

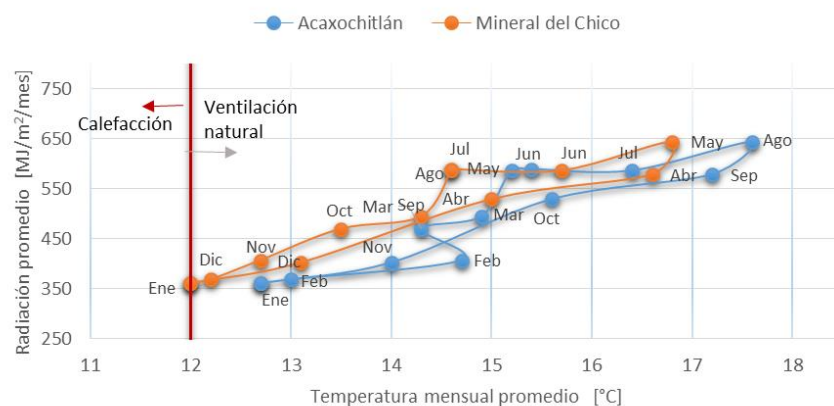


Figura 135. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Acaxochitlán y Mineral del Chico en Hidalgo.

Ambos municipios presentan temperaturas máximas y mínimas similares. La temporada de lluvias se presenta en el mismo período para ambos casos. Mineral del Chico presenta mayor precipitación llegando a un máximo de 250 mm en septiembre. Las temperaturas máximas no sobrepasan los 27°C y las mínimas son mayores a 4°C (Figura 136).



Figura 136. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Acaxochitlán y Mineral del Chico, Hidalgo.

Ambos municipios tienen temperaturas mínimas menores a los 10°C durante todo el año y temperaturas máximas menores a los 27°C, por lo que la recomendación es contar con calefacción y ventilación natural durante todo el año (Figura 137). Sólo cuando las temperaturas sean menores a 10°C es que se debe usar la calefacción.

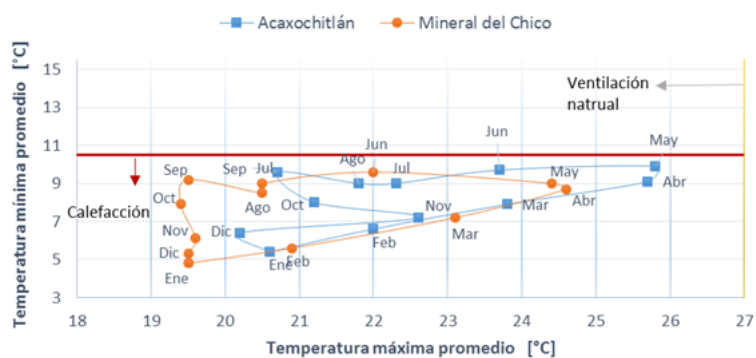


Figura 137. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Acaxochitlán y Mineral del Chico, Hidalgo.

I.15 Jalisco

El 68% de la superficie del estado presenta clima cálido subhúmedo (Aw), hacia lo largo de la costa y zona centro el 18% es templado subhúmedo (Cw) en las partes altas de las Sierras, el 14% seco y semiseco (Bs) en el Norte y Noreste del estado.

El clima favorece el cultivo de maíz, caña de azúcar, sorgo y maguey tequilero, entre otros.

La mita del año que corresponde a invierno y primavera basta con la ventilación natural para mantener la temperatura dentro del invernadero, para el resto del año, se necesita de enfriamiento artificial para reducir la temperatura por debajo de los 27°C (Figura 138).

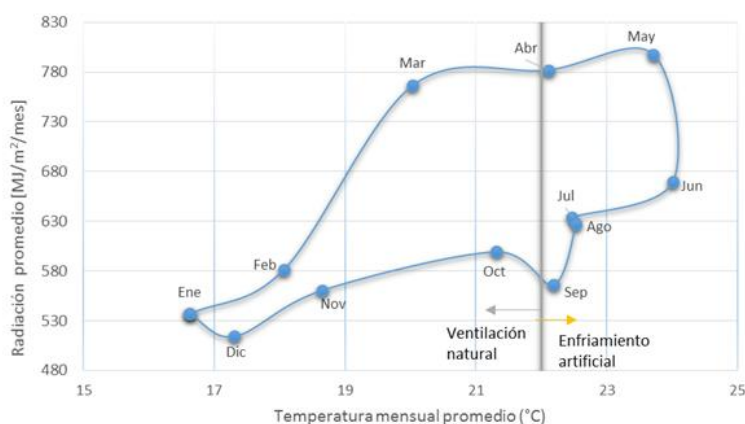


Figura 138. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el Estado de Jalisco, México.

Las temperaturas máximas son menores a 35°C para todo el año, las temperaturas mínimas son mayores a 6°C, para todo el año. La temporada de lluvias se extiende por verano y parte de otoño. Con un máximo de 200 mm en julio (Figura 139).

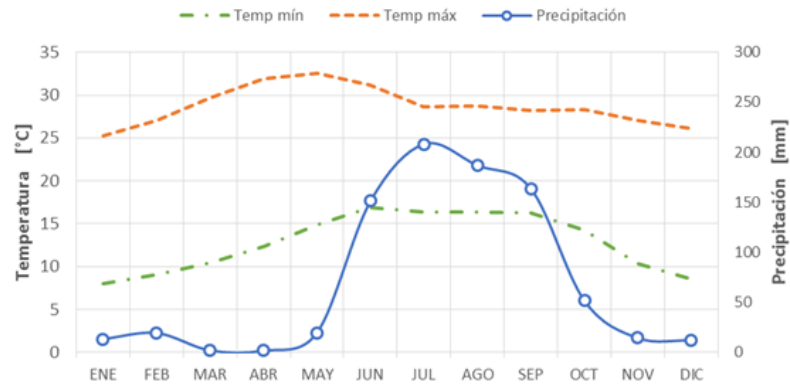


Figura 139. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Jalisco, México.

Para invierno, las temperaturas mínimas se encuentran por debajo de los 10 °C por lo que sería conveniente pensar en calefacción. El resto del año se necesita de enfriamiento artificial debido al comportamiento de las temperaturas máximas (Figura 140).

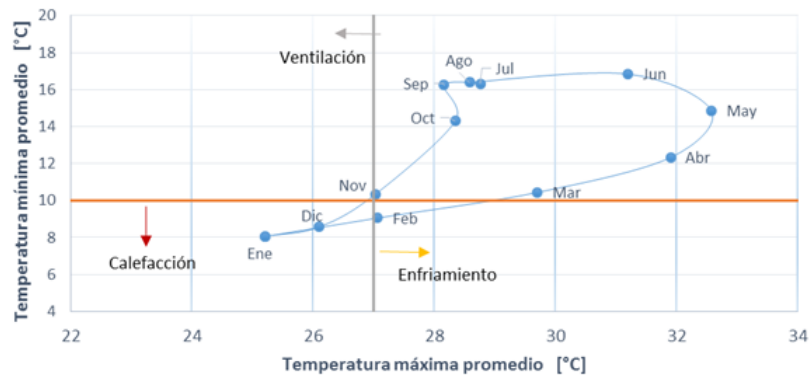


Figura 140. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Jalisco, México.

Jalisco cuenta con 122 áreas de control y 110 unidades de producción. El municipio que presenta mayores unidades de producción es Tlajomulco con una latitud de 20°28'22''N y longitud 103°26'48''O. La estación de donde se obtuvieron datos meteorológicos fue la número 14294. Los datos de radiación para este municipio se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.4727&lon=-103.4466&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La radiación mensual es superior a los 400 MJ/m²/mes por lo que no se requiere de luz artificial en ningún mes del año. A excepción de mayo y junio, basta con la ventilación natural para enfriar el invernadero (Figura 141).

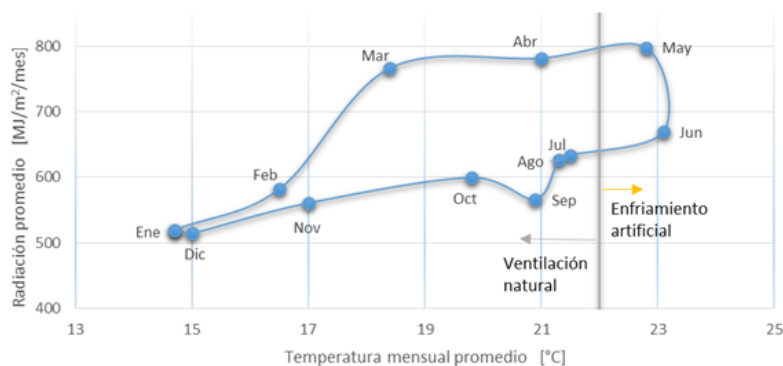


Figura 141. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para el municipio de Tlajomulco, Jalisco.

Las temperaturas máximas no sobrepasan los 35°C y las mínimas son mayores a los 3°C para todo el año. La temporada de lluvias se presenta en verano y parte de otoño con un máximo de 200 mm en el mes de julio. En verano es cuando se presenta la menor diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas con tan sólo 13°C (Figura 142).

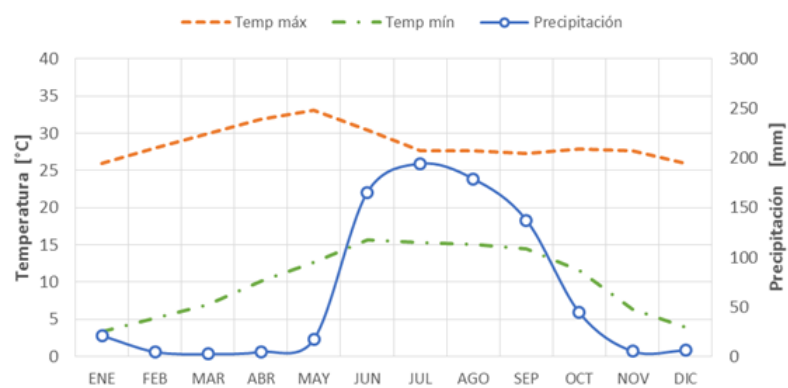


Figura 142. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Tlajomulco, Jalisco.

La mayoría del año para Tlajomlco se necesita de enfriamiento para reducir la temperatura. Al igual que la mitad del año es necesario considerar la calefacción, en general estas condiciones son iguales a las que presenta el promedio del Estado (Figura 143).

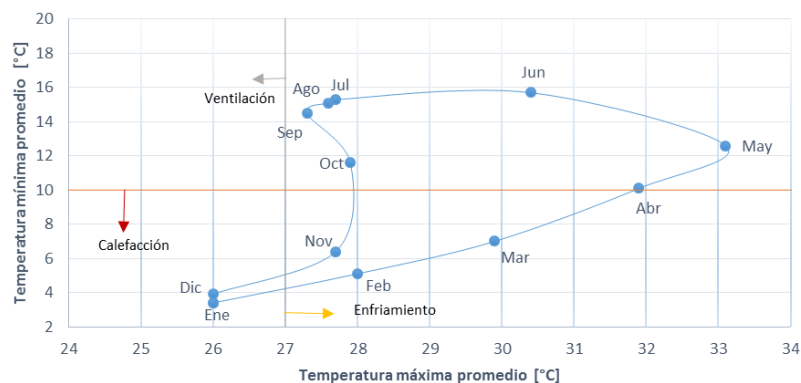


Figura 143. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el municipio de Tlajomulco, Jalisco.

I.16 Michoacán

En el 54.5% del estado el clima es cálido subhúmedo (Aw), localizado en la planicie costera del pacífico y Sierra Madre del Sur, el 29% templado subhúmedo (Cw) en el eje neovolcánico, el 15% seco y semiseco (Bs) localizado en las partes bajas y medias de la depresión del Balsas y Tepelcatepec, el 1% templado húmedo (Cm) y el 0.5% cálido húmedo (Am) se presenta en regiones altas del eje neovolcánico. El clima favorece el cultivo de aguacate, siendo este estado el principal productor a nivel nacional.

Las temperaturas en el Estado son mayores a los 12 °C para la mayoría del año, excepto en verano donde exceden los 22°C. Durante el período de verano se necesita considerar enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro del invernadero, para el resto del año basta con tener ventilación natural. La radiación promedio está por encima de los 400 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial (Figura 144).

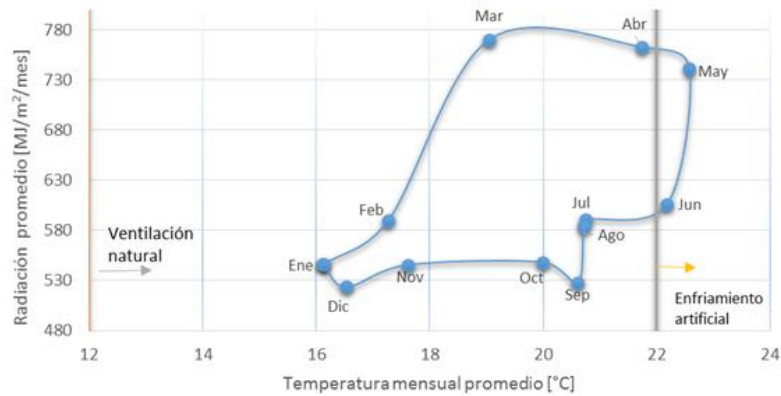


Figura 144. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Michoacán, México.

Las temperaturas mínimas son mayores a los 5°C para todo el año, mientras que las temperaturas máximas son menores a los 31°C para todo el año. La temporada de lluvias es en verano y parte de otoño con un máximo de 200 mm en el mes de julio (Figura 145).

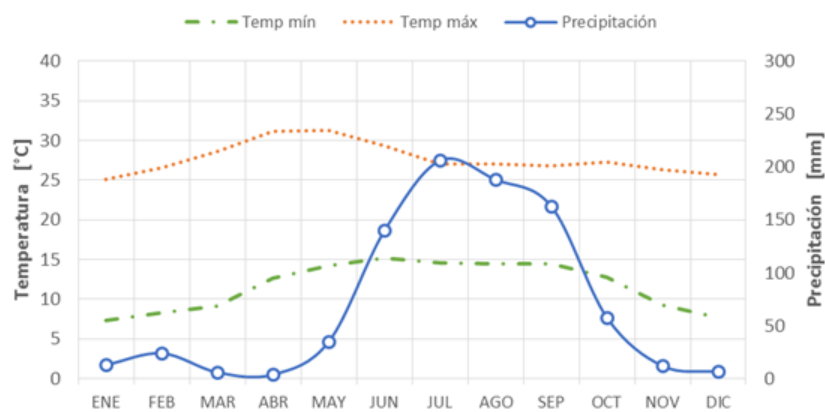


Figura 145. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Michoacán, México.

Durante el período de invierno es necesario considerar calefacción debido a las bajas temperaturas. Basta con tener ventilación natural durante el otoño e invierno para reducir la temperatura dentro del invernadero sin embargo, el resto del año se necesita de enfriamiento artificial (Figura 146).

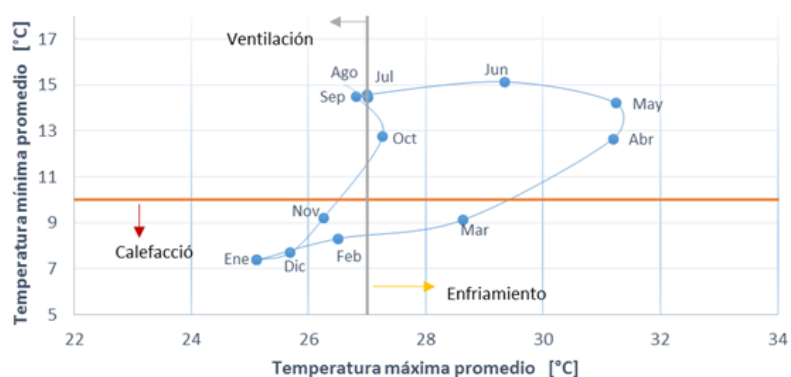


Figura 146. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Michoacán, México.

En Michoacán cuenta con 157 áreas de control y 224 unidades de producción. Los municipios con mayores unidades de producción son Zitácuaro y Jacona. El primero con invernaderos con cultivos alimenticios, invernaderos con floricultura y con cultivos no alimenticios mientras que el segundo sólo con invernaderos con cultivos alimenticios y en floricultura. La ubicación de Zitácuaro es latitud 19°23'00"N y longitud 100°23'00"O, Jacona se ubica en la latitud 19°58'0"N y longitud 102°19'30"O. Las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos son la número 16036, correspondiente a

Zitácuaro, y la número 16162, correspondiente a Jacona. Los datos de radiación para Zitácuaro se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.3833&lon=-100.3833&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación para Jacona se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.9666&lon=-102.325&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Ambos municipios tienen temperaturas parecidas, sin embargo Jacona presenta mayores temperaturas en verano por lo que necesita de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro de los invernaderos, por otra parte Zitácuaro puede mantener la temperatura por debajo de los 22°C con ventilación natural. Ambos municipios reciben en promedio más de 500 MJ/m²/mes por lo que no necesitan de luz artificial (Figura 147).

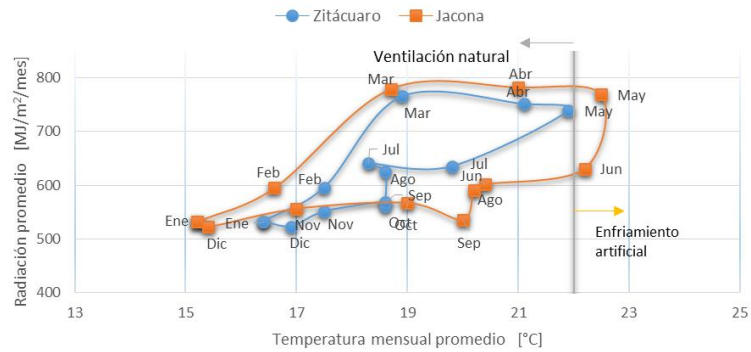


Figura 147. Radiación mensual promedio y temperatura mensual promedio para los municipios de Jacona y Zitácuaro, Michoacán.

Ambos municipios presentan temperaturas mínimas y máximas similares. La temporada de lluvias es la misma para ambos municipios, iniciando en verano y terminando en otoño. El máximo de precipitación es de 190 mm y se presenta en julio en ambos municipios (Figura 148).

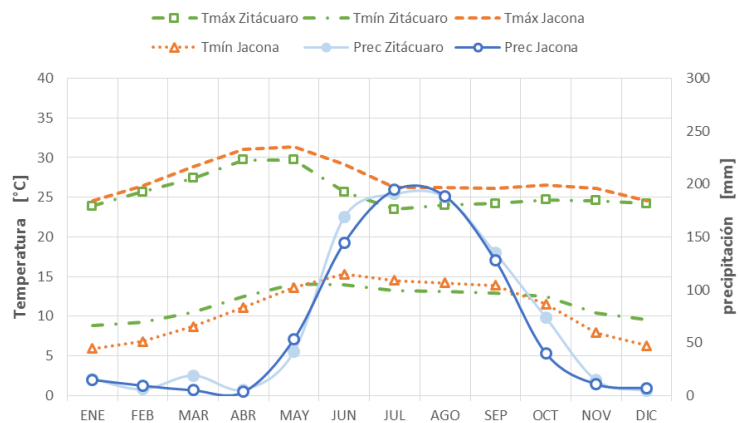


Figura 148. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Jacona y Zitácuaro, Michoacán.

Ambos municipios presentan temperaturas mínimas y máximas similares. La temporada de lluvias es la misma para ambos municipios, iniciando en verano y terminando en otoño. El máximo de precipitación es de 190 mm y se presenta en julio en ambos municipios.

Jacona tiene mayores temperaturas, por lo que necesita de enfriamiento para la mayor parte del año. Por otro lado, Zitácuaro puede usar ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos. Las temperaturas mínimas que se presentan en ambos municipios muestran que debe pensarse en usar calefacción en el período de invierno (Figura 149).

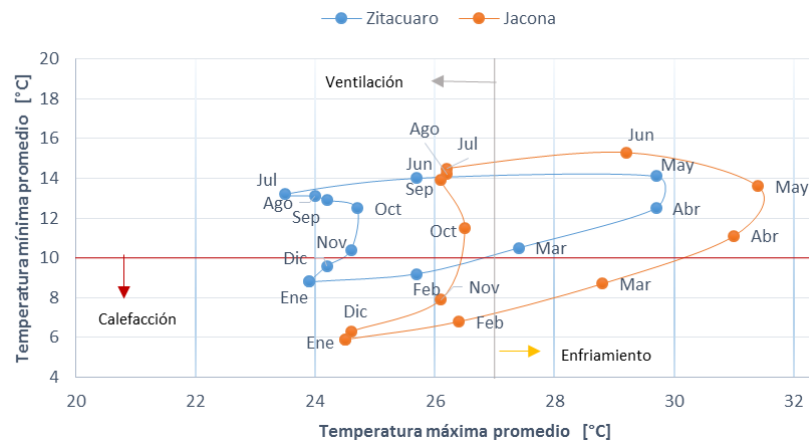


Figura 149. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Jacona y Zitácuaro, Michoacán.

I.17 Morelos

El clima que predomina es el cálido subhúmedo (Aw) ya que se presenta en el 87% de la superficie del estado, el 11% está representado por el clima templado húmedo (Cm),

localizado en la parte Norte del estado, el 2% está representado por clima templado subhúmedo (Cw), localizado en la parte Noreste.

El clima favorece el cultivo de caña de azúcar, arroz, sorgo, maíz, jitomate, algodón, cacahuate, cebolla y frijol, entre otros. Frutales: melón, mango, limón agrio, papaya y plátano. Además se encuentran flores y plantas de ornato de exportación como orquídeas, nochebuenas, rosas, claveles y geranios.

Las temperaturas mensuales promedio superan los 12 °C para la mitad del año por lo que no se necesita de calefacción y se puede mantener el invernadero con una temperatura por debajo de los 22°C con ventilación natural; sin embargo para el resto del año las temperaturas exceden los 22°C por lo que se necesita de enfriamiento artificial para poder reducir la temperatura dentro del invernadero. La radiación promedio incidente es superior a los 500 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial en todo el año (Figura 150).

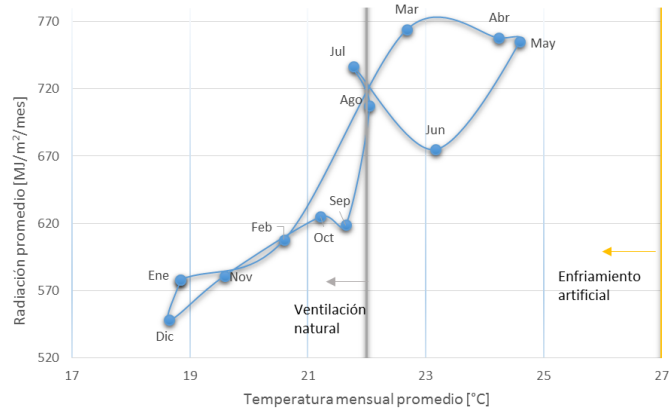


Figura 150. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Morelos.

Las temperaturas máximas están por debajo de los 35°C y las temperaturas mínimas están por encima de los 10°C. La temporada de lluvias se presenta en verano y otoño, durante este período las lluvias son constantes con un promedio de 225 mm. El resto del año las lluvias son escasas. En verano se presenta la menor diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas con 12°C (Figura 151).

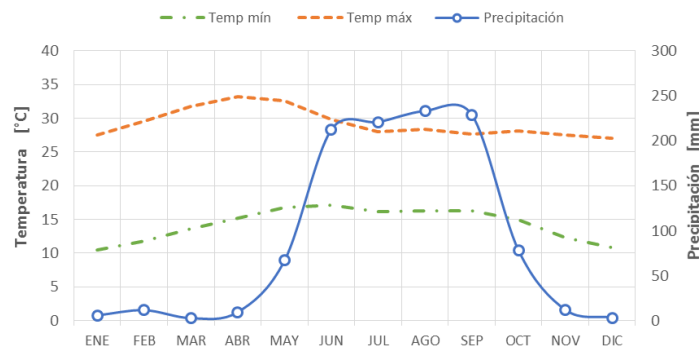


Figura 151. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Morelos.

Las temperaturas mínimas, en promedio, son mayores a los 10°C por lo que no se necesita de calefacción. Sin embargo las temperaturas máximas pueden llegar hasta los 33°C por lo que se necesita pensar en el uso de un sistema de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro del invernadero (Figura 152).

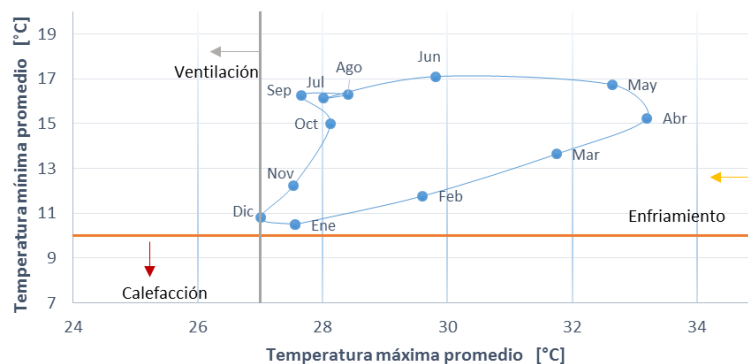


Figura 152. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Morelos.

El Estado de Morelos cuenta con 129 áreas de control y 233 unidades de producción entre invernaderos con cultivos alimenticios, invernaderos en floricultura e invernaderos con cultivos no alimenticios. Los municipios que presentan mayor cantidad de unidades de producción son Cuautla y Yatepec. La ubicación de Cuautla es latitud 18°48'15''N y longitud 98°57'03''O. La ubicación de Yatepec es latitud 18°51'16''N y longitud 99°01'18''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 17003 para Cuautla y la número 17024 para Yatepec. Los datos de radiación para Cuautla se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=18.8041&lon=-98.9503&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación para Yatepec se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=18.8544&lon=-98.9783&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La radiación es superior a los 450 MJ/m²/mes durante todo el año por lo que no se necesita de luz artificial. Los dos municipios tienen temperaturas similares y es durante el invierno donde se puede mantener temperaturas por debajo de los 22°C con ventilación natural, el resto del año, se necesita de enfriamiento artificial (Figura 153).

