



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO

EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE LAS OLAS DE CALOR EN  
LA REPÚBLICA MEXICANA**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A :

**JOSÉ LUIS HERRERA ALANÍS**

TUTOR

**DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL**  
FACULTAD DE INGENIERÍA

**MÉXICO, D. F. Diciembre 2012**



**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

SECRETARIO: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

VOCAL: DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

1° SUPLENTE: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

2° SUPLENTE: DRA. LILIA REYES CHÁVEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

**Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.**

**TUTOR DE TESIS:**

DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

---

**FIRMA**



## Agradecimientos

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** que ha sido mi casa por tantos años. Primero por darme la oportunidad de embarcarme en esta travesía, y segundo por el apoyo a través de la beca otorgada sin la cual todo hubiera quedado en buenos deseos.

Al **Instituto de Ingeniería**, en el cual tuve la oportunidad de conocer y convivir con grandes amigos. Participar en diversos proyectos con lo que vislumbre un poco el panorama de todo lo que me falta por hacer, y por último, por el apoyo económico otorgado en la etapa final de este proyecto a través de una beca.

Al **Dr. Carlos Escalante**, por su asesoría en la realización y culminación de este trabajo.

A los doctores **Ramón Domínguez Mora, Jesús Gracia Sánchez, Rodolfo Silva Casarín y Lilia Chávez Reyes**. Por sus comentarios, ayuda, consejos y enseñanzas que resultaron muy valiosos y que tendré siempre presente, de los cuales procuré utilizar en este trabajo y usaré a lo largo de mi vida profesional y personal.

Al ingeniero **Víctor Franco**, por todo su apoyo y ayuda que me ofreció a lo largo de estos años, por tener siempre la abierta la puerta y escuchar a todos, sobre todo a los becarios.

Al ingeniero **Antonio Capella Vizcaíno**, por tener la fortuna de participar en algunos de sus tantos proyectos, por su paciencia para explicarme un montón de cosas que desconocía y aún desconozco, por enseñarme a aterrizar ideas, en algo tan sencillo como en la servilleta de una cafetería, por tratar de hacer de mi un buen ingeniero.

A todos mis amigos del Instituto, los que siguen y los que estuvieron. Con lo que compartí una comida, un café, un juego de fútbol, una ida a algún congreso, participamos juntos en algún proyecto o simplemente una charla en algún pasillo. Tanto investigadores, técnicos académicos, personal de confianza o por honorarios. Sin importar estatus, edificio, coordinación o área, gracias por todos los momentos que estuvimos juntos y si la vida así lo quiere, por los momentos que nos faltan por vivir.

A mis padres **Esteban Herrera Ramírez, Margarita Alanís Rodríguez** y mi hermana **Verónica Herrera Alanís**, por su apoyo siempre y en todo momento. Por su comprensión y paciencia, ya que en muchas ocasiones llego a ser una persona realmente insoportable y sin embargo, siempre están ahí. Gracias, de verdad muchas gracias por todo.



## Contenido

Introducción .....	25
1 Aspectos Básicos .....	29
1.1 Regresión Lineal Múltiple .....	29
1.2 Pruebas de Significancia .....	30
1.3 Observaciones influyentes .....	31
1.4 Técnicas de interpolación.....	32
1.4.1 Definiciones.....	33
1.4.2 Método de Interpolación Polinomial .....	33
1.4.3 Aproximación de LaGrange .....	35
1.4.4 Método de Interpolación Inversa .....	36
1.4.5 Método de Interpolación Multicuadrática .....	37
1.4.6 Método de Interpolación Óptima .....	38
1.4.7 Estimación de la función de correlación espacial .....	40
1.4.8 Método de Interpolación Kriging .....	41
1.4.9 Método de Interpolación Kriging Ordinario y Restringido .....	41
1.4.10 Método de Interpolación Kriging Universal .....	42
1.4.11 Estimación del Variograma .....	43
1.5 Funciones de distribución de probabilidad mixta .....	44
1.6 Análisis de sequías.....	46
1.6.1 Índices de la Sequía .....	46
1.6.2 Porcentaje de la normal .....	46
1.6.3 Variabilidad de la Precipitación Anual .....	46
1.6.4 Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) .....	47
1.6.5 Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) .....	47
1.6.6 Índice de Palmer de Sequía Hidrológica (PHDI) .....	48
1.6.7 Índice de Humedad de los cultivos (CMI) .....	48
1.6.8 Deciles de la precipitación .....	48
1.7 Evaporación .....	49
1.7.1 Fórmulas empíricas .....	50
2 Análisis de Información existente .....	53
2.1 Análisis de datos de estaciones.....	53

2.2	Características climáticas .....	58
2.2.1	Aguascalientes .....	58
2.2.2	Sonora .....	61
2.2.3	Tamaulipas .....	64
2.2.4	Chiapas .....	67
2.2.5	Yucatán.....	70
2.3	Criterios existentes de Olas de Calor .....	73
2.3.1	Umbrales Absolutos .....	73
2.3.2	Umbrales Relativo .....	76
2.4	Análisis de los criterios existentes de las Olas de Calor .....	78
3	Estudio de la Ola de Calor .....	81
3.1	Criterios Propuestos para la determinación de las Olas de Calor .....	82
3.1.1	Primer Criterio.....	82
3.1.2	Segundo Criterio .....	82
3.2	Parámetros de las Olas de Calor del primer criterio .....	83
3.3	Parámetros de las Olas de Calor del segundo criterio .....	87
3.4	Relación de las Olas de Calor y otras variables climáticas .....	88
4	Aplicación de los criterios de la Ola de Calor .....	95
4.1	Aplicación del Primer Criterio de Ola de Calor en el estado de Aguascalientes .....	95
4.2	Aplicación del Primer Criterio de Ola de Calor en la República Mexicana.....	107
4.3	Aplicación del Segundo Criterio de Ola de Calor en el estado de Aguascalientes.....	112
4.4	Aplicación del Segundo Criterio de Ola de Calor en la República Mexicana .....	120
4.5	Umbrales de la Ola de Calor en sitios no medidos.....	124
5	Estimación de los impactos.....	127
5.1	Relación de rendimientos en el sector agrícola .....	131
5.1.1	Relación de rendimientos con el primer criterio .....	131
5.1.2	Relación de rendimientos con el segundo criterio .....	148
5.1.3	Análisis de sequía en el sector agrícola .....	159
5.1.4	Comentarios sobre las relaciones en el sector agrícola.....	162
5.2	Relación de rendimientos en el sector ganadero .....	168
5.2.1	Relación de rendimientos con el primer criterio .....	168
5.2.2	Relación de rendimientos con el segundo criterio .....	180
5.2.3	Análisis de sequía en el sector ganadero .....	190
5.2.4	Comentarios sobre las relaciones en el sector ganadero .....	192
5.3	Relación de Marginalidad y las Olas de Calor .....	198



5.4	Comparación de resultados en el cálculo de la evaporación.....	199
6	Conclusiones y observaciones .....	203
7	Referencias bibliográficas .....	209
I.	Anexos.....	213
	Programas desarrollados en MATLAB.....	213
I.1	Modelos de interpolación .....	213
I.1.1	Interpolación polinomial.....	214
I.1.2	Aproximación de Lagrange .....	214
I.1.3	Interpolación Distancia inversa.....	215
I.1.4	Interpolación Distancia inversa al cuadrado.....	216
I.1.5	Interpolación Distancia inversa óptima .....	216
I.1.6	Interpolación Multicuadrática con multiplicador de Lagrange .....	217
I.1.7	Interpolación Óptima lineal .....	218
I.1.8	Interpolación Óptima potencial .....	219
I.1.9	Interpolación Kriging lineal .....	219
I.1.10	Interpolación Kriging monómico .....	220
I.2	Análisis de la Ola de Calor .....	221
I.2.1	Programa para determinar las Olas de Calor con el primer criterio .....	221
I.2.2	Subrutina para determinar los parámetros estadísticos y umbral del primer criterio .....	221
I.2.3	Programa para determinar los parámetros de las Olas de Calor de acuerdo al primer criterio 222	
I.3	Programa para determinar las Olas de Calor con el segundo criterio.....	223
I.4	Programa para determinar el día de inicio y término de las Olas de Calor .....	224
I.5	Programa para determinar las fechas de los eventos con una probabilidad seleccionada .....	226
I.6	Programa para realizar las gráficas automáticamente .....	227
I.6.1	Subrutina para realizar gráficas automáticas .....	228

## Índice de mapas

Mapa 2. 1 Ubicación de las Estaciones antes de los filtros .....	54
Mapa 2. 2 Ubicación de las estaciones después de los filtros .....	54
Mapa 2. 3 Ubicación del municipio San José Gracia, en el estado de Aguascalientes .....	58
Mapa 2. 4 Ubicación del Municipio de Cajeme, en el estado de Sonora .....	61
Mapa 2. 5 Ubicación del municipio Llera, en el estado de Tamaulipas .....	64
Mapa 2. 6 Ubicación del municipio Tuxtla Gutiérrez, en el estado de Chiapas .....	67
Mapa 2. 7 Ubicación del municipio Santa Elena, en el estado de Yucatán .....	70
Mapa 4.1 Umbrales de la serie de temperatura máxima. Aguascalientes, México .....	96
Mapa 4.2 Umbrales de la serie de temperatura mínima. Aguascalientes, México .....	96
Mapa 4.3 Elevaciones en el estado de Aguascalientes .....	97
Mapa 4.4 Tipo de clima para el estado de Aguascalientes .....	97
Mapa 4.5 Total de eventos de Ola de Calor registrados en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México .....	98
Mapa 4.6 Duración promedio de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México .....	98
Mapa 4.7 Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México .....	99
Mapa 4.8 Mes más probable de aparición de la Ola de Calor. Aguascalientes, México .....	99
Mapa 4.9 Probabilidad de que ocurra al menos una Ola de Calor en un año. Aguascalientes, México .....	100
Mapa 4.10 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 2 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México .....	100
Mapa 4.11 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 3 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México .....	101
Mapa 4.12 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 4 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México .....	101
Mapa 4.13 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 5 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México .....	102
Mapa 4.14 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración entre 6 y 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México. ....	102
Mapa 4.15 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración mayor de 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México. ....	103
Mapa 4.16 Día de inicio de la temporada de Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México .....	103
Mapa 4.17 Día de término de la temporada de Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México .....	104
Mapa 4.18 Duración de la temporada de la Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México .....	104
Mapa 4.19 Umbral máximo en la República Mexicana .....	107
Mapa 4.20 Umbral Mínimo en la República Mexicana .....	108
Mapa 4.21 Número de eventos registrados en el periodo de 1968 a 2005 en la República Mexicana .....	108

Mapa 4.22 Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005 en la República Mexicana .....	109
Mapa 4.23 Mes más probable de aparición de la Ola de Calor en la Republica Mexicana .....	109
Mapa 4.24 Probabilidad de que ocurra al menos una Ola de Calor en un año en la República Mexicana .....	110
Mapa 4.25 Día de inicio de la temporada de la Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ en la República Mexicana .....	110
Mapa 4.26 Día de Término de la Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ en la República Mexicana .....	111
Mapa 4.27 Duración de la temporada de la Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ en la República Mexicana .....	111
Mapa 4.28 Total de eventos de Ola de Calor registrados en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México.....	112
Mapa 4.29 Duración promedio de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México.....	113
Mapa 4.30 Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México.....	113
Mapa 4.31 Mes más probable de aparición de la Ola de Calor. Aguascalientes, México .....	114
Mapa 4.32 Probabilidad de que ocurra al menos una Ola de Calor en un año. Aguascalientes, México.....	114
Mapa 4.33 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 2 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.....	115
Mapa 4.34 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 3 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.....	115
Mapa 4.35 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 4 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.....	116
Mapa 4.36 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 5 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.....	116
Mapa 4.37 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración entre 6 a 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.....	117
Mapa 4.38 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración mayor a 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.....	117
Mapa 4.39 Día de inicio de la temporada de Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México.....	118
Mapa 4.40 Día de término de la temporada de Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México.....	118
Mapa 4.41 Días de duración de la temporada de Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México.....	119
Mapa 4.42 Periodicidad de aparición de las Olas de Calor para un mismo año. ....	119
Mapa 4.43 Número de eventos de Ola de Calor registrados en el periodo de 1968 a 2005 en la República Mexicana .....	120
Mapa 4.44 Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005 en la República Mexicana .....	121
Mapa 4.45 Mes más probable de aparición de la Ola de Calor en la República Mexicana .....	121
Mapa 4.46 Probabilidad de que ocurra al menos una Ola de Calor en un año en la República Mexicana .....	122

Mapa 4.47 Día de Inicio de la temporada de Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ en la República Mexicana .....	122
Mapa 4.48 Día de termino de la temporada de la Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ en la República Mexicana .....	123
Mapa 4.49 Duración de la temporada de la Ola de Calor para una $G(x)=0.95$ en la República Mexicana .....	123
Mapa 4.50 Periodicidad de aparición de las Olas de Calor para un mismo año en la República Mexicana .....	124
Mapa 5. 1 Municipios con marginalidad alta y muy alta. Primer criterio. ....	198
Mapa 5. 2 Municipios con marginalidad muy alta y alta. Segundo criterio .....	199

## Índice de gráficas

Gráfica 2. 1 Precipitación acumulada anual en la estación 1019, Aguascalientes .....	59
Gráfica 2. 2 Distribución mensual de la lluvia en la estación 1019, Aguascalientes .....	59
Gráfica 2. 3 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 1019. Aguascalientes .....	60
Gráfica 2. 4 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 1019. Aguascalientes .....	61
Gráfica 2. 5 Precipitación acumulada anual en la estación 26068. Sonora .....	62
Gráfica 2. 6 Distribución mensual de la lluvia en la estación 26068. Sonora .....	62
Gráfica 2. 7 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 26068. Sonora.....	63
Gráfica 2. 8 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 26068. Sonora .....	63
Gráfica 2. 9 Precipitación acumulada anual en la estación 28044. Tamaulipas.....	65
Gráfica 2. 10 Distribución mensual de la lluvia en la estación 28044. Tamaulipas. ....	65
Gráfica 2. 11 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 28044. Tamaulipas.....	66
Gráfica 2. 12 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 28044. Tamaulipas.....	66
Gráfica 2. 13 Precipitación acumulada anual en la estación 7202. Chiapas.....	68
Gráfica 2. 14 Distribución mensual de la lluvia en la estación 7202. Chiapas .....	68
Gráfica 2. 15 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 7202. Chiapas .....	69
Gráfica 2. 16 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 7202. Chiapas.....	69
Gráfica 2. 17 Precipitación acumulada anual en la estación 31027. Yucatán .....	71
Gráfica 2. 18 Distribución mensual de la lluvia en la estación 31027. Yucatán .....	71
Gráfica 2. 19 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 31027. Yucatán .....	72
Gráfica 2. 20 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 31027. Yucatán .....	72
Gráfica 2. 21 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio Canadiense. Umbral Absoluto .....	73
Gráfica 2. 22 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio 30°C. Umbral Absoluto.....	74
Gráfica 2. 23 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio 35°C. Umbral Absoluto.....	75
Gráfica 2. 24 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio NWS. Umbral Absoluto .....	75
Gráfica 2. 25 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio López. Umbral Relativo .....	76
Gráfica 2. 26 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio NWS percentil 95. Umbral Relativo .....	77
Gráfica 2. 27 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio de NWS percentil 99. Umbral Relativo .....	78
Gráfica 4.1 Lluvia acumulada anual y duración de la Ola de Calor, Estación 1004. Aguascalientes, México.....	105
Gráfica 4.2 Relación de Lluvia vs Ola de Calor, Estación 1004. Aguascalientes, México .....	105

Gráfica 4.3 Lluvia acumulada anual y duración de la Ola de Calor, Estación 1021. Aguascalientes, México.....	106
Gráfica 4. 4 Relación de Lluvia vs Ola de Calor, Estación 1021. Aguascalientes, México .....	106
Gráfica 4.5 Relación entre la Elevación y los Umbrales de la Ola de Calor. ....	125
Gráfica 5. 1 Rendimiento adimensional vs Frecuencia. Datos completos.....	129
Gráfica 5. 2 Rendimiento adimensional vs Frecuencia. Datos depurados .....	129
Gráfica 5.3 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Duración promedio anual. ....	132
Gráfica 5.4 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Duración promedio anual.	132
Gráfica 5.5 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Número de eventos al año.....	133
Gráfica 5.6 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Número de eventos al año. .....	133
Gráfica 5.7 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas. ....	134
Gráfica 5.8 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas. ....	134
Gráfica 5.9 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas máximas. ....	135
Gráfica 5.10 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas máximas.....	135
Gráfica 5.11 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas.....	136
Gráfica 5.12 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas .....	136
Gráfica 5.13 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas mínimas .....	137
Gráfica 5.14 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas mínimas .....	137
Gráfica 5.15 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Severidad promedio anual. ....	138
Gráfica 5.16 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Severidad promedio anual. .....	138
Gráfica 5.17 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Severidad promedio anual adimensional. .....	139
Gráfica 5.18 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional. ....	139
Gráfica 5.19 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura de alivio promedio anual. .....	140
Gráfica 5.20 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura de alivio promedio anual.....	140
Gráfica 5.21 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas. ....	141
Gráfica 5.22 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas.....	141
Gráfica 5.23 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas.....	142

Gráfica 5.24 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas. ....	142
Gráfica 5.25 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas mínimas. ....	143
Gráfica 5.26 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas. ....	143
Gráfica 5.27 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas. ....	144
Gráfica 5.28 Rendimiento adimensional de maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas. ....	144
Gráfica 5.29 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de inicio. ....	145
Gráfica 5.30 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de inicio .....	145
Gráfica 5.31 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de término. ....	146
Gráfica 5.32 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de término. ....	146
Gráfica 5.33 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Días de temporada. ....	147
Gráfica 5.34 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Días de temporada. ....	147
Gráfica 5.35 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Número de eventos por año. ....	149
Gráfica 5.36 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Número de eventos por año. ....	149
Gráfica 5.37 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Duración total anual. ....	150
Gráfica 5.38 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Duración total anual. ....	150
Gráfica 5.39 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual. ....	151
Gráfica 5.40 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual. ....	151
Gráfica 5.41 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Ola de Calor mínima anual. ....	152
Gráfica 5.42 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Ola de Calor mínima anual. ....	152
Gráfica 5.43 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Sensibilidad térmica promedio anual. ..	153
Gráfica 5.44 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Sensibilidad térmica promedio anual. ....	153
Gráfica 5.45 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura esperada promedio anual. ....	154
Gráfica 5.46 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura esperada promedio anual. ....	154
Gráfica 5.47 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de Inicio. ....	155
Gráfica 5.48 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de Inicio. ....	155
Gráfica 5.49 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de Término. ....	156
Gráfica 5.50 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de Término. ....	156
Gráfica 5.51 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de Temporada. ....	157
Gráfica 5.52 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de Temporada. ....	157
Gráfica 5.53 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Frecuencia. ....	158
Gráfica 5.54 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Frecuencia. ....	158
Gráfica 5.55 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el maíz de grano por riego. ....	159
Gráfica 5.56 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el frijol por riego. ....	159

Gráfica 5.57 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para la alfalfa.....	160
Gráfica 5.58 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el maíz de grano por temporal. ....	160
Gráfica 5.59 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el frijol por temporal.....	161
Gráfica 5.60 Rendimiento del ganado bovino vs Duración promedio anual.....	168
Gráfica 5.61 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Duración promedio anual. ....	168
Gráfica 5.62 Rendimiento del ganado bovino vs Número de eventos por año. ....	169
Gráfica 5.63 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Número de eventos por año.....	169
Gráfica 5.64 Rendimiento del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas. ....	170
Gráfica 5.65 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas.....	170
Gráfica 5.66 Rendimiento del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas.....	171
Gráfica 5.67 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas.....	171
Gráfica 5.68 Rendimiento del ganado bovino vs Severidad promedio anual. ....	172
Gráfica 5.69 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Severidad promedio anual.....	172
Gráfica 5.70 Rendimiento del ganado bovino vs Severidad adimensional promedio anual.....	173
Gráfica 5.71 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Severidad adimensional promedio anual.....	173
Gráfica 5.72 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura de alivio promedio anual.....	174
Gráfica 5.73 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura de alivio promedio anual.....	174
Gráfica 5.74 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas. ....	175
Gráfica 5.75 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas .....	175
Gráfica 5.76 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas mínimas.....	176
Gráfica 5.77 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas mínimas .....	176
Gráfica 5.78 Rendimiento del ganado bovino vs Día de inicio. ....	177
Gráfica 5.79 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de inicio.....	177
Gráfica 5.80 Rendimiento del ganado bovino vs Día de término .....	178
Gráfica 5.81 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de término .....	178
Gráfica 5.82 Rendimiento del ganado bovino vs Días de temporada. ....	179
Gráfica 5.83 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de temporada. ....	179
Gráfica 5.84 Rendimiento del ganado bovino vs Número de eventos por año. ....	180
Gráfica 5.85 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Número de eventos por año.....	180
Gráfica 5.86 Rendimiento del ganado bovino vs Duración total anual. ....	181
Gráfica 5.87 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Duración total anual. ....	181
Gráfica 5.88 Rendimiento del ganado bovino vs Intensidad máxima anual .....	182
Gráfica 5.89 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Intensidad máxima anual.....	182
Gráfica 5.90 Rendimiento del ganado bovino vs Ola de calor máxima anual. ....	183



Gráfica 5.91 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Ola de calor máxima anual. ....	183
Gráfica 5.92 Rendimiento del ganado bovino vs Sensibilidad térmica máxima anual.....	184
Gráfica 5.93 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Sensibilidad térmica máxima anual .....	184
Gráfica 5.94 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura máxima anual. ....	185
Gráfica 5.95 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura máxima anual.....	185
Gráfica 5.96 Rendimiento del ganado bovino vs Día de inicio .....	186
Gráfica 5.97 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de inicio.....	186
Gráfica 5.98 Rendimiento del ganado bovino vs Día de término .....	187
Gráfica 5.99 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de término .....	187
Gráfica 5.100 Rendimiento del ganado bovino vs Días de temporada. ....	188
Gráfica 5.101 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Días de temporada.....	188
Gráfica 5.102 Rendimiento del ganado bovino vs Frecuencia. ....	189
Gráfica 5.103 Rendimiento del ganado bovino vs Frecuencia. ....	189
Gráfica 5.104 Relación entre el rendimiento del ganado bovino y el porcentaje de la precipitación. .....	190
Gráfica 5.105 Relación entre el rendimiento del ganado porcino y el porcentaje de la precipitación .....	190
Gráfica 5.106 Relación entre el rendimiento del ganado caprino y el porcentaje de la precipitación .....	191
Gráfica 5.107 Relación entre el rendimiento del ganado ovino y el porcentaje de la precipitación .....	191
Gráfica 5. 108 Humedad relativa vs Temperatura promedio, municipio de Atlacomulco en el Estado de México.....	200
 Gráfica 6.1 Serie de tiempo de temperatura. ....	205
Gráfica 6.2 Temperatura promedio semanal de un año promedio.....	206
Gráfica 6.3 Temperatura promedio semanal, promedio de años sin Olas de Calor .....	206
Gráfica 6.4 Temperatura promedio semanal, promedio de años con Olas de Calor .....	207

## Índice de tablas

Tabla 1. 1 Monomios algebraicos .....	34
Tabla 1.2 Parámetros para la estimación de la Radiación solar y la Evaporación.....	51
Tabla 2. 1 Año de inicio de registro .....	56
Tabla 3. 1 Variables climáticas relacionadas con las Olas de Calor .....	90
Tabla 3.2 Tabla de coeficientes del Modelo de regresión Múltiple y la prueba de significancia .....	91
Tabla 3.3 Resumen de la relación de las Olas de Calor con otras variables climáticas .....	92
Tabla 5.1 Rendimiento anual (ton/ha) por cultivo y forma de riego en el municipio de Aguascalientes, Ags.....	127
Tabla 5.2 Rendimiento del ganado en kg/cab en el municipio de Aguascalientes, Ags.....	128
Tabla 5.3 Estadísticos del Rendimiento adimensional.....	130
Tabla 5.4 Climas y número de municipios .....	130
Tabla 5.5 Parámetros de Ola de Calor del primer criterio en el municipio de Aguascalientes .....	131
Tabla 5.6 Parámetros de Ola de Calor del segundo criterio en el municipio de Aguascalientes .....	148
Tabla 5.7 Parámetros estadísticos de los diferentes cultivos para el clima Seco Templado.....	161
Tabla 5.8 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio. ....	162
Tabla 5.9 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio.....	163
Tabla 5.10 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio. ....	164
Tabla 5.11 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio. ....	165
Tabla 5.12 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio.....	165
Tabla 5.13 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio.....	166
Tabla 5.14 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio. ....	166
Tabla 5.15 de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio. ....	167
Tabla 5.16 Parámetros estadísticos del ganado para el clima seco templado.....	192
Tabla 5.17 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio .....	192
Tabla 5.18 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio.....	193
Tabla 5. 19 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio .....	194
Tabla 5. 20 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio .....	195

Tabla 5. 21 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio.....	195
Tabla 5. 22 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio.....	196
Tabla 5. 23 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio .....	196
Tabla 5. 24 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio .....	197
Tabla 5. 25 Estimación de la evaporación (mm), aplicando la ecuación 1.70 .....	200
Tabla 5. 26 Estimación de la evaporación (mm), aplicando la ecuación 1.72 .....	201



## RESUMEN

Las Olas de Calor son un fenómeno que se ha estudiado poco y tiene grandes efectos en los sectores productivos (agricultura, ganadería, etc.) en el sector de servicios (energía eléctrica, transporte, etc.) y en la salud. En este trabajo se analizan las Olas de Calor en la República Mexicana a través de dos criterios. Estos criterios utilizan umbrales relativos, los cuales se determinan a través de los percentiles. Una vez obtenidos los umbrales, se analizó el fenómeno de la Ola de calor y se proponen parámetros para su estudio, caracterización y análisis. Se elaboraron mapas para cada parámetro y de vulnerabilidad. Se determinaron los efectos de las Olas de Calor en el sector agrícola (maíz, frijol, alfalfa y vid) y en el sector ganadero (bovinos, porcinos, caprinos y ovinos). También se hizo un análisis de la evaporación.

En este trabajo se concluye que los umbrales relativos son los más adecuados para determinar los efectos de las Olas de Calor en los seres vivos. También se observa en el primer criterio que las Olas de Calor son una anomalía de las temperaturas mínimas ya que inician antes de lo esperado. Se observa que las Olas de Calor son eventos cíclicos pero aperiódicos y no guardan ninguna relación con la sequía. Sobre los impactos de las Olas de Calor en la agricultura, las variables que más afectan el rendimiento son: el día de inicio, severidad, duración y temperatura de alivio. En el Sector ganadero son: la duración, el número de eventos y la temperatura de alivio.



## **Abstract**

Heat waves are phenomena that have been few studied. Heat waves have great effects on the productive sectors (agriculture, livestock, etc.), in service sectors (electricity supply, transport, etc.) and the health. In this work, heat waves in Mexico by means of two criteria. These criteria used relative thresholds, which they are determined through percentiles. Heat waves are analyzed with thresholds and parameters are proposed for study, characterization and analysis. Maps were created for each parameter and vulnerability. It is determined the effects of heat waves in agriculture (corn, beans, alfalfa and vine) and livestock (cattle, pigs, goats and sheep). Finally, it made an analysis of evaporation.

This work concluded that relative thresholds are more appropriate to determine the effects of the heat wave in living beings. It is observed in the first criterion that the heat waves are an anomaly of minimum temperatures that started earlier than expected. It is observed that heat waves are cyclical events but aperiodic and there are not relation to drought. On the impacts of the heat waves in agriculture, the variables that most affect yield are: the start day, severity, duration and temperature of relief. In the livestock sector are: duration, the number of events and temperature of relief.





## **Introducción**

El clima es el resultado de un conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan las condiciones habituales o más probables de un punto determinado en la superficie terrestre. Los accidentes geográficos como montañas o mares influyen decisivamente en sus características. Para definir estas características se utilizan los siguientes elementos:

### **Temperatura atmosférica:**

Es el indicador de la energía calórica acumulada en el aire y aunque depende de varios factores como el tipo de sustrato, latitud, etc., su factor más importante es la radiación solar ya que es de esta donde adquiere la mayor cantidad de energía.