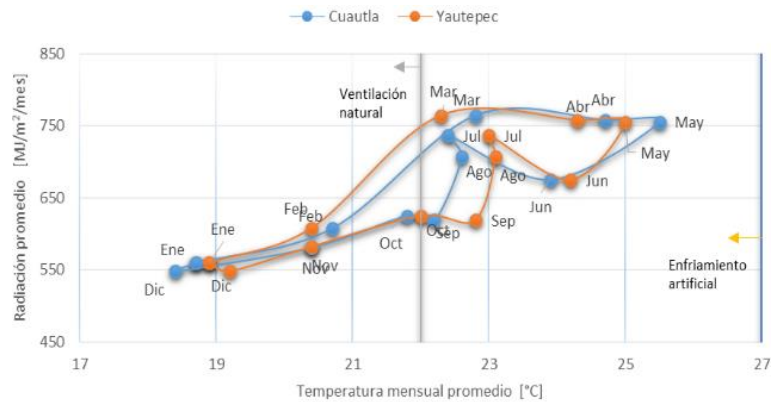


Figura 153. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Cuautla y Yautepec, Morelos.

La temporada de lluvias se presenta en el mismo período sin embargo Yautepec tiene mayor precipitación en agosto y septiembre con 210 mm. Las temperaturas máximas no sobrepasan los 35°C y las temperaturas mínimas son mayores a los 7°C para ambos municipios (Figura 154).

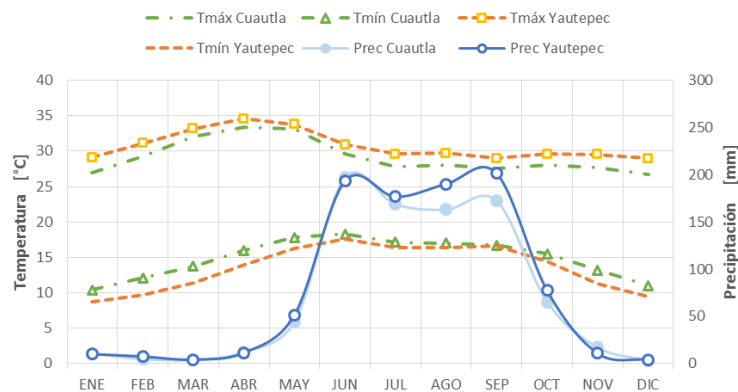


Figura 154. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Cuautla y Yautepec, Morelos.

La Figura 155 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio mínimas y máximas para ambos municipios. Yautepec presenta temperaturas mínimas menores a los 10°C por lo que en invierno necesita de calefacción. Cuautla y Yautepec necesitan de enfriamiento artificial debido al comportamiento de sus temperaturas máximas. .

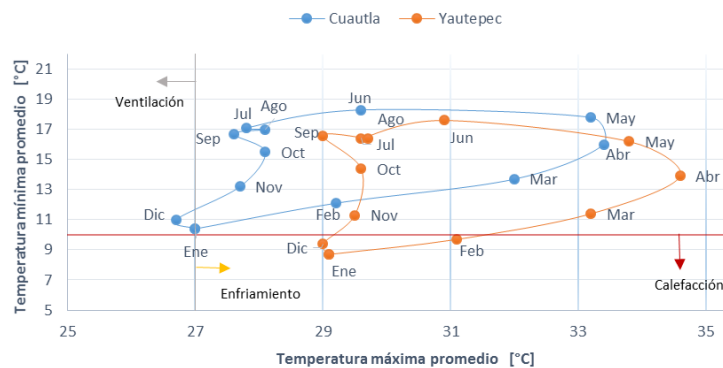


Figura 155. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Cuautla y Yautepec en el Estado de Morelos.

I.18 Nayarit

El 91.5% del estado presenta clima cálido subhúmedo (Aw), el 6% templado subhúmedo (Cw) presente en las Sierras, el 2% seco y semiseco (Bs) hacia el Sur y Sureste del estado y el restante 0.5% es cálido húmedo (Am).

El clima cálido favorece es cultivo de maíz, frijol, sorgo, tabaco, arroz, sandía, cacahuate, jitomate, Chile seco, la caña de azúcar, café, mango, plátano y aguacate.

El comportamiento de la temperatura a lo largo del año muestra un aumento considerable para cada estación. En enero, donde se presenta una de las menores temperaturas, basta

con tener ventilación natural para reducir la temperatura dentro del invernadero, sin embargo durante primavera y lo que resta del invierno se necesita de enfriamiento artificial dentro del invernadero y el resto del año, es decir, en el período de verano se tienen temperaturas excesivas. Se necesita considerar una estrategia que sumada al enfriamiento artificial permita reducir la temperatura dentro de los invernaderos o no cultivar en estas fechas (Figura 156).

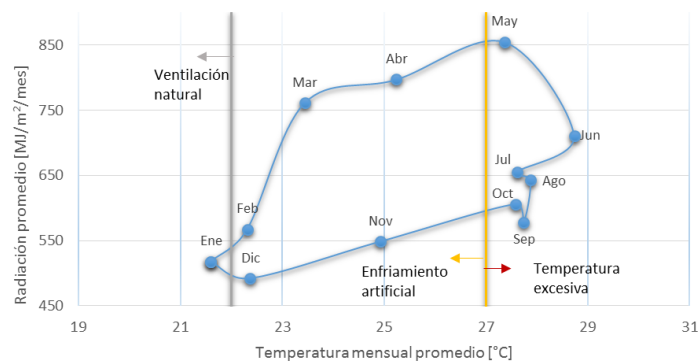


Figura 156. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Nayarit, México.

Las temperaturas máximas son menores a los 36°C pero superiores a los 30°C. Las temperaturas mínimas se encuentran por encima de los 13 °C para todo el año. El período de lluvias se presenta en verano, con un máximo de 370 mm en agosto. El resto del año las lluvias son escasas (Figura 157).

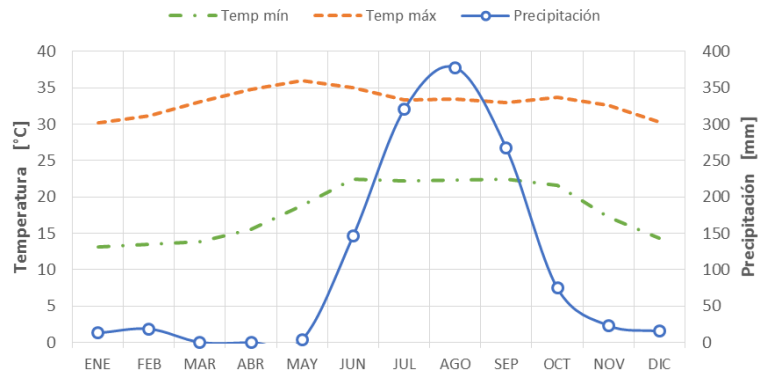


Figura 157. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nayarit.

Debido a las altas temperaturas del Estado se necesita considerar el enfriamiento artificial. Las temperaturas mínimas son superiores a los 10°C por lo que no se necesita de calefacción (Figura 158).

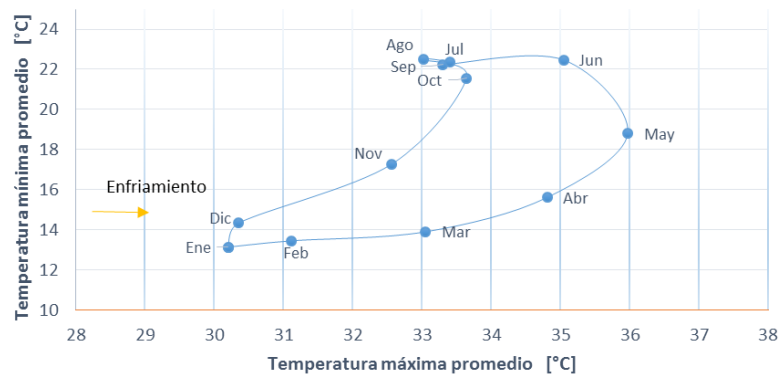


Figura 158. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nayarit.

Nayarit cuenta con 82 áreas de control y 87 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Santiago Ixcuintla y San Blas. El municipio de San Blas cuenta con invernaderos con cultivos alimenticios, no alimenticios y destinados a la floricultura mientras que Santiago Ixcuintla sólo con invernaderos con cultivos alimenticios y no alimenticios. Santiago Ixcuintla se ubica a una latitud de 21°43'00''N y longitud 105°08'00''O. San Blas se ubica a una latitud de 21°32'38''N y longitud 105°17'00''O. Las estaciones de donde se extrajeron datos meteorológicos son la número 18069 para Santiago Ixcuintla y la número 18029 para San Blas. Los datos de radiación para Santiago Ixcuintla se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.7166&lon=-105.1333&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación del municipio de San Blas se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.5438&lon=-105.2833&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 159 muestra la radiación y temperatura promedio para los municipios de Santiago Ixcuintla y San Blas. Ambos municipios presentan temperaturas y radiación promedio similares, La mitad del año se requiere de enfriamiento artificial para mantener

la temperatura interna debajo de los 27°C, sin embargo en verano las temperaturas son excesivas y se necesita considerar otras estrategias que junto con el enfriamiento artificial ayuden a reducir la temperatura. La radiación es superior a los 400 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial para ninguno de los dos municipios.

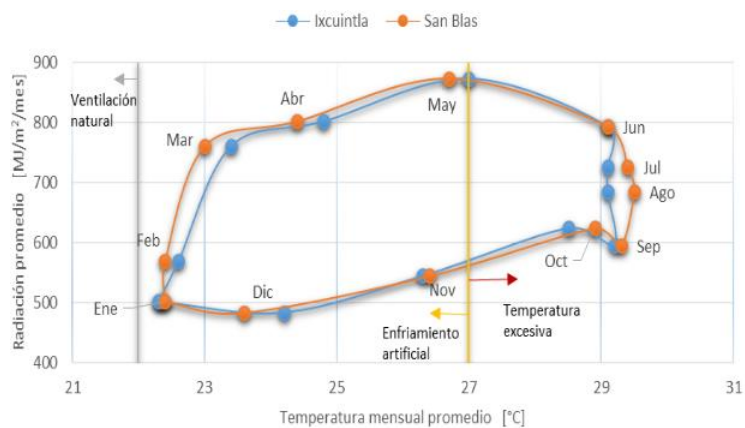


Figura 159. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Ixcuintla y San Blas, Nayarit.

El comportamiento de las temperaturas es similar para los dos municipios. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 29 a 36°C. Las temperaturas mínimas se encuentran entre los 15 a 25°C. La temporada de lluvias es la misma para ambos con la diferencia que Santiago Ixcuintla presenta mayor precipitación con un máximo de 450 mm en agosto. El máximo de precipitación para San Blas es de tan sólo 380 mm (Figura 160).

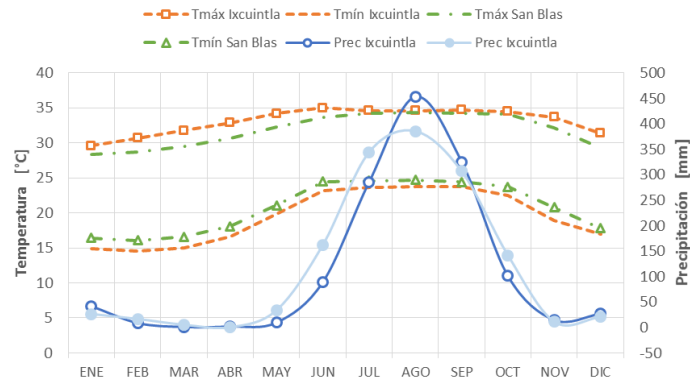


Figura 160. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Ixcuintla y San Blas, Nayarit.

Para ambos municipios, las temperaturas mínimas son superiores a los 12 °C por lo que no se necesita de calefacción pero las temperaturas máximas se encuentran por encima de los 27 °C y es necesario considerar el enfriamiento artificial (Figura 161).

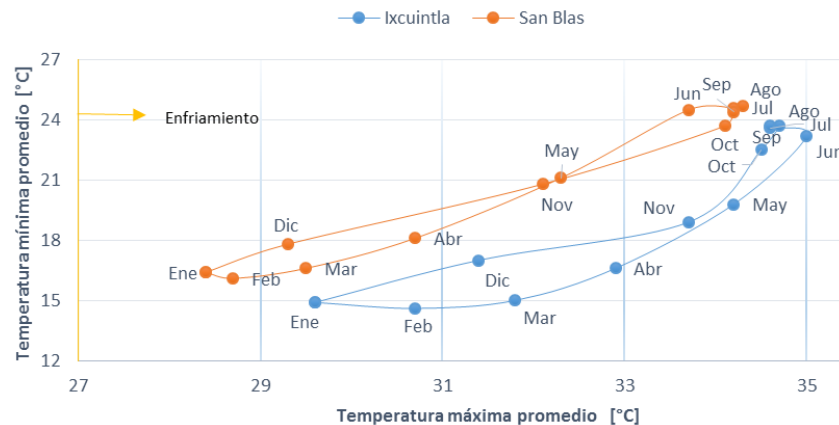


Figura 161. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Santiago Ixcuintla y San Blas en el Estado de Nayarit, México.

I.19 Nuevo León

El 68% del estado presenta clima seco y semiseco (Bs), el 20% cálido subhúmedo (Aw) se encuentra en la región perteneciente a la llanura costera del Golfo Norte, el 7% es templado subhúmedo (Cw) y se localiza en las partes altas de las Sierras y el restante 5% presenta clima muy seco (BW) hacia la Sierra Madre Occidental.

El clima seco y semiseco que predomina en el estado es una limitante para la agricultura, sin embargo se cultiva maíz, sorgo, trigo, frijol, avena y cebada principalmente con el riego.

Las temperaturas de Nuevo León son altas, es por ello que sólo la mitad del año se puede utilizar la ventilación natural para reducir la temperatura dentro del invernadero, el resto del año se necesita de enfriamiento artificial, especialmente en verano. La radiación no es tan elevada comparada con otros Estados de la República Mexicana con el mismo clima pero es lo suficiente como para no requerir de luz artificial (Figura 162).

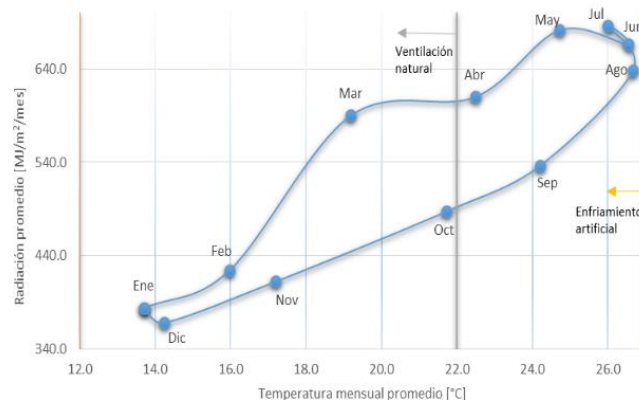


Figura 162. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Nuevo León.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 20 y 35°C, teniendo su máximo en verano. Las temperaturas mínimas se extienden desde los 5 a los 20°C. Las lluvias se presentan a lo largo del año, el mes más lluvioso es septiembre con 200 mm en promedio (Figura 163).

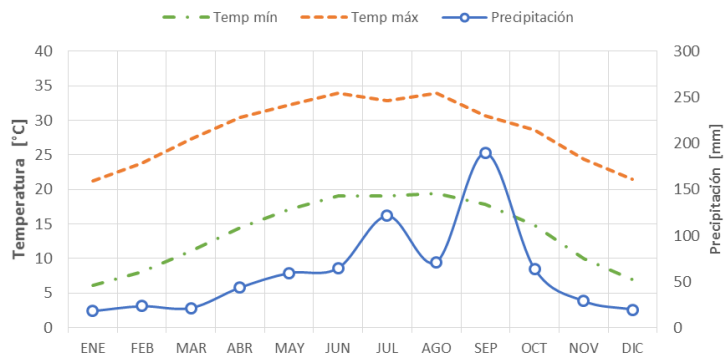


Figura 162. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nuevo León.

Las temperaturas mínimas en invierno se extienden por debajo de los 10°C lo que implica considerar calefacción para estos meses donde es propenso encontrar heladas. El comportamiento de las temperaturas máximas muestra dos regiones donde se puede usar ventilación y enfriamiento, el período de verano y otoño requiere enfriamiento por las altas temperaturas, el resto sólo de ventilación natural (Figura 163).

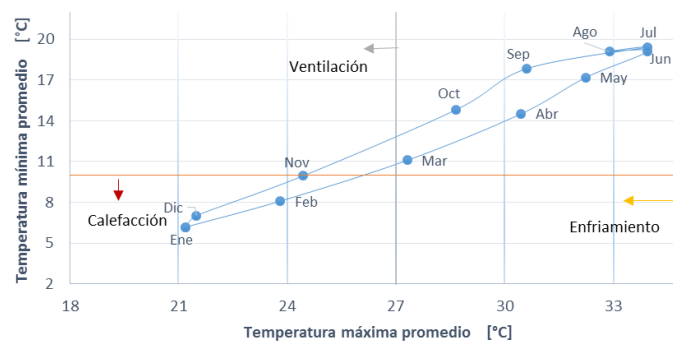


Figura 163. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Nuevo León.

Nuevo León cuenta con 73 áreas de control y 96 unidades de producción. Los dos municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Montemorelos y Galeana. El primero con invernaderos con cultivos alimenticios y no alimenticios e invernaderos destinados a la floricultura, el segundo sólo con invernaderos con cultivos alimenticios y no alimenticios. Montemorelos se ubica a una latitud de 25°09'06''N y longitud 099°55'36''O. Galeana se ubica a una latitud de 24°53'23''N y longitud 100°10'49''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 19189 para

Montemorelos y la número 19148 para Galeana. Los datos de radiación correspondientes a Montemorelos se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=25.1516&lon=-98.0733&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación para Galeana se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=24.8879&lon=-100.1802&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

El municipio de Galeana requiere de calefacción para el invierno pues la temperatura promedio es menor a 10°C, para el resto del año basta con ventilación natural para enfriar el invernadero. El municipio de Montemorelos requiere de ventilación natural para invierno y otoño pero en verano y primavera las temperaturas son elevadas por lo que se necesita de un sistema de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro del invernadero (Figura 164).

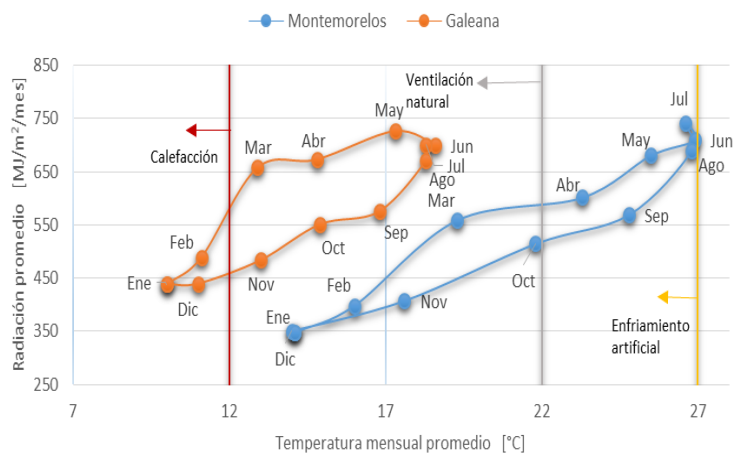


Figura 164. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Montemorelos y Galeana, Nuevo León.

La Figura 165 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para ambos municipios. Se nota una clara diferencia entre sus temperaturas máximas y mínimas lo que corrobora lo mostrado en la Figura anterior. Montemorelos presenta mayores temperaturas comparadas con las de Galeana. Para Montemorelos las temperaturas máximas se encuentran entre los 20 a 35°C y las temperaturas mínimas entre los 6 a 20°C. Para Galeana las temperaturas máximas se encuentran entre los 16 a 26°C y las temperaturas mínimas entre los 2 a 10°C. Galeana presenta lluvias la mayor parte del año excepto durante el invierno y con precipitaciones menores a los 100 mm. Montemorelos, por otro lado, presenta precipitaciones todo el año con un máximo de 310 mm en septiembre, el resto del año sólo presenta lluvias por debajo de los 130 mm.

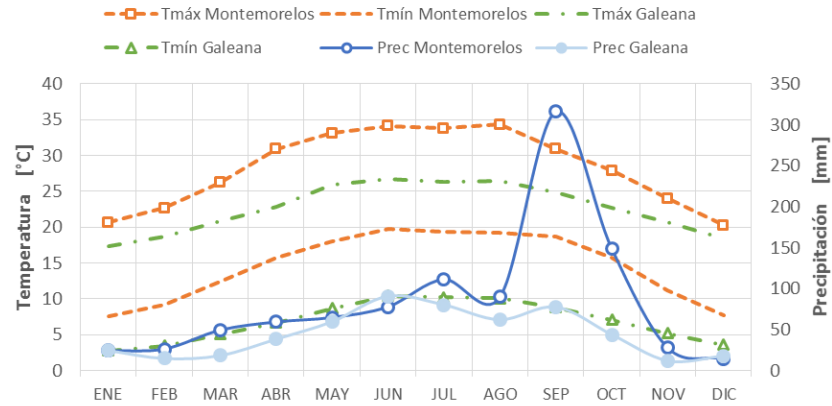


Figura 165. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Montemorelos y Galeana, Nuevo León.

Ambos municipios difieren en el comportamiento de sus temperaturas. Montemorelos requiere de calefacción sólo durante el invierno, la mitad del año, sobre todo en verano, necesita de enfriamiento artificial para reducir la temperatura. Por otro lado, Galeana requiere considerar calefacción para todo el año y se puede reducir la temperatura con ventilación natural (Figura 166).

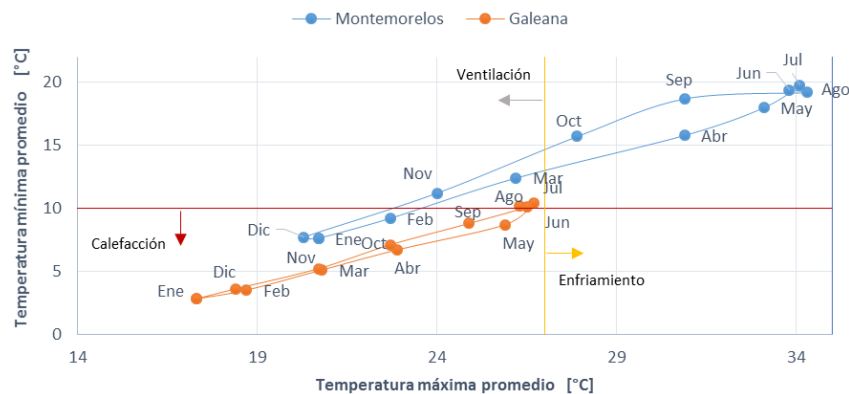


Figura 166. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Montemorelos (azul) y Galeana (anaranjado) en el Estado de Nuevo León, México.

I.20 Oaxaca

El 47% de la superficie del estado presenta clima cálido subhúmedo (Aw) que se localiza en toda la zona costera y hacia el Este, el 22% presenta clima cálido húmedo (Am) localizado principalmente en la región Norte, el 16% presenta clima templado húmedo (Cm) en las partes altas orientales de los cerros Volcán Prieto y Humo Grande, el 11% presenta clima seco y semiseco (Bs) en la región Centro Sur y Noroeste, el restante 4% presenta clima templado subhúmedo (Cw) hacia el Sur y Noroeste del estado en las zonas con altitudes entre 2000 y 3000 metros.

En la zona de la costa, donde se presenta clima cálido húmedo (Am) favorece el cultivo de frutas tales como: limón, mango, tamarindo, plátano, coco, naranja, papaya, piña, sandía y melón. En los municipios de Pluma Hidalgo, Candelaria, Lérica, Santa María

Huatulco, San Miguel del Puerto, San Mateo Piñas, Pochita y Canica se cultiva el café “pluma”, que es una de las variedades de café más apreciadas a nivel internacional.

Debido a la gran presencia de climas dentro del Estado se observa una distribución amplia a largo de las temperaturas requiriendo durante invierno calefacción, para el resto del año, excepto en mayo, enfriamiento artificial y en mayo se tienen temperaturas excesivas por lo que se necesita de estrategias que junto con el enfriamiento artificial permitan reducir la temperatura dentro de los invernaderos. La radiación es superior a los 450 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial para ningún mes del año (Figura 167).

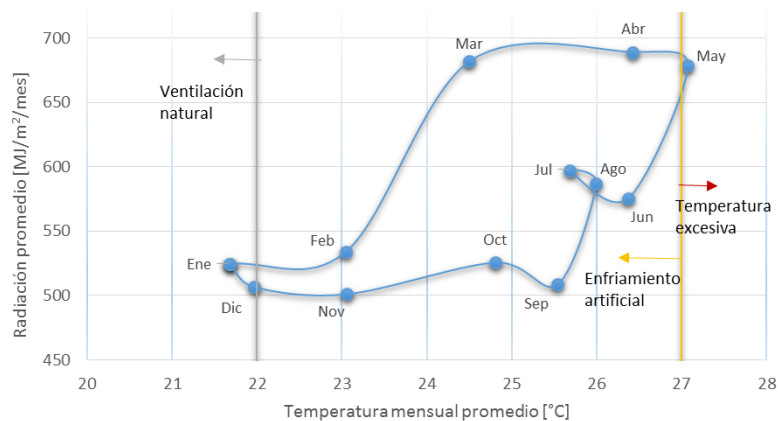


Figura 167. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Oaxaca.