### **Humedad del aire:**

Indica la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Depende en gran medida por la temperatura ya que el aire caliente contiene más humedad que el aire frío.

### **Presión atmosférica:**

Es el peso de la masa de aire por cada unidad de superficie, depende de la temperatura y de la altitud.

Estos tres elementos son los que determinan el clima, siendo el viento y la precipitación sus más evidentes y perceptibles consecuencias.

## **Clima**

El clima impacta directamente a la economía de los países, sobre todo en aquellos de escasos recursos. En México el 60% de la agricultura es de temporal, la cual es fuertemente afectada por eventos como la sequía, inundaciones, etc. Estimaciones basadas en producción de maíz (García, Cabrera, Sánchez, & Pérez, 2009) y una relación meteorológica indican que a 6° C arriba de la temperatura óptima (de 22 a 28° C) durante el crecimiento del grano resulta en una pérdida de aproximadamente 10% en EEUU.

En el sector ganadero, el clima guarda relación con la producción de carne y la leche. En Arkansas, en veranos muy calurosos, la producción de leche puede caer hasta un 50%, la reproducción y la lactancia también se ven grandemente disminuidas. Algunos datos indican que únicamente el 10 o 20% de las inseminaciones resultan en embarazos (Went, Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle, 2003).

En el sector salud los impactos son conocidos desde la antigüedad (enfermedades respiratorias en invierno y gastrointestinales en verano). Se ha demostrado que está asociado con cambio en la tasa de nacimientos, con el conteo de esperma, brotes de neumonía, influenza y bronquitis, mortandad, alta concentración de polen y altos niveles de contaminación. Algunos estudios recientes indican que la mortandad durante eventos de calor extremos varía dependiendo de la edad, sexo y raza. Factores asociados con el incremento de riesgo son: el alcoholismo, vivir en edificios mal ventilados y el uso de tranquilizantes. Factores que ayudan a disminuir el riesgo son: ejercicio frecuente, tener aire acondicionado y el consumo abundante de líquidos (Kalkstein & Valimont, 1987), (Ballester, Corella, Pérez-Hoyos, Sáez, & Hervás, 1997) (CM, 2005).

Rara vez, las autoridades reaccionan bien ante las olas de calor. El alcalde de Chicago declaró que la ola de calor de 1995 se había exagerado enormemente. El Ministro de Salud de Francia, afirmó que su ministerio había manejado bien la ola de calor de 2003, pero una comisión parlamentaria concluyó que la precariedad de la gestión política había contribuido al desastre.

**Tabla I. 1 Número de muertos durante la ola de calor de 2003 en Europa (hipertermia y mortalidad excesiva)**

País	OMS	EPI
Francia	14,802	14,802
Alemania	-	7,000
España	59*	4,230
Italia	3,134	4,175
Portugal	2,106	1,316
Inglaterra y Gales	2,045	2,045
Países Bajos	-	1,400
Bélgica	-	150

\*Según la OMS, durante la ola de calor hubo 6.000 muertes, pero sólo se reconoció que esa era la causa en 59 casos.  
Fuentes: Organización Mundial de la Salud, 2004 y Earth Policy Institute, 2003.

### **Eventos Extremos.**

Los eventos extremos climáticos son fenómenos naturales que se pueden presentar en cualquier tiempo y lugar del planeta. Dentro de los eventos extremos se encuentran las Olas de Calor.

Las Olas de Calor son eventos que se han estudiado poco, ya que rara vez causan daños físicos que llamen la atención en comparación con otros eventos extremos como las inundaciones, huracanes, tornados, etc. Sin embargo, los impactos de las Olas de Calor se presentan en todos los sectores productivos de las actividades humanas (ganadería, agricultura, recursos forestales, salud) e incluso en el sector de servicios (agua potable, suministro de energía eléctrica, transporte, etc.). En EEUU y Europa, en los últimos años han aumentado los reportes de mortandad y mortalidad asociadas a eventos de calor extremo; los fallecimientos asociados a las Olas de calor son mucho más altos, por ejemplo National Climatic Data Center en EEUU reportó en 1980 alrededor de 10,000 decesos atribuidos a una ola de calor, en contraste, los fallecimientos provocados por inundaciones, huracanes y ventiscas entre los años 1980 al 2000 fueron de alrededor de 270, con un promedio de 44 fallecimientos por evento (Smoyer-Tomic, Kunh, & Hudson, 2003).

En las Olas de Calor, como en otros eventos climáticos, surgen las siguientes preguntas:

1. ¿Por qué se producen las Olas de Calor?
2. ¿Cuáles son las variables involucradas en las Olas de Calor?
3. ¿Cuáles son los criterios para definir una Ola de Calor?
4. ¿Qué parámetros necesitamos para estudiar y caracterizar una Ola de Calor?
5. ¿Es posible predecir una Ola de Calor y con cuanto tiempo de anticipación?
6. ¿Qué parámetros son mejor simulados para predecir las Olas de Calor?
7. ¿Qué efectos tienen las Olas de Calor en los sectores productivos?
8. ¿Cómo se comporta la Ola de Calor en presencia de otros fenómenos meteorológicos como la sequía?
9. ¿Qué zonas son más susceptibles a las Olas de Calor?

En este trabajo doctoral, se buscará buscaremos contestar la mayoría de estas preguntas.

Por lo tanto, este trabajo doctoral tiene los siguientes objetivos:

- Estudiar, determinar e identificar las Olas de Calor.
- Verificar los criterios existentes en la literatura y en caso de ser necesario, proponer uno.
- Relacionar las Olas de Calor con los impactos en los diferentes sectores.
- Determinar los posibles escenarios con fin de mitigación o adaptación.
- Elaborar mapas de vulnerabilidad y/o riesgo.

Las Aportaciones serán:

- Proponer un criterio que sea aplicable a la República Mexicana para el estudio, análisis, determinación y caracterización de las Olas de Calor.
- Relacionar los eventos de las Olas de Calor con los impactos en algunos sectores productivos.
- Proponer parámetros para comparar eventos en diferentes zonas.

Con estos objetivos y aportaciones, se busca contestar las preguntas de la 2 a la 9. Dejando la primera para otro estudio.

Por cuestiones de espacio no se puede presentar todos los resultados en este documento, por lo que se anexa un CD con los resultados, tablas, gráficas y mapas.



## 1 Aspectos Básicos

En esta parte, se da una breve introducción a los modelos y métodos utilizados en este trabajo doctoral.

### 1.1 Regresión Lineal Múltiple

Esta herramienta permite conocer la asociación y por lo tanto la predicción del evento en estudio. Este tipo de análisis depende mucho de la cantidad de información, ya que siempre existen errores que pueden ser por imprecisión de los datos, el azar y la variabilidad de los eventos, es por esto que cuanto mayor sea la cantidad de observaciones mayor será la precisión y la variabilidad explicada por el azar disminuye.

Los modelos de regresión múltiple, presenta la siguiente forma:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \dots + \varepsilon \quad [1. 1]$$

En donde  $Y$  es la variable dependiente,  $X_i$  son las variables independientes,  $a_i$  son los coeficientes del modelo y el término  $\varepsilon$  es el error. Para determinar los coeficientes se utiliza en método de mínimos cuadrados. A este modelo resulta más conveniente darle un enfoque matricial (por cuestiones de programación), por lo que la expresión anterior se escribe de la siguiente forma (Montgomery & Runger, 2007):

$$Y = XA + \varepsilon \quad [1. 2]$$

Donde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{nk} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{nk} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix}$$
$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Al resolver por mínimos cuadrados, se llega a la siguiente expresión:

$$A = (X'X)^{-1}X'Y \quad [1. 3]$$

Existen diversas técnicas para decidir el modelo que mejor se ajuste a los datos, las principales son (Montgomery & Runger, 2007): el coeficiente de determinación, análisis de residuales y observaciones influyentes.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mide la cantidad en que se reduce la dispersión de la variable dependiente al usar las variables independientes, aunque un valor de  $R^2$  más alto no implica que ese modelo de regresión sea más adecuado ya que al incrementar las variables el valor de  $R^2$  aumenta independientemente si la variable es significativa o no.

El Análisis de residuales determina a través de los residuales como se adapta el modelo a los datos, también se utiliza para determinar si el modelo se puede mejorar por la inclusión de una variable independiente.

Las observaciones influyentes determinan la disposición de los datos en el espacio de las variables dependientes y encuentra puntos “erróneos” o “malos” que al eliminarlos mejora el coeficiente de determinación.

En este trabajo se determinó el mejor modelo a través del Coeficiente de Determinación, él cual viene dado por la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad [1.4]$$

Donde:

$SSE$  Suma de cuadrados de la estimación o errores  
 $SSR$  Suma de cuadrados de la regresión  
 $SST$  Suma de cuadrados totales.

## 1.2 Pruebas de Significancia

Dentro del modelo no todas las variables tienen la misma importancia, de hecho el uso de variables poco significativas trae como consecuencia el aumento del cuadrado medio de los errores lo que indica que esas variables den un mal ajuste del modelo. La hipótesis para determinar el nivel de significancia de los coeficientes son:

$$\begin{aligned} H_0 &= A_i = 0 \\ H_1 &= A_i \neq 0 \end{aligned} \quad [1.5]$$

Si la hipótesis  $H_0$  no se rechaza, entonces la variable  $X_i$  se puede eliminar del modelo. El estadístico de la prueba para esta hipótesis es:

$$T_0 = \frac{A_i}{\sqrt{\sigma^2 C_{ii}}} \quad [1. 6]$$

Donde

$C_{jj}$  Elemento diagonal de  $(X'X)^{-1}$ ,  
 $A_j$  Coeficiente de regresión  
 $\sigma^2$  Cuadrado medio del error o residual y esta dado por:

$$\sigma^2 = \frac{SSE}{n - p} \quad [1. 7]$$

Donde

$SSE$  Suma de los cuadrados de las estimaciones o errores  
 $n$  Número de datos  
 $p$  Número de parámetros

### 1.3 Observaciones influyentes

En el análisis de regresión lineal simple o múltiple, a veces se observan algunos puntos dispersos (outliers) que se encuentran con respecto de la mayoría. La disposición de estos puntos es muy importante para determinar las propiedades del modelo de regresión, ya que pueden influir en gran medida en el coeficiente de determinación, en los coeficientes de regresión o en el cuadrado medio del error.

Estos puntos dispersos puede ser por una mala medición, un error en la captura de datos, entre otras cosas, por lo que deben eliminarse. Aunque también existe la posibilidad que los datos hayan sido tomados correctamente sin embargo es importante determinar de qué manera influyen en el modelo. (Montgomery & Runger, 2007) describe un método desarrollado por Dennis R. Cook, la cual llama Medida de la distancia de Cook, la cual da un buen diagnóstico en la detección de las observaciones influyentes.

La medida de la distancia de Cook, es una medida del cuadrado de la distancia entre la estimación de mínimos cuadrados  $\beta$  basada en las  $n$  observaciones y la estimación obtenida cuando se elimina el punto  $i$  que es el que se va a analizar. Su expresión es la siguiente:

$$D_i = \frac{r_i^2}{p} \frac{h_{ii}}{(1 - h_{ii})} \quad [1. 8]$$

$$r_i = \frac{e_i}{\sqrt{\sigma^2(1 - h_{ii})}} \quad [1. 9]$$

$$h_{ii} = x_i'(X'X)^{-1}x_i \quad [1. 10]$$

Donde:

$D_i$	Medida de la distancia de Cook.
$h_{ii}$	Varianza del valor ajustado de la variable dependiente
$r_i$	Residual studentizado

## 1.4 Técnicas de interpolación

La mayoría de las estaciones climatológicas no tiene datos en forma continua y los datos faltantes pueden ser de un día hasta varios años. Por esta razón debe hacer uso de modelos matemáticos que ayuden a estimar los datos faltantes. Son muchos los factores que afectan la distribución espacial de la variable. Por lo tanto, la estimación adecuada depende del número, de la distribución de las estaciones de medición, así como el método que se emplea para la estimación.

Las técnicas de interpolación han sido muy usadas en la estimación de lluvias máximas y medias. Van desde técnicas sencillas como la regresión lineal hasta muy complejas como las geoestadísticas apoyadas con el uso de algoritmos genéticos o redes neuronales. Las técnicas geoestadísticas actualmente tienen gran auge y se mencionan muchas bondades y ventajas sobre las demás técnicas de interpolación (Deraisme & De Fouquet, 1996), sin embargo su complejidad ha hecho que dichas técnicas no se hayan difundido en el campo profesional así como en escuelas de licenciatura dejándolas solo para estudios de posgrados.

En este trabajo se compararon diferentes técnicas de interpolación para la estimación de los datos faltantes (Herrera Alanís & Escalante Sandoval, En Proceso, 2012): Lagrange (L), Polinomial (P), Inversa de la distancia (ID), Inversa de la distancia al cuadrado (IDC), Inversa de la distancia con el exponente óptimo (IDEO), Multicuadrática (MC), Óptima inversa (OI), Óptima potencial (OP), Óptima exponencial (OE), Kriging lineal (KL), Kriging monómico (KM), Regresión lineal (RL) y múltiple (RM). A cada una de las técnicas se les determinó el error estándar de ajuste (EEA) que es el parámetro que indica cual de todas las técnicas es la que mejor se ajusta a los datos (Escalante & Reyes, Técnicas estadísticas en Hidrología, 2005)

Las técnicas de interpolación se clasificaron en dos tipos: Las técnicas que no utilizan información del sitio en estudio (sitios sin medición); y las segundas necesitan información del sitio de estudio (sitios con poca información). Dentro de las primeras, estas se pueden subdividir en dos: los métodos que hacen uso solamente de las coordenadas de las estaciones de apoyo (L, P, ID, IDC y



MC) y las que usan además alguna variable estadística (OI, OP, OE, KL y KM). Los métodos que usan información del sitio de apoyo usadas en este trabajo son: IDEO, RL y RM.

### 1.4.1 Definiciones

Sean  $X_j$  y  $Y_j$  las coordenadas de un punto  $j$  en un espacio bidimensional,  $P_j$ , una función de las coordenadas  $X_j$  y  $Y_j$ , la que denota el proceso observado en “ $n$ ” estaciones de medición,  $j$  es el subíndice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido ( $j=1,2,...,n$ ),  $P_\varepsilon$  es una estimación del proceso en un punto con coordenadas  $X_\varepsilon$  y  $Y_\varepsilon$ . La estimación puntual se hace de los datos medidos en las “ $n$ ” estaciones y ésta puede ser representada por una combinación lineal pesada de aquellos valores medidos, es decir:

$$P_\varepsilon = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad [1.11]$$

Donde

$W_j$       Peso o factor de peso del punto de muestreo  $j$ .

Esta ecuación es una forma general de la Función de Interpolación llamada *Condición de Linealidad*.

### 1.4.2 Método de Interpolación Polinomial

Este método consiste en ajustar una ecuación global para el área en estudio  $j$ , ésta es función de las coordenadas del sitio a interpolar, empleando una función algebraica o una polinomial, siendo la forma general:

$$P_\varepsilon = \sum_{j=1}^n \alpha_k \phi_k(X_\varepsilon, Y_\varepsilon) \quad [1.12]$$

Donde

$P_\varepsilon$       Valor interpolado en cualquier punto  $(X_\varepsilon, Y_\varepsilon)$   
 $\alpha_k$        $k$ -ésimo monomio en términos de las coordenadas  $(X_\varepsilon, Y_\varepsilon)$   
 $\phi_k(X_\varepsilon, Y_\varepsilon)$       Número total de monomios, determinándose el grado de la función polinomial ajustada en la ecuación.

Los monomios algebraicos en términos de las coordenadas  $X$  y  $Y$  se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 1. 1 Monomios algebraicos**

Grado	k	(X, Y)												m
0	1							1						1
1	2 a 3						X		Y					3
2	4 a 6					$X^2$		$XY$		$Y^2$				6
3	7 a 10				$X^3$		$X^2Y$		$XY^2$		$Y^3$			10
4	11 a 15			$X^4$		$X^3Y$		$X^2Y^2$		$XY^3$		$Y^4$		15
5	16 a 21		$X^5$		$X^4Y$		$X^3Y^2$		$X^2Y^3$		$XY^4$		$Y^5$	21
6	22 a 28	$X^6$		$X^5Y$		$X^4Y^2$		$X^3Y^3$		$X^2Y^4$		$XY^5$	$Y^6$	28

Se desea estimar el arreglo de parámetros  $\alpha_k$  para  $k = 1, 2, \dots, m$  por medio de la minimización de la suma del cuadrado de los errores, el cual está dado por:

$$F = \sum_{j=1}^n (P_j - \bar{P}_j)^2 \quad [1. 13]$$

Derivando la función  $F$  con respecto a los coeficientes  $\alpha_k$  para  $k = 1, 2, \dots, m$  ordenando e igualando la ecuación a cero se obtiene:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \sum_{j=1}^n \phi_k(X_j, Y_j) \phi_i(X_j, Y_j) = \sum_{j=1}^n P_j \phi_k(X_j, Y_j) \quad [1. 14]$$

Para  $k = 1, 2, \dots, m$ .

La sumatoria del lado izquierdo es únicamente función de las coordenadas de los puntos de las estaciones, los cuales están en forma de función polinomial en la ecuación.

Los coeficientes polinomiales,  $\alpha_k$  se obtienen con la siguiente expresión

$$\alpha_k = \sum_{j=1}^n \alpha_{ki} P_j \quad [1. 15]$$

Para  $k = 1, 2, \dots, m$ .

Donde:

$$\alpha_{ki} = \sum_{j=1}^m Y_{ki} \phi_j(X_j, Y_j) \quad [1.16]$$

Para  $k = 1, 2, \dots, m$  e  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Donde:

$Y_{ki}$  Elementos del  $k$ -ésimo renglón y de la  $i$ -ésima columna de la matriz inversa de  $[m \times n]$  cuyos elementos son:

$$\theta_{ki} = \sum_{j=1}^n \phi_k(X_j, Y_j) \phi_i(X_j, Y_j) \quad [1.17]$$

Para

$k = 1, 2, \dots, m$ . renglones  
 $i = 1, 2, \dots, n$ . columnas

Considerando lo anterior, la ecuación  $P_e$  queda de la siguiente forma:

$$P_e = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \phi_k(X_e, Y_e) \right) P_j \quad [1.18]$$

El factor de peso queda expresado como:

$$W_j = \sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \phi_k(X_e, Y_e) \quad [1.19]$$

En la interpolación sobre un área, la matriz con coeficientes  $\alpha_{kj}$  se evalúa sólo una vez, puesto que éste es solamente función de las coordenadas de los puntos de las estaciones. Los factores de peso son determinados a partir de los monomios  $\phi_k(X_e, Y_e)$  en término de las coordenadas del sitio a ser interpolado  $(X_e, Y_e)$ .

### 1.4.3 Aproximación de LaGrange

Esta aproximación es referida algunas veces como Interpolación de LaGrange. Para la aplicación de esta técnica los coeficientes  $\alpha_k$  son evaluados de modo que el proceso  $P$  pase a través de los valores observados en las estaciones. Por lo tanto, esta aproximación requiere que el número de

monomios sea igual al número de estaciones, es decir que  $m = n$ . La ecuación  $P_j$  puede reescribirse como:

$$P_j = \sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \phi_k(X_j, Y_j) \quad [1. 20]$$

Para  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Los coeficientes  $a_k$  se estiman con:

$$a_k = \sum_{j=1}^n \beta_{kj} P_j \quad [1. 21]$$

Para  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Donde:

$\beta_{kj}$  Elemento de la matriz inversa de  $[n \times n]$  con elementos  $\phi_k(X_j, Y_j)$  para  $k = 1, 2, \dots, n$ . monomios (filas) y  $j = 1, 2, \dots, n$ . estaciones (columnas).

Sustituyendo los valores obtenidos de  $a_k$ , la expresión para estimar  $P_e$  es:

$$P_e = \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^n \beta_{kj} \phi_k(X_e, Y_e) \right] P_j \quad [1. 22]$$

Siendo la expresión entre corchetes el factor de peso:

$$W_j = \sum_{k=1}^n \beta_{kj} \phi_k(X_e, Y_e) \quad [1. 23]$$

#### 1.4.4 Método de Interpolación Inversa

Este método se basa en que la influencia de la variable a interpolar es inversamente proporcional a la distancia entre las estaciones de apoyo. Los pesos de la función de interpolación son solamente una función de la distancia entre el punto de interés  $(X_e, Y_e)$  y los puntos de medición  $(X_j, Y_j)$  para  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Considerando la distancia  $d_{ej}$  el peso correspondiente al punto  $(X_j, Y_j)$  está dado:

$$W_j = \frac{F(d_{ej})}{\sum_{j=1}^n F(d_{ej})} \quad [1. 24]$$

Donde:

$F(d_{ej})$  Función dada la distancia  $d_{ej}$ .

Una forma comúnmente usada de la función  $F(*)$  es  $F(d_{ej}) = \left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta$  De acuerdo con lo anterior el factor de peso se escribe como:

$$W_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta} \quad [1. 25]$$

El factor de peso tiende a cero para estaciones muy alejadas al punto de interés (distancia  $d_{ej}$ ). Cuando la potencia  $\beta$  toma valores de 1 o 2 la técnica es llamada como *Interpolación de la Distancia Inversa* o *Interpolación del Cuadrado de la Distancia Inversa* y en estos casos se puede interpolar aunque el punto de interés no tenga datos, si en el punto de interés existen datos se puede recurrir a optimizar el exponente  $\beta$ .

#### 1.4.5 Método de Interpolación Multicuadrática

En este método, la influencia de cada estación de medición está representada por superficies cuadradas o conos y es función de sus coordenadas. La estimación para un punto dado  $(X_e, Y_e)$  se obtiene por la suma de contribuciones de todas las superficies. Esto se expresa como:

$$P_e = \sum_{i=1}^n W_i d_{ei} \quad [1. 26]$$

Donde:

$d_{ei}$  Distancia entre los puntos  $(X_e, Y_e)$  y  $(X_j, Y_j)$

Para estimar los coeficientes  $C_i$  en términos de los factores de pesos, se usa una ecuación para cada punto  $(X_j, Y_j)$  como:

$$P_j = \sum_{i=1}^n C_i d_{ij} \quad [1. 27]$$

Donde:

$C_i$       Coeficiente multicuadrático del punto  $(X_j, Y_j)$   
 $j = 1, 2, \dots, n.$

Los coeficientes  $C_j$  se determinan como:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \delta_{ij} P_j \quad [1. 28]$$

$j = 1, 2, \dots, n.$

Donde  $\delta_{ij}$  es un elemento de la matriz inversa de  $[n \times n]$ , cuyos elementos son las distancias  $d_{ij}$  entre las  $n$  estaciones. Por lo tanto, la ecuación de  $P_e$  se puede escribir como:

$$P_e = \sum_{i=1}^n d_{ei} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} P_j \quad [1. 29]$$

O

$$P_e = \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{i=1}^n \delta_{ij} d_{ei} \right] P_j \quad [1. 30]$$

Y nuevamente los factores de peso para cada estación son:

$$W_j = \sum_{i=1}^n \delta_{ij} d_{ei} \quad [1. 31]$$

$j = 1, 2, \dots, n.$

#### 1.4.6 Método de Interpolación Óptima

Este método consiste en minimizar la varianza del error medio de interpolación, para entonces determinar los factores de peso de cada estación. La varianza del error medio está expresada en términos de los pesos  $W_j$  y de la correlación espacial.

Sea  $\hat{P}_e$  el valor estimado de  $P_e$  por medio de:

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad [1.32]$$

Entonces la minimización de la varianza del error de interpolación  $\sigma_e^2$  será:

$$\sigma_e^2 = VAR[P_e - \hat{P}_e] = VAR\left[P_e - \sum_{j=1}^n W_j P_j\right] \quad [1.33]$$

Donde:

$VAR[*]$  Varianza del error.

Desarrollando, se tiene la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n W_i \rho(d_{ij}) = \rho(d_{ej}) \quad [1.34]$$

Para

$j = 1, 2, \dots, n$ .

Los factores de peso se obtienen al resolver el sistema de ecuaciones lineales. En la ecuación anterior, los valores de la función de correlación espacial para los puntos  $ij$  y el punto  $e$ , así como los factores de peso expresados en forma matricial son:

$$[\rho(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{11}) & \rho(d_{12}) & \dots & \rho(d_{1n}) \\ \rho(d_{21}) & \rho(d_{22}) & \dots & \rho(d_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(d_{n1}) & \rho(d_{n2}) & \dots & \rho(d_{nn}) \end{bmatrix} \quad [1.35]$$

$$[\rho(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \rho(d_{e2}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \end{bmatrix} \quad [1.36]$$

$$[W_i] = [\rho(d_{ij})]^{-1} [\rho(d_{ej})] \quad [1.37]$$

Para que el estimador  $\hat{P}_e$  sea insesgado debe satisfacerse que la suma de los factores de peso sea igual a la unidad, esto es:

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad [1.38]$$

Aplicando el multiplicador de LaGrange ( $\lambda$ ) el sistema lineal de ecuaciones puede resolverse simultáneamente para obtener los factores de peso  $W_j$ , donde los términos matriciales son:

$$[\rho(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{11}) & \rho(d_{12}) & \dots & \rho(d_{1n}) & 1 \\ \rho(d_{21}) & \rho(d_{22}) & \dots & \rho(d_{2n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 1 \\ \rho(d_{n1}) & \rho(d_{n2}) & \dots & \rho(d_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad [1. 39]$$

$$[\rho(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \rho(d_{e2}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad [1. 40]$$

$$[W_i] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} \quad [1. 41]$$

#### 1.4.7 Estimación de la función de correlación espacial

La función de correlación espacial,  $\rho(d_{ij})$ , se obtiene de observaciones entre  $[n(n-1)]/2$  pares de estaciones y la distancia entre ellas. Asumiendo que en el área de estudio el comportamiento de la variable aleatoria  $P$  es homogénea e isotrópica, la función de correlación puede ser representada por alguno de los siguientes modelos:

a) Modelo Inverso:

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \frac{d_{ij}}{c}} \quad [1. 42]$$

b) Modelo de Potencia Inversa:

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{c}\right)^a} \quad [1. 43]$$



c) Modelo Exponencial:

$$\rho(d_{ij}) = e^{-\left(\frac{d_{ij}}{c}\right)} \quad [1. 44]$$

Para hacer el ajuste de las funciones de correlación, en primer lugar, se estiman las correlaciones ente estaciones, así para las estaciones  $i$  y  $j$ , el coeficiente de correlación muestral está dado por:

$$\hat{\rho}(d_{ij}) = \left(\frac{1}{N-1}\right) \frac{\sum_{t=1}^N [P_i^t - \hat{m}_i][P_j^t - \hat{m}_j]}{\hat{S}_i \hat{S}_j} \quad [1. 45]$$

Donde:

$P_i^t$	Observaciones de las series de tiempo del proceso $P$ en la estación $i$ .
$P_j^t$	Observaciones de las series de tiempo del proceso $P$ en la estación $j$ .
$\hat{m}_i$	Media de las observaciones en la estación $i$ .
$\hat{m}_j$	Media de las observaciones en la estación $j$ .
$\hat{S}_i$	Desviación estándar insesgada de las observaciones en la estación $i$ .
$\hat{S}_j$	Desviación estándar insesgada de las observaciones en la estación $j$ .
$N$	Número total de datos históricos en común entre el par de estaciones.

Entonces, para  $n$  estaciones, hay  $[n(n-1)]/2$  pares de estaciones las cuales son usadas en el ajuste de las funciones de correlación espacial.

#### 1.4.8 Método de Interpolación Kriging

Este método es similar a la interpolación óptima, excepto que la función de correlación espacial se reemplaza por el semivariograma. Al igual que la interpolación óptima, la Interpolación Kriging requiere que el proceso observado sea estacionario y de 2º orden. Esencialmente este método supone homogeneidad en las medias, varianzas y covarianzas. Como consecuencia de lo anterior se asume una estructura de covarianza espacial isotrópica. Por consiguiente, la varianza en un punto se representa por  $VAR[P_i] = \sigma^2$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$  estaciones y la covarianza entre las estaciones  $i$  y  $j$  está representada por  $COV(P_i P_j) = COV(d_{ij})$ .

#### 1.4.9 Método de Interpolación Kriging Ordinario y Restringido

La estimación se obtiene con la ecuación [1. 32], pero en este método se minimiza la varianza respecto a los factores de peso. Se obtiene una solución matricial que debe resolverse como un sistema de ecuaciones. Para asegurar que la solución sea insesgada se debe cumplir la ecuación [1. 38], por lo que también se recurre al multiplicador de LaGrange ( $\lambda$ ):

$$[\gamma(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{11}) & \gamma(d_{12}) & \dots & \gamma(d_{1n}) & 1 \\ \gamma(d_{21}) & \gamma(d_{22}) & \dots & \gamma(d_{2n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 1 \\ \gamma(d_{n1}) & \gamma(d_{n2}) & \dots & \gamma(d_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad [1. 46]$$

$$[\gamma(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{e1}) \\ \gamma(d_{e2}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad [1. 47]$$

$$[W_i] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} \quad [1. 48]$$

La solución se puede representar de la siguiente manera:

$$[W_j] = [\gamma(d_{ij})]^{-1} [\gamma(d_{ej})] \quad [1. 49]$$

Para la ecuación:

$$\sum_{i=1}^n W_i \gamma(d_{ij}) + \lambda = \gamma(d_{ej}) \quad [1. 50]$$

#### 1.4.10 Método de Interpolación Kriging Universal

Éste intenta incluir la *no homogeneidad* en la media del proceso. En este método la media  $m_e$ , en el punto  $(X_e, Y_e)$  se representa por una combinación lineal de la media de las estaciones  $m_j$ :

$$m_e = \sum_{j=1}^n W_j m_j \quad [1. 51]$$

En notación matricial que deberá resolver el esquema Kriging Universal es:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdots & \gamma_{1n} & \phi_{11} & \phi_{21} & \cdots & \phi_{m1} \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdots & \gamma_{2n} & \phi_{12} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{m2} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & 0 & \cdots & \gamma_{3n} & \phi_{13} & \phi_{23} & \cdots & \phi_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & 0 & \cdots & 0 & \phi_{1n} & \phi_{2n} & \cdots & \phi_{mn} \\ \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \cdots & \phi_{1n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \cdots & \phi_{2n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{m1} & \phi_{m2} & \phi_{m3} & \cdots & \phi_{mn} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{e1} \\ \gamma_{e2} \\ \gamma_{e2} \\ \vdots \\ \gamma_{en} \\ \phi_{1e} \\ \phi_{2e} \\ \vdots \\ \phi_{me} \end{bmatrix} \quad [1. 52]$$

#### 1.4.11 Estimación del Variograma

- a) Modelo Lineal: Este método es más simple y se escribe como:

$$\gamma(d_{ij}) = ad_{ij} \quad [1. 53]$$

- b) Modelo Monómico: Estos modelos se usan para representar fenómenos estacionarios, siendo de la forma:

$$\gamma(d_{ij}) = ad_{ij}^b \quad [1. 54]$$

Donde

- $b$  Intervalo abierto (0,2).

- c) Modelo Exponencial: Está dado por:

$$\gamma(d_{ij}) = a[1 - \exp(-cd_{ij})]; c > 0 \quad [1. 55]$$

- d) Modelo Gaussiano: la expresión representativa es:

$$\gamma(d_{ij}) = a[1 - \exp(-cd_{ij}^2)]; c > 0 \quad [1. 56]$$

- e) Modelo Esférico: la ecuación está dada por:

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2} a \left[ 3 \frac{d_{ij}}{c} - \left( \frac{d_{ij}}{c} \right)^3 \right] \quad [1. 57]$$

En general,  $a$  y  $c$  son constantes apropiadas del modelo esférico y  $d_{ij}$  es la distancia entre dos puntos.

El semivariograma entre las estaciones  $i$  y  $j$  se calcula como:

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = \frac{1}{2N} \sum_{t=i}^n [(P_i^t - \hat{m}_i) - (P_j^t - \hat{m}_j)]^2 \quad [1. 58]$$

Donde:

- $P_k^t$  Representa las observaciones de la serie de tiempo en la estación  $k$ .
- $\hat{m}_k$  Es la media de la estación  $k$ .
- $N$  Es el número total de observaciones en común entre el par de estaciones.

## 1.5 Funciones de distribución de probabilidad mixta

En diversos análisis probabilísticos se necesita una Función de Distribución de Probabilidades (FDP) que permita el manejo de ceros dentro del registro. La Función Gamma Mixta es una función muy versátil y se ha utilizado con éxito en la estimación de eventos en series que presentan ausencia de datos como es en el caso de las Heladas (Campos Aranda, Heladas, Orígenes, Predicción, Pronóstico y defensa, 2000). Sin embargo al explorar esta función para determinar el día de inicio del evento, el ajuste parece que no se adapta del todo a la muestra, por lo que fue necesario explorar otras Funciones de Distribución de Probabilidad. Las funciones utilizadas fueron: Gumbel, Normal y LogNormal.

Se realizó un análisis de heladas en el estado de Aguascalientes utilizando las FDP mencionadas en el párrafo anterior. De esta exploración, se concluyó que la distribución Normal es la que mejor se ajusta a este tipo de datos (Herrera Alanís & Escalante Sandoval, Comparación de funciones mixtas para la determinación de fechas de inicio y término de la temporada de heladas, 2010).

Las funciones mixtas se evalúan a través de la siguiente expresión:

$$G(x) = q + pF(x) \quad [1. 59]$$

Donde  $q$  es la probabilidad de tener valores nulos (ceros),  $p$  es la probabilidad complemento y  $F(x)$  es la función analizada. Para determinar  $q$  se sigue la siguiente expresión:

$$q = \frac{m}{n} \quad [1. 60]$$

Donde

- $m$  Número de valores nulos en la serie
- $n$  Tamaño del registro.

Dado que  $p$  es el complemento de  $q$ , se tiene que:

$$p = 1 - q \quad [1. 61]$$

A continuación se describe brevemente la FDP Normal.

La expresión de la Función Normal es la siguiente:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad [1. 62]$$

Donde:

$\mu$       Parámetro de ubicación.  
 $\sigma$       Parámetro de escala.

Esta función no tiene inversa, así que se resuelve de forma aproximada con las siguientes expresiones:

$$\hat{X} = \hat{\mu} + \hat{\sigma}U_t \quad [1. 63]$$

$$U_t = V - \frac{b_0 + b_1V + b_2V^2}{1 + b_3V + b_4V^2 + b_5V^3} \quad [1. 64]$$

$$V = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{F(x)^2}\right)} \quad [1. 65]$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 2.515517 \\ b_1 &= 0.802853 \\ b_2 &= 0.010328 \\ b_3 &= 1.432788 \\ b_4 &= 0.189269 \\ b_5 &= 0.001308 \end{aligned}$$

Si  $F(x)$  es mayor a 0.5, se cambia el signo de  $U_t$  y se sustituye  $F(x)^2$  por  $(1-F(x))^2$  de la ecuación [1. 65].

## **1.6 Análisis de sequías**

### **1.6.1 Índices de la Sequía**

Con el fin de comparar las características de la sequía en una o en varias regiones, se han propuesto un conjunto de índices (Escalante & Reyes, Análisis de sequías, 2004), (Herrera Alanís, Efectos de la escasez de agua en el sector agropecuario en el estado de Querétaro, México, 2006). Todos los índices propuestos tienen sus limitaciones y su uso se restringe solo como comparación del impacto y la severidad de la sequía en distintos sitios y épocas. Diversos países y departamentos han adoptado un índice para la toma de decisiones, por ejemplo, el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) es utilizado ampliamente por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos en donde existen grandes áreas con topografía uniforme, en estados con topografía montañosa lo complementan con el Índice de suministro de Agua Superficial; el Centro Nacional de Mitigación de Sequía (NDMC) usa el Índice de la Precipitación Estandarizada para supervisar las condiciones de humedad, ya que este índice identifica los meses de sequía más pronto que el índice de Palmer y se puede calcular para varias escalas de tiempo. A continuación se da una introducción a los índices más usados.

### **1.6.2 Porcentaje de la normal**

Es uno de los índices más sencillos y hace uso solo de los registros de lluvia. Este índice se obtiene al dividir la precipitación entre la precipitación normal, la cual se establece como la precipitación media para un registro de al menos 30 años.

Tiene las siguientes ventajas: es un análisis muy sencillo; es aplicable a diferentes escalas de tiempo; es muy eficaz cuando se compara en una sola región o estación.

Entre las desventajas, se encuentran las siguientes: la precipitación media es diferente a la mediana de la precipitación, debido a que la lluvia no tiene una distribución normal; La comparación entre regiones o estaciones no siempre es adecuada.

### **1.6.3 Variabilidad de la Precipitación Anual**

El coeficiente de variación de la precipitación anual, se utiliza frecuentemente como un Índice de Sequía. Las Sequías son más frecuentes cuando el coeficiente de variación es mayor de 0.35.

En diversos países, incluyendo México, se ha encontrado una relación entre un valor alto del coeficiente de variación y las regiones áridas y semiáridas, que son las regiones más afectadas por la sequía.

#### **1.6.4 Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)**

El SPI está basado en la probabilidad de precipitación para cualquier escala de tiempo y fue diseñado para cuantificar el déficit de precipitación para múltiples escalas temporales.

La comprensión de que el déficit de la precipitación tiene impactos diferentes fue lo que llevó al desarrollo de este índice. Las condiciones de humedad del suelo responden a las anomalías de la lluvia a corto plazo, mientras que el agua subterránea, el escurrimiento y el almacenamiento en presas son una respuesta a las anomalías de la precipitación a largo plazo. Por estas razones, originalmente se calculó el SPI para períodos de 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

El cálculo del SPI se basa en el registro a largo plazo de la precipitación para un período de tiempo específico. Este registro se ajusta a una distribución de probabilidad, la cual es inmediatamente transformada a una distribución normal estándar, tal que el valor medio del SPI para un sitio y periodo deseado es cero. Los valores positivos del SPI indican precipitaciones más grandes que la mediana.

Este índice tiene la ventaja de que puede calcularse para diferentes escalas de tiempo, es menos complejo que el índice de Palmer, proporciona un pronóstico de sequía y puede evaluar su severidad.

#### **1.6.5 Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)**

Muchas veces llamado simplemente como Índice de Sequía de Palmer (PDSI). Es usado como un índice meteorológico, siendo de los más completos ya que involucra a la precipitación, la evapotranspiración, escurrimiento y humedad del suelo.

Palmer basó su índice en el concepto de suministro y demanda a partir de un balance de agua. En el balance no se consideran impactos humanos, como la irrigación o el suministro de agua. Es un índice mensual y estandarizado, así que tiene un significado consistente en diferentes regiones climáticas.

El índice de Palmer es muy popular y ampliamente usado. Algunas de las ventajas de este índice son: proporciona un pronóstico útil para activar programas de contingencia para la sequía; representa espacial y temporalmente las sequías históricas; al involucrar las condiciones de humedad del suelo, es muy utilizado para establecer políticas de operación en distritos de riego.

Dentro de las desventajas, se encuentran las siguientes: Para la estimación de la evapotranspiración se utiliza el método de Thornthwait, aunque esta técnica es ampliamente usada sigue siendo solo una aproximación; no considera el retraso natural entre la precipitación y el escurrimiento; el índice no incluye fenómenos como las nevadas, ventiscas, etc.; el índice es muy sensible a las condiciones de humedad del suelo.

### **1.6.6 Índice de Palmer de Sequía Hidrológica (PHDI)**

El PHDI describe la deficiencia anormal de humedad en el suelo, utilizando el mismo principio que en el PDSI. La principal diferencia es que el inicio y el término de los períodos húmedos y secos, el PHDI responde más lentamente a los cambios en el clima. Esto ocurre ya que el PHDI expresa la humedad recibida como un porcentaje de la humedad requerida para que termine la sequía. La ventaja de este retraso en la respuesta es que mientras el clima puede retornar a la normalidad puede existir déficit en la humedad del suelo, escurrimiento y nivel de los lagos. La respuesta de tiempo más lenta permite la recuperación de esas características hidrológicas y así el índice describe mejor a la sequía hidrológica. Es importante señalar que el valor del PHDI no es lineal y no debe promediarse.

### **1.6.7 Índice de Humedad de los cultivos (CMI)**

El CMI fue desarrollado por Palmer dentro del contexto del PSDI. Este índice emplea una aproximación meteorológica para monitorear semana a semana las condiciones de los cultivos. Así como el PDSI se desarrolló para monitorear las condiciones de humedad o sequía de largo plazo, el CMI fue diseñado para evaluar las condiciones de humedad de corto plazo a lo largo de grandes extensiones agrícolas.

El índice se basa en la precipitación total y la temperatura media de cada semana dentro de una división climática, así como el valor del CMI de la semana previa. El CMI responde rápidamente a las condiciones climatológicas de corto plazo y se puede construir planos que reflejen las variaciones de humedad en diferentes sitios de una región, sin embargo, una fuerte lluvia durante una sequía puede dar como resultado un valor del CMI que indique condiciones adecuadas de humedad, aún cuando las condiciones de sequía no se hayan interrumpido.

### **1.6.8 Deciles de la precipitación**

Esta técnica fue desarrollada por Gibbs y Maher (1967) y consiste en dividir la precipitación en decimos. A cada una de estas divisiones se le conoce con el nombre de Decil. Los límites de cada decil se calculan ordenando la muestra de tamaño " $n$ " de menor a mayor magnitud, el valor más grande registrado se le asigna la variable  $Hp(n)$  y al más pequeño  $Hp(1)$ . Cada decil se obtiene con las siguientes ecuaciones:



$$c = \frac{hp_n - hp_1}{10} \quad [1. 66]$$

$$decil_1 = hp_1 + c \quad [1. 67]$$

$$decil_i = hp_{(i-1)} + c \quad [1. 68]$$

Para  $i = 2, 3, \dots, 10$

Este índice puede ser anual o mensual, y también es útil para representar espacialmente la sequía. Una desventaja es que se necesita una cantidad importante de información para establecer adecuadamente los deciles.

## 1.7 Evaporación

La evaporación es una componente importante en la transferencia de energía y materia a la atmósfera. En ingeniería, la evaporación se refiere a la pérdida de humedad desde una superficie libre como embalses, ríos, lagos, superficies sin cobertura vegetal, etc. La combinación de evaporación y transpiración (agua que despiden las hojas de las plantas en forma de vapor) se le conoce como Evapotranspiración.

La evaporación se produce básicamente por el aumento de la energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercana a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor.

La ley de Dalton expresa que la evaporación es proporcional al gradiente de presión de vapor entre la zona de intercambio y la atmosfera.

$$E = k(e_w - e_a) \quad [1. 69]$$

Donde

$E$	Evaporación
$e_w$	Presión de vapor existente en la zona de intercambio
$e_a$	Presión de vapor de la atmósfera
$k$	Constante de proporcionalidad.

Son dos los factores importantes que intervienen en la evaporación son: Calor latente y transporte. La radiación solar es la principal fuente de energía en forma de calor y la velocidad del aire es la encargada de transportar las moléculas.

Para la determinación de la evaporación, existen diferentes métodos como la de Balance de Energía, métodos aerodinámicos, una combinación del método de Balance de Energía y Aerodinámico, así como métodos empíricos. Para mayor detalle se puede consultar diferente

bibliografía (Aparicio, 2004), (Campos Aranda, Estimación y aprovechamiento del escurrimiento, 2007), (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Dada la calidad y cantidad de información, en este trabajo solo se trabajo con fórmulas empíricas.

### 1.7.1 Fórmulas empíricas

Las fórmulas empíricas son resultado de una búsqueda para estimar la evaporación, con escasa información climatológica, ya que rara vez se tienen mediciones de la velocidad de viento, presión de saturación del aire, presión atmosférica, radiación solar, etc.

De las diversas fórmulas empíricas que existen se mencionan dos, las cuales se pueden consultar más a detalle en Campos Aranda (2007).

La siguiente ecuación está basada en las fórmulas de PENMAN por lo que tiene una base física. Esta ecuación han sido propuesta en Boucher(1997) y Linecre (1977).

$$E = \frac{\frac{700(\bar{T} + 0.006Alt)}{100 - lat} + 15(\bar{T} - T_R)}{80 - \bar{T}} \quad [1. 70]$$

Donde:

$E$	Evaporación en mm.
$Alt$	Altitud en m.
$Lat$	Latitud en m.
$\bar{T}$ :	Temperatura promedio.
$T_R$ :	Temperatura de punto de rocío.

Campos (2007) propone la siguiente expresión para estimar la evaporación mensual:

$$E = 3.0346R_E^{0.4225} + 16.6316(e_s - e)^{0.9099} + C \quad [1. 71]$$

Donde:

$E$	Evaporación mensual en mm
$R_E$	Radiación solar en el tope de la atmósfera en cal/cm2/día
$e_s$	Presión de vapor de saturación en mb
$e$	Presión de vapor en mb
$C$	Corrección mensual en mm (Tabla 1.2)

La radiación solar ( $R_E$ ) se puede estimar a través del siguiente polinomio de interpolación. Esto es válido para latitudes de 10 a 40° Norte.

$$R_E = b_0 + b_1(lat - 10) + b_2(lat - 10)(lat - 20) + b_3(lat - 10)(lat - 20)(lat - 30) \quad [1. 72]$$

Los parámetros  $b_j$  y  $C$  se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1.2 Parámetros para la estimación de la Radiación solar y la Evaporación.**

mes	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	C
ENE	760	-12	-0.075	1/600	-7.8
FEB	820	-9	-0.1	1/1200	-7
MAR	875	-5	-0.125	1/1200	31.3
ABR	895	0	-0.125	-1/1200	37.9
MAY	890	4	-0.1	-1/400	24.3
JUN	875	6	-0.1	-1/600	7.3
JUL	880	5	-0.1	-1/1200	-4.5
AGO	890	2	-0.125	-1/1200	-8.8
SEP	880	-2.5	-0.15	1/1200	-14.7
OCT	840	-8	-0.075	-1/1200	-15.2
NOV	780	-11.5	-0.025	-1/300	-20.2
DIC	740	-12.5	-0.075	1/1200	-21.5

Para determinar  $e_s$ , se puede utilizar la siguiente expresión (Campos Aranda, Estimación y aprovechamiento del escurrimiento, 2007).

$$e_s = 6.108 \exp\left(\frac{17.27\bar{T}}{\bar{T} + 237.3}\right) \quad [1. 73]$$

La presión de vapor se puede obtener a través de la humedad relativa:

$$e = e_s H_R \quad [1. 74]$$

Donde:

$H_R$  Humedad relativa en porcentaje.

Para determinar la temperatura de punto de rocío, se utiliza la forma inversa de [1. 73].

$$B = \frac{\ln\left(\frac{e}{6.108}\right)}{17.27} \quad [1. 75]$$

$$T_R = \frac{237.3B}{(1 - B)} \quad [1. 76]$$

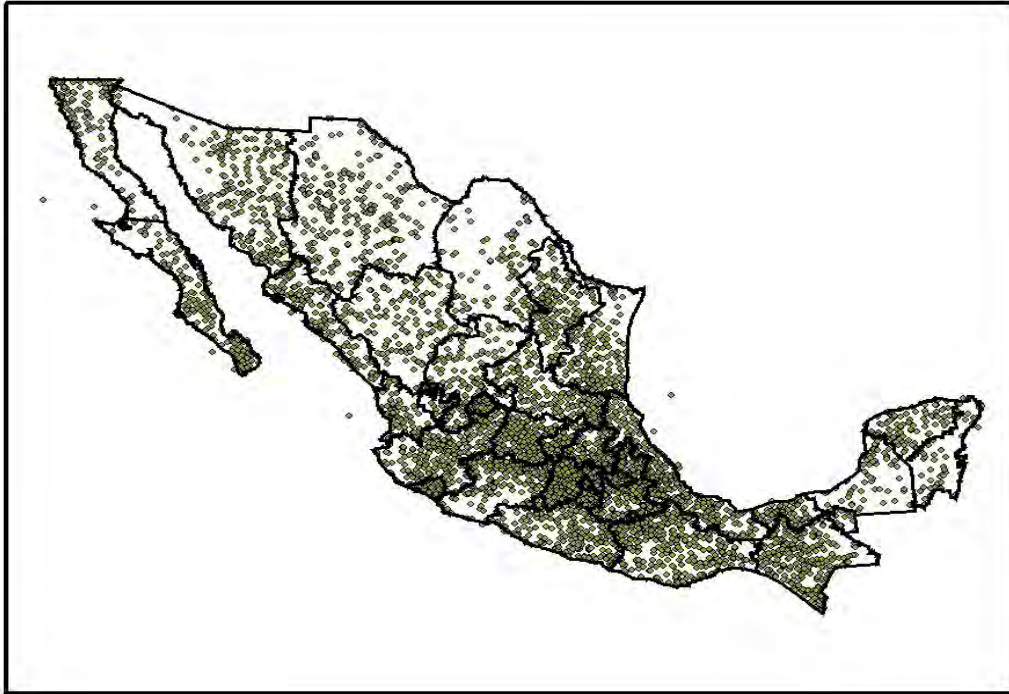
## 2 Análisis de Información existente

### 2.1 Análisis de datos de estaciones

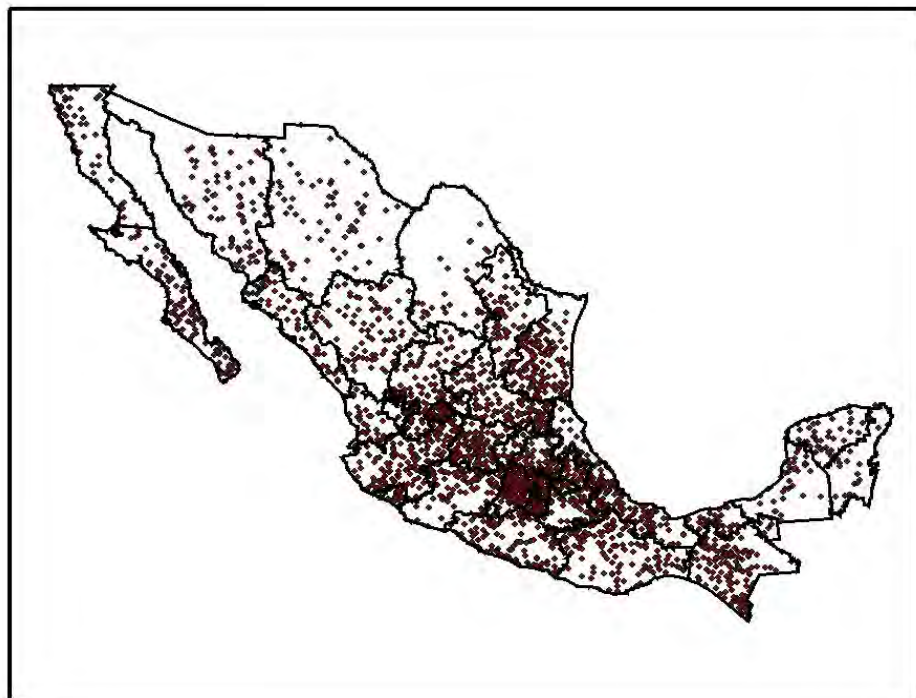
Con el fin de contar con información lo más confiable posible, se aplicaron tres filtros a las estaciones climatológicas:

1. **Ubicación:** Las estaciones que se localizan en un estado diferente al que reportaban fueron eliminadas, se tuvo cuidado en verificar las estaciones cercanas a la frontera de los estados para no eliminarlas por error.
2. **Coordenadas:** Se encontraron estaciones que tienen las mismas coordenadas. Muchas de esas estaciones se deben a que son de diferentes dependencias o por estar mal ubicadas. Se revisaron sus datos y se tuvieron 3 criterios:
  - a. Las estaciones que tienen datos en común se verificaron que fueran los mismos valores y de ser así se construyó un solo registro.
  - b. En caso de no coincidir los datos del registro común se optó por dejar la estación que tuviera mayor información.
  - c. Por último si las estaciones no tienen periodo común y los nombres de las estaciones no era el mismo, se dejó la que tiene mayor información y la otra se eliminó. En caso de tener el mismo nombre, se construyó un solo registro.
3. **Años con información:** Se dejaron las estaciones que al menos reporten 20 años de información aunque no sea de forma continua.

Con estos filtros se redujo el número de estaciones en un 77% (de 5454 a 4211). En el Mapa 2. 1 se muestra el total de estaciones reportadas en el CLICOM. En el Mapa 2. 2 se muestran las estaciones que quedaron después de aplicar los filtros.



**Mapa 2. 1 Ubicación de las Estaciones antes de los filtros**



**Mapa 2. 2 Ubicación de las estaciones después de los filtros**

Una vez aplicados los filtros, se determinó el periodo en que las estaciones empezaron a registrar. En la Tabla 2. 1 se muestran los estados y el año en que inicio el registro. Se sombreó con líneas grises en diagonal los años que no contaban con estaciones climatológicas. Las casillas en blanco indican el año en que empezaron a registrar información aunque con un limitado número de estaciones (menos del 30% de las estaciones que se encontraron después de aplicar los filtros); y por último en rojo los años con los que al menos el 30% de las estaciones de cada estado tiene registro.

Con esta tabla, se determinó que el periodo de estudio va de 1968 a 2005. En 1968 ya todos los estados presentan al menos información del 30% de las estaciones y en el 2005 aunque no todos los estados tienen el 30% de sus estaciones registrando los demás estados presentan porcentajes cercanos y varios estados con un porcentaje mayor al 60%.

Es importante mencionar, que ningún estado en ningún año presenta datos completos en todas sus estaciones, por lo que se usaron las técnicas de interpolación (capítulo 1) para el llenado de registro.

Tabla 2. 1 Año de inicio de registro

AÑO	Agascalientes	Baja California	Baja California Sur	Campeche	Coahuila	Colima	Chiapas	Chihuahua	Distrito Federal	Durango	Guanajuato	Guerrero	Hidalgo	Jalisco	México, Edo.	Michoacan	Morelos	Nayarit	Nuevo León	Oaxaca	Puebla	Querétaro	Quintana Roo	San Luis Potosi	Sinaloa	Sonora	Tabasco	Tamaulipas	Tlaxcala	Veracruz	Yucatan
1900																															
1901																															
1902																															
1903																															
1904																															
1905																															
1906																															
1907																															
1908																															
1909																															
1910																															
1911																															
1912																															
1913																															
1914																															
1915																															
1916																															
1917																															
1918																															
1919																															
1920																															
1921																															
1922																															
1923																															
1924																															
1925																															
1926																															
1927																															
1928																															
1929																															
1930																															
1931																															
1932																															
1933																															
1934																															
1935																															
1936																															
1937																															
1938																															
1939																															
1940																															
1941																															
1942																															
1943																															
1944																															
1945																															
1946																															
1947																															
1948																															
1949																															
1950																															
1951																															
1952																															
1953																															
1954																															
1955																															
1956																															
1957																															
1958																															



Continuación tabla 1

[illegible]

## 2.2 Características climáticas

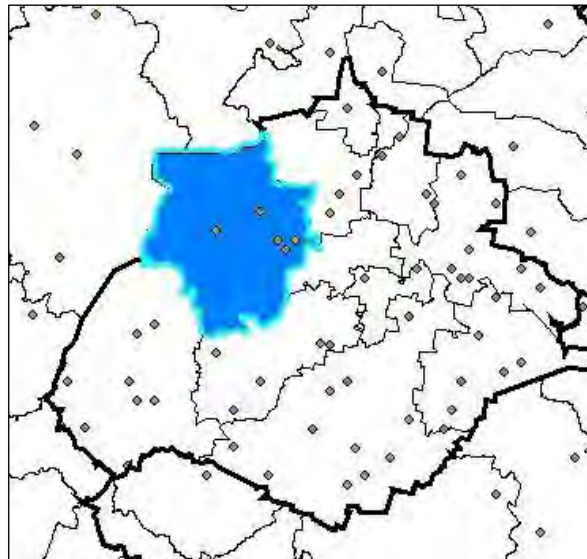
Para iniciar y tener una idea de cómo desarrollar el siguiente trabajo doctoral, se tomaron cinco estaciones esparcidas de la República Mexicana con el fin de determinar un criterio aplicable a todas las estaciones del País. Para estos ejemplos, se tomaron estaciones que tuvieran la mayor cantidad de información.