La Figura 168 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para el Estado de Oaxaca. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 29 a 34°C, mientras que las

temperaturas mínimas se encuentran entre los 15 a 20°C. La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas es de aproximadamente 10°C, lo que demuestra las altas temperaturas en promedio del Estado. La temporada de lluvias comienza en mayo y termina en octubre con un máximo de 300 mm en agosto.

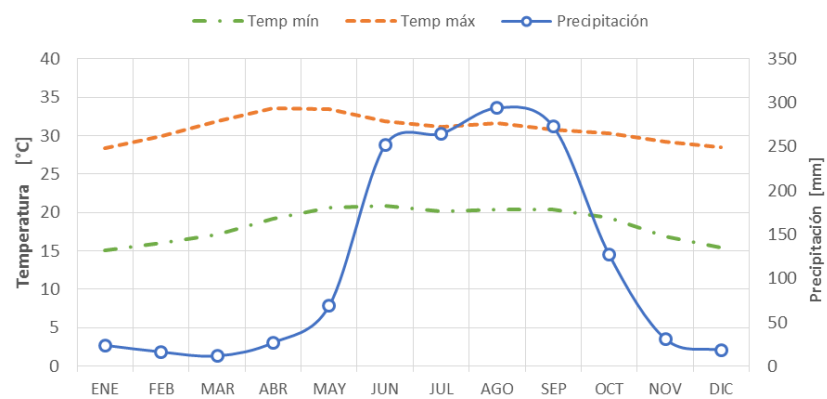


Figura 167. Precipitación mensual temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Oaxaca.

La Figura 168 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio mínimas y máximas para el Estado de Oaxaca. Debido a las altas temperaturas no se requiere de calefacción y para reducir la temperatura dentro del invernadero es necesario considerar enfriamiento artificial.

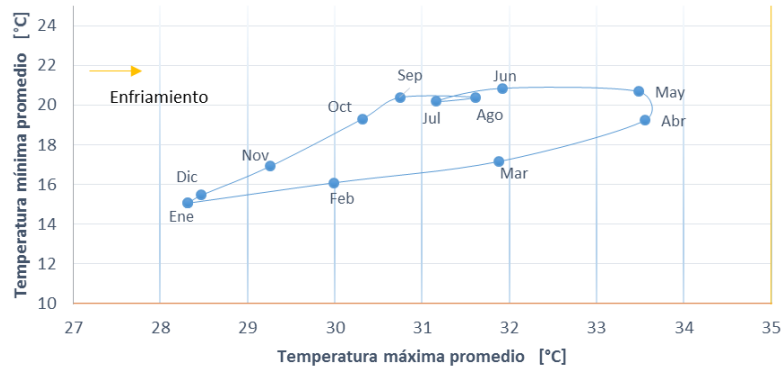


Figura 168. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Oaxaca.

Oaxaca cuenta con 122 áreas de control y 160 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Tlacolula y Río Hondo. El municipio de Tlacolula se ubica a una latitud de 16°57'00''N y longitud 096°28'59''O, el municipio de Río Hondo se encuentra a una latitud de 16°28'31''N y longitud 095°16'53''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 20165 para Tlacolula y 20277 para Río Hondo. Los datos de radiación correspondientes a Tlacolula se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=16.95&lon=-95.5169&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Río Hondo se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=16.4752&lon=-95.2813&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Río Hondo tiene temperaturas más altas comparadas con las de Tlacolula, esto propicia que Río Hondo requiera de enfriamiento artificial para la mitad del año y el resto se encuentre con temperaturas excesivas donde se necesita establecer estrategias que ayuden a reducir la temperatura dentro del invernadero u optar por no cultivar en este período. Por otro lado, Tlacolula tiene temperaturas menores a los 22 °C por lo que basta con tener ventilación natural para mantener una temperatura por debajo de los 22°C dentro de los invernaderos (Figura 169).

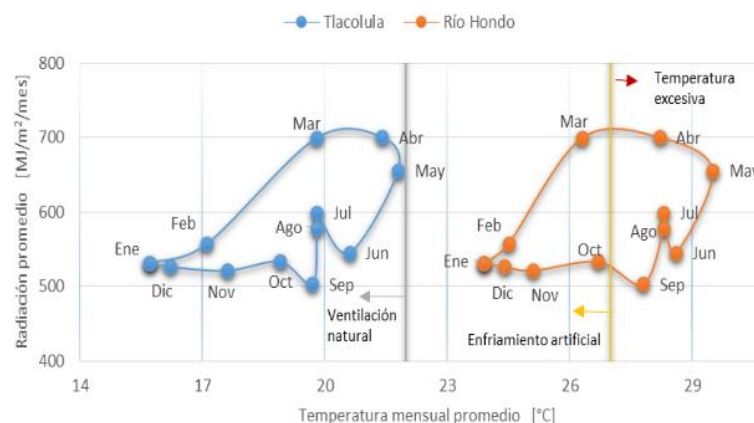


Figura 169. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Tlacolula y Río Hondo, Oaxaca.

La Figura 170 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para ambos municipios. El municipio de Río Hondo claramente presenta mayores temperaturas comparadas con Tlacolula, sus temperaturas máximas se encuentran entre los 31 a 36°C y las temperaturas mínimas entre los 15 a 24°C. Tlacolula, por otro lado, presenta temperaturas máximas entre los 25 y 31°C y temperaturas mínimas entre los 5 y 15°C. La temporada de lluvias es la misma para ambos municipios, Río Hondo tiene mayor precipitación con hasta 150 mm durante el verano y Tlacolula con 120 mm o menos también en verano.

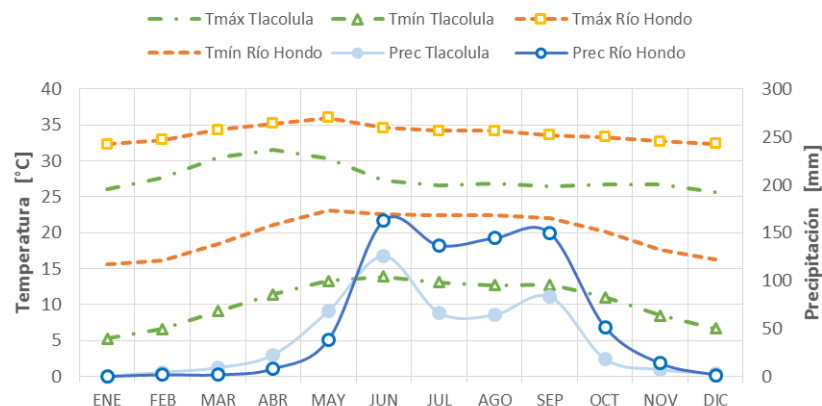


Figura 170. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Tlacolula y Río Hondo, Oaxaca.

La Figura 171 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para los municipios de Tlacolula y Río Hondo. Las temperaturas mínimas en Tlacolula están por debajo de 10°C durante invierno por lo que

es necesario pensar en calefacción para aumentar las temperaturas, el resto del año se puede usar ventilación natural y en verano de enfriamiento artificial. El caso de Río Hondo es completamente distinto, debido a sus altas temperaturas se necesita de enfriamiento artificial para todo el año.

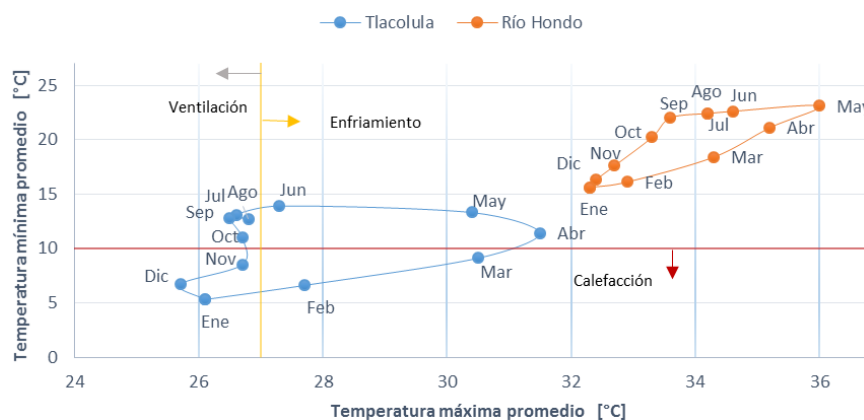


Figura 171. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Tlacolula y Río Hondo, Oaxaca.

I.21 Puebla

El 35 % de la superficie del estado presenta clima templado subhúmedo (Cw) presenta en la región central y sureste, el 25 % presenta clima cálido subhúmedo (Aw) en la parte norte y sureste, el 19 % presenta clima seco y semiseco (Bs) hacia el sur y centro oeste, el 14 % presenta clima cálido húmedo (Am) localizado en el norte y sureste, el 7 % presenta clima templado húmedo (Cm) en la región norte y una pequeña área hacia el sureste, también encontramos un pequeño porcentaje (0.2 %) de clima frío (EH) en la cumbre de los volcanes.

Las áreas agrícolas en la entidad se encuentran principalmente en las regiones con clima templado subhúmedo, el maíz aún es el cultivo principal; también se produce cacahuete, papa, ajo y frijol, entre otros. Las frutas son: manzana, perón, aguacate, café y naranja.

Dado que las temperaturas se encuentran entre los 12 a 22°C, sólo se necesita de ventilación natural para mantener una temperatura óptima para los cultivos dentro del invernadero. No se requiere de calefacción ni de luz artificial para ningún mes del año (Figura 172).

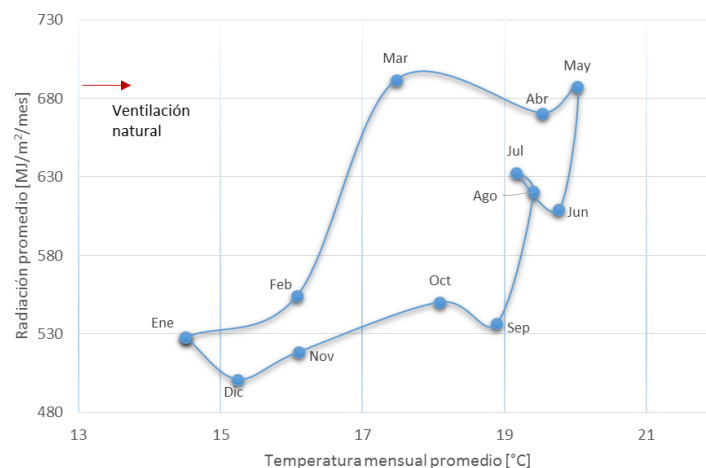


Figura 172. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Puebla.

La Figura 173 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para el Estado de Puebla. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 21 a 30 °C y las temperaturas

mínimas entre los 5 a 15°C. La temporada de lluvias se presenta en verano y parte de otoño con un máximo de 250 mm en septiembre. A pesar de que en es bastante la cantidad de agua que se precipita en la temporada de lluvias no se ve una reducción en las temperaturas del aire.

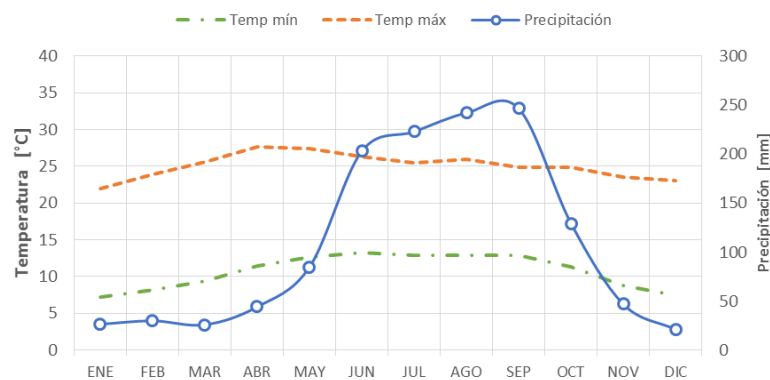


Figura 173. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Puebla.

Las temperaturas mínimas están por debajo de los 10°C por lo que se debe contemplar calefacción para el invierno. Por otra parte, las temperaturas máximas son mayores a los 27°C para los meses de octubre y septiembre y en este caso se necesita de enfriamiento. El resto del año basta con ventilación natural (Figura 174).

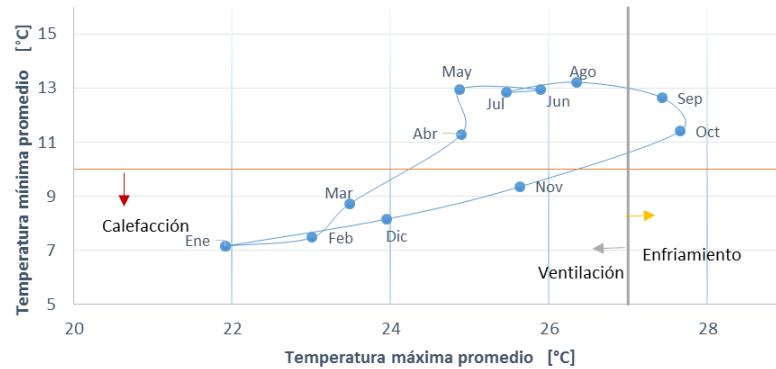


Figura 174. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Puebla.

Puebla cuenta con 294 áreas de control y 385 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Atlixco y Tetela de Ocampo, el primero se ubica a una latitud de 18°55'18''N y longitud 098°27'15''O. El segundo en una latitud de 19°47'30''N y longitud 097°45'40''O. Las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos son la número 21012 para Atlixco y la número 21021 para el caso de Tetela de Ocampo. Los datos de radiación para Atlixco se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=18.9216&lon=-97.5458&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de Tetela de Ocampo se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.7916&lon=-96.2388&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 175 muestra la radiación y temperatura para los municipios de Atlixco y Tetela de Ocampo. Tetela de Ocampo presenta menores temperaturas comparadas con las de Atlixco, en invierno, las temperaturas son menores a los 10°C requiriendo de calefacción para elevar la temperatura, el resto del año se puede mantener una temperatura por debajo de los 22°C con ventilación natural. Atlixco tiene temperaturas entre los 15 y 22°C por lo que necesita de un sistema de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro del invernadero.

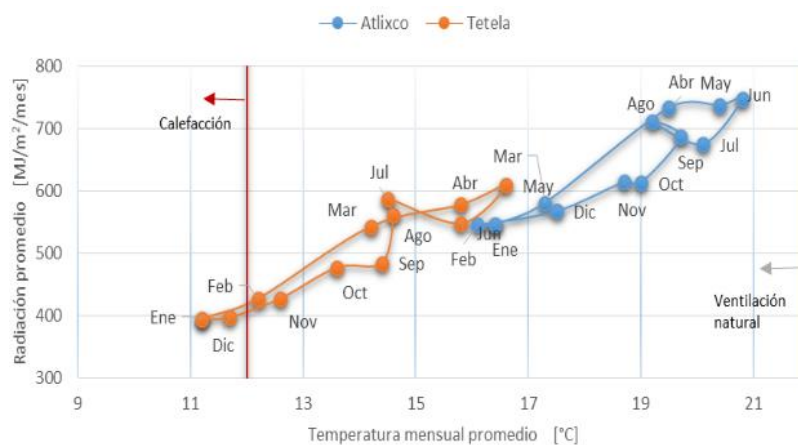


Figura 175. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Atlixco y Tetela, Puebla.

Las temperaturas son diferentes para ambos municipios, Atlixco es el que presenta mayores temperaturas. Las temperaturas máximas de Atlixco se encuentran entre los 25 a 30°C y las temperaturas mínimas entre los 7 a 15°C. Para el municipio de Tetela de Ocampo las temperaturas máximas se encuentran entre los 16 a 25°C y las temperaturas mínimas se encuentran entre los 4 a 11°C. La temporada de lluvias es similar para ambos municipios sin embargo Tetela de Ocampo tiene mayores precipitaciones con un máximo de 230 mm en septiembre mientras que Atlixco sólo llega a una precipitación máxima de 190 mm (Figura 176).

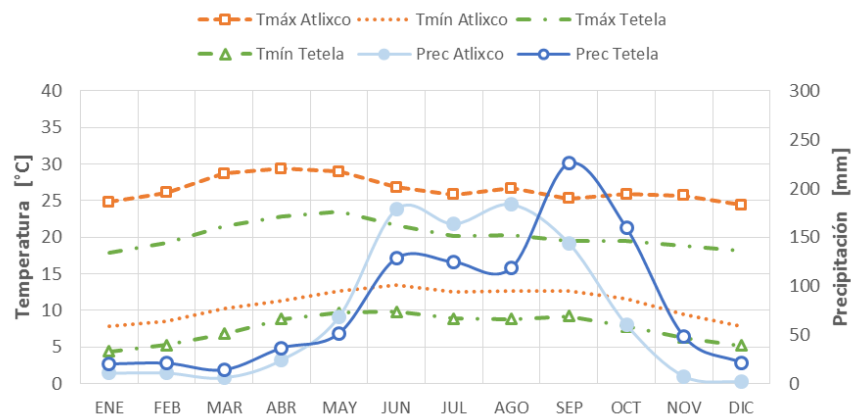


Figura 176. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Atlixco y Tetela, Puebla.

La Figura 177 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para ambos municipios. Tetela de Ocampo requiere de calefacción y ventilación natural, mientras que Atlixco necesita además de considerar

ventilación natural requiere de enfriamiento artificial. Solo durante los meses de invierno, Atlixco requiere de calefacción.

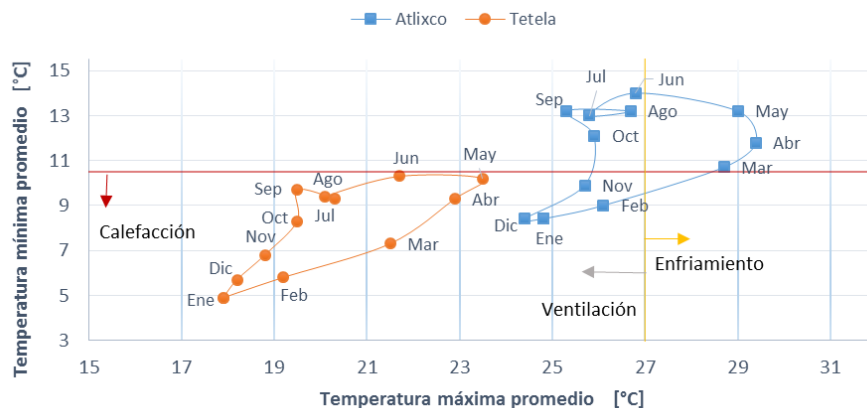


Figura 177. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Atlixco y Tetela, Puebla.

I.22 Querétaro

El 51% de la superficie del estado presenta clima seco y semiseco (Bs) localizado en la región Centro; el 24.3% presenta clima cálido subhúmedo (Aw) en la región de la Sierra Madre Oriental; el 23% presenta clima templado subhúmedo (Cw) localizado en la región Sur, Centro y Noreste; el 1 % presenta clima cálido húmedo (am) hacia el Noreste y el restante 0.7% presenta clima templado húmedo (Cm) al Noreste del estado.

La agricultura es de gran importancia para el estado, en donde sobresale el cultivo de maíz, alfalfa, cebolla, lechuga, sorgo y forrajes, frijol, cebada y col, entre otros.

Las temperaturas para Querétaro se encuentran entre los 14 a 22°C excepto en mayo donde sobrepasan los 22°C. Dadas estas temperaturas casi todo el año basta con tener ventilación natural para mantener las temperaturas dentro del invernadero. En el caso de mayo se requiere de enfriamiento artificial (Figura 178).

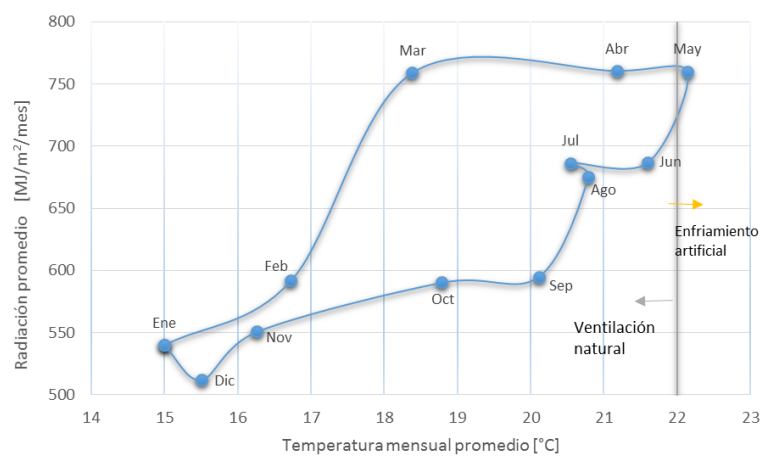


Figura 178. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Querétaro.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 23 a 30°C y las temperaturas mínimas se encuentran entre los 5 a 15°C. La temporada de lluvias se presenta en verano y parte de otoño. La mayor cantidad de precipitación se da en julio con 140 mm. El resto del año las lluvias son escasas (Figura 179).

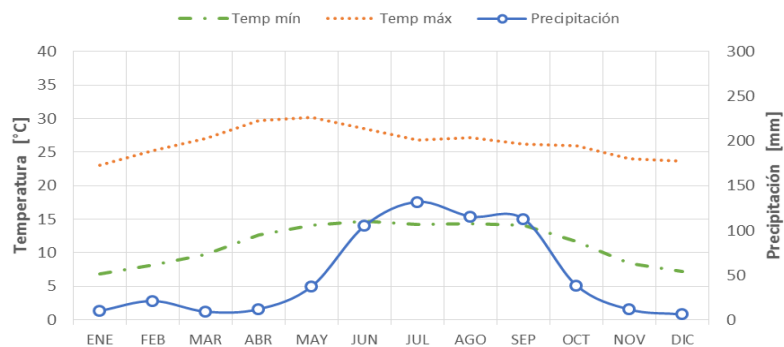


Figura 179. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Querétaro.

La Figura 180 muestra las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para el Estado de Querétaro. El Estado requiere de calefacción, ventilación natural y enfriamiento artificial debido al comportamiento de sus temperaturas a lo largo del año. El período de invierno las temperaturas mínimas son menores a los 10°C, en otoño las temperaturas son menores a los 27°C y en verano las temperaturas son mayores a 22°C.

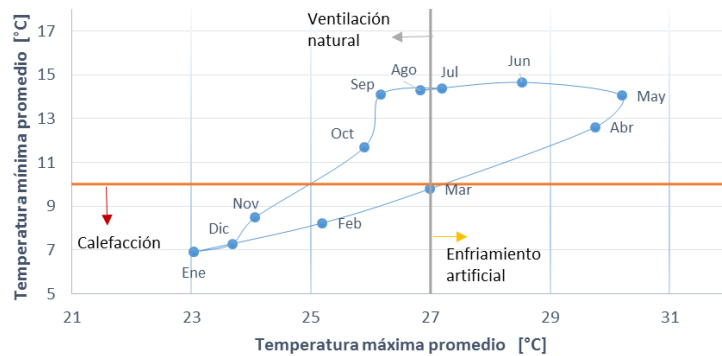


Figura 180. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Querétaro.

Querétaro cuenta con 12 áreas de control y 18 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Amealco y San Juan del Río, sin embargo, para el estudio también se consideró el municipio de Colón ya que es ahí donde se encuentra el Agroparque. El municipio de Amealco se ubica en la latitud $20^{\circ}11'05''N$ y longitud $100^{\circ}08'44''O$, el municipio de San Juan del Río se ubica en la latitud $20^{\circ}22'27''N$ y longitud $099^{\circ}59'54''O$, por último, Colón se ubica en la latitud $20^{\circ}47'08''N$ y longitud $100^{\circ}02'43''O$. Las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos fueron la número 22001 para Amealco, la número 22022 para San Juan del Río y la número 22026 para Colón. Los datos de radiación para Amealco se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.1847&lon=-100.1455&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de San Juan del Río se encuentran en la página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.3741&lon=-98.0016&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Por último, los datos de radiación para Colón se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.7855&lon=-100.0452&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 181 muestra la radiación y temperatura promedio para los tres municipios. Amealco presenta menores temperaturas, San Juan del Río y Colón tienen temperaturas similares sin embargo Colón presenta mayor incidencia de radiación. En general, los tres municipios pueden mantener las temperaturas dentro del invernadero por debajo de los 22°C con ventilación natural.

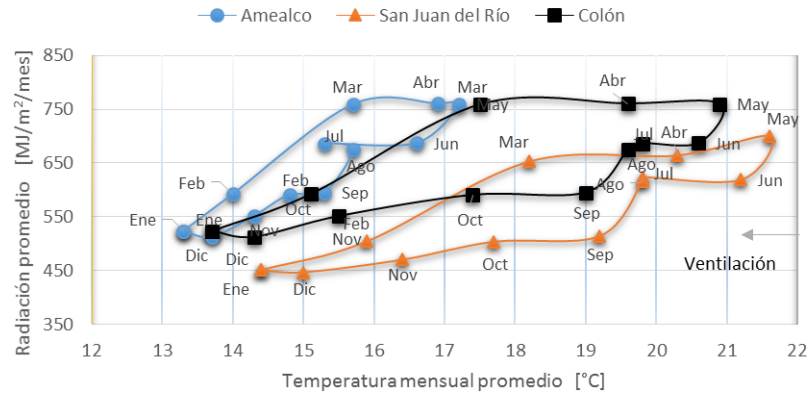


Figura 181. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Amealco, San Juan del Río y Colón, Querétaro.

La temporada de lluvias es la misma para los tres municipios pero es Amealco quien presenta mayor precipitación llegando hasta los 210 mm en julio, los otros dos municipios sólo tienen precipitaciones menores a los 100 mm. Las temperaturas de San Juan del Río y Colón son similares y se encuentran entre los 24 a 30°C en las temperaturas máximas y entre los 4 a 15°C en las temperaturas mínimas. Amealco tiene menores temperaturas estando alrededor de los 20 a 26°C en las temperaturas máximas y entre los 5 a 10°C en las temperaturas mínimas (Figura 182).

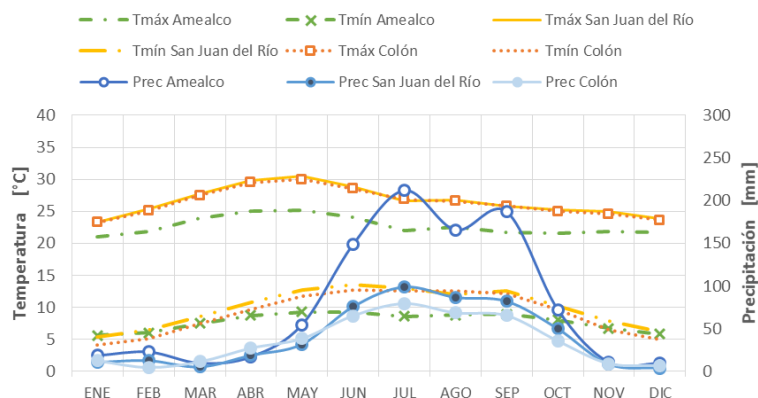


Figura 182. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Amealco, Colón y San Juan del Río.

La Figura 183 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio para los tres municipios. Amealco es el único municipio que presenta temperaturas mínimas por debajo de los 10°C por lo que se necesita considerar la calefacción para los invernaderos y sus temperaturas máximas se encuentran por debajo de los 27°C lo que significa que es suficiente con tener ventilación natural para enfriar los invernaderos. San Juan del Río y Colón ambos presentan temperaturas menores a los 10°C en invierno por lo que se considera la calefacción para esta temporada, en verano las temperaturas máximas sobrepasan los 27°C por lo que los invernaderos necesitan de enfriamiento artificial y en otoño basta con la ventilación natural para reducir la temperatura.

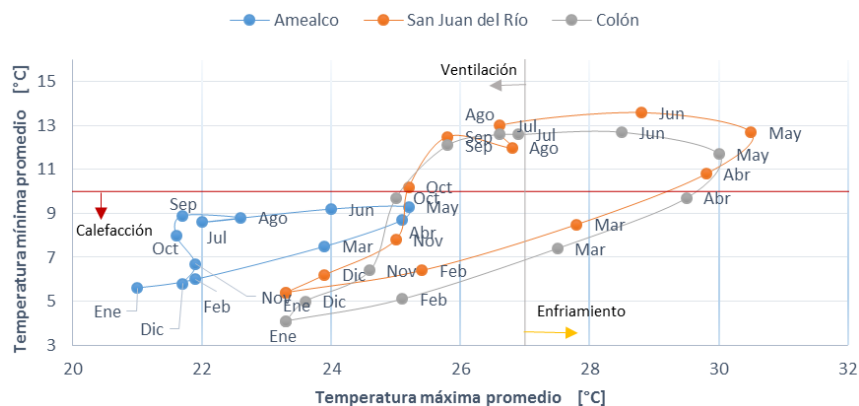


Figura 183. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Amealco, San Juan del Río y Colón en el Estado de Querétaro.

I.23 Quintana Roo

El 99% de la superficie del estado presenta clima cálido subhúmedo (Aw) y el 1% cálido húmedo (Am), localizado en la isla de Cozumel.

El clima cálido subhúmedo favorece el cultivo de caña de azúcar, chile, jalapeño, maíz, arroz, hortalizas y frutales como chicozapote, naranja, toronja, papaya, limón agrio, mango y piña entre otras.

Las temperaturas del Estado son elevadas y van de los 23 a los 29°C a lo largo del año. La mitad del año, considerando el invierno parte de otoño, para poder reducir las temperaturas dentro de los invernaderos es necesario un sistema de enfriamiento artificial; sin embargo, el resto del año las temperaturas son excesivas y se necesita de estrategias

que junto con el enfriamiento artificial ayuden a reducir las temperaturas o no cultivar en esta época debido a las altas temperaturas (Figura 184).

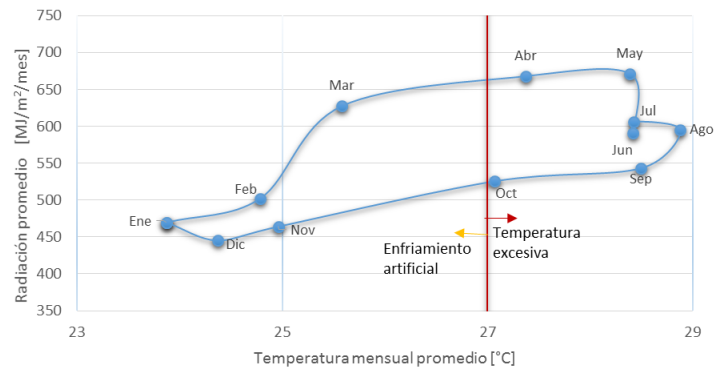


Figura 184. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Quintana Roo, México.

Las temperaturas máximas se encuentran entre 29 y 35°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre 19 y 25°C. La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas es de tan solo 10°C. Las lluvias se extienden por todo el año, teniendo precipitaciones superiores a los 130 mm a partir de junio y con un máximo de 260 mm en septiembre (Figura 185).

La Figura 186 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio mínimas y máximas para el Estado de Quintana Roo. Debido a las altas temperaturas del Estado es que la única acción que se presenta para Quintana Roo es la de enfriamiento artificial.

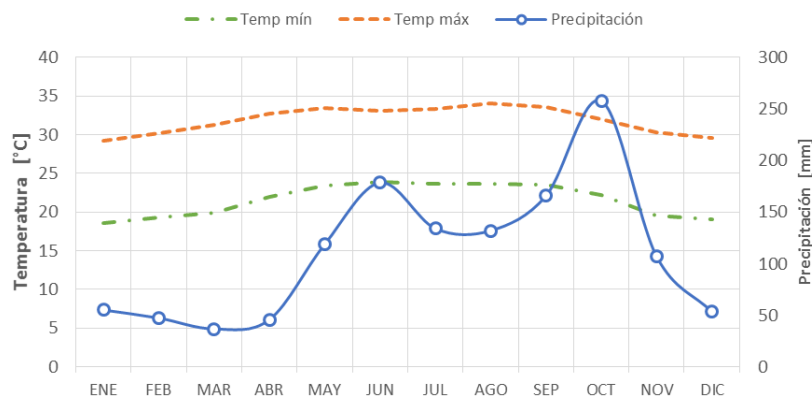


Figura 185. Precipitación mensual promedio, Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Quintana Roo.

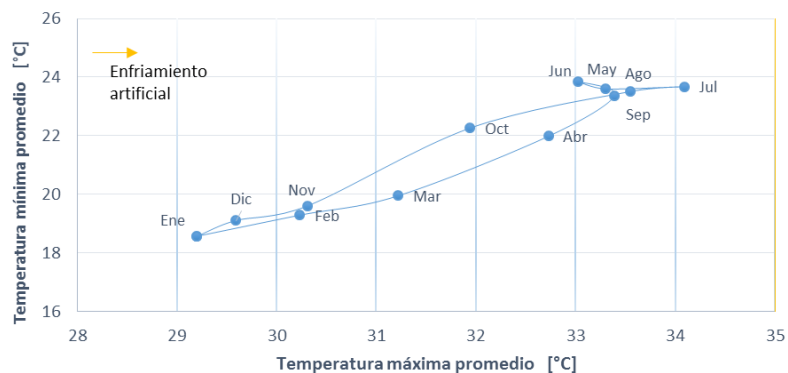


Figura 186. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Quintana Roo.

Quintana Roo cuenta con 8 áreas de control y 9 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Felipe Carrillo Puerto, ubicado a una latitud de 19°34'32''N y longitud 088°02'42''O y Lázaro Cárdenas ubicado a una latitud de 21°20'45''N y longitud 087°25'49''O. Las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos son la número 23003 para Felipe Carrillo Puerto y la número 23023 para

Lázaro Cárdenas. Los datos de radiación del municipio de Felipe Carrillo Puerto se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.5755&lon=-87.955&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Lázaro Cárdenas se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.3458&lon=-86.5697&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

El municipio de Lázaro Cárdenas tiene una amplia distribución de temperaturas por lo que en invierno basta con tener ventilación natural, durante el verano se tienen temperaturas excesivas y el resto del año se puede cultivar con enfriamiento artificial. Por otra parte, el municipio de Felipe Carrillo Puerto tiene durante invierno y finales de otoño una temperatura entre los 22 a 27°C lo que indica la necesidad de contar con enfriamiento artificial en los invernaderos, el resto del año, especialmente en verano, las temperaturas sobre pasan los 27°C y se consideran temperaturas excesivas para cultivar dentro de un invernadero (Figura 187).

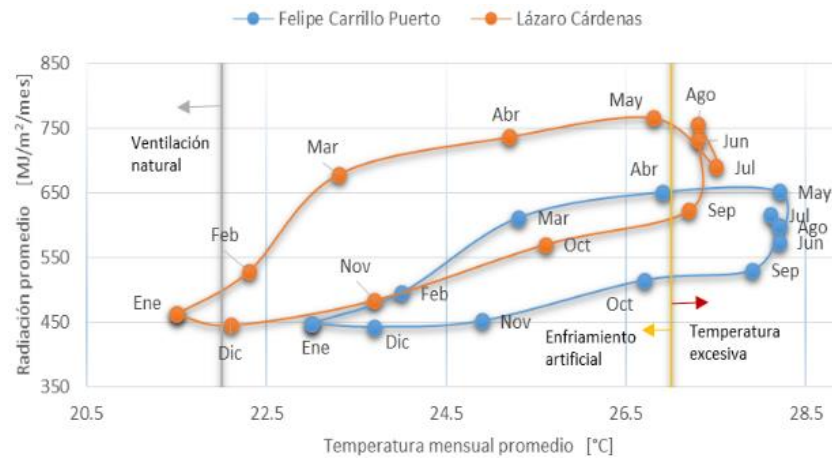


Figura 187. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas, Quintana Roo.

Los dos municipios tienen similares temperaturas máximas sin embargo Felipe Carrillo Puerto presenta mayores temperaturas mínimas. La temporada de lluvias es la misma para ambos y se extiende de mayo a noviembre aunque llueve todo el año. Las temperaturas mínimas son superiores a los 14°C y las temperaturas máximas son menores a los 35°C (Figura 188).

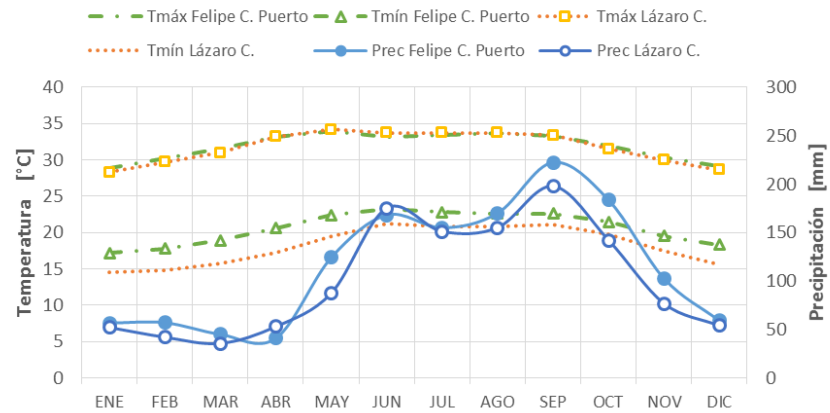


Figura 188. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas para los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas, Quintana Roo.

La Figura 189 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para ambos municipios. Para ambos municipios el comportamiento de sus temperaturas máximas es similar pero no así el de las temperaturas mínimas, como se corrobora con la Figura anterior. Dadas las temperaturas máximas ambos requieren de enfriamiento artificial si se piensa cultivar en invernadero.

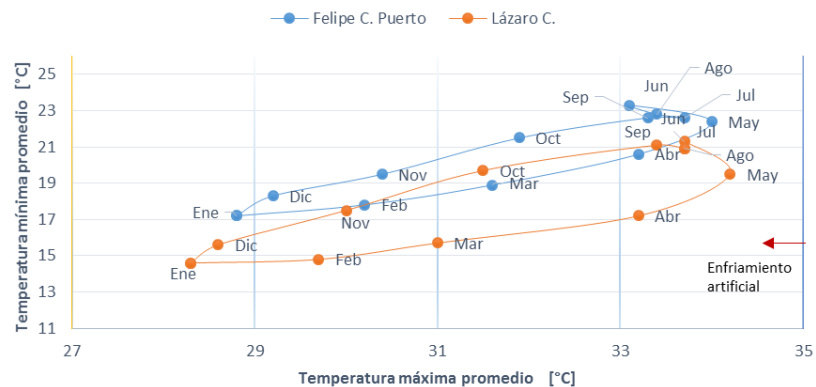


Figura 189. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas en el Estado de Quintana Roo.

I.24 San Luis Potosí

El clima que predomina es el seco y semiseco (Bs) ya que se presenta en el 71% del estado localizado en la región conocida como el Salado, el 15% está representado por el clima cálido subhúmedo (Aw), localizado en la parte Este de la Sierra Madre Oriental, el 10% está representado por clima cálido húmedo (Am), el 2.4% es clima muy seco (BW), el 1.5% es templado subhúmedo (Cw) y se localiza en las llanuras, el 0.1% es templado húmedo (Cm).

Los cultivos principales son maíz, cártamo, frijol, cebada, caña de azúcar, naranja, café, limón agrio, tuna y mango.

Debido a las altas temperaturas del Estado, la mitad del año, especialmente la correspondiente a invierno, se puede mantener una temperatura por debajo de los 25 °C

con ventilación natural, el resto del año se requiere de un sistema de enfriamiento artificial para lograr reducir la temperatura dentro del invernadero (Figura 190).

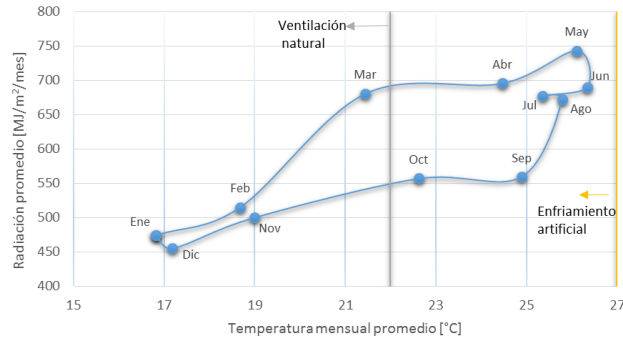


Figura 190. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de San Luis Potosí.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 24 y 35°C. Las temperaturas mínimas se encuentran entre los 10 a 20°C. La temporada de lluvias se presenta en verano y parte de otoño, con un máximo de 220 mm en julio. El resto del año las precipitaciones son menores a los 50 mm (Figura 191).

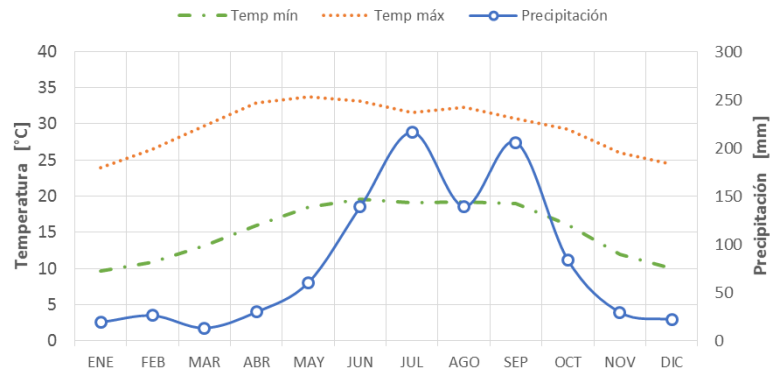


Figura 191. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de San Luis Potosí.

La Figura 192 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para el Estado de San Luis Potosí. Durante el invierno hay dos acciones de control a tomar en cuenta, por una parte las temperaturas mínimas llegan a estar por debajo de los 10°C lo que se traduce en calefacción durante este tiempo y las temperaturas máximas están por debajo de los 27°C por lo que basta con ventilación natural para mantener la temperatura dentro del invernadero. Sin embargo, el resto del año las temperaturas son elevadas concluyendo que se requiere de enfriamiento artificial.

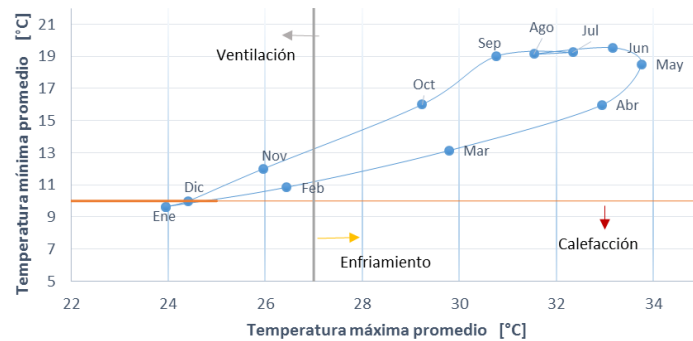


Figura 192. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de San Luis Potosí.

San Luis Potosí cuenta con 32 áreas de control y 35 unidades de producción. El municipio que presenta mayor cantidad de unidades de producción es Río verde con invernaderos destinados a cultivos no alimenticios y floricultura. La ubicación de Río verde es latitud 21°55'17''N y longitud 099°59'47''O. La estación de la que se obtuvieron datos meteorológicos del municipio es la número 24062. Los datos de radiación se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.9213&lon=-98.0036&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Las temperaturas promedio del municipio se encuentran entre los 12 y 22°C por lo que sólo se requiere de ventilación natural para mantener la temperatura dentro de los

invernaderos. La radiación es superior a los 350 MJ/m²/mes por lo que no se requiere de luz artificial en ningún mes del año (Figura 193).

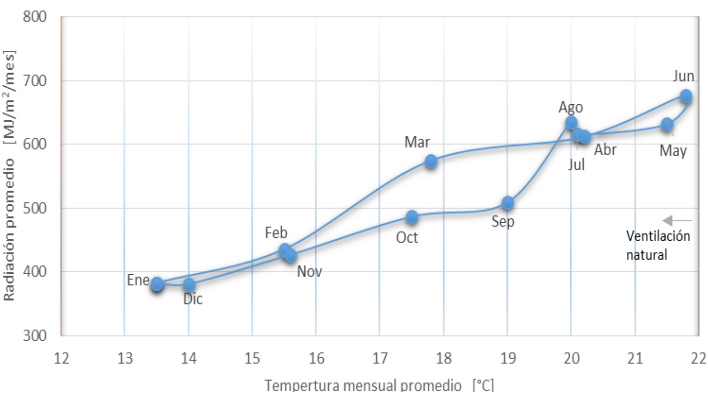


Figura 193. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el municipio de Río verde, SLP.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 21 y 31°C, siendo máxima en mayo. Las temperaturas mínimas se encuentran entre los 5 y 25°C. La temporada de lluvias se da en verano y parte de otoño con precipitaciones menores a los 60 mm (Figura 194).

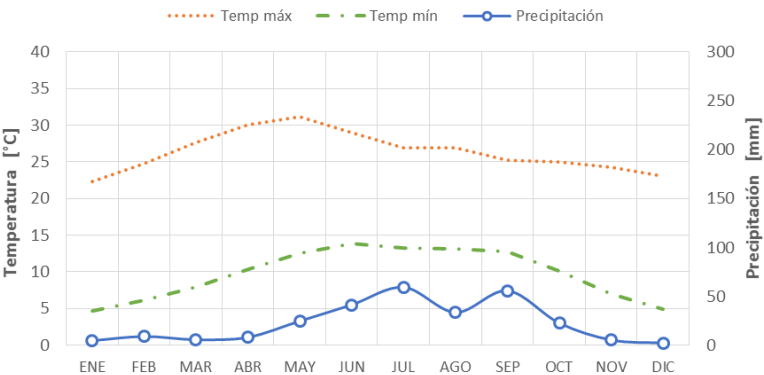


Figura 194. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el municipio de Río verde, SLP.

Las temperaturas mínimas de invierno son menores a los 10°C por lo que se necesita considerar la calefacción para estos meses. Las temperaturas máximas se encuentran, la mitad del año, bajo 27°C y basta con la ventilación natural, el resto del año las temperaturas son superiores a los 27°C por tanto se necesita el enfriamiento artificial (Figura 195).

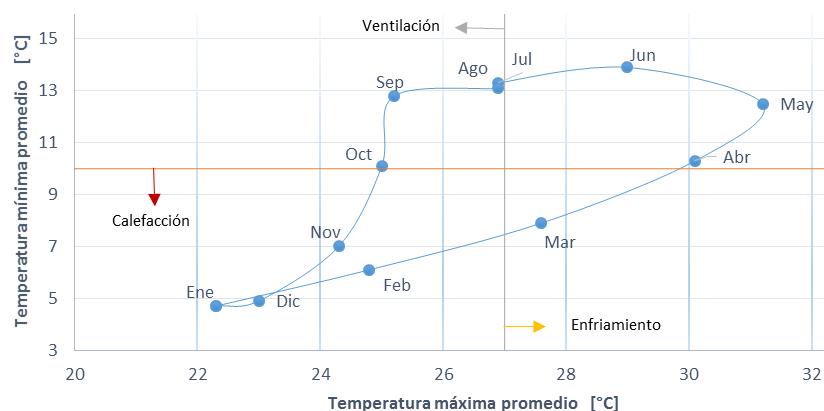


Figura 195. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el municipio de Río verde, SLP.

I.25 Sinaloa

El 48% del estado presenta un clima cálido subhúmedo (Aw) localizado en una franja Noreste-Sureste que abarca desde Choix hasta los límites con Nayarit. El 40% es clima seco y semiseco (Bs), el 10% es muy seco (BW) y se localiza en la zona de los Mochis, el restante 2% es clima templado subhúmedo (Cw).

Sinaloa es muy importante como productor agrícola nacional, las principales áreas de cultivo se encuentran en los climas secos y semisecos por lo que requiere riego siendo los principales cultivos maíz, frijol, papa, cártamo, soya, algodón, sorgo, garbanzo y cártamo entre otros. En la región se presenta clima cálido subhúmedo donde se cultiva jitomate, sandía, melón y hortalizas.

Las temperaturas se extienden de los 18 a 30°C, típico de un clima seco. En el período de invierno, que es donde se presentan menores temperaturas, basta con tener ventilación natural para mantener bajo los 25°C dentro de los invernaderos. Los meses de abril, mayo, octubre y noviembre requieren de enfriamiento artificial para poder reducir la temperatura interna del invernadero y el resto del año, en concreto durante el verano, las temperaturas son excesivas, se necesita de estrategias que junto con el enfriamiento artificial ayuden a reducir la temperatura o no cultivar en esta temporada (Figura 196).

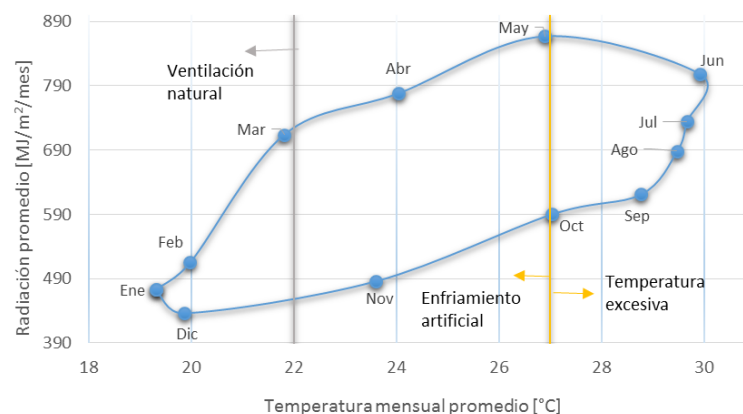


Figura 196. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Sinaloa, México.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 27 y 37°C. Las temperaturas mínimas se encuentran entre los 10 y 25°C. La temporada de lluvias se presenta en verano y parte de otoño. La máxima precipitación es de 210 mm y se presenta en agosto. El resto del año no hay lluvia (Figura 197).

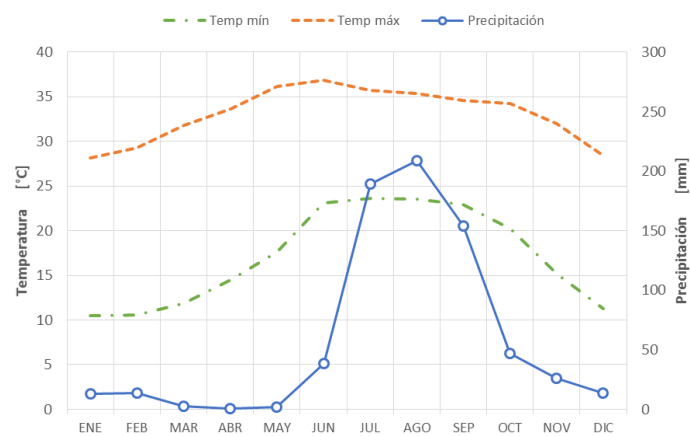


Figura 197. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Sinaloa.

La Figura 198 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio mínimas y máximas para el Estado de Sinaloa. Debido a las altas temperaturas, el Estado requiere de enfriamiento artificial para todo el año.

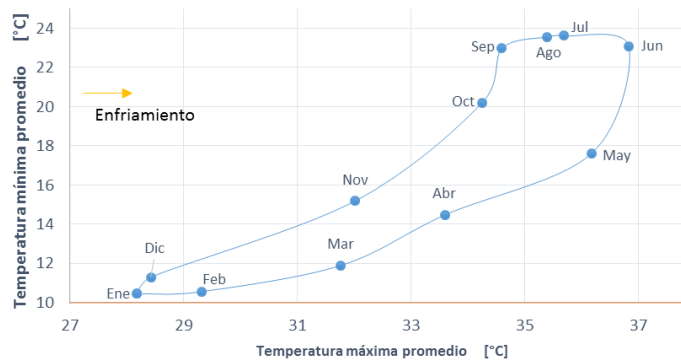


Figura 198. Temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Sinaloa.