El tema de Olas de Calor se concentra en los meses cálidos (abril-septiembre), sin embargo en esta fase de estudio se usaron también los meses fríos (octubre-marzo) con el fin de observar si existen eventos en esos meses.

A continuación se da una breve descripción los municipios y las estaciones que se utilizaron en esta etapa del trabajo.

### 2.2.1 Aguascalientes

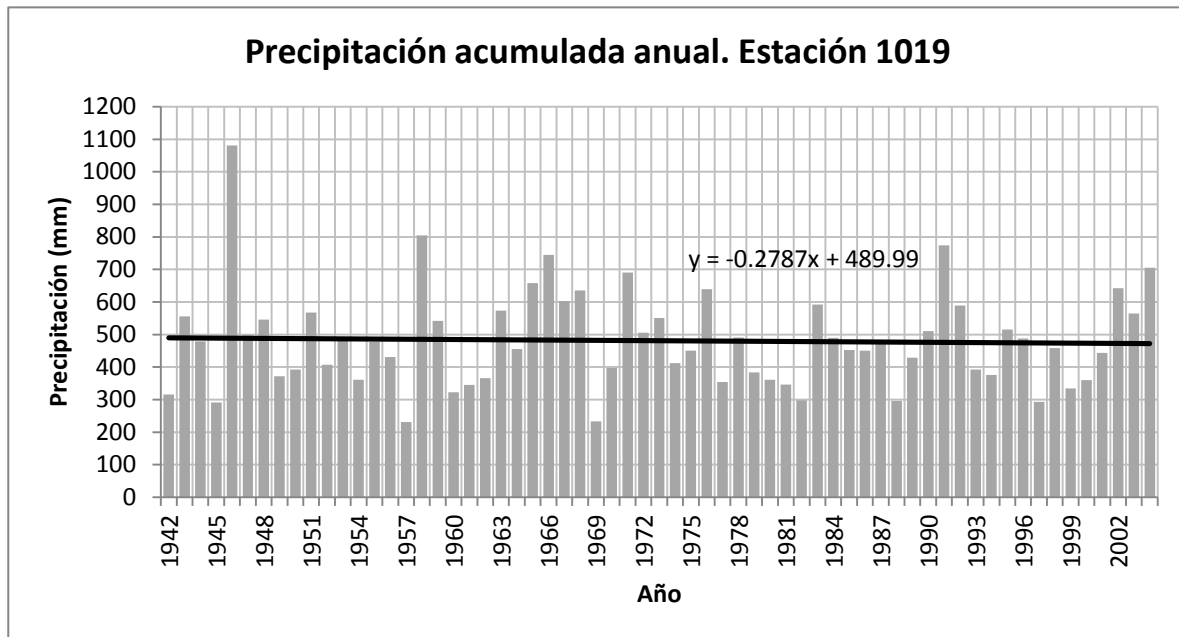
Para el estado de Aguascalientes se utilizó la estación 1019 que se encuentra ubicada en el municipio de San José de Gracia (Mapa 2. 3). La estación cuenta con más de 60 años de registro (1942 a 2004).



Mapa 2. 3 Ubicación del municipio San José Gracia, en el estado de Aguascalientes

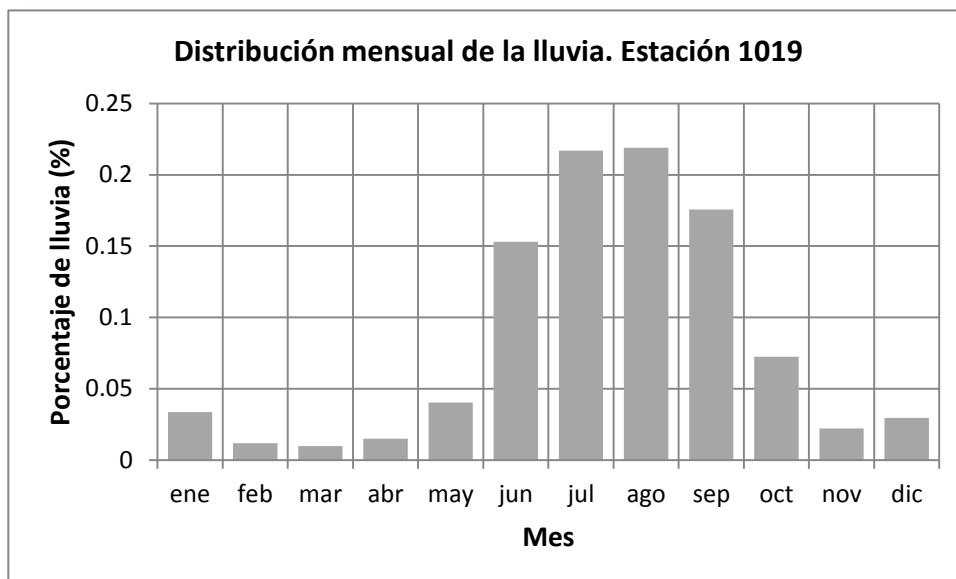
El municipio de San José de Gracia presenta un clima semiseco templado con lluvias principalmente en verano. Su clave climática es Bs1kw. Se presentan lluvias principalmente en verano, con las

máximas en los meses de julio y agosto, la lluvia media anual es de 483 mm. La línea de tendencia marca una ligera disminución en la lámina de lluvia.



Gráfica 2. 1 Precipitación acumulada anual en la estación 1019, Aguascalientes

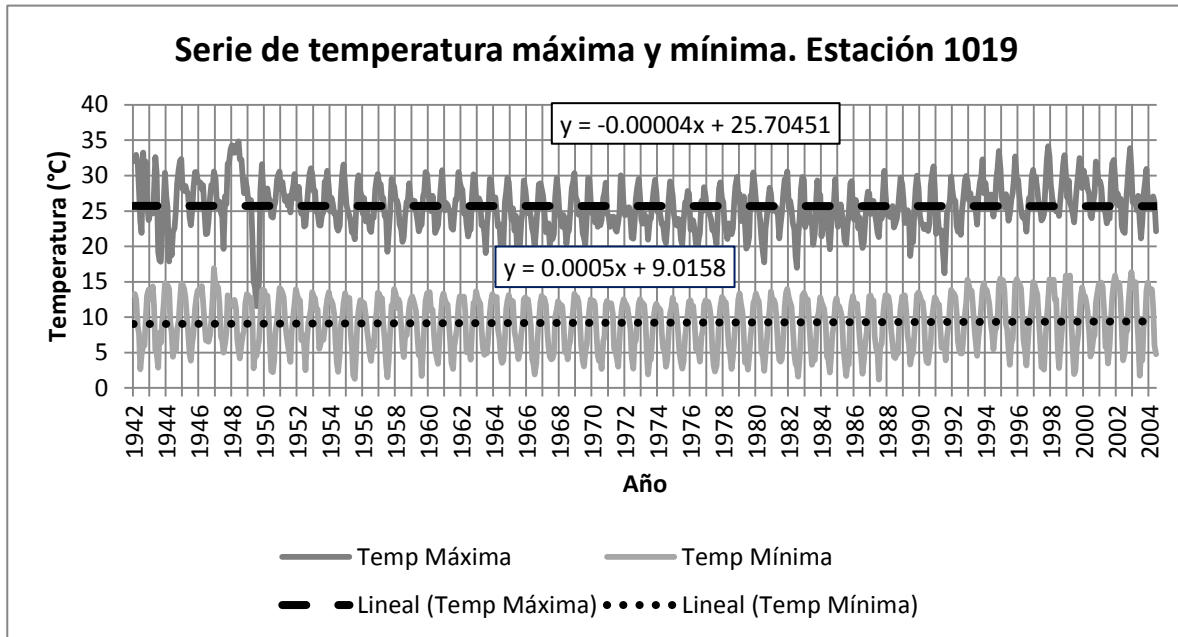
En la Gráfica 2. 1 se muestra la distribución de lluvia acumulada anual y en la Gráfica 2. 2 se muestra la distribución promedio mensual de la lluvia para la misma estación.



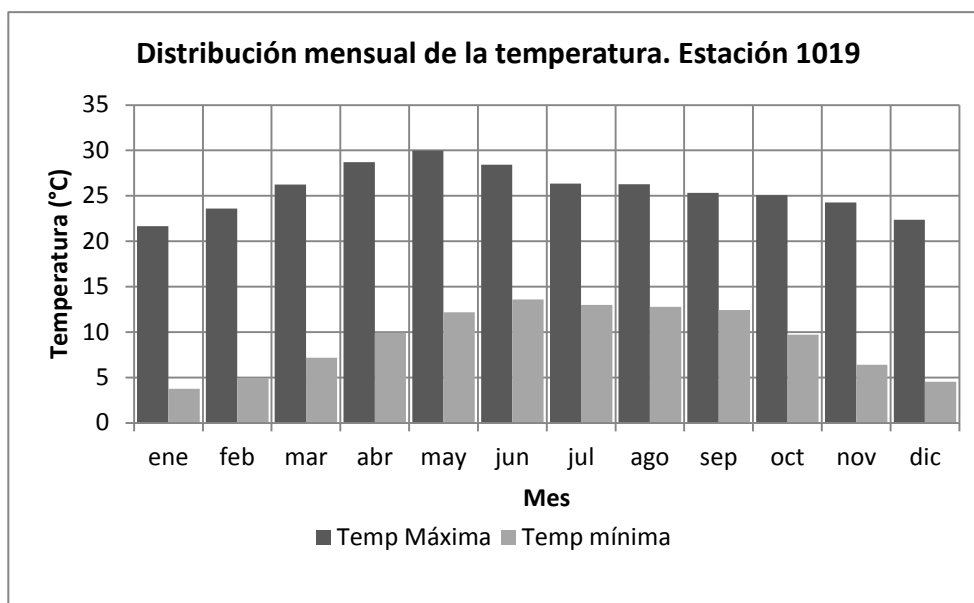
Gráfica 2. 2 Distribución mensual de la lluvia en la estación 1019, Aguascalientes

En la Gráfica 2. 3 se muestra la serie de la temperatura anual, tanto máxima como mínima. Existe un incremento de la temperatura mínima y un decremento en la temperatura máxima en los

últimos años, sin embargo no son apreciables por lo que se puede decir que se ha mantenido constante la temperatura media. Los meses más calurosos son de abril a junio superando los 28° C y la temperatura máxima se presenta en el mes de mayo. Se observa también que la serie de temperatura mínima alcanza los valores más altos en el mes de junio, aunque los meses de mayo a septiembre en promedio se tienen temperaturas mínimas superiores a los 12° C.



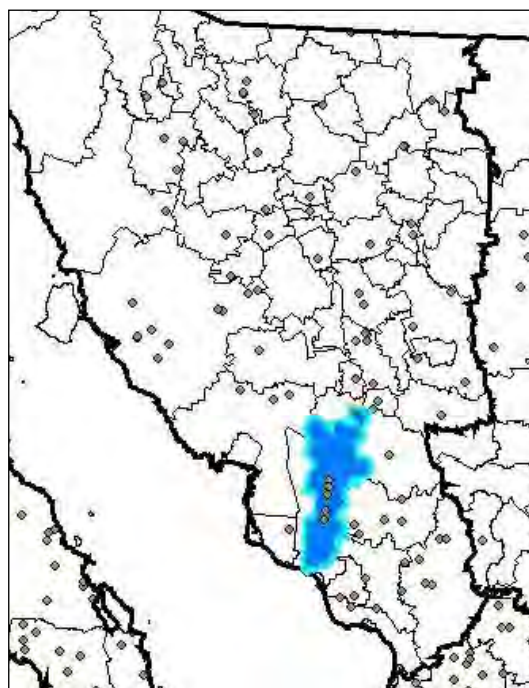
Gráfica 2. 3 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 1019.  
Aguascalientes



Gráfica 2. 4 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 1019. Aguascalientes

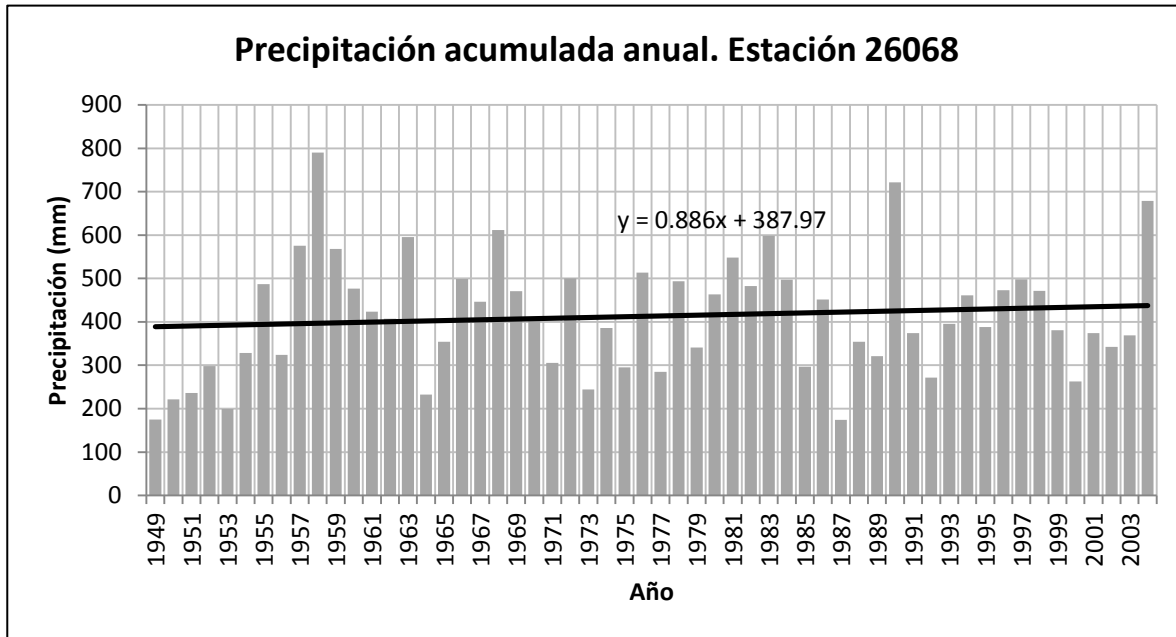
## 2.2.2 Sonora

En estado de Sonora se seleccionó la estación 26068, ubicada en el municipio de Cajeme (Mapa 2. 4). Esta estación presenta datos desde 1949 hasta 2004.

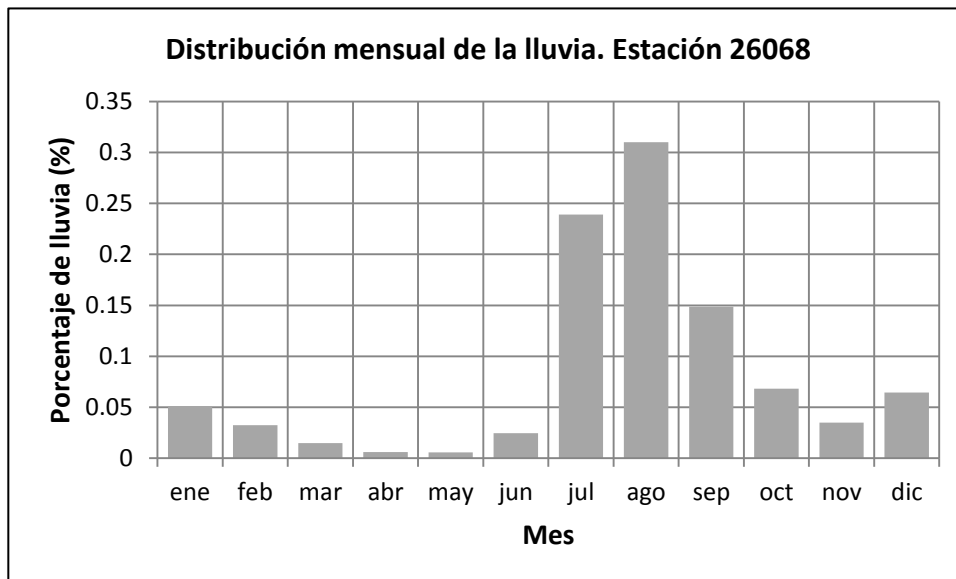


Mapa 2. 4 Ubicación del Municipio de Cajeme, en el estado de Sonora

El municipio de Cajeme tiene clima cálido extremoso con lluvias son muy marcadas en verano. La clave climática es BSO(h')hw. Las precipitaciones anuales son bajas, alrededor de los 400 mm al año. Julio y Agosto son los meses de mayor precipitación (Gráfica 2. 5 y Gráfica 2. 6). El registro histórico muestra una tendencia creciente en la precipitación.



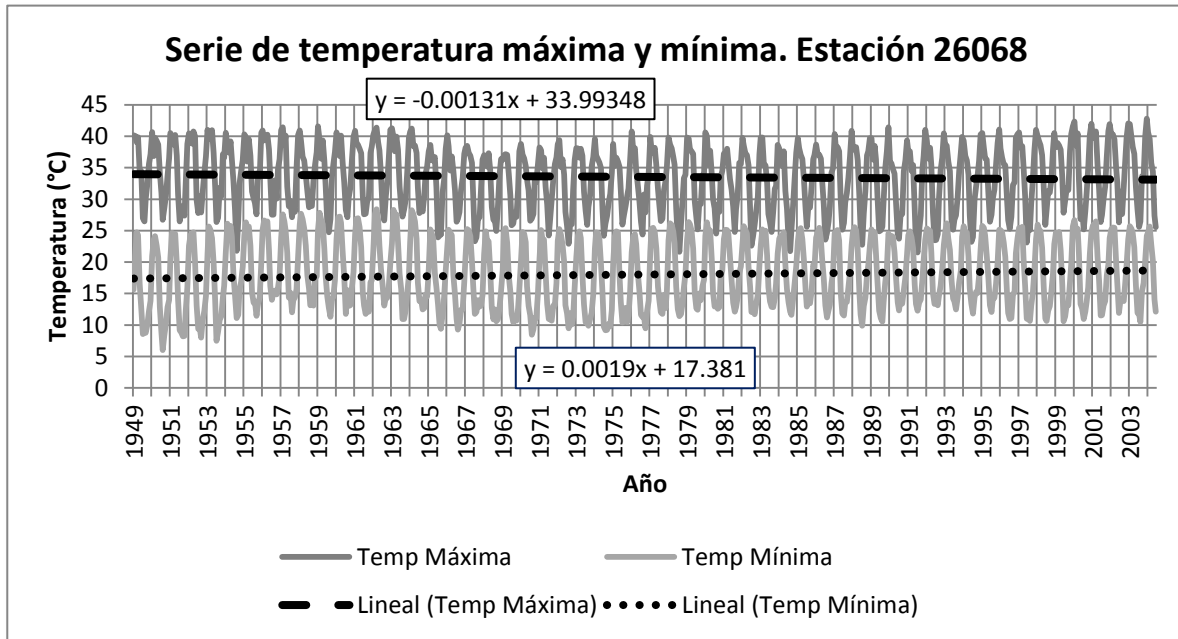
Gráfica 2. 5 Precipitación acumulada anual en la estación 26068. Sonora



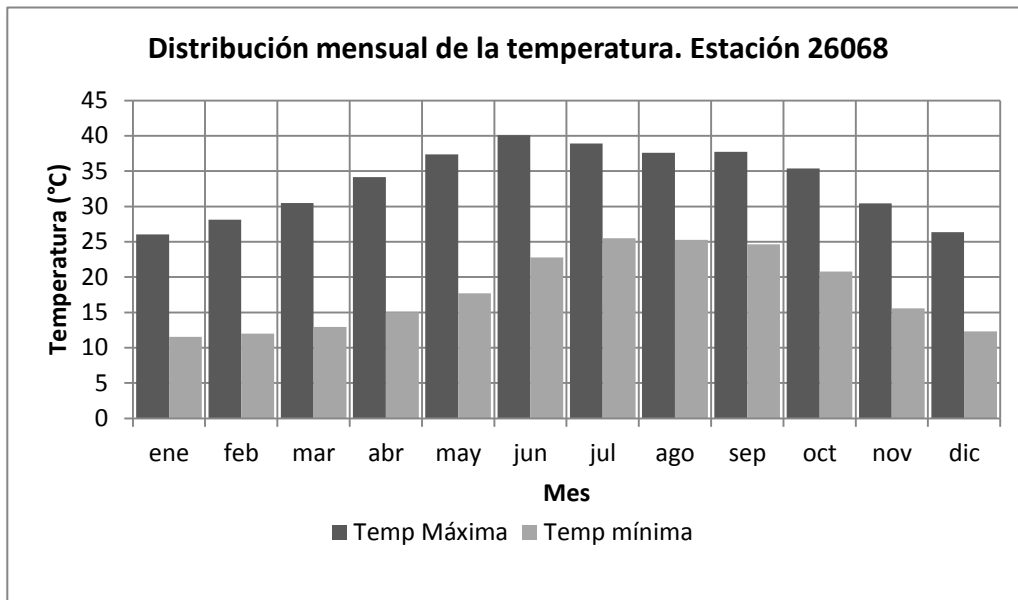
Gráfica 2. 6 Distribución mensual de la lluvia en la estación 26068. Sonora

En esta estación, las tendencias muestran un aumento en la temperatura mínima y un decremento en la temperatura máxima, aunque igual que en el caso de la estación 1019 en Aguascalientes, el

cambio de temperatura es muy pequeño y se puede considerar que la temperatura media se mantiene constante. Los meses de mayo a octubre tienen temperaturas superiores a los 35° C siendo la máxima en junio. En cuanto a la serie de temperatura mínima se tienen temperaturas superiores a los 20° C en los meses de junio a octubre, los meses de julio a septiembre sobrepasan los 24° C (Gráfica 2. 7 y Gráfica 2. 8).



Gráfica 2. 7 Serie temporal de temperatura máxima (gris obscuro) y mínima (gris claro) en la estación 26068. Sonora

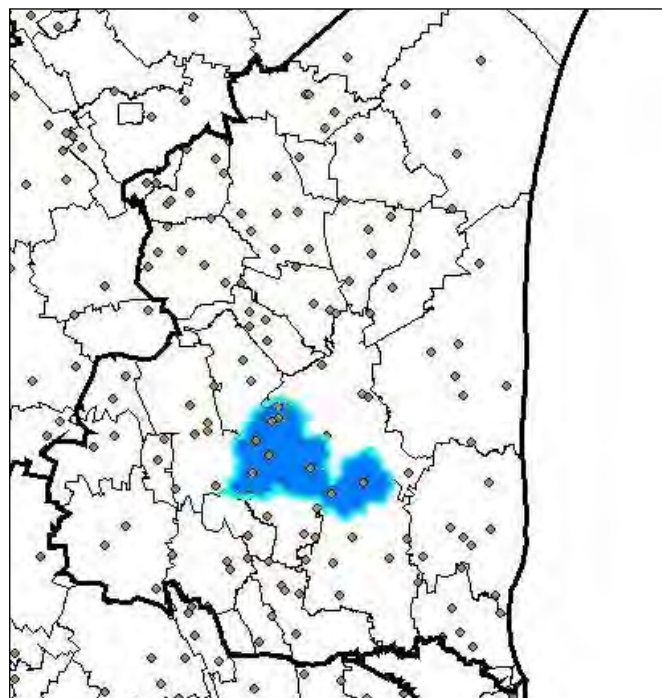


Gráfica 2. 8 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris obscuro) y mínima (gris claro) en la estación 26068. Sonora



### 2.2.3 Tamaulipas

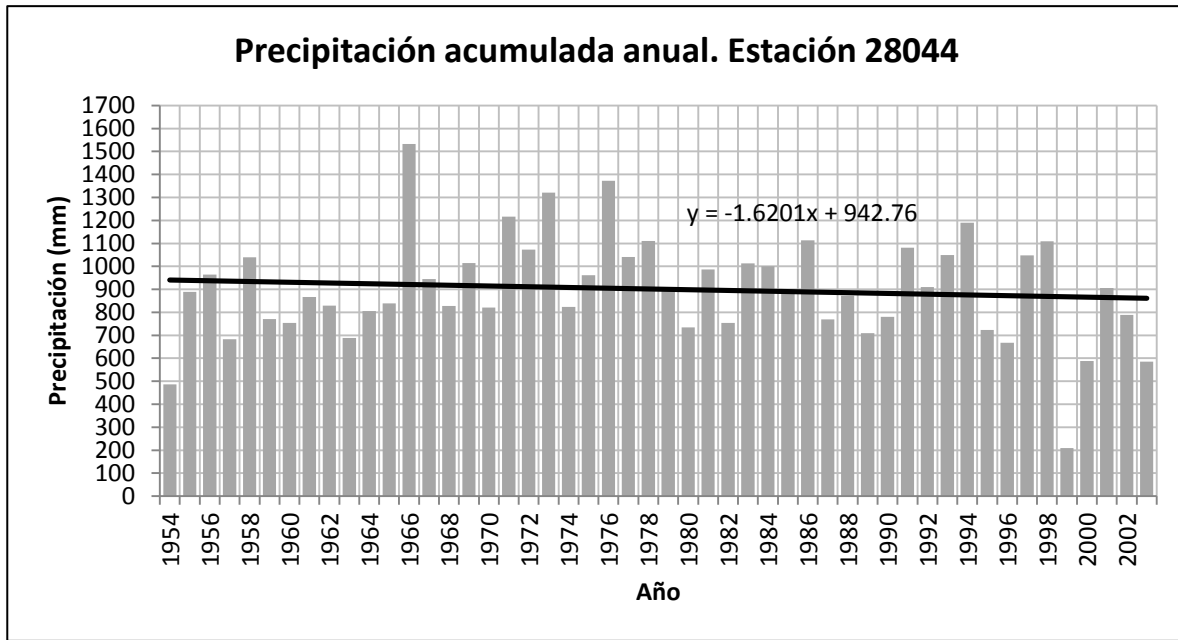
En el estado de Tamaulipas se utilizó la estación 28044, localizada en el municipio de Llera (Mapa 2. 5), esta estación cuenta con información desde 1954 al 2003.



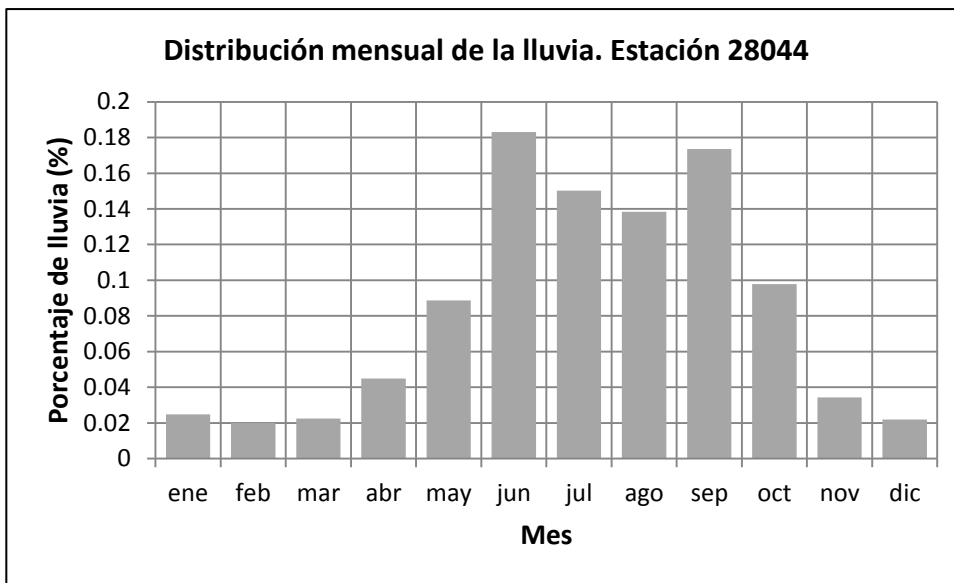
**Mapa 2. 5 Ubicación del municipio Llera, en el estado de Tamaulipas**

Este municipio presenta un clima semicálido extremo, con lluvias principalmente en verano y sequía interesquial, su clasificación climática es (A)C(wo). Las lluvias importantes se presentan en verano (Junio a Septiembre). La tendencia del registro histórico acumulado anual muestra una disminución en la precipitación. La lluvia media anual es de 921 mm (Gráfica 2. 9 y Gráfica 2. 10).