Sinaloa cuenta con 32 áreas de control y 24 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son El Rosario, ubicado en la latitud $22^{\circ}59'31''\text{N}$ y longitud $105^{\circ}51'41''\text{O}$, y Culiacán, ubicado en la latitud $24^{\circ}47'31''\text{N}$ y longitud $107^{\circ}23'53''\text{O}$. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 25078 para El Rosario, y la número 25015 para Culiacán. Los datos de radiación para el municipio de El Rosario se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=22.9919&lon=-105.8613&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación para el municipio de Culiacán se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=24.7919&lon=-107.398&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

El Rosario y Culiacán tienen el mismo comportamiento que el del promedio del Estado, con ventilación natural durante invierno, enfriamiento artificial para otoño y en verano y parte de primavera con temperaturas excesivas (Figura 199).

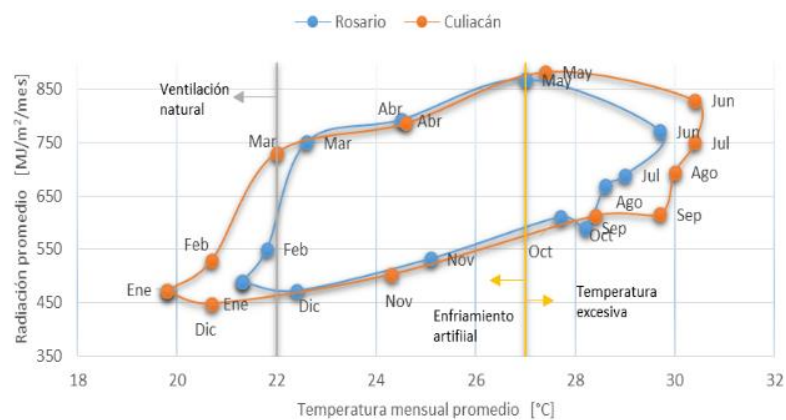


Figura 199. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios del Rosario y Culiacán.

El comportamiento de las temperaturas es similar para los dos municipios. El período de lluvias es el mismo, sin embargo El Rosario presenta mayores precipitaciones con un promedio de 220 mm. El resto del año las lluvias son escasas (Figura 200).

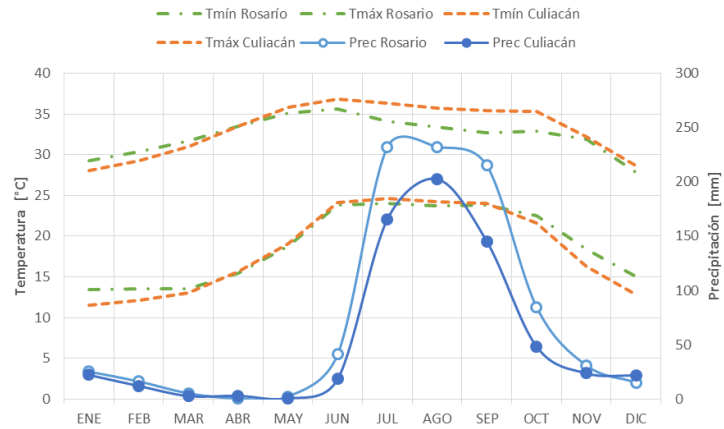


Figura 200. Precipitación mensual y temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios del Rosario y Culiacán.

Las elevadas temperaturas de ambos municipios provocan que no se requiera de calefacción y que no baste con ventilación natural para enfriar el invernadero. Además, estas condiciones difieren de las que presenta el Estado en promedio (Figura 201).

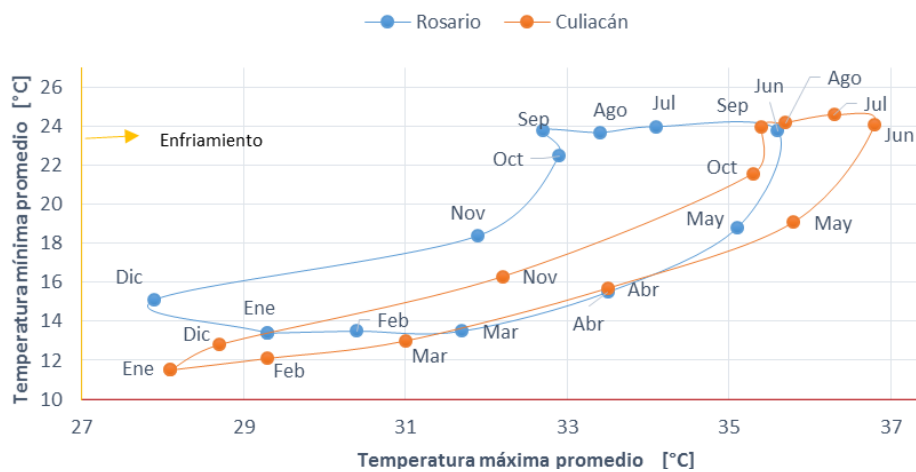


Figura 201. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de El Rosario y Culiacán en el Estado de Sinaloa.

I.26 Sonora

El 48% del estado presenta clima seco y semiseco (Bs) localizado en la Sierra Madre Occidental, el 46.5% presenta clima muy seco (BW), el 4% es templado subhúmedo (Cw) y el restante 1.5% presenta clima cálido subhúmedo (Aw) localizado hacia el Sureste.

El clima en el estado es una limitante para la agricultura, sin embargo se cultiva trigo, algodón, cártamo, sandía, ajonjolí, garbanzo, sorgo, maíz y vid, principalmente con riego, en las regiones de clima seco y semiseco de los Valles de El Yaqui, Mayo y Guaymas.

Las temperaturas en verano son superiores a los 27°C y se consideran como temperaturas excesivas, en este período se puede usar un conjunto de estrategias que, en conjunto con el enfriamiento artificial puedan enfriar el invernadero o no cultivar en esta temporada. En los meses de mayo y octubre puede reducirse la temperatura con el uso de enfriamiento artificial y el resto del año basta con tener ventilación natural para enfriar el invernadero (Figura 202).

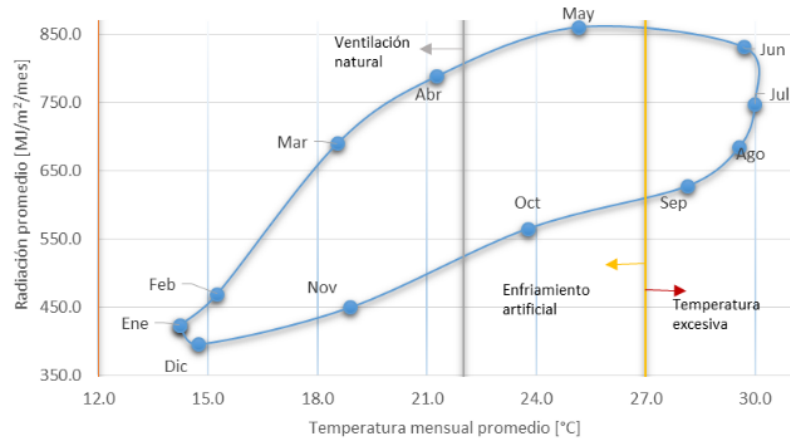


Figura 202. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Sonora.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 22 y 40°C con un gran incremento en el inicio de verano. Las temperaturas mínimas se encuentran entre los 5 y 25°C. La temporada de lluvias se presenta en verano con un máximo de 140 mm en julio (Figura 203).

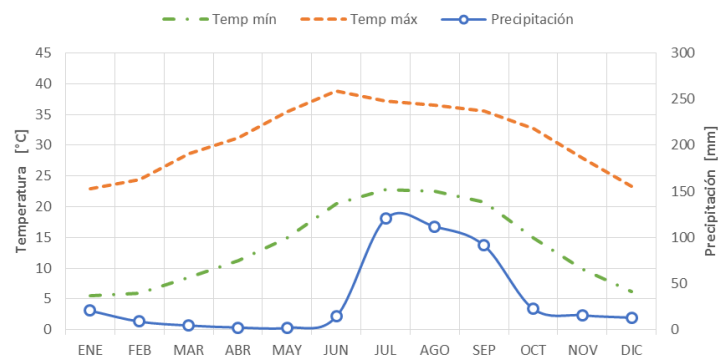


Figura 203. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales para el Estado de Sonora.

La Figura 204 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio mínimas y máximas para el Estado de Sonora. Las temperaturas mínimas para invierno son menores a 10°C y las temperaturas mayores son menores a los 27°C por lo que se requiere de calefacción y se puede mantener la temperatura con ventilación natural. El resto del año se necesita de enfriamiento artificial.

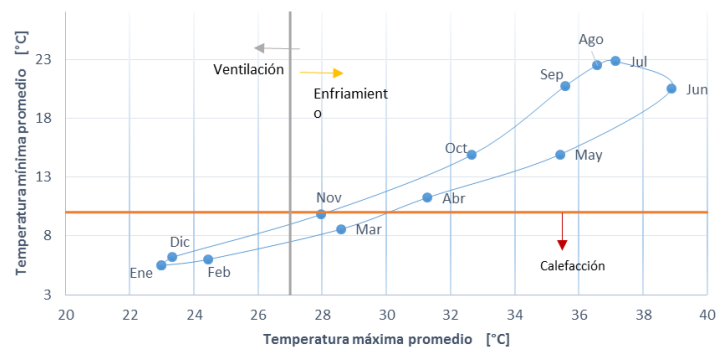


Figura 204. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Sonora.

Sonora cuenta con 21 áreas de control y 19 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Hermosillo, que se ubica a una latitud de 29°00'52''N y longitud 111°07'56''O, y Cajeme, ubicado en una latitud de 27°42'47''N y longitud 109°54'15''O. Las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos de cada municipio son la número 26174, correspondiente a Hermosillo y la número 26043,

correspondiente a Cajeme. Los datos de radiación de Hermosillo se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=29.0144&lon=-111.1322&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Cajeme se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=27.713&lon=-109.9041&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 205 muestra la radiación y temperatura promedio para los municipios de Hermosillo y Cajeme. El comportamiento es muy similar al promedio del Estado con el período de invierno con sólo ventilación natural, mayo y octubre con enfriamiento artificial y el resto del año con temperaturas excesivas.

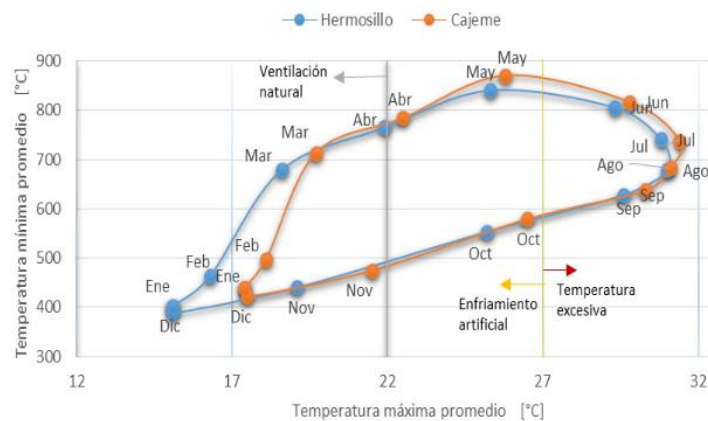


Figura 205. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Hermosillo y Cajeme, Sonora.

Las temperaturas y precipitación son muy similares para ambos municipios. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 24 y 40°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre los 5 y 25°C, la mayor precipitación se da en el mes de agosto y es de 120 mm, para el caso de Cajeme y de 100 mm para Hermosillo (Figura 206).

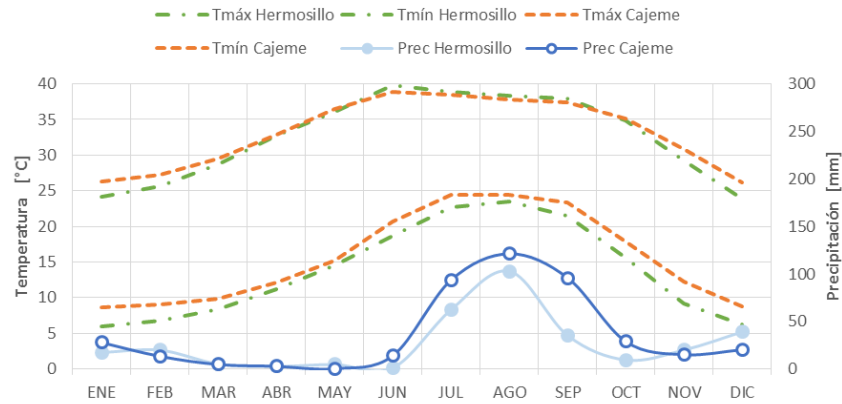


Figura 206. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Hermosillo y Cajeme, Sonora.

Al igual que en el promedio las temperaturas muestran que se necesitan de las 3 acciones de control: calefacción, ventilación y enfriamiento para los dos municipios. Ambos municipios tienen temperaturas menores a los 10°C en invierno y las temperaturas máximas menores a los 27°C (Figura 207).

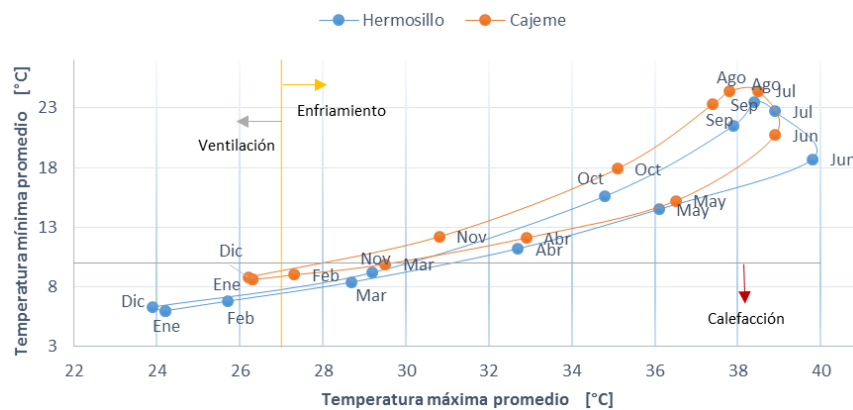


Figura 207. Temperaturas máximas y mínimas para los municipios de Hermosillo y Cajeme, Sonora.

I.27 Tabasco

El 95.5% de la superficie del estado presenta clima cálido húmedo (Am), el restante 4.5% es clima cálido subhúmedo (Aw) hacia la parte Este del estado.

El clima cálido húmedo favorece el cultivo de plátano, papaya, naranja, limón, coco, cacao, arroz, maíz y frijol, entre otros.

La mitad del año, en especial en invierno, las temperaturas son menores a los 27°C por lo que se requiere de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro de los invernaderos. El resto del año las temperaturas son excesivas originando que no se cultive en verano o que se tengan que llevar a cabo estrategias que ayuden junto con el enfriamiento artificial a reducir las temperaturas (Figura 208).

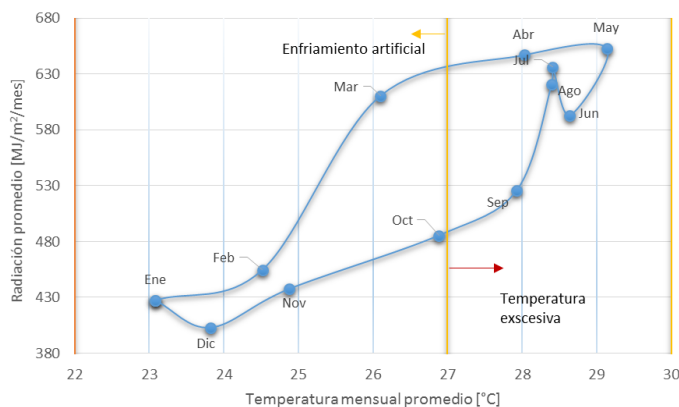


Figura 208. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Tabasco.

Las temperaturas son muy elevadas en todo el año, la diferencia entre ellas es de tan sólo 8°C. Las temperaturas máximas se encuentran entre 28 y 35°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre 18 y 25°C. Las lluvias se presentan a lo largo del año, siendo el período más seco el de primavera y el más activo en otoño con hasta 380 mm en septiembre (Figura 209).

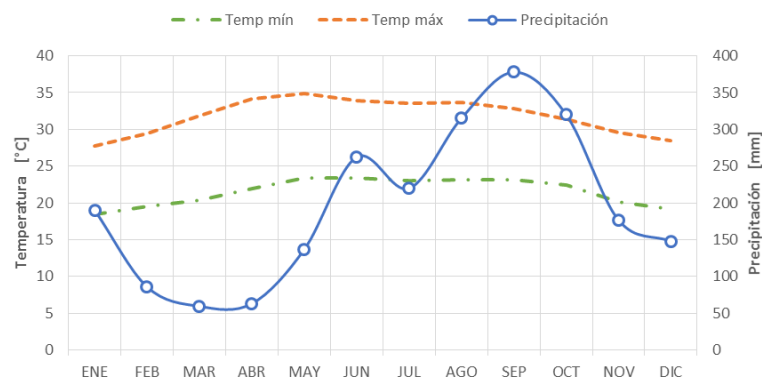


Figura 208. Precipitación mensual promedio, temperaturas mensuales promedio para el Estado de Tabasco.

La Figura 209 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio mínimas y máximas para el Estado de Tabasco. Debido a las altas temperaturas la única acción de control que resalta para el Estado es el enfriamiento artificial. Incluso, durante el verano no es conveniente tener un cultivo dentro de invernadero.

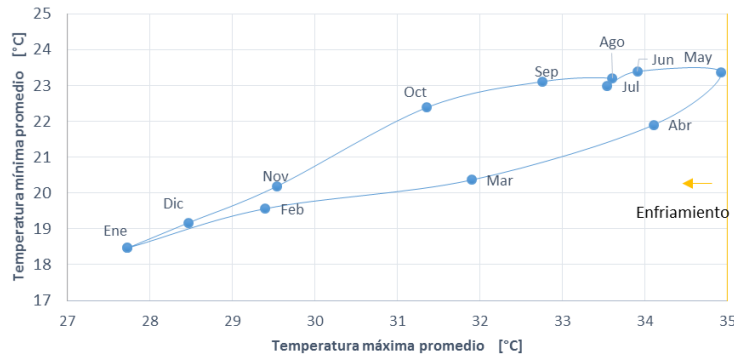


Figura 209. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tabasco.

Tabasco cuenta con 22 áreas de control y 23 unidades de producción. Los municipios que presentan mayor cantidad de unidades de producción son Mascupana y Teapa. La ubicación de Mascupana es latitud 17°45'24''N y longitud 092°36'18''O, la ubicación de Teapa es latitud 17°32'56''N y longitud 092°57'12''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 27030, correspondiente a Mascupana, y la número 27044, correspondiente a Teapa. Los datos de radiación de Mascupana se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=17.7566&lon=-91.395&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Teapa se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=17.5488&lon=-91.0466&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Las temperaturas de Mascupana son mayores a Teapa, sin embargo los dos municipios tienen temperaturas excesivas en verano, el resto del año, se necesita de enfriamiento artificial. La radiación se encuentra por encima de los 350 MJ/m²/mes por lo que no necesita de luz artificial (Figura 210).

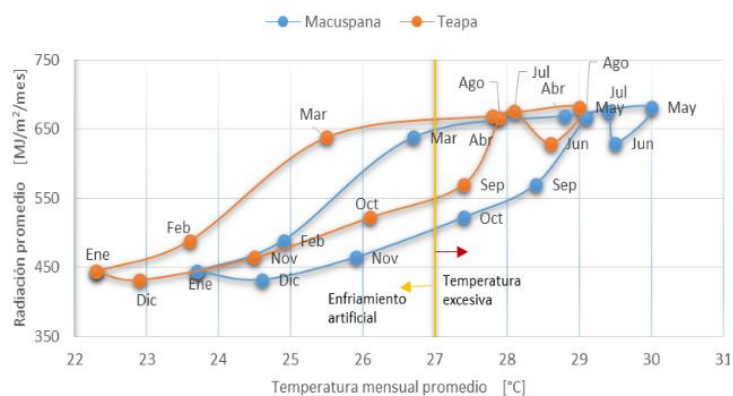


Figura 210. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Mascupana y Teapa, Tabasco.

Las temperaturas mínimas y máximas tienen valores similares para ambos municipios. Se encuentran entre los 25 y 35°C, las máximas y entre los 18 y 25°C las mínimas. Las lluvias tienen un comportamiento similar con la diferencia que Teapa presenta mayores precipitaciones, el período con menor lluvia es primavera y período con mayor precipitación es otoño. La precipitación máxima para Teapa es de 490 mm y se presenta

en septiembre, la precipitación máxima para Mascupana se presenta, también en septiembre, con un valor de 380 mm (Figura 211).

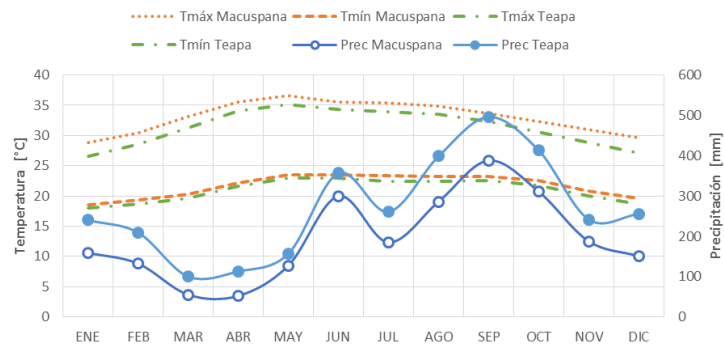


Figura 211. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Mascupana y Teapa.

La Figura 212 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para los municipios de Mascupana y Teapa. Las temperaturas máximas se encuentran por encima de los 25°C, es por ello que la única acción de control es el enfriamiento artificial.

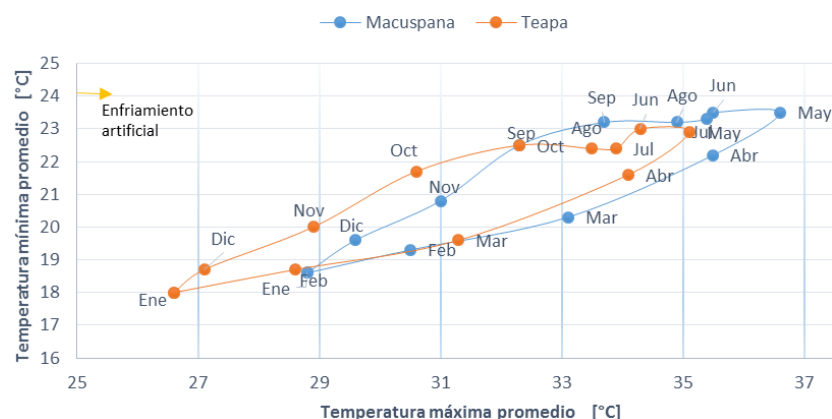


Figura 212. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Mascupana y Teapa en el Estado de Tabasco.

I.28 Tamaulipas

El 58% del estado presenta clima cálido subhúmedo (Aw), el 38% presenta clima seco y semiseco (Bs) en el Centro, el Norte y hacia el Suroeste del estado; el 2% es templado subhúmedo (Cw) en la región Suroeste y el restante 2% presenta clima cálido húmedo (Am).

Entre sus principales cultivos se encuentran sorgo, henequén, cártamo, soya, maíz, frijol y frutales como aguacate, limón agrio, mango y naranja.

Las temperaturas promedio se extienden desde los 16 °C a los 30°C, determinando así, 3 zonas. Durante el invierno basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos, en los meses de marzo, abril y octubre se requiere de

enfriamiento artificial y el resto del año, en verano principalmente, se tiene temperaturas excesivas que dificultan cultivar en esta temporada (Figura 213).

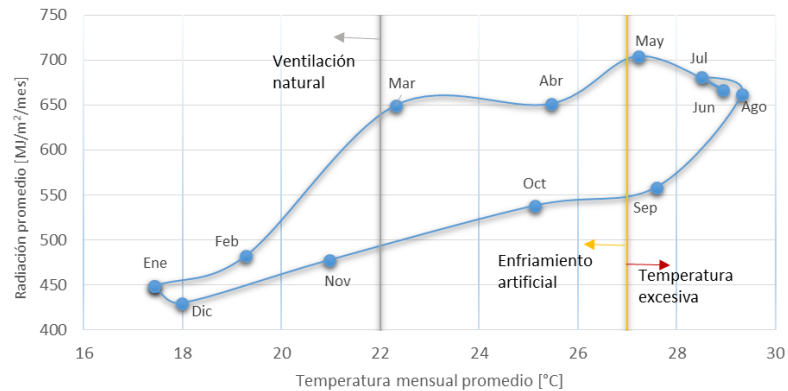


Figura 213. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Tamaulipas.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 24 y 36°C. Las temperaturas mínimas se encuentran entre los 10 y 25°C. La temporada de lluvias se extiende de abril a octubre, el resto del año hay lluvias pero son menores a 50mm. La máxima precipitación se da en septiembre con 200 mm (Figura 214).

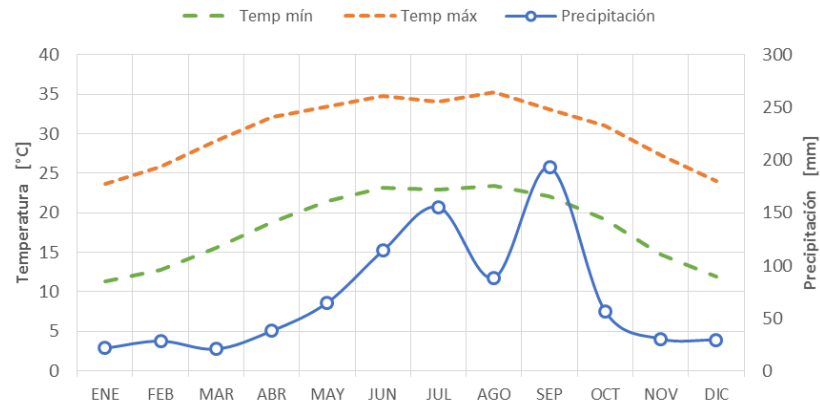


Figura 214. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tamaulipas.

Sólo en invierno es que las temperaturas máximas se encuentran por debajo de los 27°C, permitiendo que se use ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos, el resto del año se necesita de un sistema de enfriamiento artificial. Las temperaturas mínimas son mayores a 10°C para todo el año por lo que no se necesita de calefacción (Figura 215).

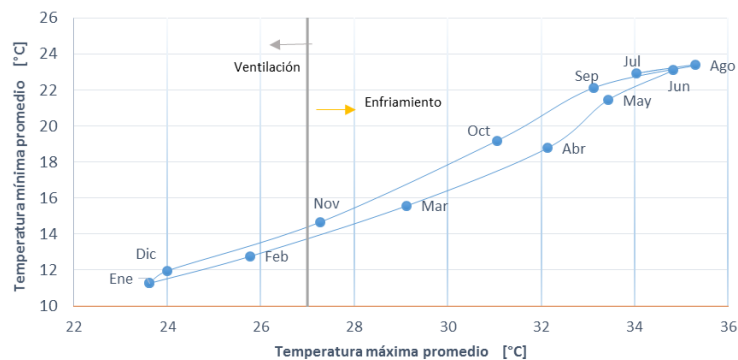


Figura 215. Temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tamaulipas.

Tamaulipas cuenta con 16 áreas de control y 16 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Altamira y El Mante. La ubicación de Altamira es latitud 22°25'23''N y longitud 097°56'42''O, la ubicación de El Mante es latitud 22°49'40''N y longitud 099°03'05''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 28175, correspondiente a Altamira, y la número 28008, correspondiente a El Mante. Los datos de radiación de Altamira se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=22.423&lon=-96.055&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de El Mante se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=22.8277&lon=-98.9486&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

El Mante presenta temperaturas mayores a Altamira, requiere de enfriamiento artificial durante los meses de marzo, octubre y noviembre, y tiene temperaturas excesivas en verano. Altamira sólo necesita de enfriamiento artificial durante el verano donde las temperaturas son mayores a los 22°C, el resto del año basta con usar ventilación natural (Figura 216).

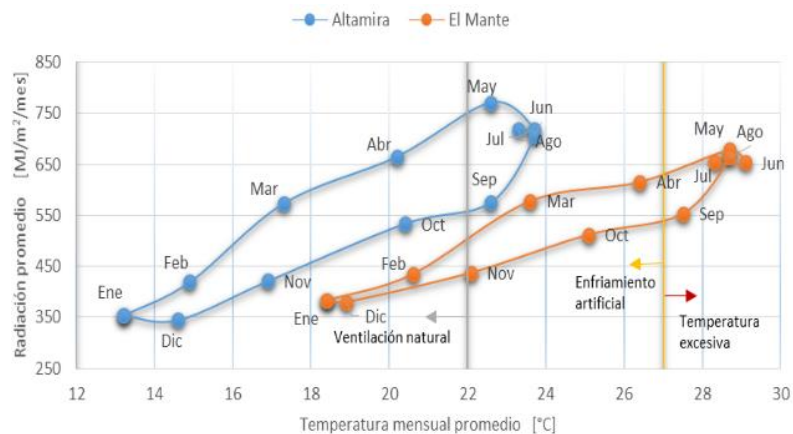


Figura 216. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Altamira y el Mante.

La Figura 217 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para ambos municipios. A pesar de que el comportamiento de las temperaturas para ambos municipios es similar la precipitación es muy diferente. Las temporadas de lluvia no coinciden y es que para Altamira la mayor precipitación se da en septiembre con 240 mm, mientras que en El Mante, la máxima precipitación se da en julio con 250 mm. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 23 y 36°C. Las temperaturas mínimas se encuentran entre los 10 y 25°C.

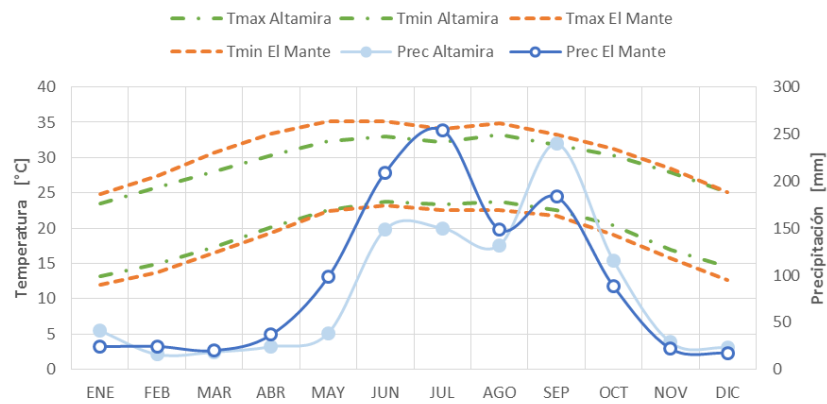


Figura 217. Precipitación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Altamira y El Mante.

Ambos municipios tienen temperaturas mínimas mayores a los 10°C por lo que no necesitan de calefacción durante todo el año. Durante el invierno, las temperaturas máximas son menores a los 27°C por lo que basta con ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos, el resto del año las temperaturas son mayores a los 27°C y propician que se necesite de enfriamiento artificial si se quiere cultivar dentro de ellos, incluso puede ser posible que en verano no se pueda tener cultivos debido a que las temperaturas alcanzan los 35°C (Figura 218).

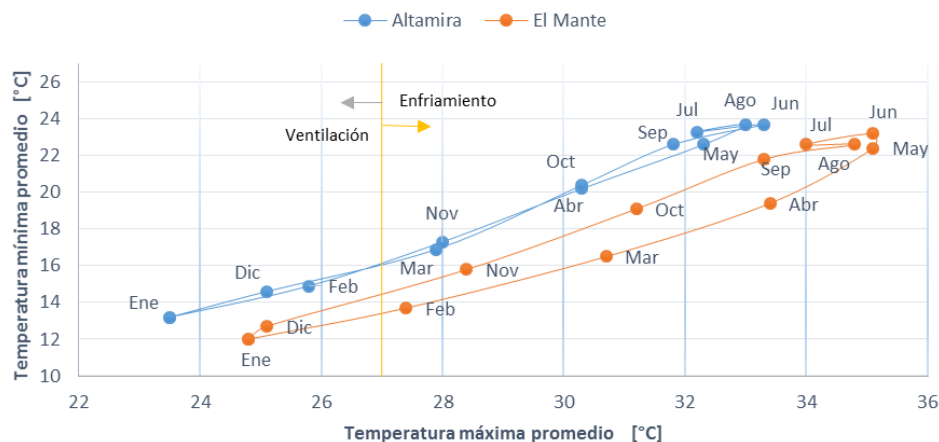


Figura 218. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Altamira (azul) y El Mante (anaranjado) en el Estado de Tamaulipas.

I.29 Tlaxcala

El 99.2% de la superficie del estado presenta clima templado subhúmedo (Aw), el 0.6% presenta clima seco y semiseco (Bs), localizado hacia la región Este, el restante 0.2% presenta clima frío (EH).

La agricultura se practica en su mayoría de temporal, favoreciendo cultivos como maíz, haba, frijol, lechuga, espinaca, amaranto, alfalfa, ajo, cebolla y col.

Se observa que sólo en enero se tienen temperaturas promedio menores a los 12°C y se puede pensar en usar calefacción para que la temperatura dentro de los invernaderos no decaiga por debajo de este valor. El resto del año, las temperaturas son mayores a los 12 °C y menores a los 22°C por lo que basta con ventilación natural para enfriar los invernaderos (Figura 219).

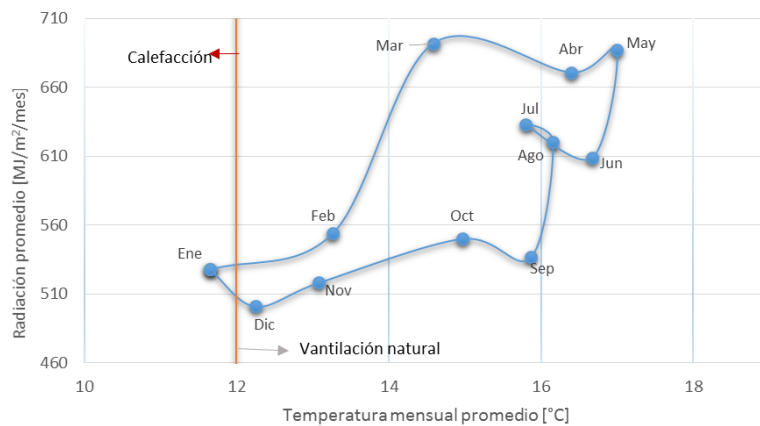


Figura 219. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Tlaxcala.

La Figura 220 muestra la precipitación y temperaturas mínimas y máximas para el Estado de Tlaxcala. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 20 y 26°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre los 2 y 10°C. La temporada de lluvias está bien establecida y se extiende de mayo a octubre con un máximo de 150 mm en julio.

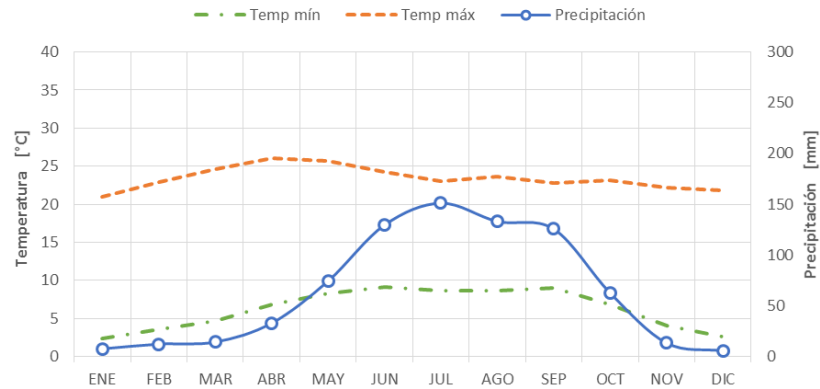


Figura 220. Precipitación mensual, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Tlaxcala.

La Figura 221 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para el Estado de Tlaxcala. Durante todo el año se deben considerar la calefacción y ventilación natural.

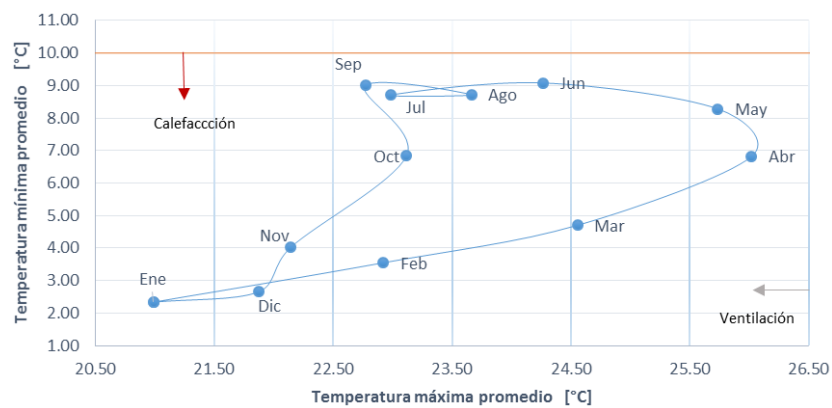


Figura 221. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Tlaxcala.

Tlaxcala cuenta con 38 áreas de control y 34 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Alzayanca y Españita. La ubicación de Alzayanca es latitud 19°25'41''N y longitud 097°47'56''O, la ubicación de Españita es latitud 19°27'28''N y longitud 098°25'20''O. Las estaciones de donde se obtuvieron datos meteorológicos son la número 29151, correspondiente a Alzayanca, y la número 29047, correspondiente a Españita. Los datos de radiación de Alzayanca se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.428&lon=-96.2011&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Españita se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.4577&lon=-97.5777&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 222 muestra la radiación y temperatura promedio para los municipios de Alzayanca y Españita. Los dos municipios cuentan con temperaturas por debajo de los 10°C en invierno por lo que requieren de calefacción durante este período. El resto del año se puede reducir la temperatura dentro de los invernaderos con ventilación natural.

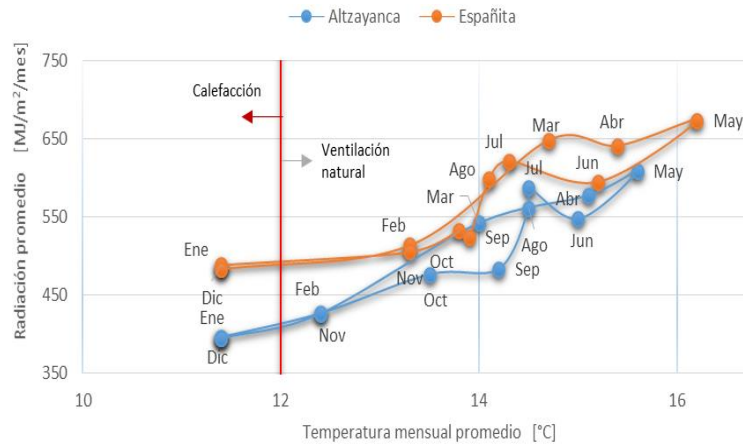


Figura 222. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Altzayanca y Españita.

Las temperaturas mínimas y máximas para ambos municipios son muy similares. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 20y 25°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre los 3 y 10°C. La temporada de lluvias es la misma para los dos municipios y se extiende de mayo a octubre, sin embargo Españita tiene mayores precipitaciones con un máximo de 210 mm en septiembre (Figura 223). Las precipitaciones de Altzayanca son menores a los 100 mm.

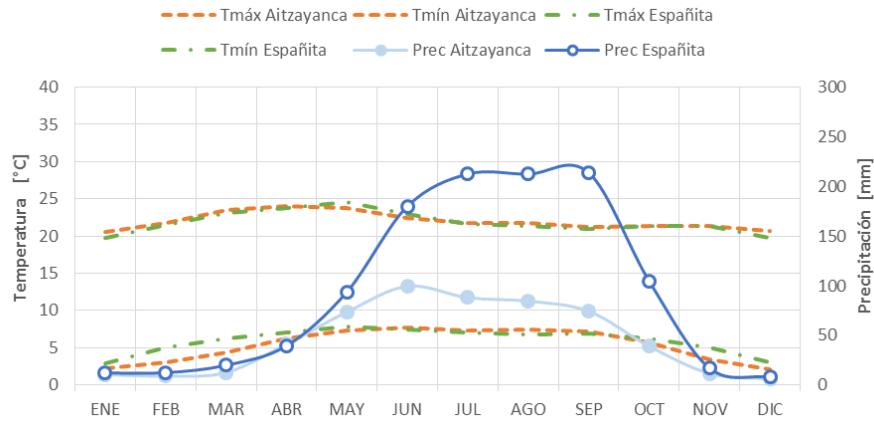


Figura 223. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Altzayanca y España.

La Figura 224 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para ambos municipios. Las temperaturas mínimas para los dos municipios se encuentran muy por debajo de los 10°C lo que implica considerar calefacción como equipamiento para los invernaderos, además las temperaturas máximas son menores a los 27°C por lo que basta con tener ventilación natural para enfriar los invernaderos.

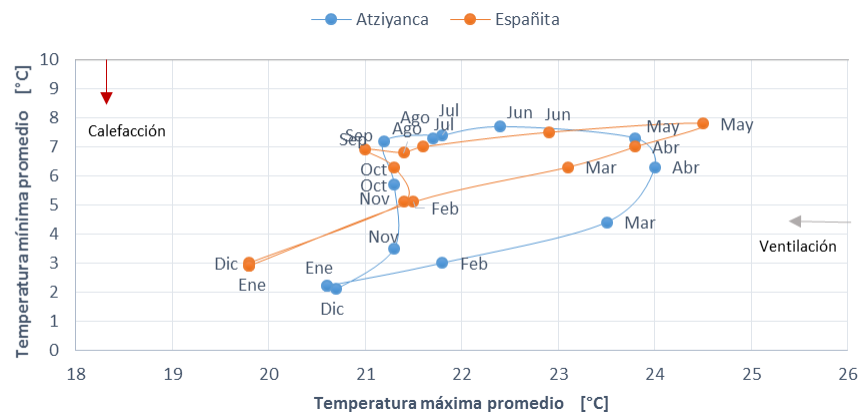


Figura 224. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Atziyanca (azul) y Españaíta (anaranjado) en el Estado de Tlaxcala, México.

I.30 Veracruz

Los climas que predominan en el estado son el cálido subhúmedo (Aw) en un 53.5% del territorio y el cálido húmedo (Am) en un 41%. El 3.5% del Estado presenta clima templado húmedo (Cm) y el 1.5% presenta clima templado (Cw). El 0.5% es seco y semiseco (Bs) y un porcentaje mínimo (0.05%) es clima frío (EH).

Los climas cálidos húmedos y subhúmedos propician el desarrollo de una gran variedad de cultivos tales como: cítricos, mango, café, arroz, piña, vainilla, plátano, caña de azúcar y maíz.

En general el Estado de Veracruz tiene un clima cálido con temperaturas por encima de los 18°C. En invierno las temperaturas son menores a los 22°C y basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos, el resto del año

se necesita un sistema de enfriamiento artificial. La radiación promedio es superior a los 350 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial (Figura 225).

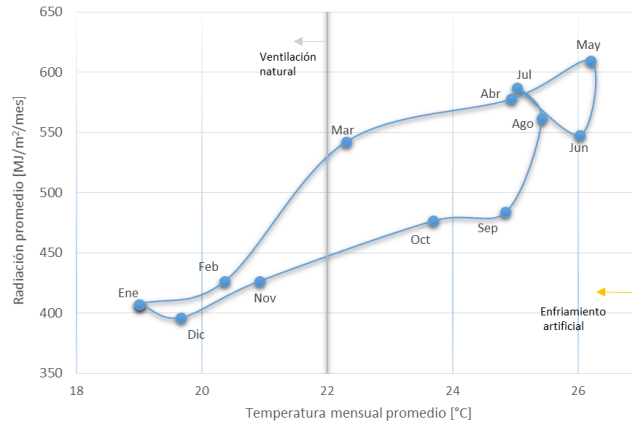


Figura 225. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Veracruz.

La Figura 226 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para el Estado de Veracruz. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 24 y 32°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre los 14 y 20°C. La temporada de lluvias se extiende de junio a noviembre con un máximo de 300 mm en septiembre. Fuera de la temporada de lluvias las precipitaciones son menores a los 60 mm.

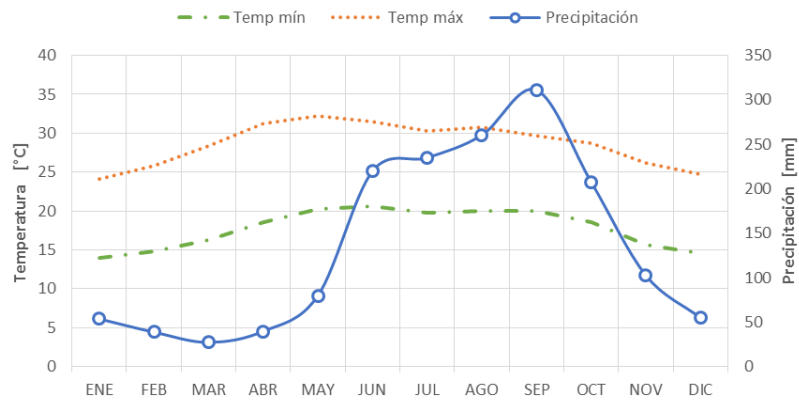


Figura 226. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Veracruz.

Las temperaturas mínimas son mayores a los 12°C por lo que no se requiere de calefacción en ningún mes del año. Durante el invierno las temperaturas máximas son menores a los 27°C y basta con la ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos. El resto del año se necesita de enfriamiento si se desea cultivar dentro de invernaderos (Figura 227).

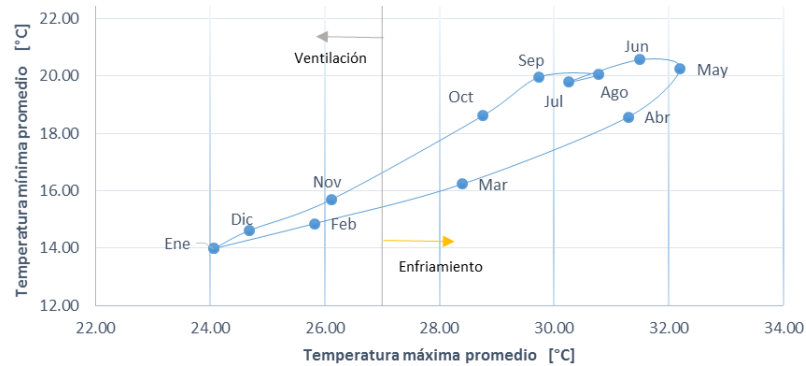


Figura 227. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para el Estado de Veracruz.

Veracruz cuenta con 235 áreas de control y 308 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Jalacingo y Huatusco, ambos con invernaderos con cultivos alimenticios y no alimenticios e invernaderos destinados a la floricultura. Jalacingo se ubica a una latitud de 19°44'54''N y longitud 97°18'50''O, Huatusco se ubica a una latitud de 19°09'00''N y longitud 96°57'35''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 30368, correspondiente a Jalacingo, y la número 30066 correspondiente a Huatusco. Los datos de radiación para Jalacingo se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.7483&lon=-96.6861&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Huatusco se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=19.15&lon=-95.0402&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Hay una clara diferencia entre las temperaturas de los dos municipios. Jalacingo presenta temperaturas en promedio menores a los 10°C durante enero por lo que se recomienda usar calefacción para este período. Huatusco por otra parte sobrepasa los 15 °C y prácticamente todo el año, basta con tener ventilación natural para enfriar el invernadero (Figura 228).

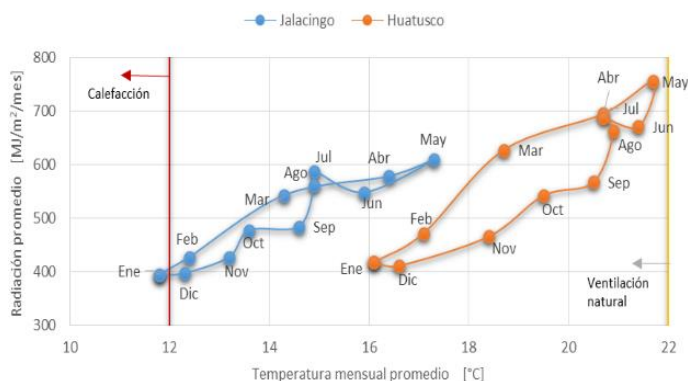


Figura 228. Radiación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas mensuales para los municipios de Jalacingo y Huatusco.

La Figura 229 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para los municipios de Jalacingo y Huatusco. Las temperaturas máximas de Jalacingo se encuentran entre los 15y 24°C, mientras que las temperaturas máximas de Huatusco se encuentran entre los 23 a 30°C. Las temperaturas mínimas de Jalacingo se encuentran

entre los 5 y 10°C, mientras que las de Huatusco se encuentran entre los 9 y 15°C, marcando así una gran diferencia. La temporada de lluvias es la misma para ambos municipios y se extiende de mayo a octubre con la diferencia que Huatusco tiene mayores precipitaciones. El máximo de precipitación de Huatusco es de 380 mm y se presenta en julio, mientras que el máximo de Jalacingo es de tan sólo 160 mm y se presentan en septiembre. El resto del año la lluvia es menor a los 100mm en ambos casos.

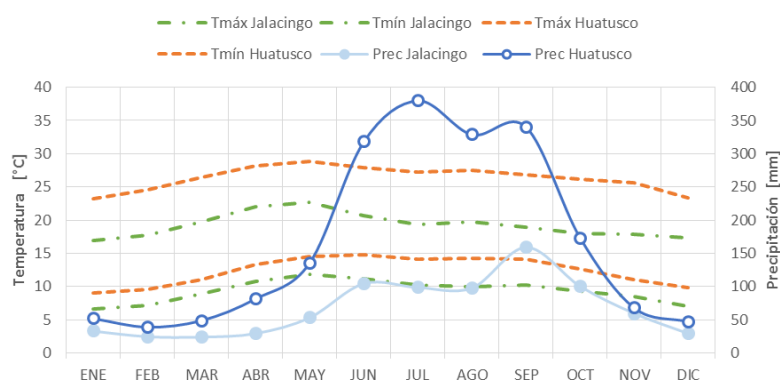


Figura 229. Precipitación mensual promedio, temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para los municipios de Jalacingo y Huatusco.

La Figura 230 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para los dos municipios. Las temperaturas mínimas de Jalacingo se encuentran por debajo de los 10°C la mitad del año, por lo que sería bueno considerar calefacción para los invernaderos de esa zona, la otra mitad del año las temperaturas máximas se encuentran por debajo de los 24°C permitiendo que el enfriamiento de los invernaderos sea mediante la ventilación natural. Huatusco presenta

temperaturas mínimas menores a los 10°C en enero, febrero y diciembre, por lo que en estos meses se requiere de calefacción. Las temperaturas máximas de Huatusco son menores a los 27°C en los períodos de otoño e invierno, por lo que es suficiente la ventilación natural para reducir la temperatura, el resto del año se necesita de un sistema de enfriamiento artificial.

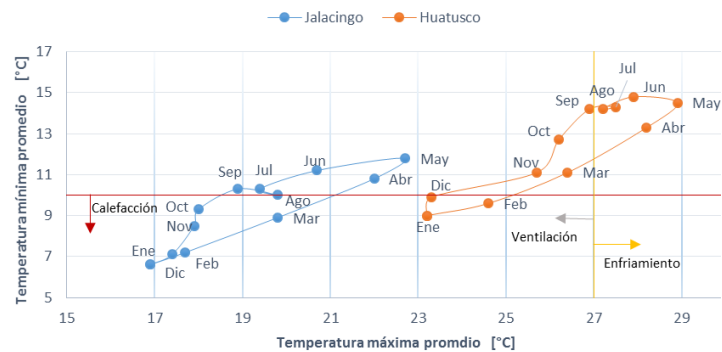


Figura 230. Temperatura mínima mensual promedio y temperatura máxima mensual promedio para los municipios de Jalacingo (azul) y Huatusco (anaranjado) en el Estado de Veracruz.