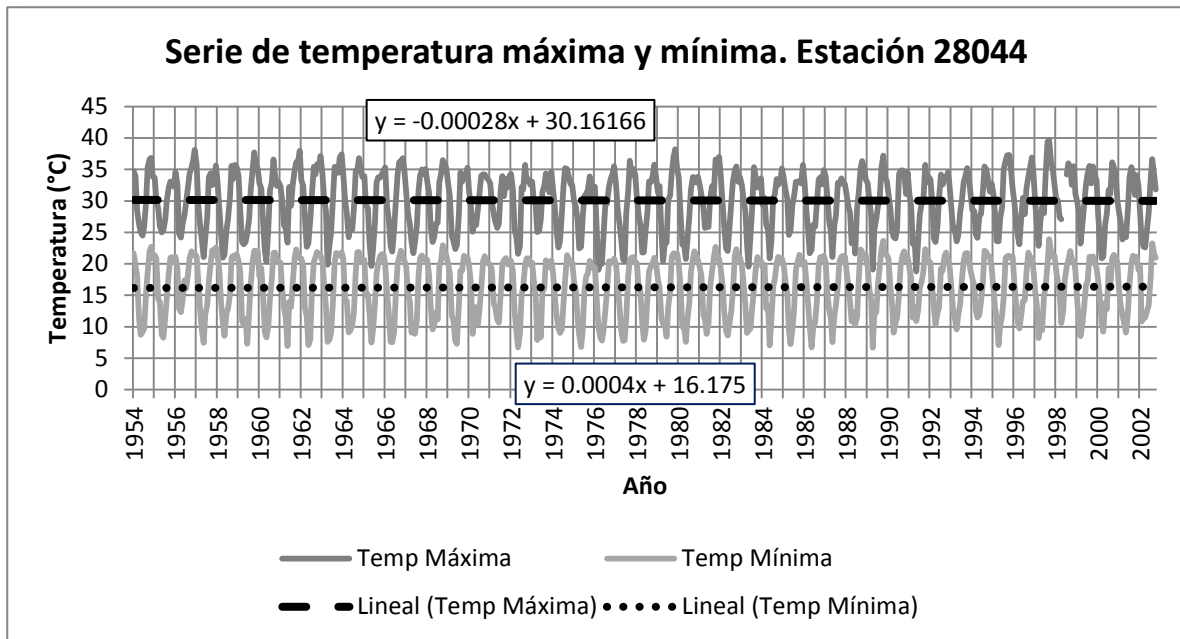


Gráfica 2. 9 Precipitación acumulada anual en la estación 28044. Tamaulipas

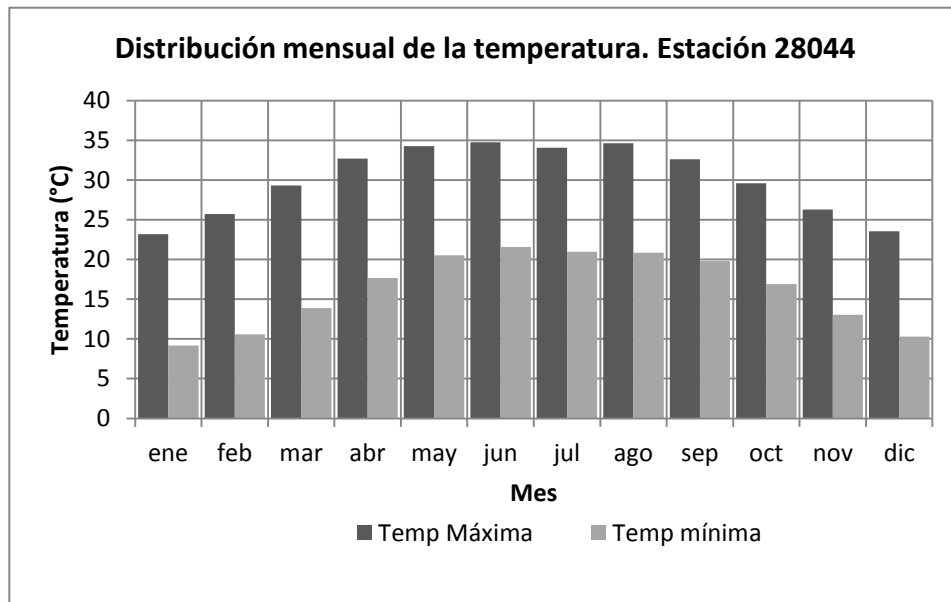


Gráfica 2. 10 Distribución mensual de la lluvia en la estación 28044. Tamaulipas.

En esta estación no se aprecia un cambio en las temperaturas con respecto a la media de cada serie. Al igual que en las estaciones anteriores la serie de temperatura máxima presenta un ligero decremento y la serie de temperatura mínima presenta un ligero incremento. Los meses de mayo a agosto son los más calurosos, superando los 33° C, estos meses también coinciden con altas temperaturas en la serie de temperatura mínima (Gráfica 2. 11 y Gráfica 2. 12).



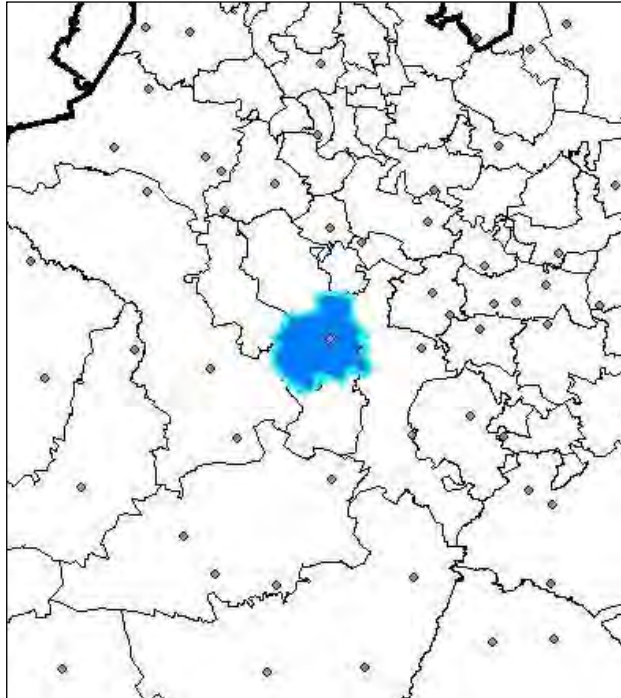
Gráfica 2. 11 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 28044. Tamaulipas.



Gráfica 2. 12 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 28044. Tamaulipas

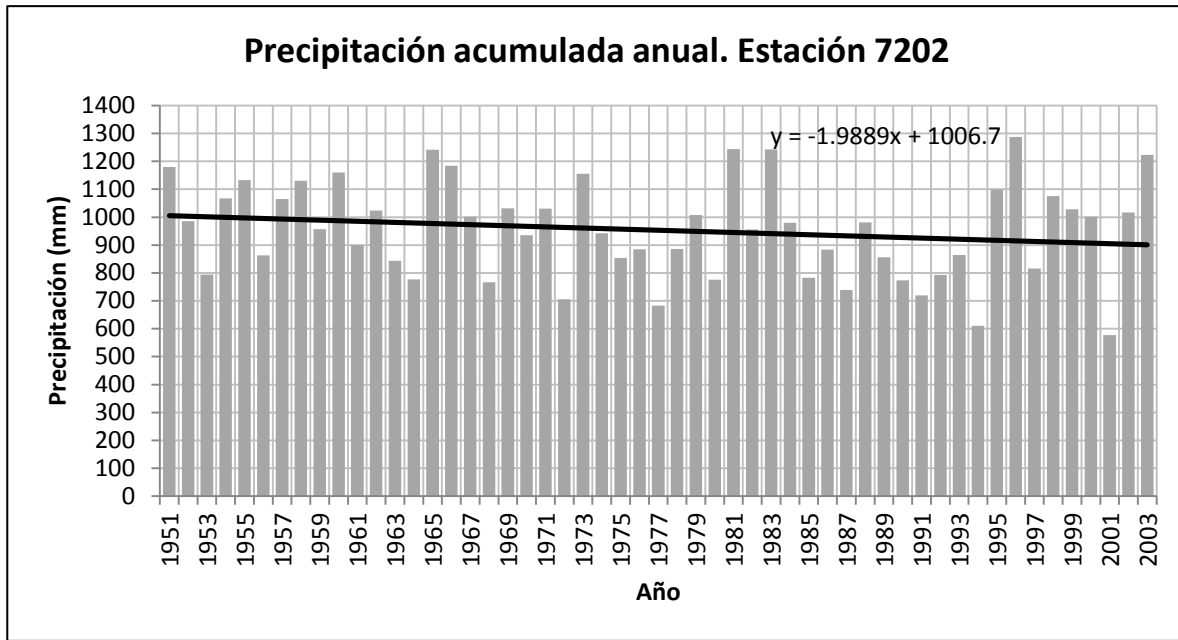
## 2.2.4 Chiapas

Para el estado de Chiapas se escogió la estación 7202, ubicada en Tuxtla Gutiérrez que es la capital del estado (Mapa 2. 6). Se tienen registros del año 1951 al 2004.

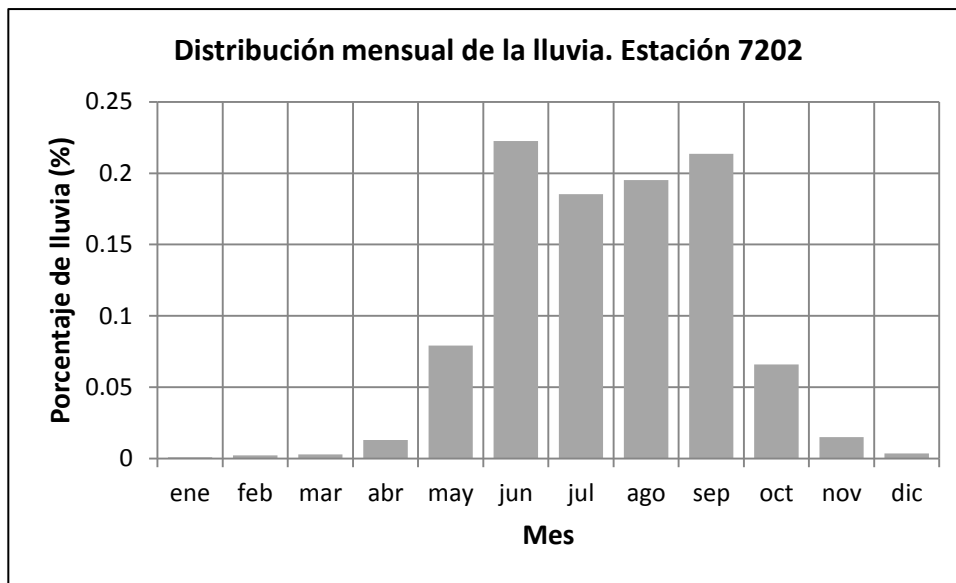


**Mapa 2. 6 Ubicación del municipio Tuxtla Gutiérrez, en el estado de Chiapas**

Tuxtla Gutiérrez presenta clima cálido subhúmedo y su clave climática es AwO(w). La precipitación se encuentra concentrada en los meses de verano (junio-septiembre), presenta sequía interesquial (Gráfica 2. 14) y una tendencia negativa (Gráfica 2. 13). La precipitación media acumulada anual es de 958 mm.

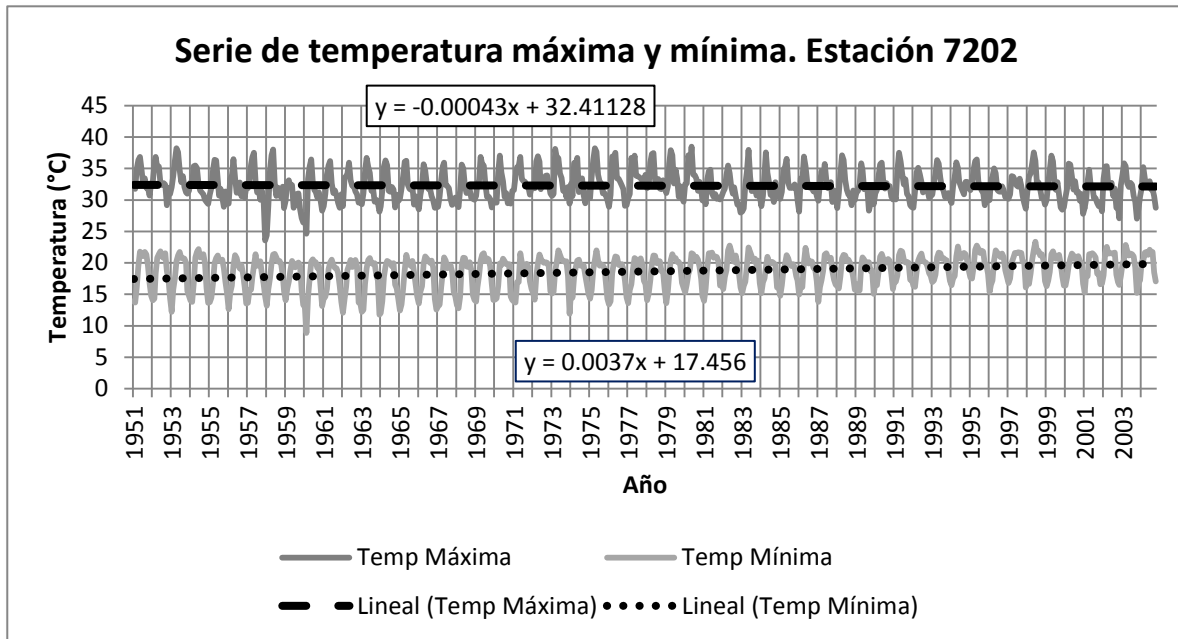


Gráfica 2. 13 Precipitación acumulada anual en la estación 7202. Chiapas

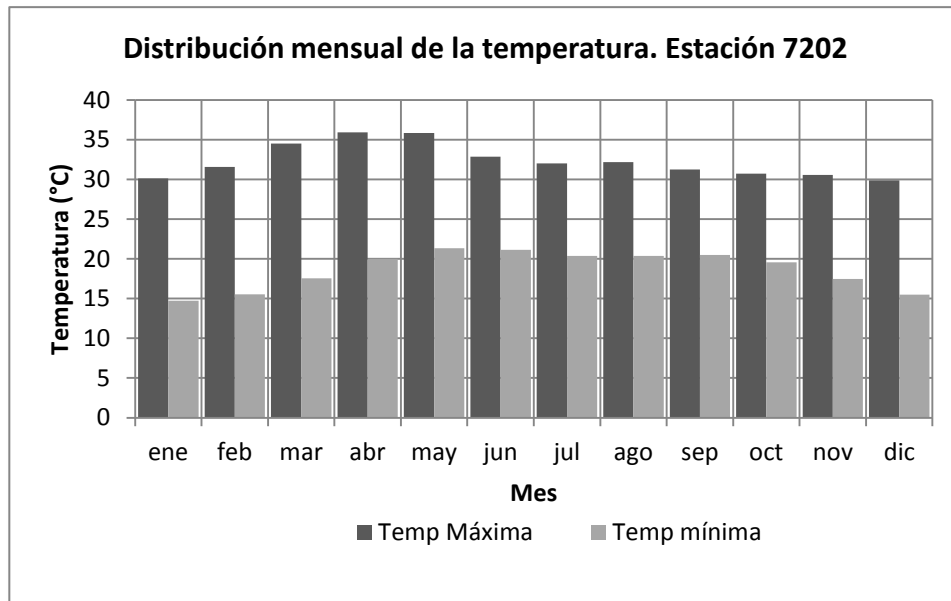


Gráfica 2. 14 Distribución mensual de la lluvia en la estación 7202. Chiapas

En esta estación se observa un ligero aumento en las temperaturas mínimas, y un decremento casi imperceptible en la serie de temperatura máxima. En promedio en los meses de marzo y abril se presentan las máximas temperaturas. En la serie de temperatura mínima, se tienen las mayores temperaturas promedio mensual en el periodo de mayo a septiembre (Gráfica 2. 15 y Gráfica 2. 16).



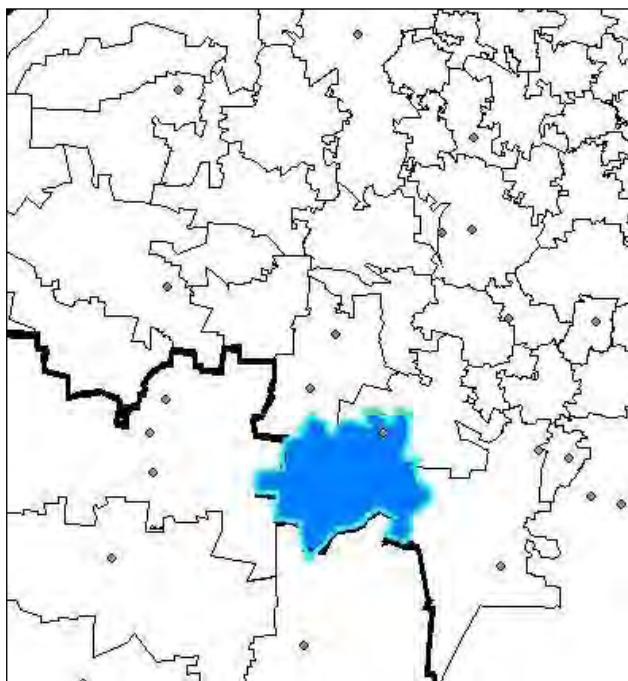
Gráfica 2. 15 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 7202. Chiapas



Gráfica 2. 16 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 7202. Chiapas

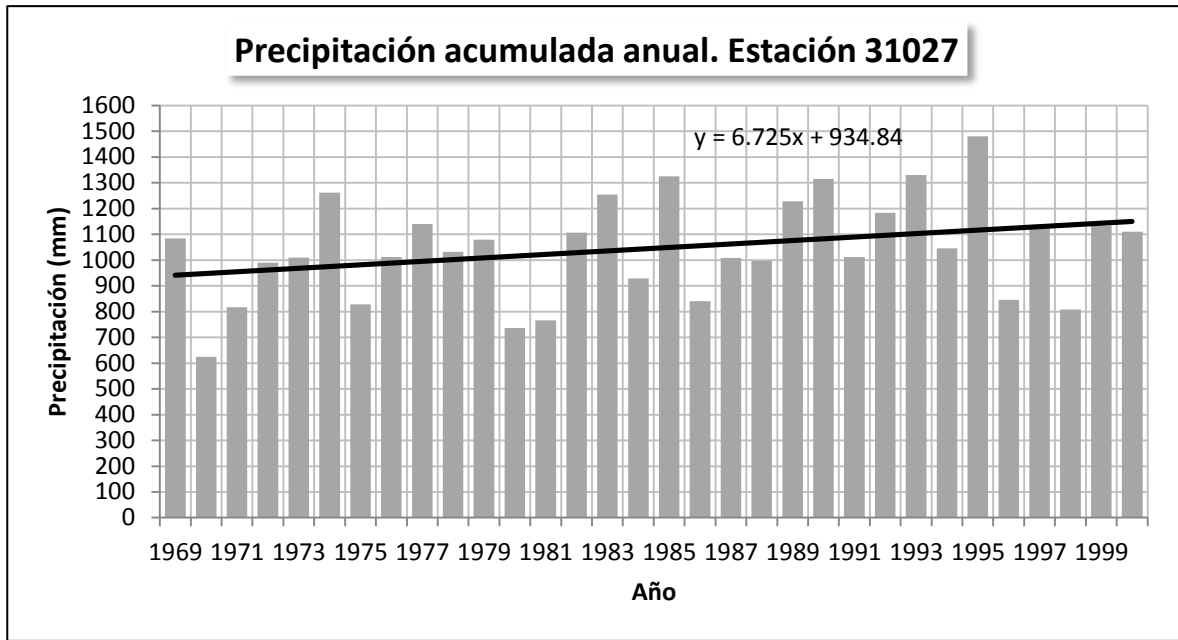
### 2.2.5 Yucatán

Por último, en el estado de Yucatán se utilizó la estación 31027, los años con registro van de 1969 al 2000. La estación está localizada en el municipio de Santa Elena (Mapa 2. 7).

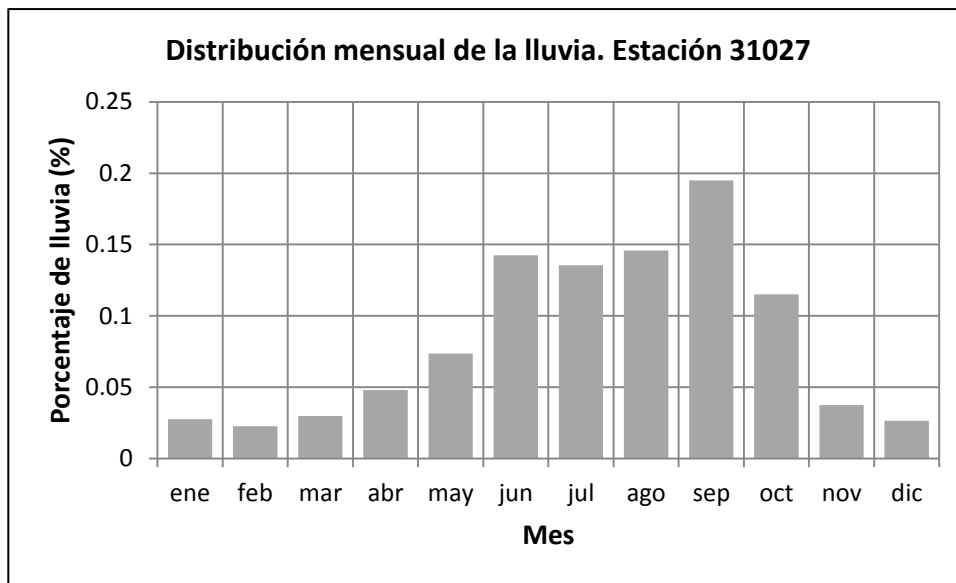


**Mapa 2. 7 Ubicación del municipio Santa Elena, en el estado de Yucatán**

En el municipio de Santa Elena el clima es cálido subhúmedo y su clave climática es AwO. La línea de tendencia muestra un aumento en la precipitación media acumulada anual (Gráfica 2. 17). Los meses con mayor precipitación van de junio a octubre y tiene una media anual de 1074 mm (Gráfica 2. 18).

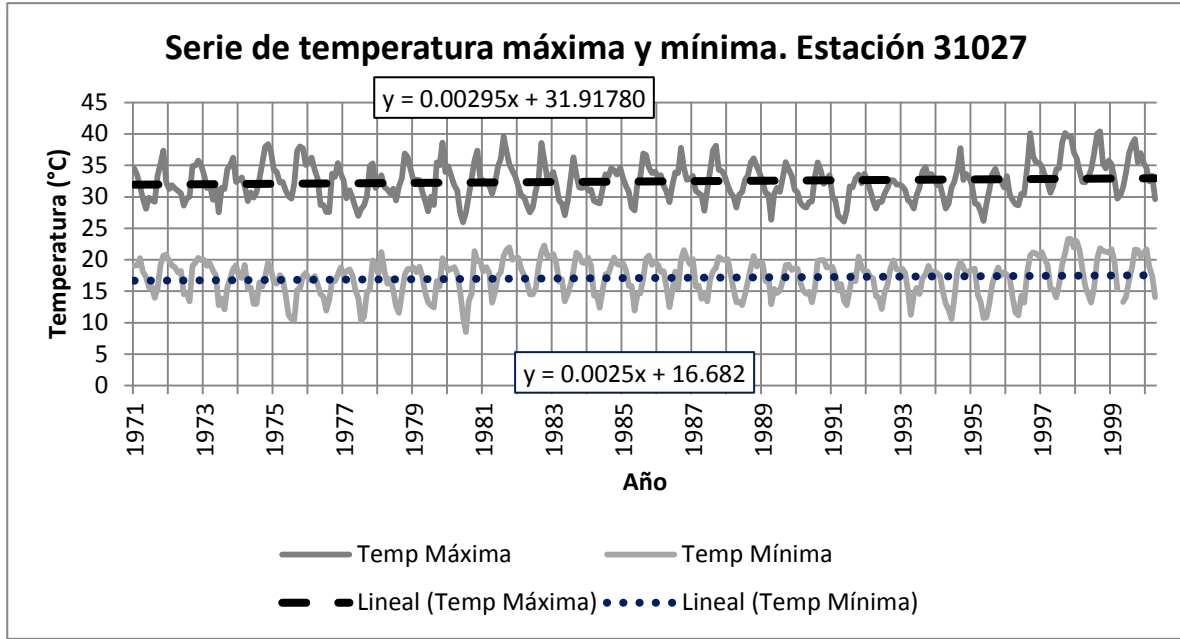


Gráfica 2. 17 Precipitación acumulada anual en la estación 31027. Yucatán

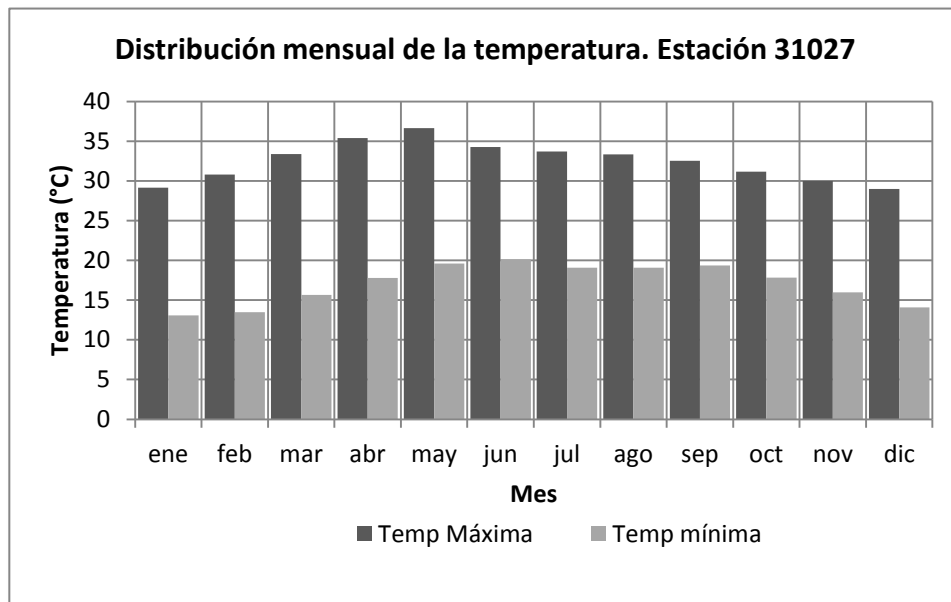


Gráfica 2. 18 Distribución mensual de la lluvia en la estación 31027. Yucatán

Los meses de mayor temperatura son de marzo a agosto, con temperaturas en promedio superiores a los 33 grados. En el mes de mayo se presentan las temperaturas máximas. En los promedios anuales no se aprecia un aumento de las temperaturas máximas ni mínimas (Gráfica 2. 19 y Gráfica 2. 20). Esta estación a diferencia de las anteriores, presenta un ligero aumento en ambas series de temperatura.



Gráfica 2. 19 Serie temporal de temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 31027. Yucatán



Gráfica 2. 20 Distribución mensual de la temperatura máxima (gris oscuro) y mínima (gris claro) en la estación 31027. Yucatán



## 2.3 Criterios existentes de Olas de Calor

Para el análisis de las Olas de Calor existen diferentes criterios, los cuales se pueden agrupar en dos umbrales, umbral absoluto y umbral relativo (Robinson, 2001), (Herrera Alanís & Escalante Sandoval, En Proceso, 2012).