I.31 Yucatán

El 85.5% de la superficie del estado presenta clima cálido subhúmedo (Aw) y el restante 14.5% presenta clima seco y semiseco (Bs).

El clima cálido húmedo permite el desarrollo del cultivo de henequén, el de mayor importancia en el estado, pero también se cultiva maíz, frijol, melón, sandía, naranja, limón y mango.

La Figura 231 muestra la radiación y temperatura promedio para el Estado de Yucatán. Los meses de mayo y junio presentan temperaturas promedio mayores a los 22°C y se requiere de enfriamiento artificial para reducir las temperaturas durante estos dos meses, el resto del año las temperaturas promedio son menores a los 22°C y basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura dentro de los invernaderos. La radiación es superior a los 400 MJ/m²/mes por lo que no se necesita de luz artificial.

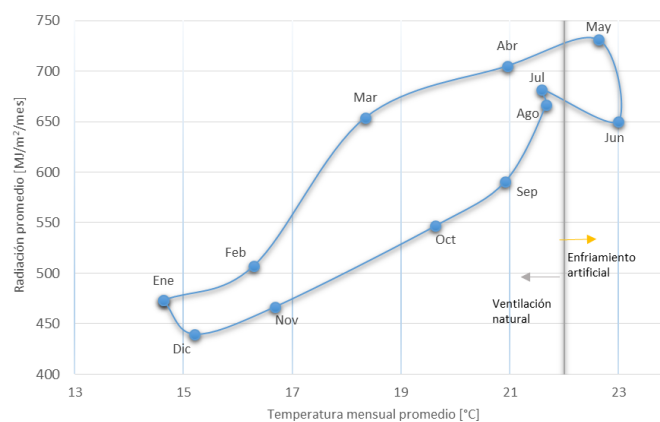


Figura 231. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Yucatán.

La Figura 232 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para el Estado de Yucatán. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 24 y 33°C, las

temperaturas mínimas se encuentran entre los 5 y 15°C. La temporada de lluvias se extiende de mayo a noviembre y con un máximo de 180 mm en septiembre.

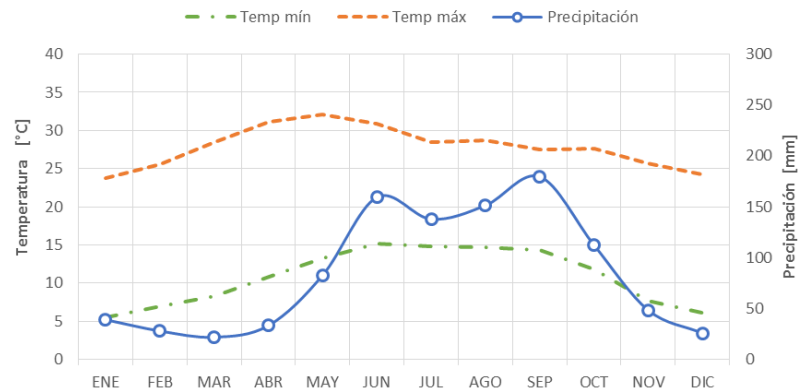


Figura 232 Precipitación mensual promedio y temperaturas máximas y mínimas mensuales promedio para el Estado de Yucatán.

La Figura 233 muestra el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas para el Estado de Yucatán. Las temperaturas mínimas, sobre todo en el período de invierno, se encuentran por debajo de los 10°C y se recomienda contar con calefacción. Las temperaturas máximas son menores a los 27°C en invierno y basta con tener ventilación natural para reducir las temperaturas dentro del invernadero, el resto del año, las

temperaturas máximas son mayores a los 27°C y se recomienda un sistema de enfriamiento artificial.

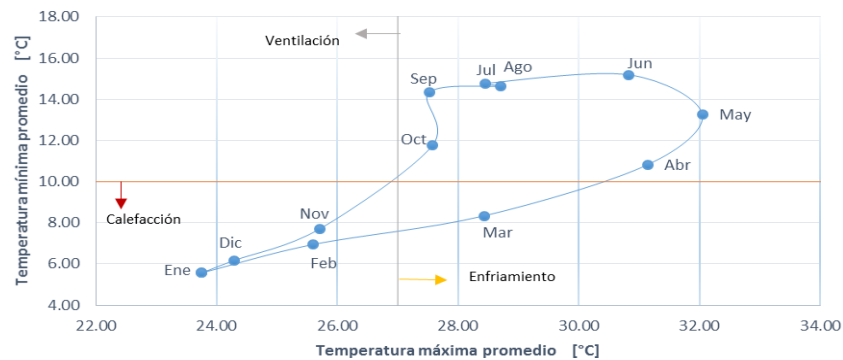


Figura 233. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Yucatán, México.

Yucatán cuenta con 20 áreas de control y 14 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Mérida y Tizimín. La ubicación de Mérida es latitud 20°58'04''N y longitud 089°37'18''O, la ubicación de Tizimín es latitud 21°09'22''N y longitud 088°10'07''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos meteorológicos son la número 31044, correspondiente a Mérida y la número 31034,

correspondiente a Tizimín. Los datos de radiación de Mérida se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=20.9677&lon=-88.3783&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Tizimín se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=21.1561&lon=-88.1686&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 234 muestra la radiación y temperatura promedio para los municipios de Mérida y Tizimín. Las temperaturas de Mérida no varían demasiado en todo el año comparadas con las de Tizimín, sin embargo ambos municipios presentan temperaturas excesivas en verano. Tizimin presenta en enero temperaturas por debajo de los 22°C y basta con tener ventilación natural para enfriar el invernadero, el resto del año, excepto en verano, se requiere de algún sistema de enfriamiento artificial. Mérida tiene temperaturas por debajo

de los 27°C cuando no es verano, requiriendo así de enfriamiento artificial para reducir la temperatura.

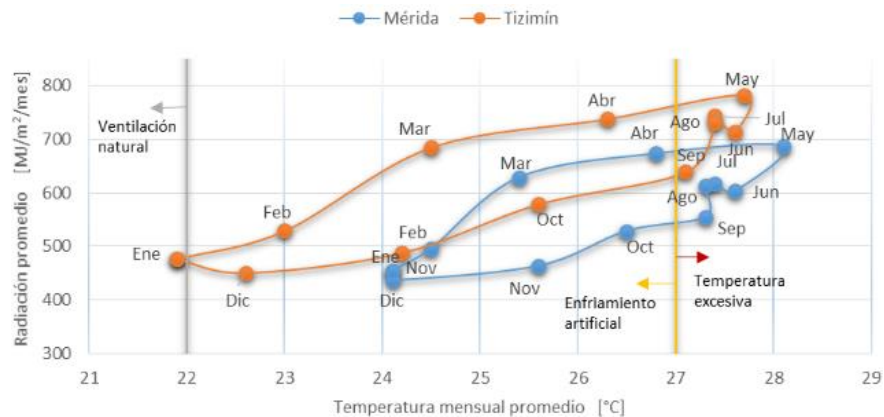


Figura 234. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Mérida y Tizimín.

La Figura 235 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para los municipios de Mérida y Tizimín. El comportamiento tanto de las temperaturas como de la precipitación es muy similar en ambos municipios. Las lluvias se presentan todo el año, sin embargo es de junio a octubre donde se presenta la mayor cantidad de precipitación

con un máximo de 200 mm en julio. Las temperaturas máximas se encuentran entre los 28 y 36°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre los 15 y 21°C.

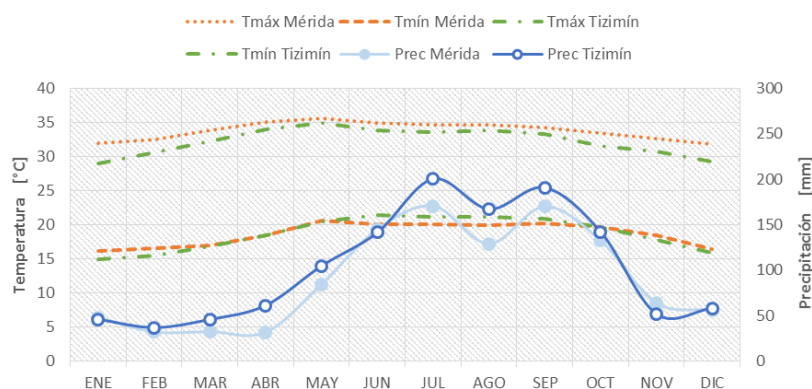


Figura 235. Precipitación y temperaturas mínimas y máximas para los municipios de Mérida y Tizimín en el Estado de Yucatán, México.

La Figura 236 muestra el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas para los municipios de Mérida y Tizimín. A pesar de que en general el comportamiento de las temperaturas mínimas y máximas es similar para los dos municipios se nota que Mérida tiene temperaturas mayores a las de Tizimín a lo largo del año. Las temperaturas mínimas de los dos municipios están por encima de los 10°C y no se requiere de calefacción para ningún mes del año, las temperaturas máximas se encuentran muy por encima de los 27°C, lo que indica que se debe considerar enfriamiento artificial para reducir las temperaturas dentro de los invernaderos, sin embargo en verano se tienen temperaturas mayores a los

30 °C y es muy posible que no baste con el enfriamiento y se deban considerar estrategias para reducir la temperatura o no cultivar en estos meses.

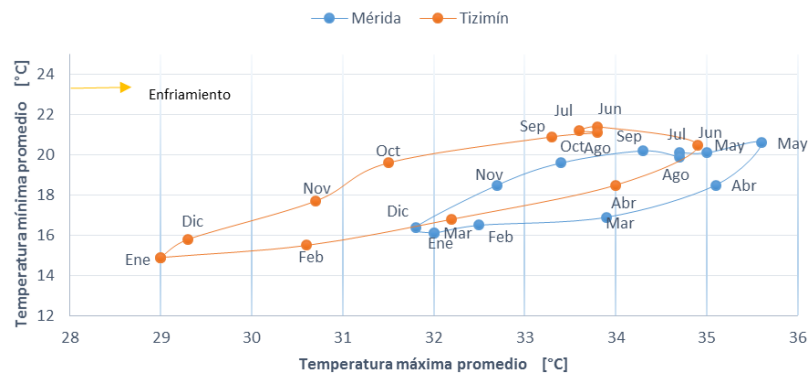


Figura 236. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Mérida y Tizimín en el Estado de Yucatán, México.

I.32 Zacatecas

El 73% de la entidad presenta clima seco y semiseco (Bs), el 17% clima templado subhúmedo (Cw) y se localiza hacia el Oeste del estado; el 6% es muy seco (BW), el 4% restante presenta clima cálido subhúmedo (Aw) y se encuentra hacia el Sur y Suroeste de la entidad.

El clima seco y semiseco de la entidad es una limitante para la agricultura, ésta se practica de riego y temporal, siendo los principales cultivos maíz, avena, trigo, frijol, chile, sorgo, nopal y durazno.

La Figura 237 muestra la radiación y temperatura promedio para el Estado de Zacatecas. El único mes que puede requerir de calefacción es enero, el resto del año las temperaturas son superiores a los 12°C y basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura.

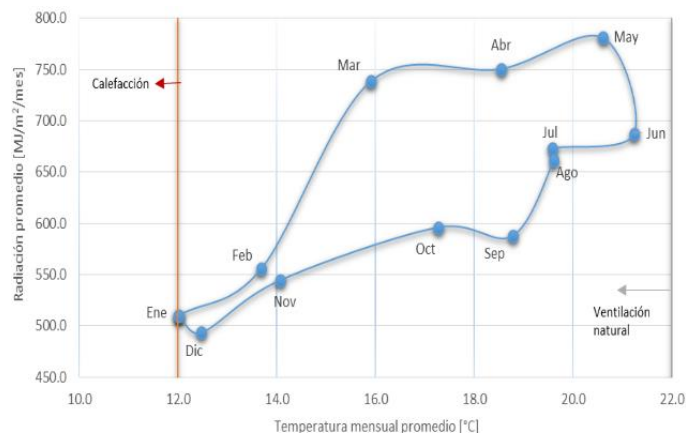


Figura 237. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para el Estado de Zacatecas.

La Figura 238 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas del Estado de Zacatecas.

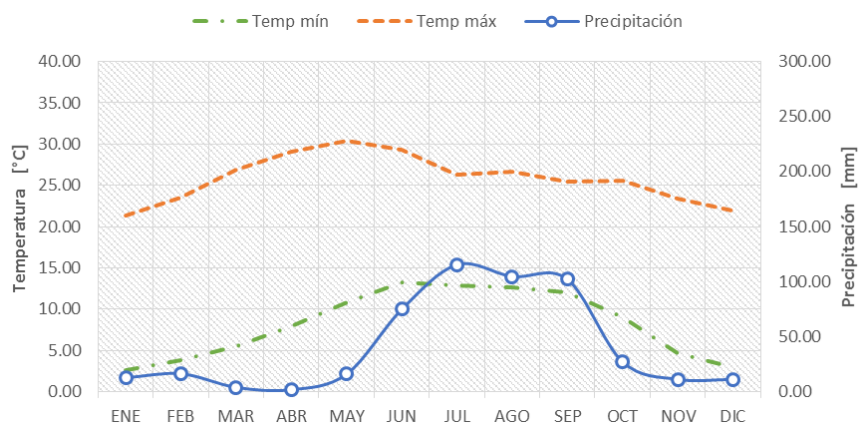


Figura 238. Precipitación y temperaturas mínimas y máximas para el Estado de Zacatecas, México.

Las temperaturas máximas se encuentran entre los 20 y 30°C, las temperaturas mínimas se encuentran entre los 2 y 15°C. La temporada de lluvias se presenta en los meses de junio a septiembre con un máximo de 115 mm en julio.

La Figura 239 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para el Estado de Zacatecas. Las temperaturas mínimas se encuentran por debajo de los 10°C, en concreto para el período de invierno, por ello se recomienda el uso de calefacción. En cuanto a las temperaturas máximas, la mitad del año son menores a los 27°C y basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura,

cuando las temperaturas superan los 27°C se recomienda enfriamiento artificial para los invernaderos.

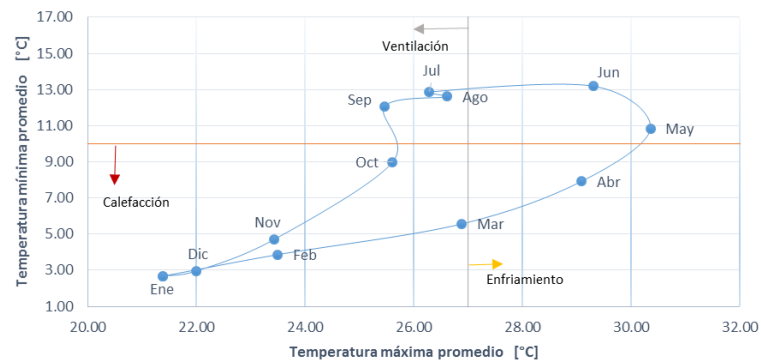


Figura 239. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para el Estado de Zacatecas, México.

Zacatecas cuenta con 34 áreas de control y 29 unidades de producción. Los municipios con mayor cantidad de unidades de producción son Fresnillo y Río Grande, el primero se ubica a una latitud de 23°10'26''N y longitud 102°53'27''O, el segundo se ubica a una latitud de 23°48'01''N y longitud 103°01'36''O. Las estaciones de las que se obtuvieron datos son la número 32020, correspondiente a Fresnillo, y la número 32096,

correspondiente a Río Grande. Los datos de radiación para Fresnillo se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=23.1738&lon=-102.8908&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

Los datos de radiación de Río Grande se encuentran en la siguiente página web:

https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip%40larc.nasa.gov&step=1&lat=23.8002&lon=-103.0266&ys=1983&ye=2005&p=swv_dwn&submit=Submit

La Figura 240 muestra la radiación y temperatura promedio para los municipios de Fresnillo y Río Grande. Para ambos municipios los meses de mayo y junio se encuentran muy cercanos a los 22°C y podrían requerir de enfriamiento artificial para reducir la temperatura dentro de los invernaderos. Río Grande tiene en invierno temperaturas

menores a los 12°C por lo que se necesita de calefacción, el resto del año, al igual que Fresnillo basta con tener ventilación natural para enfriar el invernadero.

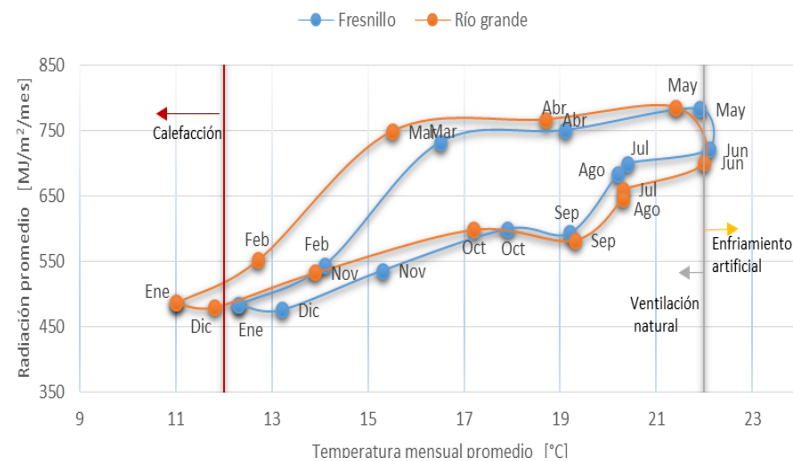


Figura 240. Radiación mensual promedio y temperaturas mensuales promedio para los municipios de Fresnillo y Río grande.

La Figura 241 muestra la precipitación y temperaturas máximas y mínimas para ambos municipios. Las temperaturas máximas y mínimas tienen un comportamiento similar en los dos municipios, con la diferencia que las temperaturas mínimas de Fresnillo son

mayores que las de Río Grande. La temporada de lluvias es la misma en ambos municipios y se extiende de junio a octubre, con un máximo de 90 mm.

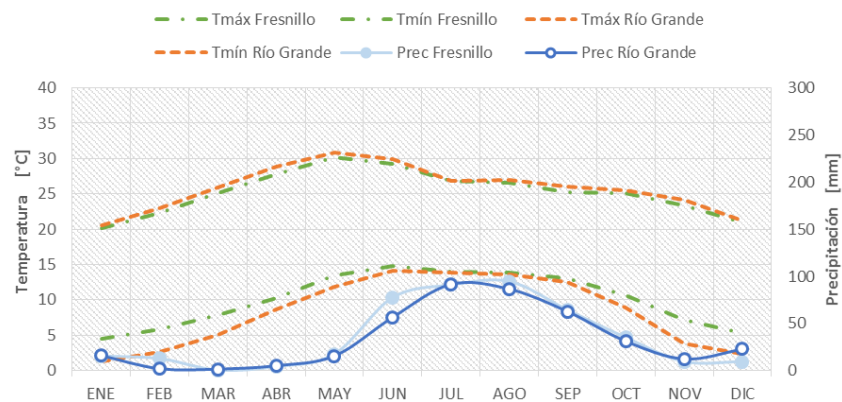


Figura 241. Precipitación y temperaturas mínimas y máximas para los municipios de Fresnillo y Río Grande en el Estado de Zacatecas, México.

La Figura 242 muestra el comportamiento de las temperaturas exteriores mensuales promedio máximas y mínimas para los municipios de Fresnillo y Río Grande. Los dos municipios tienen temperaturas mínimas por debajo de los 10°C y se requiere de calefacción durante estos meses para mantener una buena temperatura en los invernaderos. En otoño e invierno las temperaturas máximas son menores a los 27°C y basta con tener ventilación natural para reducir la temperatura en los invernaderos, el resto del año, en específico en verano las temperaturas máximas superan los 27°C y se requiere de un

sistema de enfriamiento artificial para poder reducir las temperaturas dentro de los invernaderos.

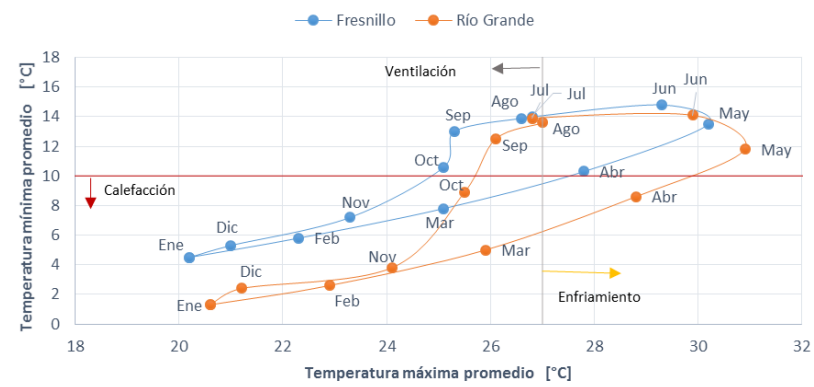


Figura 242. Temperatura exterior mínima mensual promedio y temperatura exterior máxima mensual promedio para los municipios de Fresnillo (azul) y Río Grande (anaranjado) en el Estado de Zacatecas, México.

APÉNDICE II

Ecuaciones del modelo

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{K_g} [q_{rg} - q_v - q_{cc} + q_{mg} + q_h - \lambda E_p]$$

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{K_m} [q_{rm} - q_{mg} - q_d]$$

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{A_g}{\rho_a V_g} [E_p - E_v]$$

$$\frac{dD_m}{dt} = f_r * L_{inter} - M_r * D_m$$

II.1 Ecuaciones complementarias

Presión atmosférica, Pa

$$P_{atm} = 101300 \exp\left(-\frac{z}{8200}\right)$$

Presión de vapor a saturación, Pa

$$P_s = 611 \exp\left(\frac{17.502T_g}{T_g + 240.97}\right)$$

Presión de vapor del ambiente, Pa

$$P_v = P_s \left(\frac{HR}{100}\right)$$

Razón de humedad, kgkg⁻¹

$$w = \frac{0.622P_v}{P_{atm} - P_v}$$

Radiación neta sobre el cultivo, W m^{-2}

$$R_n = L_{inter}\mu_g I_o$$

Tasa de intercambio de aire, m^3s^{-1}

$$F_v = \left(\frac{A_w}{2}\right) C_d (C_w)^{0.5} v_o + F_{v0}$$

Calor latente de vaporización del agua, J kg^{-1}

$$\lambda = 1000000.0 (2.501 - (0.002361T_g))$$

Evapotranspiración del cultivo, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$$E_{pd} = \frac{A[1 - \exp(-KLAI)]I_o}{\lambda} + \frac{B_d LAID_i}{\lambda}$$

$$E_{pn} = \frac{B_n LAID_i}{\lambda}$$

Déficit de presión de vapor, Pa

$$D_i = P_s - P_g$$

Presión parcial de vapor, Pa

$$P_g = \frac{W_g P_{atm}}{W_g + 0.6219}$$

Tasa de intercambio de vapor de agua por infiltración y ventilación, W m^{-2}

$$E_v = \frac{\rho_a F_v}{A_g} (W_g - W_o)$$

Energía absorbida por el invernadero, W m^{-2}

$$q_{rg} = \mu_g I_o$$

Pérdida de calor por infiltración y ventilación, W m^{-2}

$$q_v = \frac{\rho_a c_p F_v}{A_g} (T_g - T_o)$$

Pérdida de calor por conducción y convección, W m^{-2}

$$q_{cc} = U_c \left(\frac{A_c}{A_g} \right) (T_g - T_o)$$

Intercambio de calor entre la masa térmica y el aire interior, W m^{-2}

$$q_{mg} = U_{mg} (T_m - T_g)$$

Energía almacenada por la masa térmica durante el día, W m^{-2}

$$q_{rm} = \mu_m \mu_g I_o$$

Pérdida de calor hacia el subsuelo, W m^{-2}

$$q_d = U_d (T_m - T_d)$$

Tasa fotosintética de un dosel cerrado,

$$f_r = \frac{\varepsilon R_n f_{phot1}}{\varepsilon R_n + f_{phot1}}$$

Luz interceptada por el cultivo

$$L_{inter} = 1 - e^{-K*LAI}$$

Es la tasa (corregida) de respiración de mantenimiento de una unidad de tejido

$$M_r = R_r \exp \left(b(T_g - T_{ref}) \right)$$

Materia seca efectiva del cultivo, kg m⁻²

$$D_m = D_m$$

Es la porción de fotosíntesis neta del dosel cerrado a saturación de luz y temperatura ambiente

$$f_{phot1} = B_r + \alpha(T_g - T_{ref}) + \beta(T_g - T_{ref})^2$$

Índice de área foliar, adimensional

$$LAI = \lambda_{LAI} * m * D_m$$

II.2 Parámetros del modelo

K_g Capacidad virtual del calor del invernadero, W s m² °C⁻¹.

K_m Capacidad virtual de la masa térmica del invernadero, W s m² °C⁻¹.

ρ_a Densidad del aire, kg m⁻³.

V_g Volumen del invernadero, m³.

z Altitud del lugar, m.

k_e Coeficiente de extinción del cultivo, adimensional.

μ_g Factor de conversión de radiación, adimensional.

C_v Coeficiente de eficiencia de ventilación, m^{-2} .

F_{v0} Tasa de infiltración, m s^{-1} .

A Coeficiente para calcular la evapotranspiración en el día, adimensional.

B_d Coeficiente para calcular la evapotranspiración en el día, $\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$.

B_n Coeficiente para calcular la evapotranspiración en la noche, $\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$.

C_p Capacidad de calor específica del aire a presión constante, $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$.

A_g Área de piso del invernadero, m^2 .

U_c Coeficiente global de transferencia de calor de la cubierta, $\text{W m}^2 \text{°C}^{-1}$.

U_d Coeficiente de conductividad entre la masa térmica y el subsuelo, $\text{W m}^2 \text{°C}^{-1}$.

A_c Área de la cubierta del invernadero, m^2 .