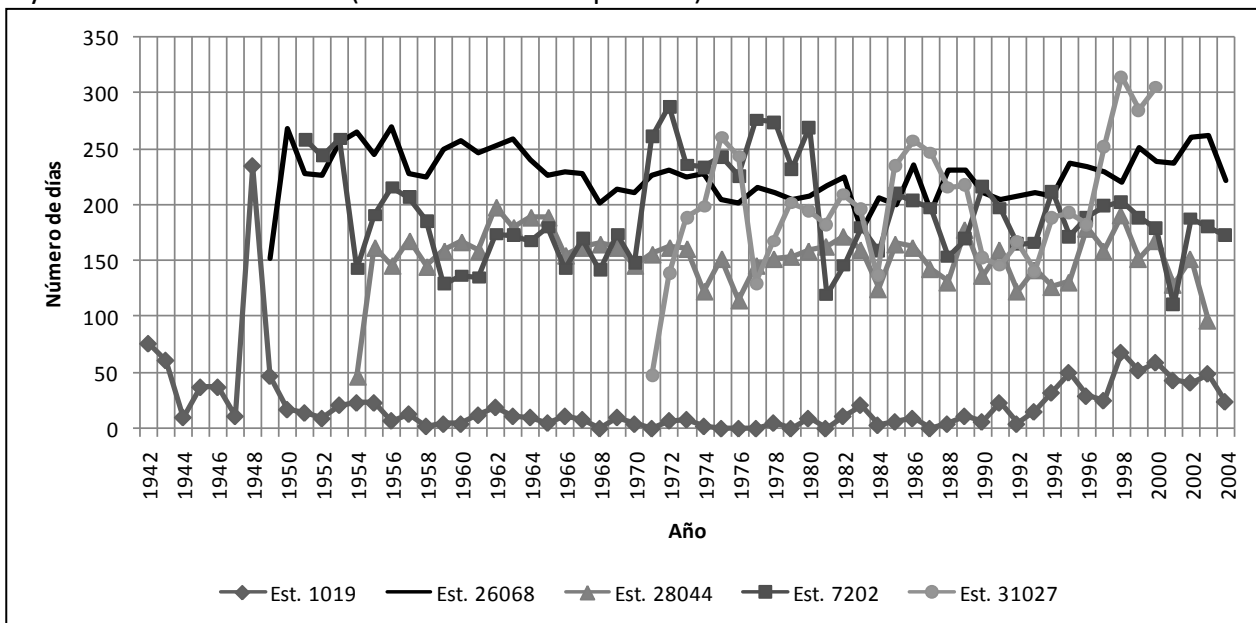
### 2.3.1 Umbrales Absolutos

Los de umbral absoluto asignan un valor fijo y cuando este se iguala o excede por un número de días consecutivos se dice que se presenta una Ola de Calor. De este tipo se encuentra el **criterio canadiense** (Smoyer-Tomic, Kunh, & Hudson, 2003) que establece un umbral de 32 grados centígrados en tres días consecutivos; el **criterio de la NWS** (National Weather Service) (Robinson, 2001) que establece que la temperatura máxima sea mayor o igual a 40.6° C y la temperatura mínima mayor o igual a 26.7° C. estas dos temperaturas deben ser superadas en al menos dos días seguidos; en **México** se ha utilizado el valor umbral de 30 y 35° C en tres días consecutivos (Jáuregui, 2002).

A continuación se describirán los resultados obtenidos al aplicar los métodos anteriores.

#### 2.3.1.1 Criterio Canadiense

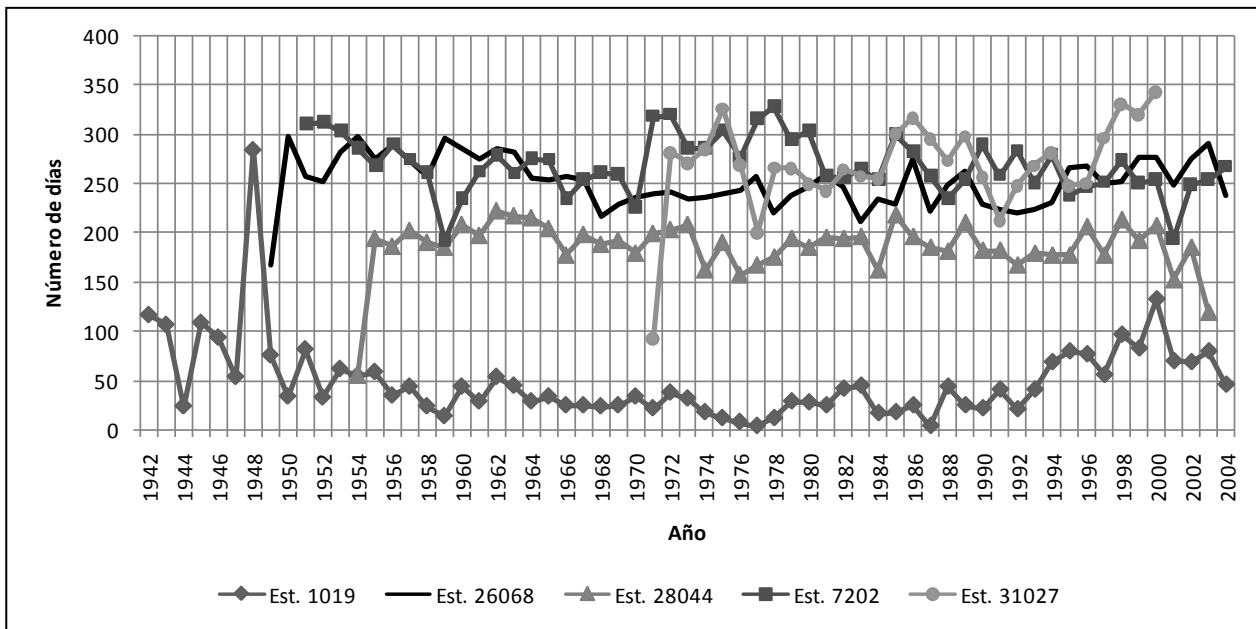
Al aplicar este criterio se observa una gran diferencia en el número de días con Olas de Calor. La estación 1019 (Aguascalientes) tiene la menor duración (20 días por año en promedio), por otro lado, las demás estaciones presentan duraciones mayores. La estación 16068 (Sonora) presenta la mayor duración acumulada (de 200 a 250 días por año).



Gráfica 2. 21 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio Canadiense. Umbral Absoluto

### 2.3.1.2 Umbral de 30 grados centígrados (México)

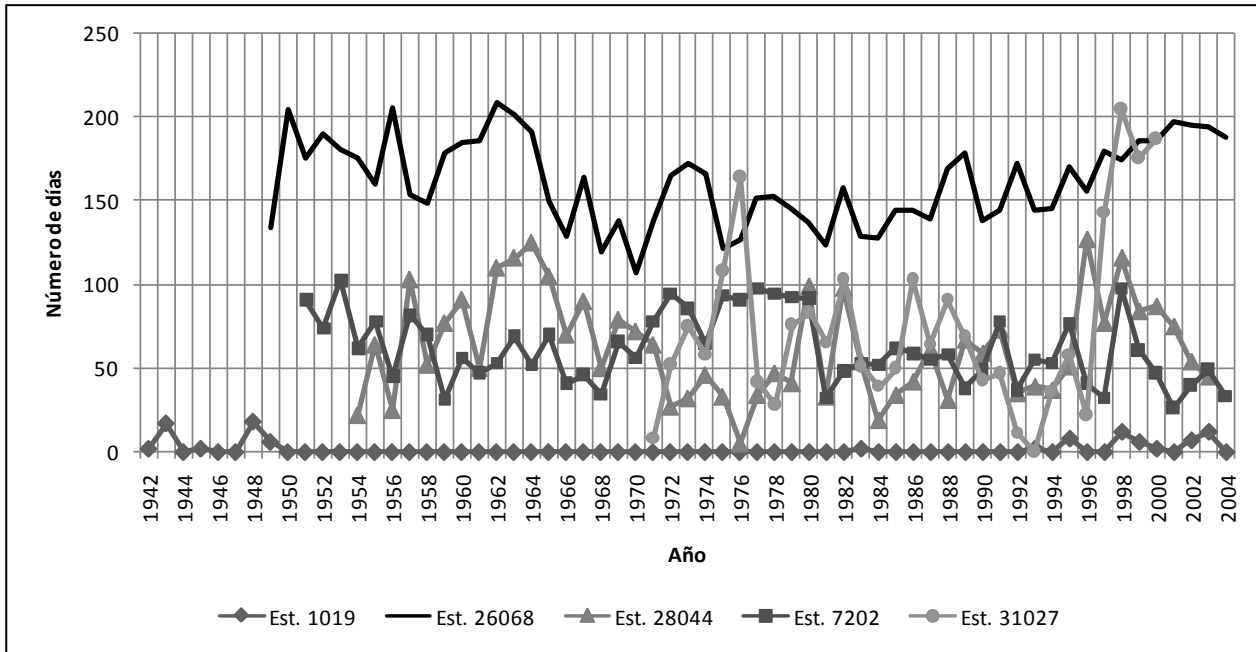
Este criterio es muy utilizado en México, así como el de 35 grados centígrados. Este valor es menor que el criterio que se utiliza en Canadá, por lo tanto la duración de los días es mayor y el número de eventos se reduce. También se observa una separación de la estación 1019 con respecto a las demás estaciones. Los días con Olas de Calor van desde 150 a 300 días por año, excepto en la estación 1019 cuyas duraciones van de 20 a 100 días.



Gráfica 2. 22 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio 30°C. Umbral Absoluto

### 2.3.1.3 Umbral de 35 grados centígrados (México)

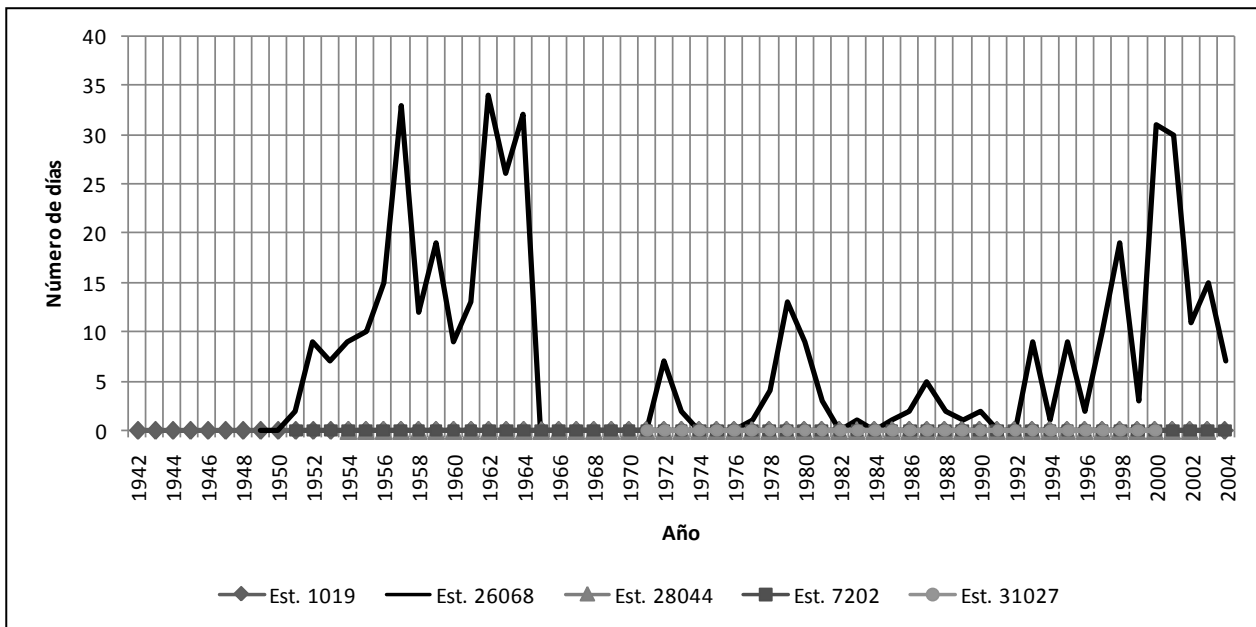
Con este criterio se reduce el número de eventos y los días con Olas de Calor. La estación 1019 prácticamente no presenta eventos (10 eventos en todo el período), mientras que la estación 26068 es la que presenta la mayor cantidad de días con Olas de Calor (de 150 a 200 días). Las demás estaciones las duraciones van de 30 a 100 días.



Gráfica 2. 23 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio 35°C. Umbral Absoluto

#### 2.3.1.4 Criterio de umbral absoluto de la NWS (National Weather Service)

Este criterio es muy extremo y solo la estación 26068 presenta datos, como se observa no es conveniente su aplicación en el País.



Gráfica 2. 24 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio NWS. Umbral Absoluto

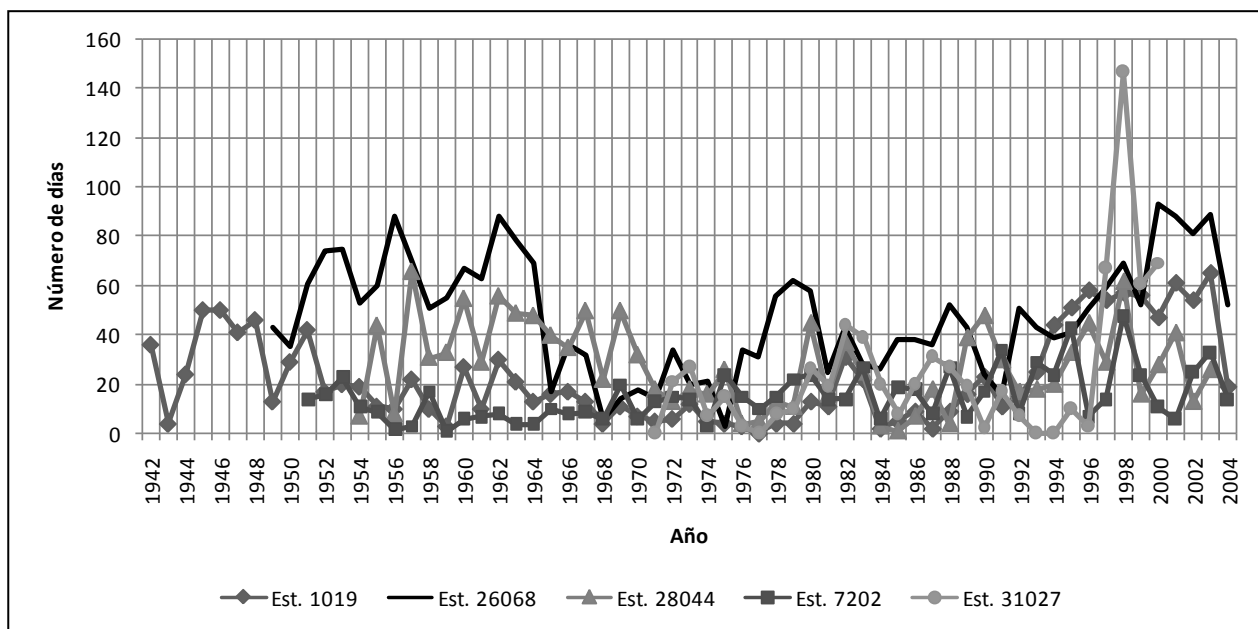
## 2.3.2 Umbrales Relativo

Los criterios de umbral relativo son aquellos que hacen uso de alguna variable estadística para determinar el umbral. Un criterio, también de **NWS** (Robinson, 2001), establece el uso de percentiles (95 y 99) en dos días consecutivos; otro criterio establece el percentil 80 tanto en temperatura máxima como en mínima para dos días consecutivos (López, 2004).

López (2004), también hace una diferencia entre Ola de Calor pura y cluster o grupo: la Ola de Calor es cuando la temperatura sobrepasa el umbral tanto en temperatura máxima como mínima en al menos dos días consecutivos; el grupo lo formaran dos Olas de Calor sucesivas si el tiempo entre ambas es cuando mucho de 24 horas y la temperatura tanto mínima como máxima superan el valor de la mediana. Estos criterios se utilizaron en las estaciones antes mencionadas. Se presentan las gráficas que muestran el número de días acumulados de las Olas de Calor

### 2.3.2.1 Criterio de López (Percentil 80)

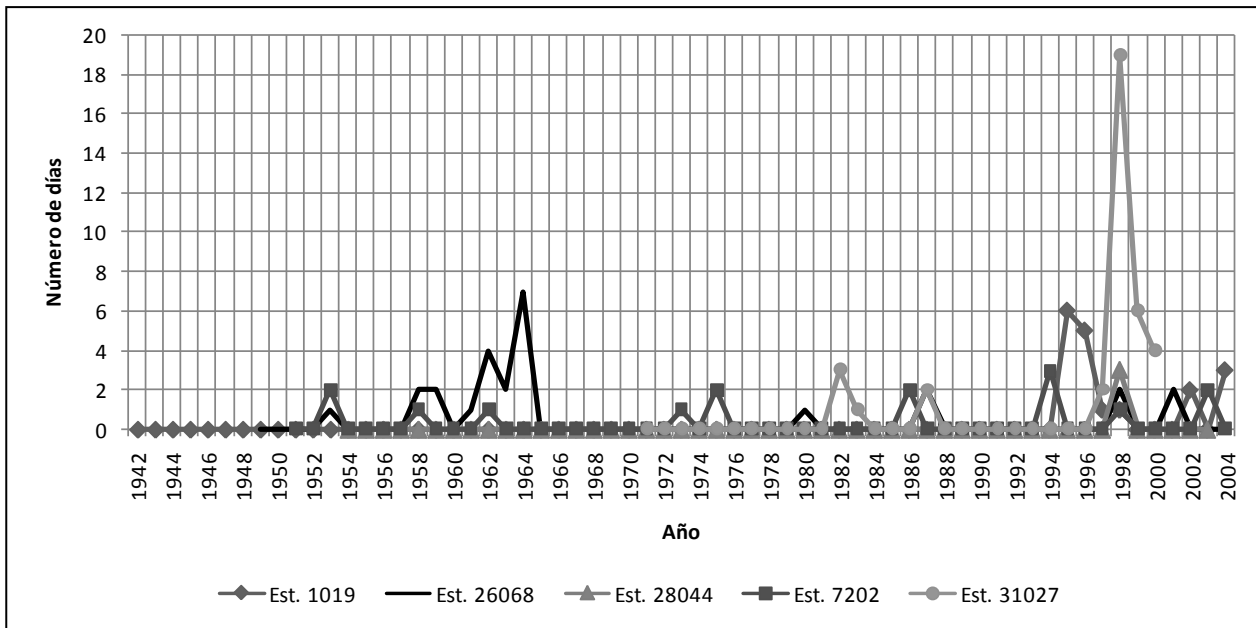
Este criterio, propuesto por López (2004), utiliza el percentil 80 de la serie de datos registrados, se observa un mayor agrupamiento en los datos, tanto en los días como en el número de eventos. Los días van de 1 a 100 en el mayor de los casos. Las temperaturas umbral máximas y mínimas fueron: Para la estación 1019, 29° la máxima y 13° la mínima; Estación 7202, 35° máxima y 21.2° mínima; Estación 26068, 39° como máxima y 24.5° mínima; La estación 28044, 35° y 21°; Por último la estación 31027, 35° fue la temperatura máxima y 20° la mínima.



Gráfica 2. 25 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio López. Umbral Relativo

### 2.3.2.2 Criterio de NWS, percentil 95

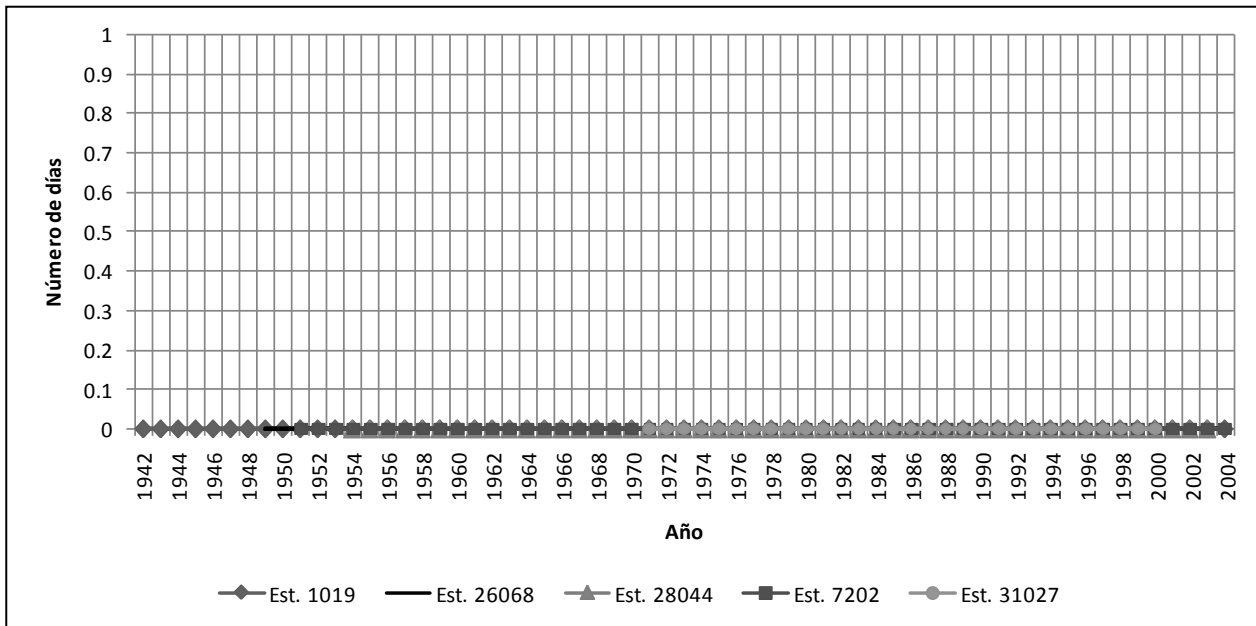
Con este criterio, los días con Olas de Calor se reducen notablemente, en la mayoría de los casos no sobrepasa los 50 días, hay una mayor agrupación de datos. En este criterio, los umbrales fueron: 32.5° para la estación 1019; 38.5° en la estación 7202; 43° en la estación 26068; 39° en la estación 28044 y 38° para la estación 31027.



Gráfica 2. 26 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio NWS percentil 95. Umbral Relativo

### 2.3.2.3 Percentil 99, criterio de NWS

Este criterio define no presenta eventos en todas las estaciones.



Gráfica 2. 27 Duración total anual de las Olas de Calor. Criterio de NWS percentil 99. Umbral Relativo

## 2.4 Análisis de los criterios existentes de las Olas de Calor

Al aplicar los diferentes criterios destaca el uso de criterios de umbral relativo, ya que dan una mejor agrupación y se pueden determinar comportamientos del fenómeno en las diferentes estaciones. Se observó también que el número de eventos, así como sus duraciones, está relacionada con el clima del lugar.

Para la estación 1019 el uso de umbrales absolutos da como resultado pocos eventos y un número menor de días con Olas de Calor. Los umbrales son mayores que el promedio mensual del mes más caluroso, que es de 30 grados

la estación 26068 da mayores resultados en eventos y en días que las otras estaciones; utilizando los umbrales relativos la estación 1019 en varios años presenta datos de Olas de Calor mayores a las demás estaciones, también la estación 26068 ya no se separa del análisis como en el caso del umbral absoluto

En estos criterios, solo se hace uso de la temperatura máxima y en algunos casos también de la mínima. Algunos estudios sugieren que para el estudio de las Olas de calor se deben usar más variables climáticas (Steadman, 1984) como la humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, etc., así como variables no atmosféricas (salud, nivel de vida, adaptación psicológica, etc.). Sin embargo, esto plantea dos grandes problemas, por una parte entender las complejas relaciones

que existen entre las diferentes variables climáticas; y por otra la falta de medición de dichas variables, siendo esta última más grave que la anterior ya que si no se cuenta con información de las variables es imposible determinar sus relaciones. También es importante señalar que esos estudios se refieren únicamente a los impactos sobre la mortandad y mortalidad del ser humano, del ganado y la agricultura. Sin embargo los impactos de las Olas de Calor tienen además efectos en las estructuras o servicios (agua potable, carreteras, líneas de conducción eléctricas, etc.), para la mayoría de los impactos estructurales la temperatura es la variable que mayor impacto tiene. Otra de las características de estudio en las Olas de Calor aparte de intensidad, es la duración y el área. La Ola de Calor tiene efectos acumulativos en la salud humana por lo tanto una larga exposición de alta temperatura aunque no se sobrepase el umbral escogido, tendrá grandes impactos en la mortandad y mortalidad.





### 3 Estudio de la Ola de Calor

El Estudio del fenómeno de la Ola de Calor es reciente y se encuentra muy poca información en la literatura, dentro de la cual en muchos estudios se toma como un fenómeno secundario o derivado de otro que ha llamado más la atención tanto de la comunidad científica como en el público en general y es el Cambio Climático. Estos eventos parecen estar relacionados, ya que al aumentar las temperaturas es de suponer que el número o la duración de Olas de Calor también aumente. Esta suposición parece correcta ya que cuando se grafican el número de días que se ha sobrepasado una cierta temperatura (generalmente entre 30 y 35° C) por año, se observa una tendencia a la alza, por lo que se concluye que al aumentar la temperatura por efecto del Cambio Climático se aumentará también el número de Olas de Calor.

Existen dos complicaciones en la suposición anterior: Un umbral absoluto no puede usarse indistintamente a todas las regiones, ya que no considera la variabilidad climática ni la adaptabilidad de los seres vivos en esas regiones, por lo tanto estos valores solo deberían usarse para describir condiciones estructurales o de servicio (pérdidas por evaporación en cuerpos de agua, pérdidas de energía en la conducción eléctrica, deterioro en el pavimento asfáltico, etc.); la otra complicación es que no toma en cuenta la temperatura mínima. Si por el contrario se determina un valor de la temperatura propia de una zona (umbral relativo) y se toma en cuenta tanto la temperatura máxima como la mínima, esa tendencia a aumentar ya no es tan clara por lo que es necesario replantear la relación Cambio Climático y Olas de Calor.

Al principio de este estudio se hizo una comparación de diferentes criterios utilizados para definir una Ola de Calor de los cuales se clasificaron en criterios absolutos o fijos y relativos o variables, dando una mejor clasificación del fenómeno estos últimos, ya que con el criterio absoluto había estaciones que presentaban más de 250 días lo que indica que es un estado “normal” de la región. Para ese análisis se tomaron 5 estaciones ubicadas en 5 puntos de la República Mexicana (Aguascalientes, Chiapas, Sonora, Tamaulipas y Yucatán) cuya única condición fue que tuvieran el mayor registro continuo del estado al que pertenecen. Se observó una clara separación de las estaciones de acuerdo a la zona climática al utilizar un criterio absoluto. Por el contrario los criterios relativos muestran una mejor agrupación del fenómeno en todas las estaciones (no hay separación). La distribución temporal y la duración de la Ola de Calor que se obtienen al aplicar los criterios relativos hacen que se consideren como fenómenos extremos y no como fenómenos recurrentes y fácilmente predecibles.

Lo anterior llevó a la necesidad de plantear una definición de Ola de Calor, que al igual que el caso de la Sequía, no hay una definición mundialmente aceptada

### **3.1 Criterios Propuestos para la determinación de las Olas de Calor**

De forma muy simple se define la Ola de calor como:

Fenómeno meteorológico extremo en donde se presenta una anomalía de altas temperaturas, tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas.

Esta definición nos lleva a diferentes interpretaciones o criterios. En este trabajo se utilizarán dos criterios para determinar una ola de calor. En ambos criterios se utiliza la serie histórica completa, es decir, sin separar los meses cálidos de los fríos.

Robinson (2001) en su estudio sobre los efectos de las Olas de Calor, estableció los dos tipos de umbrales, el absoluto y el relativo. El primer umbral, determina que tiene efectos fisiológicos en los seres vivos, mientras que en el segundo umbral los efectos son psicológicos. En este trabajo, y a diferencia de Robinson, se observan tres efectos: físicos, psicológicos y fisiológicos.

El uso del umbral absoluto solamente tendrá aplicación en relaciones que no involucren ninguna relación de adaptación, como ejemplo se puede mencionar la evaporación, pérdida de energía eléctrica, aumento en las ponchaduras de las llantas, etc. Los efectos psicológicos de las olas de calor, no son relacionados con la salud sino con el comportamiento de los individuos, entre estos efectos esta la irritabilidad, agresión, falta de atención, etc. Por último, los efectos fisiológicos están relacionados directamente con la salud, ya que estas temperaturas pueden provocar cambios orgánicos y pueden provocar desde malestares hasta la muerte, ejemplos de estos casos es la insolación, agotamiento por calor, quemaduras leves, etc.

#### **3.1.1 Primer Criterio**

Ocurre una Ola de Calor cuando:

- Las temperaturas máximas y mínimas sobrepasan el percentil 90 en al menos dos días consecutivos.

En este criterio se pueden unir dos eventos si el lapso entre ellos no supera las 24 horas (un día) y la temperatura máxima y mínima superan el valor de la temperatura mediana de su serie correspondiente

#### **3.1.2 Segundo Criterio**

Ocurre una Ola de Calor cuando:

- Se presentan cuando la temperatura máxima sobrepasa el percentil 90 de la serie de temperaturas máximas y la temperatura mínima es mayor a la temperatura esperada de ese mismo día. Se debe de sobrepasar en al menos dos días consecutivos.

### 3.2 Parámetros de las Olas de Calor del primer criterio

Una vez determinado los umbrales de la Ola de calor, es posible determinar diferentes características o parámetros. Estos parámetros tienen el objetivo de caracterizar a la Ola de Calor para su estudio y comparación ya sea para el mismo fenómeno o para observar sus impactos con algunos sectores (ganadería, agricultura, salud, etc.).

En este estudio, se proponen parámetros para caracterizar la Ola de Calor. A los parámetros obtenidos de una estación o municipio se les dio el nombre de “locales” y tienen la ventaja de que describen mejor el evento en estudio y relaciones más confiables con algún sector que se desee observar sus efectos, La desventaja es que al ser “locales”, no pueden usarse en ninguna otra zona geográfica. También se proponen parámetros que puedan ser usados para comparar diferentes zonas geográficas y encontrar relaciones más generales o extrapolables. A estos últimos se les designará como parámetros “índice”.

El objetivo de estos parámetros “índice”, es comparar y extrapolar sus relaciones a otras zonas geográficas incluso si no cuentan con información. Estos parámetros deben ser flexibles y sencillos para que se pueda regresar a su valor original. Esto llevó a la conclusión que debían surgir de algún parámetro estadístico. Es importante mencionar que dada las características de los dos criterios para determinar las Olas de Calor, los parámetros “índice” solo se usaron en el primer criterio.

La primera impresión fue que los parámetros “índice” debían obtenerse a través de una estandarización. Las primeras prueba no fueron muy fructíferas ya que fue muy común encontrar que el parámetro índice presentaba signo negativo, lo cual físicamente indica que la temperatura mínima es anormalmente mucho más alta en comparación con la temperatura máxima. La presencia del signo negativo crea confusión en la interpretación, por lo que se decidió que los parámetros “índice” en lugar de ser estandarizados, sean modulados. La modulación consiste en dividir los elementos de una serie de tiempo entre su media. Se obtuvieron cuatro series moduladas: Temperatura máxima; temperatura mínima; diferencia entre la temperatura máxima y mínima y promedio entre la temperatura máxima y mínima.

En este trabajo, a los parámetros que no se indique si son “locales” o “índice”, se entenderá que son locales.

Los parámetros propuestos para la Ola de Calor son los siguientes:

Parámetros de la Ola de Calor.

- *Fecha de inicio (FI)*. La fecha en que inicia la Ola de Calor y se da en forma continua, empezando la numeración el 1 de enero hasta el 31 de diciembre del mismo año.
- *Fecha de término (FT)*. La fecha en que termina la Ola de Calor, esta se da en forma continua empezando el 1 de enero y terminando el 31 de diciembre del mismo año.

- *Duración (D)*. El tiempo que dura la Ola de Calor.
- *Intensidad (I)*. Se define como la suma de las temperaturas divididas entre la duración de la Ola de Calor. Con esta definición se tienen dos intensidades, las de la serie de temperatura máxima ( $I_{\max}$ ) y la serie de la temperatura mínima ( $I_{\min}$ ).
- *Índice de Intensidad (IEI)*. Es la suma de la temperatura modulada entre la duración de la Ola de Calor. Se presentan dos índices, uno en la serie de temperatura máxima y otro para la serie de temperatura mínima.
- *Temperatura de alivio (TA)*. Se define como la diferencia entre la temperatura máxima y temperatura mínima.
- *Índice de la temperatura de alivio (IETA)*. Es la obtenida de la serie modulada de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima.
- *Temperatura Máxima (TM)*. Es la temperatura máxima que se registra en la Ola de Calor. Al igual que la intensidad, se tiene una Temperatura máxima en la serie de temperatura máxima ( $TM_{\max}$ ) y otra en la serie de temperatura mínima ( $TM_{\min}$ ).
- *Índice de la temperatura máxima (IETM)*. Es la temperatura máxima modulada.
- *Severidad de la Ola de Calor*. Se determina como el producto del promedio entre la intensidad máxima y mínima y la duración de la ola de Calor entre la temperatura de alivio promedio  $[S=D*(0.5*(I_{\max}+I_{\min}))/TA_{\text{promedio}}]$ .
- *Índice de Severidad de la Ola de Calor*. Se determina como el producto del promedio de la intensidad índice máxima y mínima y la duración de la Ola de Calor dividida entre el índice de la temperatura de alivio promedio.  $[S=IETAp*(0.5*(IEI_{\max} + IEI_{\min}))*D]$

Un evento de Ola de Calor no es un fenómeno que ocurra cada año, sin embargo, puede ocurrir varias veces en un mismo año. Esto se debe a que es un evento cíclico pero aperiódico. Es por esto que también es necesario determinar sus características o parámetros anuales.

Los parámetros anuales que se proponen son los siguientes.

- *Número de eventos por año (NEA)*. El número de veces que aparece una ola de calor en un año.
- *Duración anual (DA)*. Es la suma total de las duraciones de las olas de calor que aparecen en un año.
- *Duración promedio (DP)*. Es el cociente entre la duración total anual y el número de eventos por año.
- *Duración máxima anual (DMA)*. Es la máxima duración de la Ola de calor registrada en un año.

- *Intensidad promedio (IP)*. Es el promedio de las intensidades de las olas de calor que aparecen en un año. Se presentan dos, una en la serie de temperaturas máximas y la otra en la serie de temperaturas mínimas.
- *Índice de la Intensidad promedio (IEIP)*. Es el promedio de los índices de las intensidades de las olas de calor que aparecen en un año.
- *Intensidad máxima (IM)*. Es la intensidad máxima registrada en un año. Se presentan dos, una en la serie de temperaturas máximas y la otra en la serie de temperaturas mínimas.
- *Índice de la intensidad máxima ((IEIM)*. Es el índice máximo de las intensidades máximas registradas en un año.
- *Temperatura de alivio promedio (TAP)*. Es el promedio de las temperaturas de alivio promedio.
- *Índice de temperatura de alivio promedio (IETAP)*. Es el promedio de los índices de las temperaturas de alivio registradas en un año.
- *Temperatura de alivio mínima (TAM)*. Es la temperatura de alivio mínima registrada en un año.
- *Índice de la temperatura de alivio mínima (IETAM)*. Es el índice mínimo de temperatura mínima de alivio que se registro en un año.
- *Severidad total (ST)*. Es la suma de las severidades que se presentan en un año.
- *Índice severidad total (IST)*. Es la suma de los índices de severidad que se presentan en un año.
- *Severidad promedio (SP)*. Es la severidad total anual entre el número de eventos al año.
- *Índice de severidad promedio (ISP)*. Es el índice de severidad total anual entre el número de eventos al año.
- *Severidad máxima (SM)*. Es la severidad máxima registrada en un año.
- *Índice de severidad máxima (ISM)*. Es el índice de severidad máxima registrada en un año.
- *Temperatura máxima promedio (TMP)*. Es el promedio de las temperaturas máximas, se obtienen dos, una en la serie de temperaturas máximas y otra en la serie de temperaturas mínima.
- *Índice de temperatura máxima promedio (IETMP)*. Es el promedio del índice modulado de temperatura máxima que se presenta en el año.
- *Temperatura máxima registrada (TMR)*. Es la temperatura máxima registrada en un año. Se obtienen dos, una en la serie de temperaturas máximas y otra en la serie de temperaturas mínimas.
- *Índice de temperatura máxima registrada (IETMR)*. Es el índice estándar de la temperatura máxima registrada en el año.
- *Día de inicio de la temporada de la ola de calor*. Es el día en que aparece la primera ola de calor en un año.

- *Día de término de la temporada de la ola de calor.* Es el último día de la última ola de calor que aparece en un año.

También se pueden determinar los siguientes parámetros para un cierto periodo de estudio.

- *Mes más probable (MMP).* Es el mes que más veces presenta el evento de la ola de calor en un periodo determinado.
- *Promedio total de los eventos de la ola de calor (PT).* Es la suma de Olas de Calor que se presentan en un periodo entre el número de años en los que se presenta la Ola de Calor.
- *Duración de la ola de calor más probable (DMP).* Es la duración de la Ola de Calor que más veces se presenta en un periodo determinado.
- *Probabilidad anual de ocurrencia (P).* Es la suma de años en los que se presenta la Ola de Calor entre el total de años del periodo considerado.
- *Fecha de inicio de la ola de calor con una probabilidad  $G(x)=0.95$  (FI95).* Es la fecha que tiene una probabilidad del 95% de presentarse en ese día o después. Esta fecha se determina a través de una Función de Distribución de Probabilidad Mixta.
- *Fecha de término de la ola de calor con una probabilidad  $G(x)=0.95$  (FT95).* Es la fecha que tiene una probabilidad del 95% de terminarse en ese día o antes. Esta fecha se determina a través de una Función de Distribución de Probabilidad Mixta.
- *Duración de la temporada de la Ola de Calor con una  $G(x)=0.95$  (NIT95).* Es la diferencia entre la fecha de inicio con una probabilidad del 95% menos la fecha de término con una probabilidad del 95%.
- *Total de Eventos (TE).* Es el número total de eventos presentados en un determinado periodo.

Una vez determinado los eventos, se proponen dos clasificaciones para la Ola de calor:

La primera clasificación es de acuerdo al percentil en que se encuentra, esta clasificación puede aplicarse para cada día que dura el evento o el evento en sí. La clasificación es la siguiente:

0. Unión. Mayor que la mediana, pero menor que el umbral. Se utiliza para unir dos eventos y considerarlos como uno.
1. Baja. Entre el percentil 90 y 92.
2. Moderada. Entre el percentil 90 y 94.
3. Media. Entre el percentil 94 y 96.
4. Severa. Entre el percentil 96 y 98.
5. Extrema. Mayor del percentil 98.

Es conveniente hacer la siguiente aclaración: Según los criterios que establecimos para determinar las Olas de Calor citado anteriormente, dos eventos de Olas de Calor se pueden unir si el tiempo entre ellos no es mayor a 24 horas y la temperatura máxima y mínima supera el valor de la mediana de la serie correspondiente, es precisamente esta temperatura a la que se refiere la clasificación Unión (0). Esta clasificación se propone como un índice adimensional, y es de gran ayuda para la elaboración de mapas.

La segunda clasificación es de acuerdo a su afectación:

1. Local. Cuando se presente solo en un municipio.
2. Vasta. Cuando se presente en más de dos municipios de un mismo Estado.
3. Extraordinaria. Cuando se presente en más de un Estado.

### 3.3 Parámetros de las Olas de Calor del segundo criterio

La Ola de calor tiene, como ya se comentó, efectos en diversos sectores como la salud, la ganadería, agricultura, etc. En el caso de la salud, se presentan efectos físicos como es el caso de insolación, agotamiento por calor e incluso la muerte. Sin embargo existen algunos efectos que son psicológicos y estos no se dan con eventos tan extremos como en el primer criterio, sino que se dan con temperaturas más bajas.

Los efectos psicológicos son: incomodidad, irritabilidad, agresividad, falta de atención y falta de concentración. En España se han encontrado algunas relaciones entre la temperatura y el número de accidentes laborales, los sectores más afectados son la agricultura y la construcción (MMA, 2005).

El objetivo de este segundo criterio es tomar las anomalías de la temperatura mínima diaria así como una alta temperatura máxima. La temperatura máxima, al igual que en el primer criterio, se tomó como umbral el percentil 90 de la serie de temperaturas máximas, mientras que la anomalía en la temperatura mínima se consideró como la desviación de la temperatura mínima de un día con respecto a la media de ese día.

$$anomalía = Temp. mínima día i - Temp. Promedio día i \quad [3.1]$$

Al igual que en el primer criterio, se tomo como duración mínima dos días consecutivos.

Los parámetros que se proponen bajo este criterio son:

- *Sensibilidad Térmica*. Es la diferencia entre la temperatura máxima y la anomalía de la temperatura mínima.
- *Intensidad en exceso*. Es la diferencia entre la Sensibilidad Térmica y el percentil 90 de la serie de temperatura máxima.

- *Temperatura de la Ola de Calor.* Es la diferencia entre la temperatura máxima y el percentil 90 de la serie de temperatura máxima.
- *Temperatura de la Ola de Calor esperada.* Es la suma entre la ola de calor y el percentil 90 de la serie de temperatura máxima.
- *Periodicidad.* Es el tiempo que transcurre entre los eventos de Ola de Calor para un mismo año.

Al igual que el criterio anterior. Estos parámetros se pueden presentar en forma anual como datos promedios o máximos, así como el día de inicio, término, etc.

### **3.4 Relación de las Olas de Calor y otras variables climáticas**

Hasta este momento se ha definido la Ola de Calor como un evento exclusivo de la temperatura, aunque también se sabe que está relacionado otras variable como la humedad relativa y el viento (sobre todo sus efectos) (Steadman, A universal scale of apparent temperature, 1984) etc. Sin embargo el motivo de utilizar solo la temperatura es porque es una variable climática de la cual se tienen mayores mediciones, tanto temporal como espacial, ya que es medida por las estaciones climatológicas (alrededor de 5400 estaciones) y por el contrario, la humedad relativa, la dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, radiación solar, etc., solo son medidas por algunas estaciones meteorológicas de las cuales se encuentran alrededor de 200 en todo el país. El número de estaciones implica otro problema, los registros de las estaciones rara vez están completos por lo que se hace necesario aplicar técnicas de llenado de datos y estas técnicas utilizan la distancia de las estaciones de apoyo a la estación de estudio por lo que a una mayor distancia entre las estaciones la confiabilidad es menor.

También es importante aclarar que aunque no se toma en cuenta la altitud en el análisis va implícita. El clima en una zona está determinado en gran medida por la altitud, las zonas más bajas tienen mayor temperatura que las zonas altas, por lo tanto los datos tomados en una estación climatológica ya están afectados por la altitud, es decir, estos datos son para esa zona, con ese clima y a esa altitud. Solo se debe tener cuidado al hacer el llenado de datos para no mezclar zonas de diferente altitud (o clima) ya que esto tendería a modificar los datos y con esto obtener un valor umbral más alto en los climas fríos o más bajos en las zonas cálidas.

En este trabajo también se utilizaron otras variables climáticas con el objeto de encontrar relaciones que ayuden a anticipar el evento de Ola de Calor. Para este estudio se utilizó una estación meteorológica en el estado de Aguascalientes y se hizo un ejercicio para encontrar una relación entre las diferentes variables climáticas y la ola de Calor.

Para el análisis de las variables climáticas se usaron técnicas de Análisis Multivariantes, las cuales permiten explorar simultáneamente un gran número de variables.



Dentro del análisis multivariante se encuentran dos grupos: Métodos de dependencia que buscan explicar o predecir el comportamiento de las variables dependientes a través de las variables independientes y los Métodos de Interdependencia que encuentran información sobre la estructura de los datos simplificando el número de variables o reduciendo las dimensiones con la menor pérdida de información. Una forma sencilla de reducir variables es a través del coeficiente de correlación, ya que las variables que están muy correlacionadas pueden sustraerse dejando solo una variable representativa, esto no significa que no tengan relevancia o que se eliminen, sino simplemente que pueden ser explicadas a través de otra variable.

La Regresión Lineal Múltiple es una técnica de dependencia y permite analizar la relación entre una variable dependiente y gran número de variables independientes, con el objeto de usar esas variables independientes (valores conocidos) para predecir la variable dependiente (valores por conocer). Las variables climáticas (variables independientes) que se utilizaron son: Temperatura máxima y mínima, presión atmosférica máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima, velocidad media y máxima e insolación; esto para un día de retraso, y los promedios de dos, tres, cinco y siete días de retraso. Con esto se construyó una matriz como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 3. 1 Variables climáticas relacionadas con las Olas de Calor**

FECHA	tmax	tmin	tmax	tmin	tmax	tmin	hr max	hr min	hr max	hr min	hr max	hr min	p max	p min	p max	p min	p max	p min
	1	1	3	3	7	7	1	1	3	3	7	7	1	1	3	3	7	7
1982-5-17	31.50	16.50	30.33	16.33	29.21	16.00	66.00	16.00	62.33	18.00	57.14	18.86	815.60	810.40	815.40	810.80	815.16	811.13
1982-5-25	31.00	16.00	29.67	16.33	29.71	16.07	68.00	25.00	77.00	29.00	78.86	32.43	813.90	809.90	814.47	810.40	815.37	811.17
1982-6-17	34.00	15.00	33.00	15.00	32.00	15.57	67.00	18.00	66.33	18.00	66.43	19.29	814.50	810.20	815.77	545.80	816.84	698.46
1983-5-22	34.00	14.00	32.83	15.00	32.93	15.14	57.00	25.00	57.67	27.67	54.57	24.43	816.50	811.60	816.50	812.23	816.19	812.14
1983-6-27	30.00	18.00	30.00	16.50	30.14	16.79	86.00	25.00	86.33	22.67	87.57	30.00	818.70	814.80	817.70	813.97	817.40	813.64
1985-5-25	32.50	15.50	32.50	15.50	30.86	15.36	73.00	30.00	69.33	25.00	73.71	24.14	817.10	811.90	817.77	812.77	816.63	812.06
1986-5-13	34.00	15.50	32.33	14.33	30.50	14.93	51.00	15.00	47.00	15.33	41.71	16.71	815.80	810.90	816.20	812.07	815.39	811.33
1988-6-8	32.50	16.50	32.33	15.50	32.43	15.14	76.00	19.00	62.00	16.33	57.14	13.86	816.40	812.00	817.47	813.27	816.74	812.61
1989-6-2	31.00	16.50	30.83	16.33	30.00	15.93	73.00	24.00	67.67	22.33	74.00	25.29	819.10	814.40	818.47	813.30	818.67	813.66
1992-6-26	31.00	17.00	32.00	15.33	31.00	15.07	85.00	9.00	74.00	10.67	70.86	10.00	816.20	812.00	816.97	811.33	831.06	812.20
1993-6-3	33.50	15.50	31.67	16.00	30.36	15.07	66.00	13.00	74.67	13.00	75.00	14.29	816.70	812.10	816.90	812.77	817.00	812.70
1995-6-2	32.00	16.50	31.00	17.50	30.79	17.36	77.00	28.00	77.00	28.00	77.00	28.00	816.70	812.20	816.70	812.20	816.70	812.20
1995-6-9	34.00	15.00	32.83	15.83	32.93	17.07	37.00	18.00	50.33	12.67	53.43	18.00	815.40	811.70	815.20	811.57	815.60	811.31
2001-4-15	33.00	16.00	34.00	15.83	33.43	15.43	53.00	16.00	51.00	13.00	45.57	11.57	818.50	813.20	818.17	813.97	817.66	813.06
2001-5-18	30.00	17.00	28.67	15.33	27.79	14.43	64.00	17.00	64.67	17.00	68.43	23.71	818.50	814.20	818.77	814.67	819.46	815.87
2001-6-5	31.00	17.50	30.83	17.17	32.00	16.50	80.00	20.00	71.00	20.67	70.57	19.86	814.70	809.90	815.43	810.37	816.71	812.10
2002-4-20	34.50	16.00	33.00	14.67	31.07	14.79	59.00	14.00	60.33	16.67	57.00	19.43	817.50	813.00	819.23	814.37	819.24	814.46
2002-5-3	35.50	16.00	35.83	16.33	35.07	15.79	57.00	14.00	60.33	15.00	60.29	15.29	817.10	811.10	817.70	812.07	818.64	813.54
2002-6-17	32.50	15.00	31.17	16.67	30.50	17.07	86.00	18.00	82.00	24.33	83.00	30.57	819.90	815.40	819.17	815.57	817.61	814.04

Un punto importante que se debe aclarar, es que este fue un ejercicio para determinar las relaciones entre las variables climáticas y las Olas de Calor ya que solo se tiene información de una estación (Aguascalientes). Este tipo de análisis depende mucho de la cantidad de información, ya que siempre existen errores que pueden ser por imprecisión de los datos, el azar y la variabilidad de los eventos, es por esto que cuanto mayor sea la cantidad de observaciones mayor será la precisión y la variabilidad explicada por el azar disminuye.

Se desarrollaron diferentes modelos de Regresión Lineal Múltiple para las posibles combinaciones desde 1 hasta 6 variables, algunos resultados se muestran en las siguientes tablas.

En la Tabla 3.2 se muestra los resultados del análisis de dos variables para el evento de la Ola de Calor. Los valores  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  son los coeficientes del modelos de regresión múltiple, los valores de  $T_0$ ,  $T_1$  y  $T_2$  son los valores de la prueba de significancia y se sombreadon los valores que tienen un nivel de confianza menor al 0.5%

**Tabla 3.2 Tabla de coeficientes del Modelo de regresión Múltiple y la prueba de significancia**

variable 1	variable 2	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	t student	$T_0$	$T_1$	$T_2$
tmin 1	tmax 7	21.500	0.420	-0.140	0.322	1.998	4.488	4.200	<b>0.996</b>
tmin 1	tmin 5	18.967	0.526	-0.100	0.318	1.998	5.784	4.667	<b>0.786</b>
tmin 1	hr max 1	20.453	0.433	-0.102	0.316	1.998	4.087	4.226	<b>0.683</b>
tmin 1	tmin 3	18.413	0.551	-0.107	0.316	1.998	6.017	3.586	<b>0.641</b>
tmin 1	tmax 2	19.922	0.440	-0.083	0.315	1.998	4.200	4.383	<b>0.602</b>
tmin 1	tmax 3	20.039	0.439	-0.087	0.315	1.998	3.851	4.224	<b>0.552</b>
tmin 1	tmax 5	19.812	0.441	-0.078	0.314	1.998	3.780	4.195	<b>0.495</b>
tmin 1	tmin 2	17.745	0.521	-0.055	0.312	1.998	6.219	2.305	<b>0.245</b>
tmin 1	tmin 7	17.914	0.478	-0.018	0.312	1.998	5.276	4.674	<b>0.155</b>
tmin 2	tmax 7	24.496	0.360	-0.200	0.277	1.998	5.127	3.547	<b>1.402</b>
tmax 2	tmin 2	23.681	-0.179	0.375	0.275	1.998	5.317	<b>1.335</b>	3.821
tmin 2	tmin 3	20.699	0.743	-0.367	0.275	1.998	6.681	2.921	<b>1.329</b>
tmin 2	hr max 1	24.000	0.367	-0.183	0.272	1.998	4.933	3.593	<b>1.240</b>
tmin 2	tmax 3	24.030	0.368	-0.188	0.272	1.998	4.839	3.605	<b>1.209</b>
tmin 2	tmin 5	20.926	0.537	-0.168	0.269	1.998	6.345	4.005	<b>1.113</b>
tmin 2	tmax 5	23.505	0.371	-0.160	0.267	1.998	4.556	3.514	<b>1.022</b>
tmin 2	tmin 7	20.009	0.463	-0.065	0.258	1.998	5.878	3.951	<b>0.493</b>
tmin 3	tmax 7	27.821	0.309	-0.302	0.236	1.998	6.008	2.907	2.197
tmax 3	tmin 3	27.693	-0.309	0.316	0.230	1.998	5.845	2.075	2.975
tmin 3	hr max 1	27.515	0.313	-0.291	0.229	1.998	5.836	2.924	2.045
tmax 2	tmin 3	26.641	-0.269	0.328	0.229	1.998	6.036	2.041	3.139
tmin 3	tmax 5	27.574	0.309	-0.289	0.224	1.998	5.648	2.851	<b>1.941</b>
tmin 3	tmin 5	22.160	0.744	-0.414	0.215	1.998	6.571	3.250	<b>1.740</b>
tmax 7	tmin 7	31.677	-0.428	0.252	0.207	1.998	7.906	3.237	2.403
tmin 5	tmax 7	31.450	0.250	-0.408	0.204	1.998	7.559	2.346	3.074

Continuación tabla 3.2.

variable 1	variable 2	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	t student	$T_0$	$T_1$	$T_2$
tmin 7	hr max 1	31.544	0.257	-0.428	0.200	1.998	7.815	2.432	3.134
tmin 5	hr max 1	31.393	0.248	-0.401	0.193	1.998	7.386	2.307	2.910
tmin 3	tmin 7	21.536	0.511	-0.160	0.189	1.998	6.154	2.971	<b>0.902</b>
tmax 3	tmin 7	32.094	-0.429	0.239	0.188	1.998	7.560	2.957	2.247
tmax 3	tmin 5	31.759	-0.411	0.241	0.187	1.998	7.230	2.819	2.231
tmax 5	tmin 5	31.774	-0.400	0.235	0.185	1.998	7.193	2.790	2.164
tmax 5	tmin 7	32.133	-0.415	0.231	0.185	1.998	7.506	2.914	2.161
tmax 2	tmin 7	31.015	-0.358	0.237	0.172	1.998	7.439	2.719	2.200
tmax 2	tmin 5	30.699	-0.340	0.238	0.171	1.998	7.079	2.560	2.171
tmax 2	tmax 7	40.687	-0.178	-0.313	0.148	1.998	16.899	<b>0.996</b>	<b>1.701</b>
tmax 2	hr max 1	40.794	-0.204	-0.295	0.144	1.998	16.499	<b>1.176</b>	<b>1.603</b>
tmax 3	tmax 7	40.611	-0.202	-0.285	0.144	1.998	16.477	<b>0.796</b>	<b>1.219</b>
tmax 3	hr max 1	40.788	-0.248	-0.251	0.141	1.998	16.215	<b>1.053</b>	<b>1.120</b>
tmax 5	tmax 7	40.128	-0.147	-0.310	0.138	1.998	16.828	<b>0.422</b>	<b>0.944</b>
tmax 7	hr max 1	39.844	-0.395	-0.045	0.135	1.998	17.193	<b>0.840</b>	<b>0.093</b>
tmax 5	hr max 1	40.342	-0.238	-0.233	0.135	1.998	16.585	<b>0.815</b>	<b>0.824</b>
tmax 2	tmax 5	40.320	-0.163	-0.307	0.133	1.998	16.545	<b>0.760</b>	<b>1.318</b>
tmax 3	tmax 5	40.162	-0.202	-0.258	0.128	1.998	16.384	<b>0.432</b>	<b>0.564</b>
tmax 2	tmax 3	40.059	-0.110	-0.344	0.126	1.998	16.388	<b>0.385</b>	<b>1.080</b>
tmin 5	tmin 7	23.933	0.320	-0.042	0.086	1.998	6.611	<b>0.810</b>	<b>0.108</b>

En forma de resumen, se construyó la siguiente tabla usando el mejor coeficiente de determinación de las combinaciones de una a seis variables:

Tabla 3.3 Resumen de la relación de las Olas de Calor con otras variables climáticas

Intensidad Ola de Calor	1 Variable	2 Variables	3 Variables	4 Variables	5 Variables	6 variables
34.00	33.73	34.04	33.47	33.64	33.99	34.12
34.33	33.36	33.41	33.43	33.62	33.86	33.54
32.80	32.26	33.03	33.58	32.43	32.73	32.67
31.80	32.63	31.88	31.89	31.86	31.40	31.43
34.17	33.92	33.64	33.52	34.26	33.74	34.02
34.05	34.28	33.15	34.00	34.62	34.38	34.21
33.17	33.18	33.90	33.88	33.11	32.96	32.94
EEA	<b>2.11</b>	<b>2.53</b>	<b>2.64</b>	<b>1.12</b>	<b>0.73</b>	<b>0.90</b>

Donde la columna Intensidad es la variable dependiente, se observa la predicción de los diferentes modelos y al final la suma de los cuadrados de las diferencias entre el valor real y el estimado. Entre más variables se usen el coeficiente de determinación aumenta (con una variable es de 0.4 y con seis de 0.9) y la suma de los cuadrados de las diferencias (EEA) disminuye, aunque se observó que a partir del uso de 4 variables al menos una es no significativa y también se observó que en todos los modelos las variables más significativas y que presentan los mayores coeficientes de determinación es la temperatura tanto máxima como mínima (la combinación cambia de acuerdo al modelo).