U_{mg} Coeficiente global de transferencia de calor entre el aire exterior y la masa térmica, adimensional.

μ_m Eficiencia térmica de la masa térmica, adimensional.

ε Eficiencia fotosintética, kg kg^{-1} .

m Fracción destinada a materia seca total, adimensional.

R_r Coeficiente constante involucrado en la tasa (corregida) de respiración de mantenimiento de una unidad de tejido, s^{-1} .

b Coeficiente constante involucrado en la tasa (corregida) de respiración de mantenimiento de una unidad de tejido, adimensional.

T_{ref} Temperatura de referencia, $^{\circ}\text{C}$.

B_r Coeficiente involucrado con la tasa de fotosíntesis bruta del dosel cerrado a temperatura de saturación y temperatura ambiente, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

α Coeficiente involucrado con la tasa de fotosíntesis bruta del dosel cerrado a temperatura de saturación y temperatura ambiente, $\text{kg m}^{-2} ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

β Coeficiente involucrado con la tasa de fotosíntesis bruta del dosel cerrado a temperatura de saturación y temperatura ambiente, $\text{kg m}^{-2} ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{s}^{-1}$.

λ_{LAI} Coeficiente involucrado en el cálculo del índice de área foliar, kg m^2 .

T_d es la temperatura del subsuelo a profundidad de referencia, $^{\circ}\text{C}$.

II.3 Entradas

I_0 Es la radiación global incidente sobre el invernadero, W m^{-2} .

T_0 Es la temperatura del aire exterior $^{\circ}\text{C}$.

v_o Es la velocidad del viento exterior m s^{-1} .

w_o Es la humedad específica del aire exterior $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ de aire.

A_w Es el área total de la abertura de ventilación m^2 .

q_h Es el flujo de calor del sistema de calefacción W m^{-2} .

II.4 Estados

T_g , Temperatura del aire, $^{\circ}\text{C}$.

T_m , Temperatura de la masa térmica, $^{\circ}\text{C}$

W_g , Humedad específica, kg kg^{-1}

D_m , Materia seca total, kg m^{-2}

II.5 Representación en forma de espacio de estados

Vector de estados

$$x(t) = \begin{bmatrix} T_g(t) \\ T_m(t) \\ W_g(t) \\ D_m(t) \end{bmatrix}$$

Vector de parámetros

$$p = \begin{bmatrix} K_g \\ K_m \\ \rho_a \\ V_g \\ z \\ k \\ \mu_g \\ T_d \\ C_v \\ F_{v0} \\ C_p \\ A_g \\ U_c \\ U_d \\ A_c \\ U_{mg} \\ \mu_m \\ \varepsilon \\ m \\ R_r \\ b \\ T_{ref} \\ B_r \\ \alpha \\ \beta \\ \lambda_{LAI} \\ A \\ B_d \\ B_n \end{bmatrix}$$

Número de parámetros: 29

Vector de perturbaciones

$$d(t) = \begin{bmatrix} I_o(t) \\ T_o(t) \\ v_o(t) \\ w_o(t) \end{bmatrix}$$

Vector de controles

$$u(t) = \begin{bmatrix} A_w(t) \\ q_h(t) \end{bmatrix}$$

Vector de condiciones iniciales

$$x_0(0) = \begin{bmatrix} T_g(0) \\ T_m(0) \\ W_g(0) \\ D_m(0) \end{bmatrix}$$

Vector de salidas

$$y(t) = \begin{bmatrix} T_g(t) \\ T_m(t) \\ \frac{100 * W_g(t) * P_{atm}}{(0.622 + W_g(t)) * P_g} \\ D_m(t) \end{bmatrix}$$

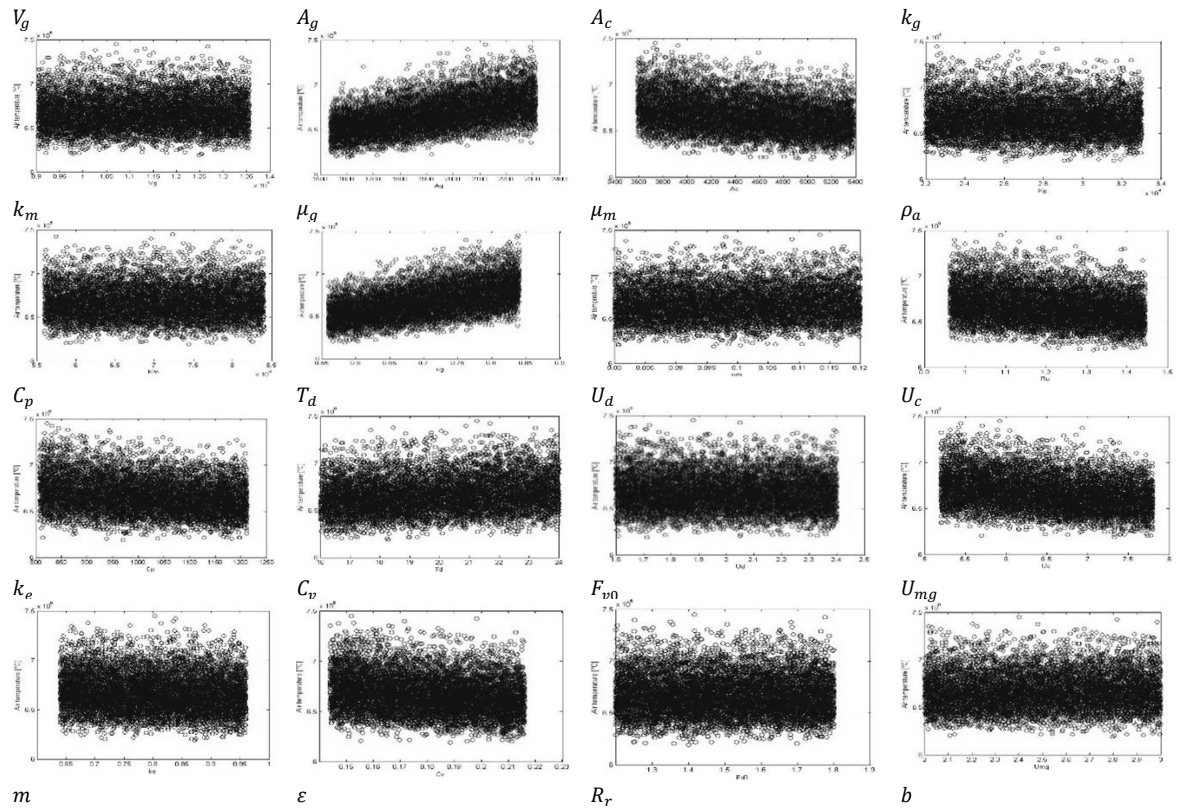
APÉNDICE III **Información adicional del análisis de sensibilidad global usando el método de Coeficientes de Regresión Estandarizados**

El Cuadro 21 muestra los valores de R para cada una de las variables de salida del modelo.

Cuadro 21. Valores de R para cada variable de salida

	Temperatura del aire	Temperatura de la masa térmica	Humedad relativa	Biomasa
R	0.978	0.991	0.949	0.868

La Figura 243 muestra las gráficas de dispersión de los parámetros y la temperatura del aire.



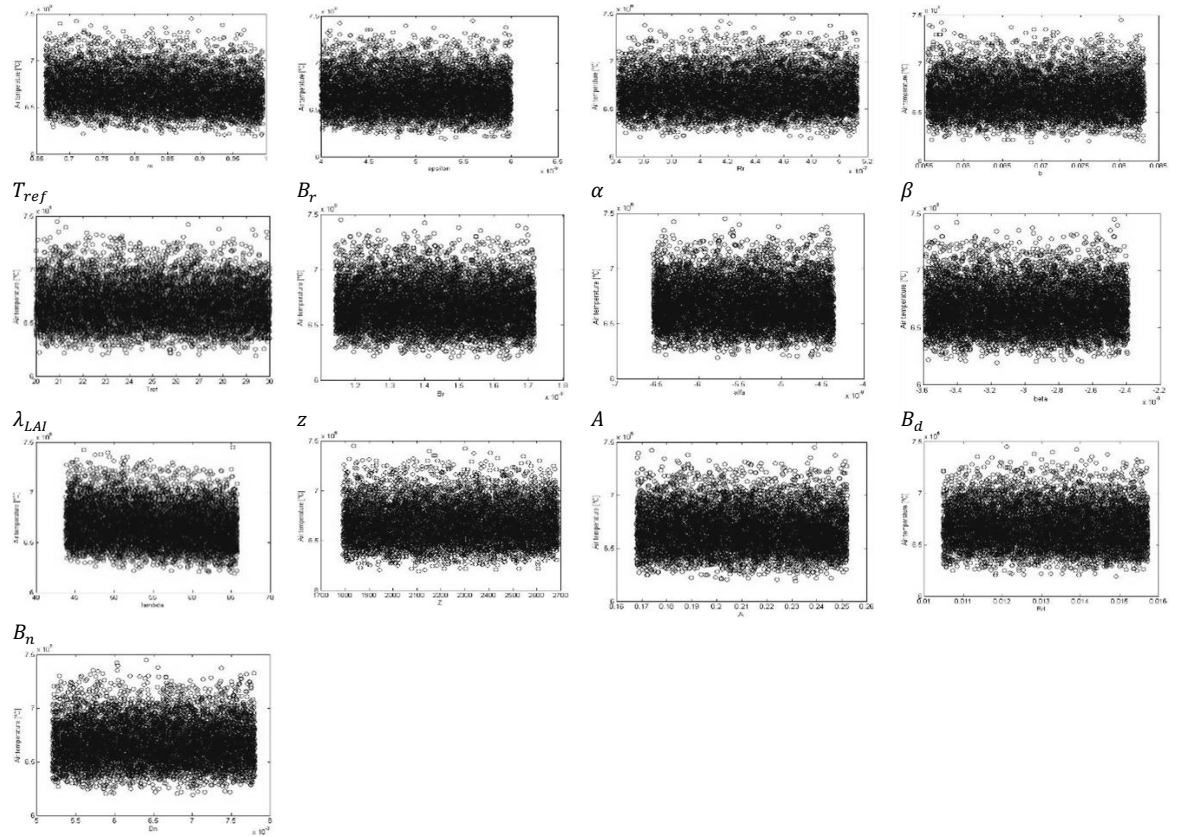
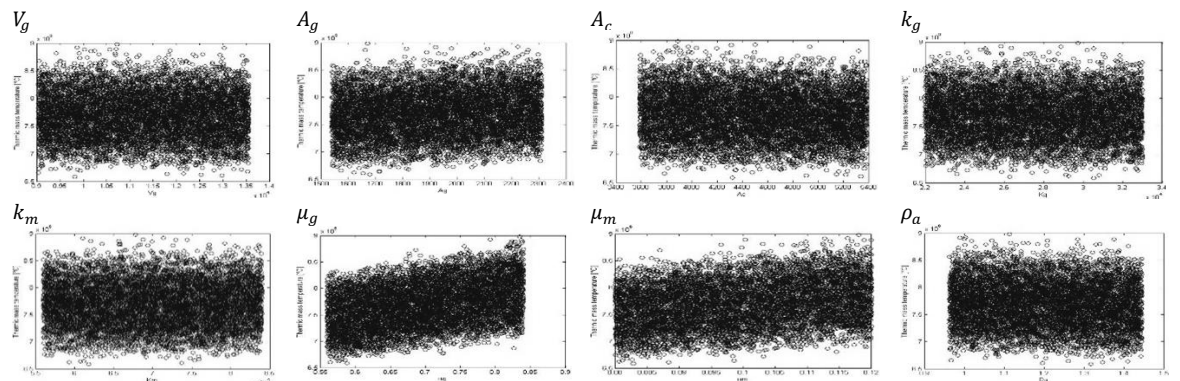


Figura 243. Gráficas de dispersión de la temperatura del aire con respecto a cada parámetro del modelo.

La Figura 244 muestra las gráficas de dispersión de los parámetros y la temperatura de la masa térmica.



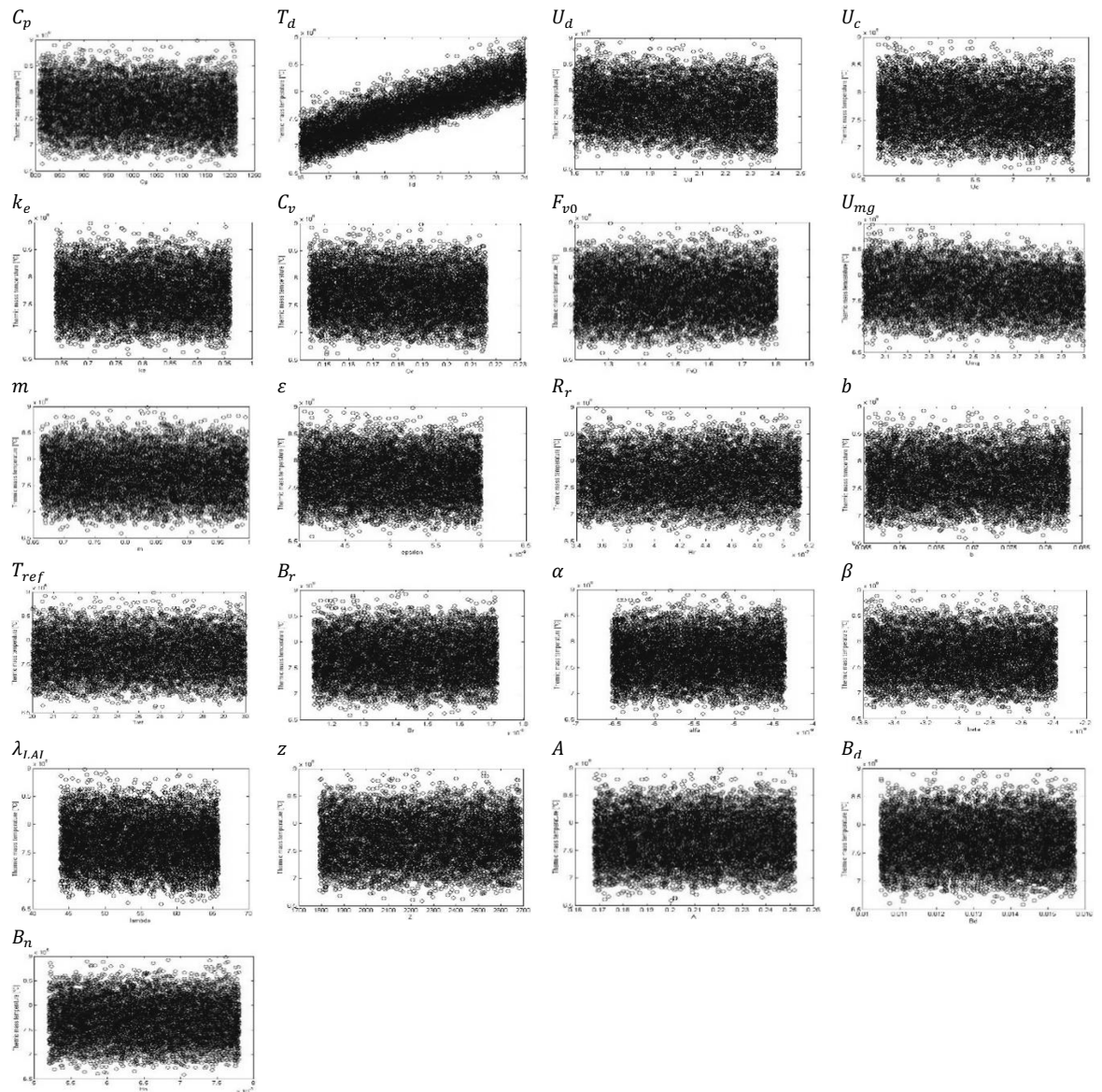
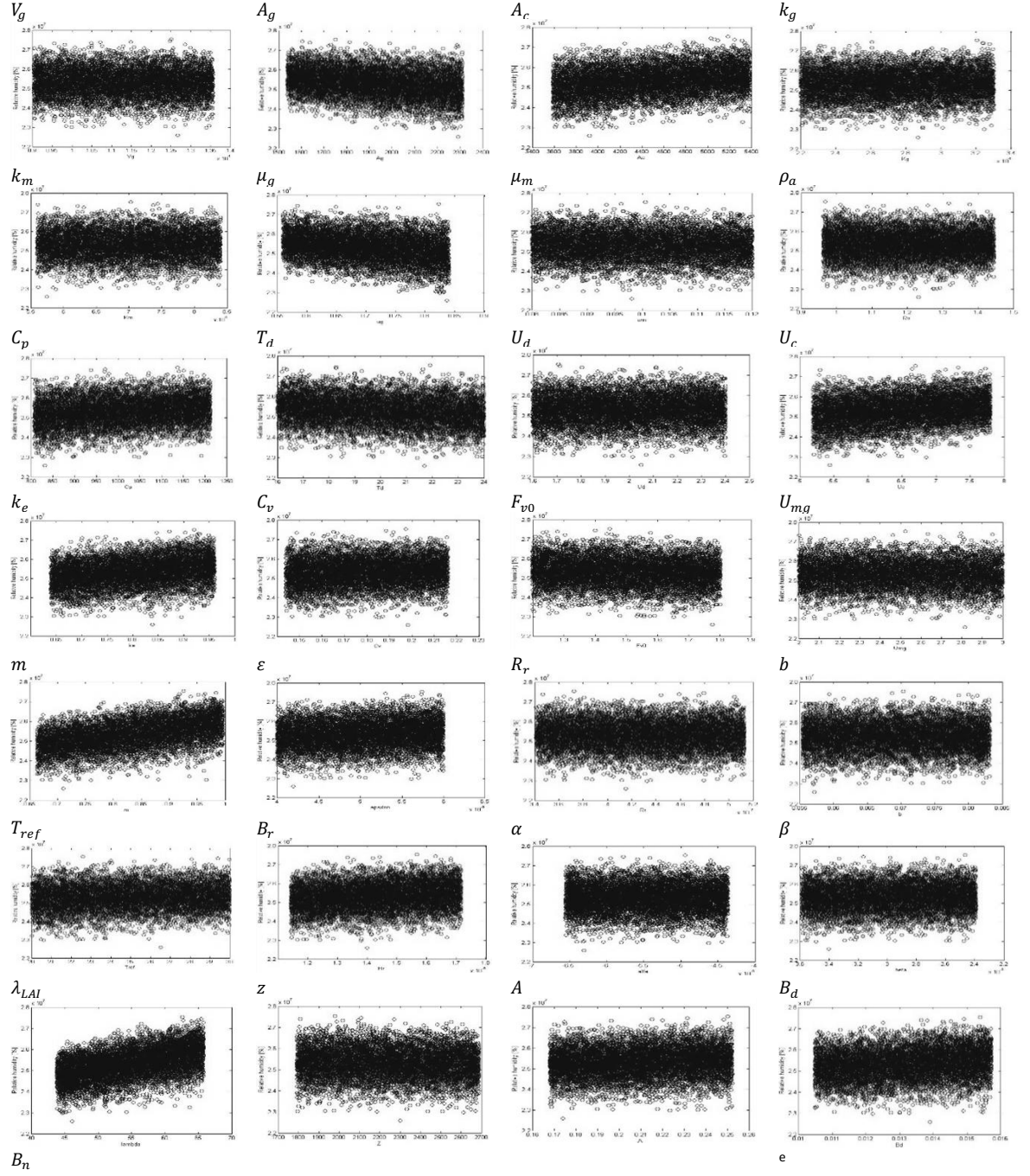


Figura 244. Gráficas de dispersión de la temperatura de la masa térmica con respecto a cada parámetro del modelo.

La Figura 245 muestra las gráficas de dispersión de cada parámetro y de la humedad relativa.



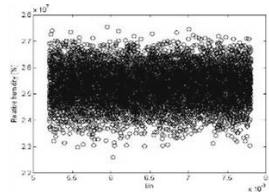
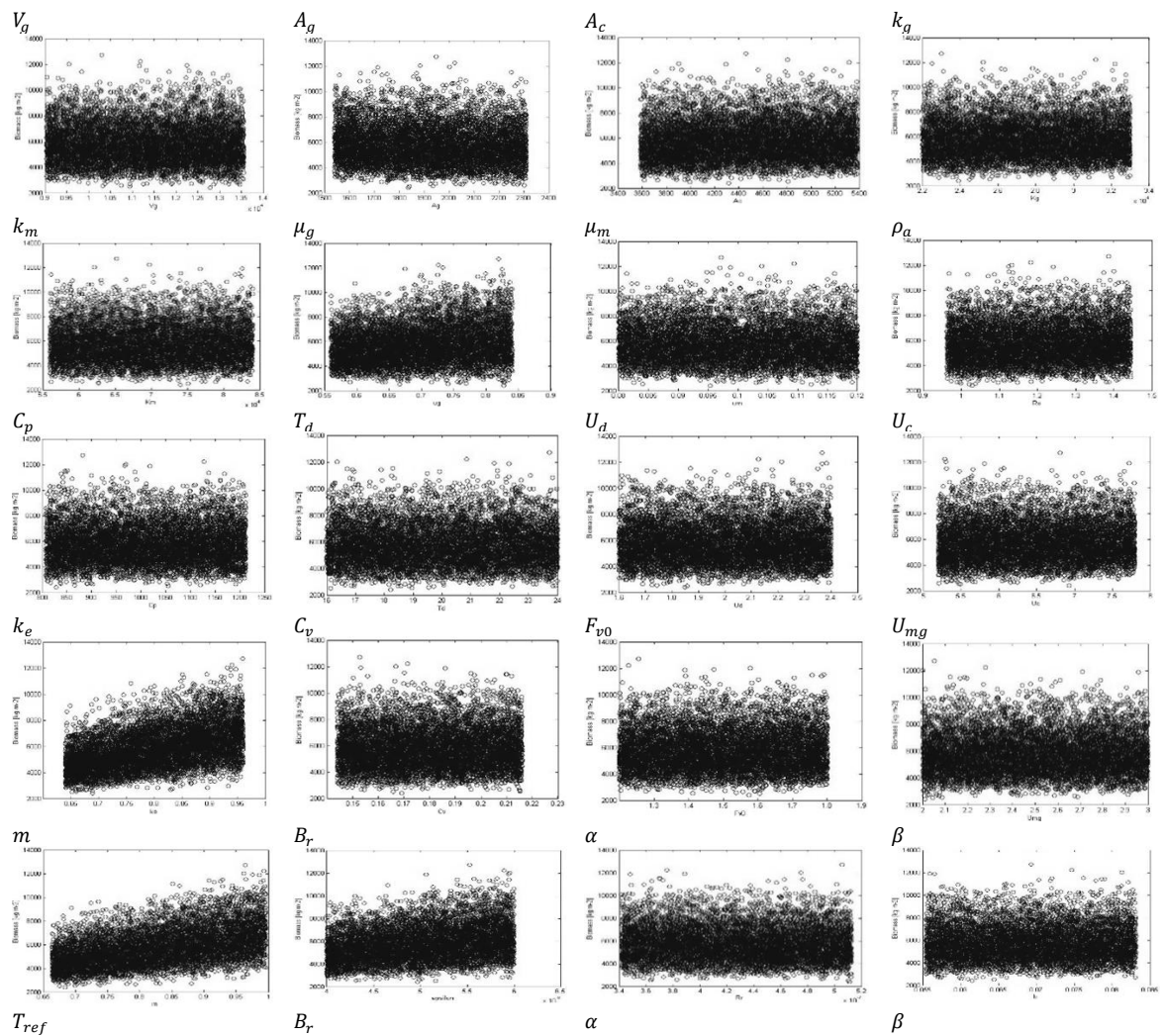


Figura 245. Gráficas de dispersión de la humedad relativa con respecto a cada parámetro del modelo.

La Figura 246 muestra las gráficas de dispersión de cada parámetro y de la biomasa.



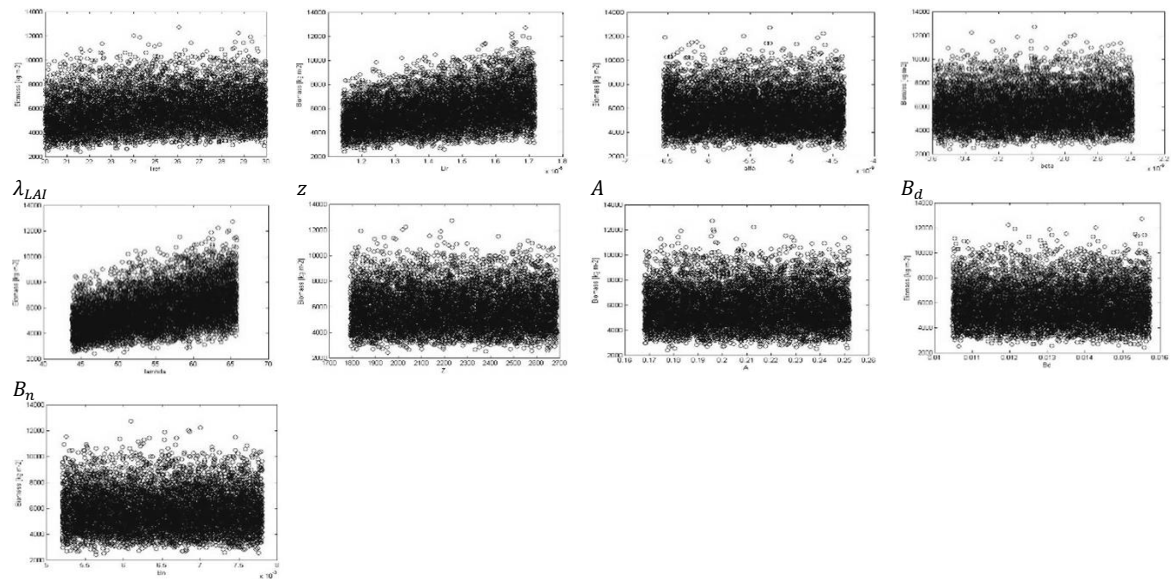


Figura 246. Dispersión de biomasa con respecto a cada parámetro del modelo.