Se observó que las demás variables climáticas responden a la temperatura, es decir, se pueden predecir a través de la temperatura pero no a la inversa. Por lo tanto no se usarán para predecir los eventos de Ola de Calor.



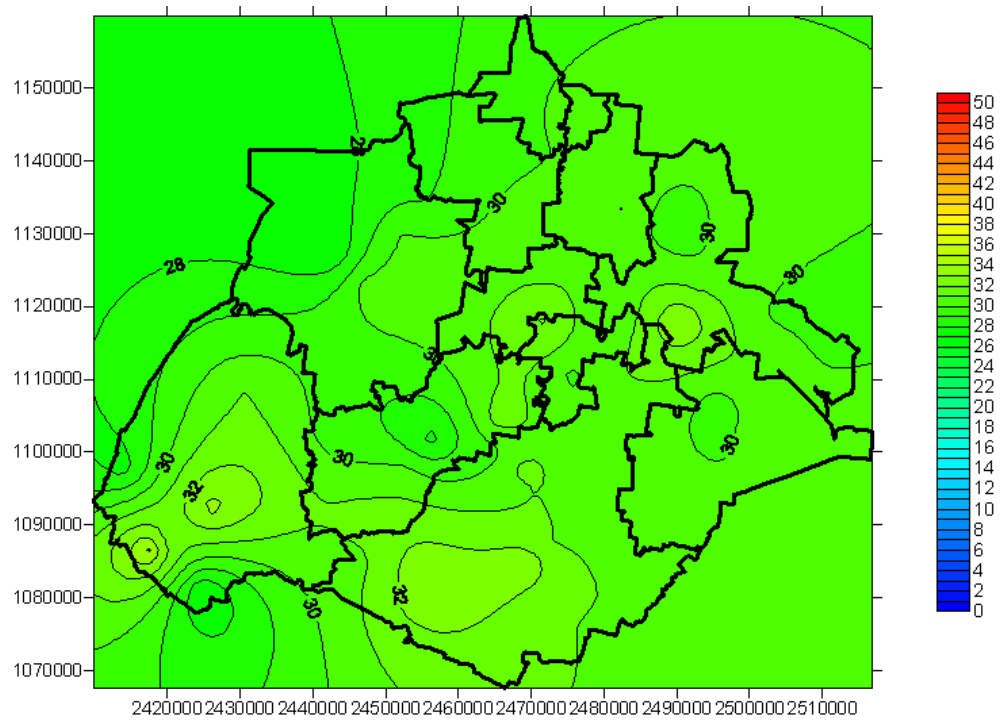
## **4 Aplicación de los criterios de la Ola de Calor**

Los criterios y los parámetros tienen por objetivo estudiar, analizar, caracterizar y comparar el fenómeno de la Ola de Calor.

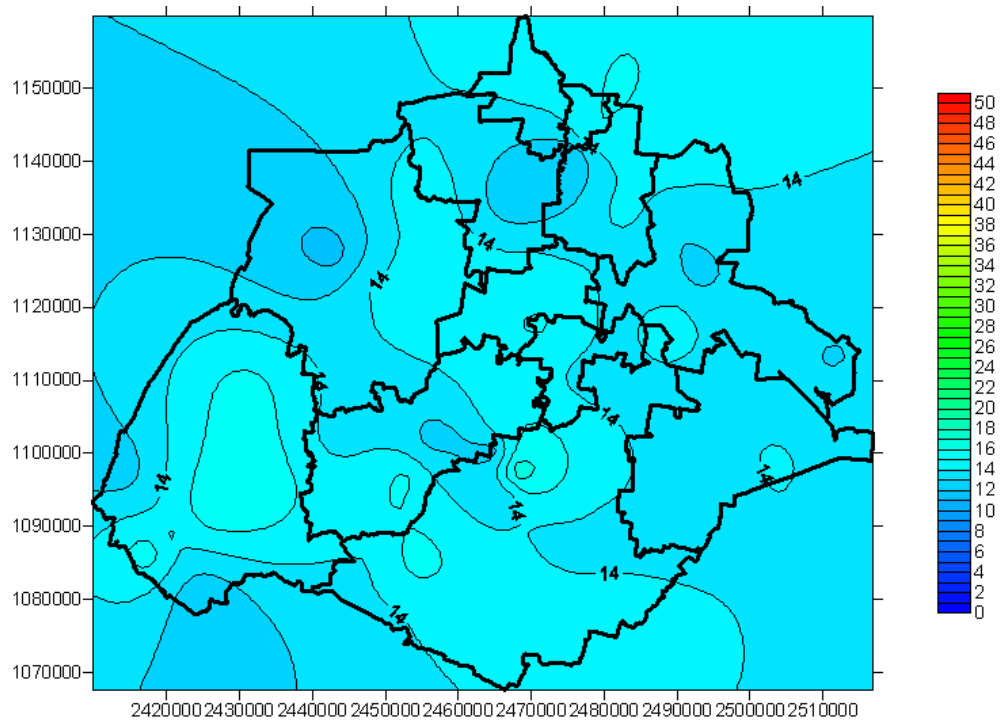
### **4.1 Aplicación del Primer Criterio de Ola de Calor en el estado de Aguascalientes**

Aplicando el primer criterio, se obtiene en el Estado de Aguascalientes un promedio de 44 eventos de Ola de Calor entre los años 1968 a 2005. La duración promedio es de 4.1 días, esto es, 183 días con Olas el fenómeno de Olas de Calor. Si entre 1968 y 2005 hay 13880 días, las olas de Calor representan solo el 1.3% lo cual reafirma lo extremo del evento.

Una vez obtenido los umbrales de la Ola de Calor, es posible dibujar un mapa de isolíneas que muestre el umbral de la serie de temperatura máxima (Mapa 4.1) o el umbral de la serie de temperatura mínima (Mapa 4.2). Los valores que tienen los umbrales de temperatura más bajo, corresponden a las zonas más altas como se muestra en el Mapa 4.3 (arriba de los 2500 msnm) y los umbrales más altos con las zonas más bajas (no mayores a los 1500 msnm). Por último en el Mapa 4.4 se muestra el clima en el estado de Aguascalientes y también se observa que los umbrales más bajos están en las zonas de clima húmedo y lo de los umbrales más altos corresponde a las zonas más cálidas. Por lo tanto se confirma que aunque no se consideró la altitud en el análisis de Olas de Calor los resultados confirman su presencia en forma implícita.

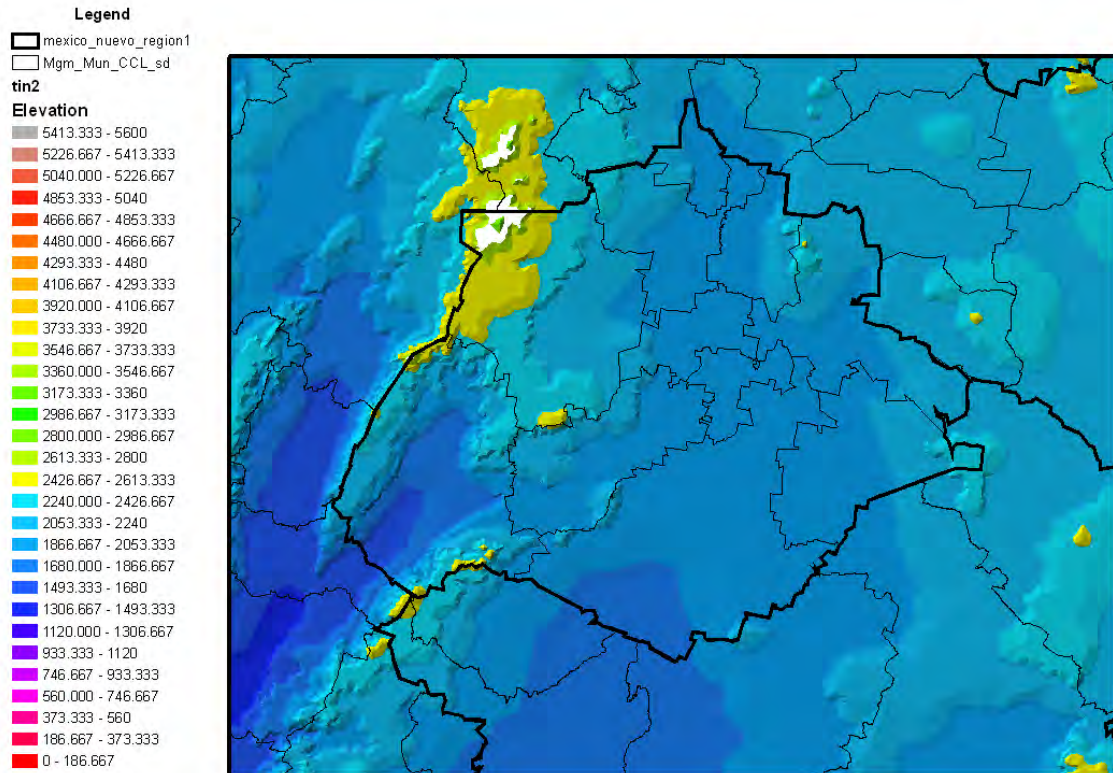


**Mapa 4.1 Umbral de la serie de temperatura máxima. Aguascalientes, México**

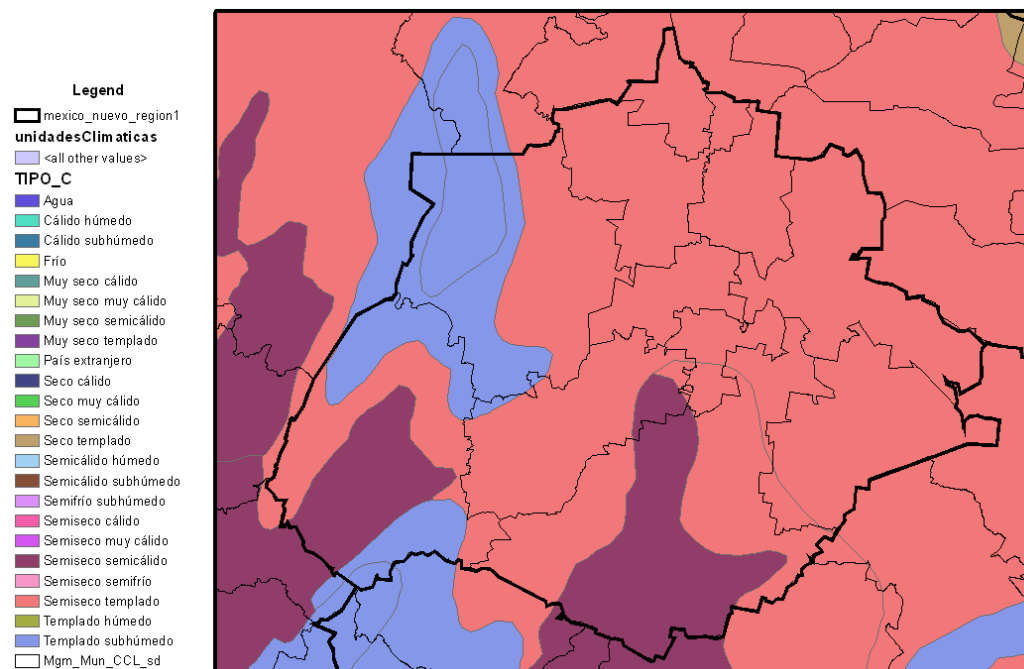


**Mapa 4.2 Umbral de la serie de temperatura mínima. Aguascalientes, México**



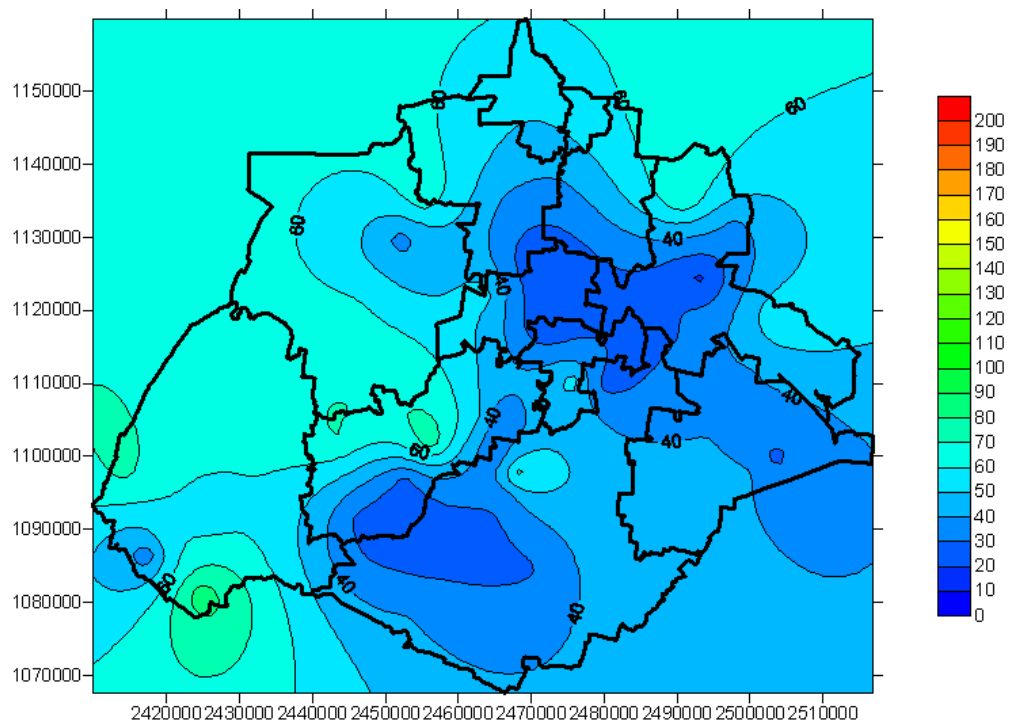


Mapa 4.3 Elevaciones en el estado de Aguascalientes

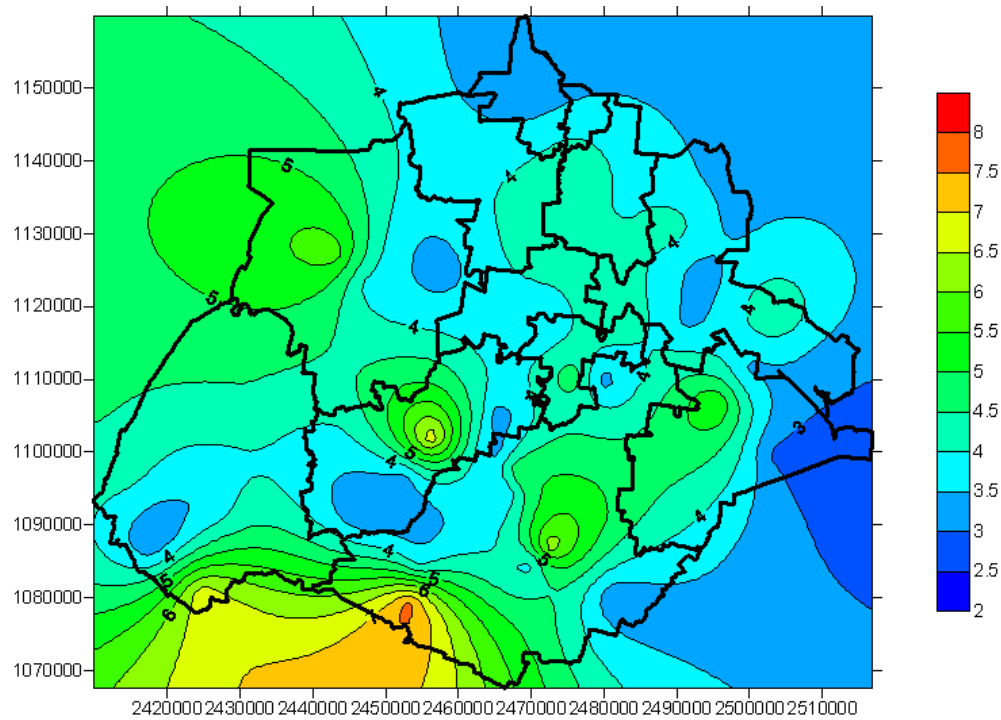


Mapa 4.4 Tipo de clima para el estado de Aguascalientes

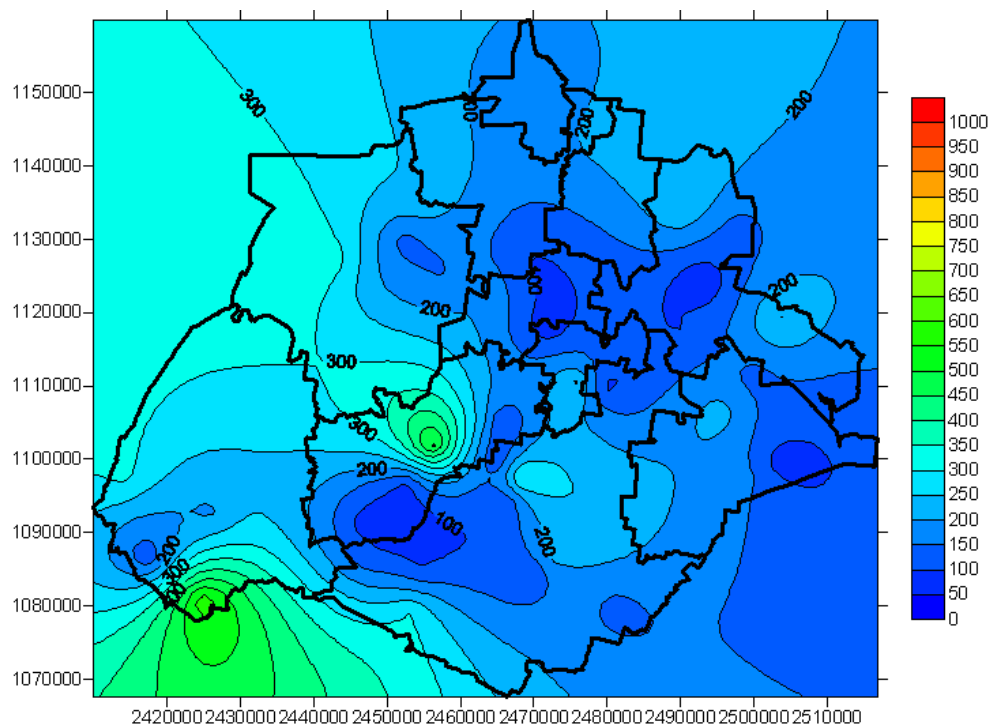
A manera de ejemplo, se muestran los siguientes mapas, que son del resultado de aplicar los parámetros propuestos. Estos valores son del periodo de estudio.



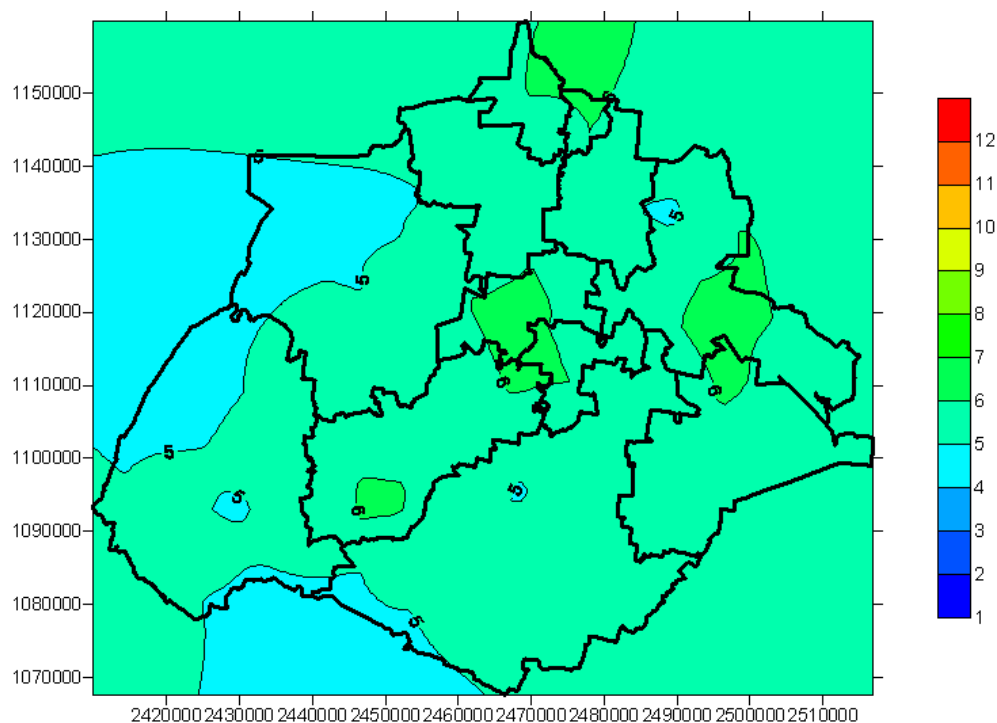
**Mapa 4.5 Total de eventos de Ola de Calor registrados en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México**



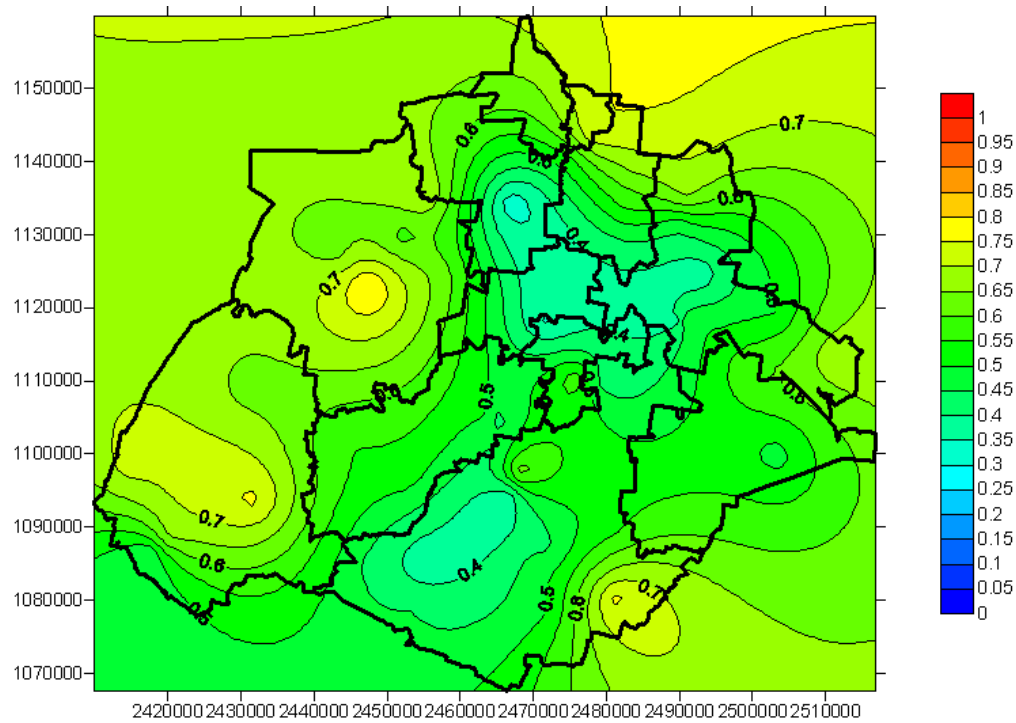
**Mapa 4.6 Duración promedio de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México**



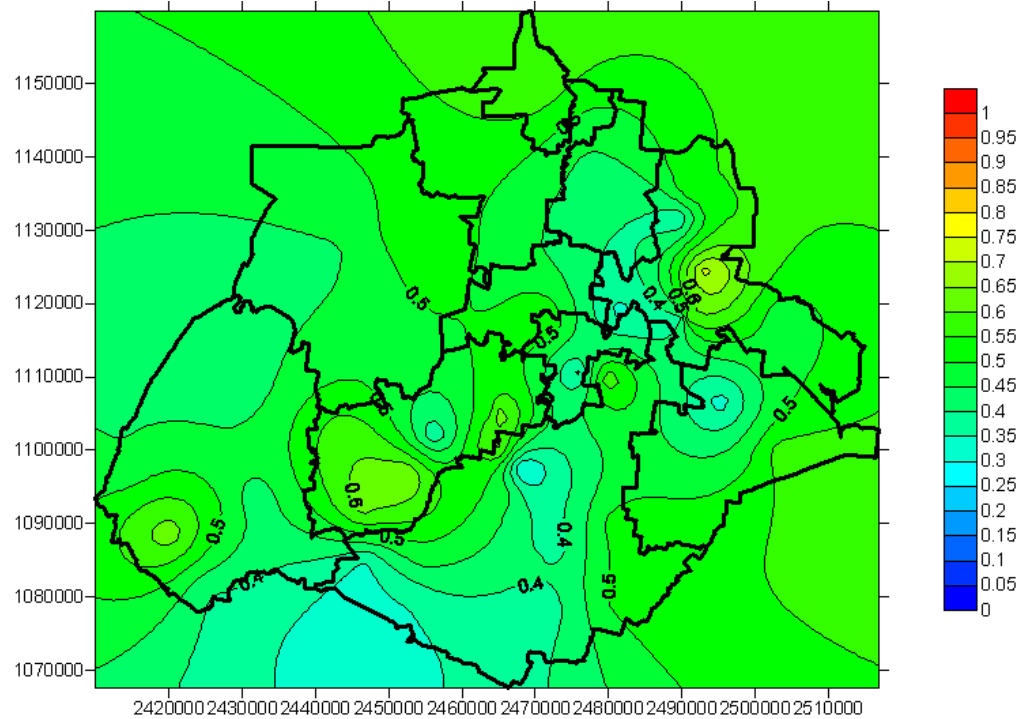
**Mapa 4.7 Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México**



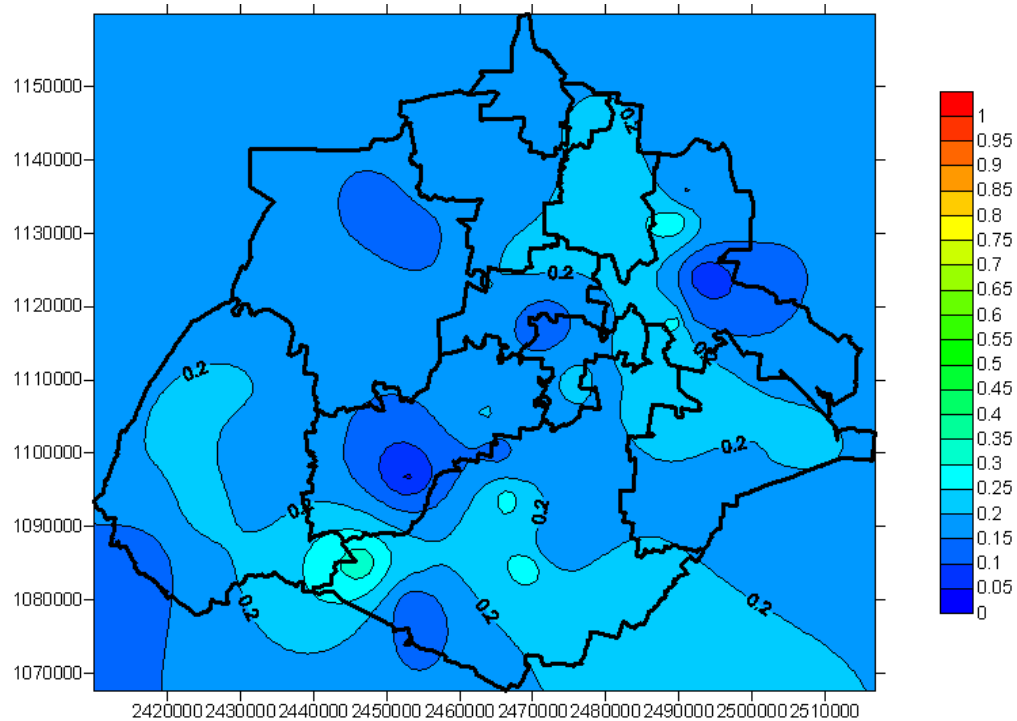
**Mapa 4.8 Mes más probable de aparición de la Ola de Calor. Aguascalientes, México**



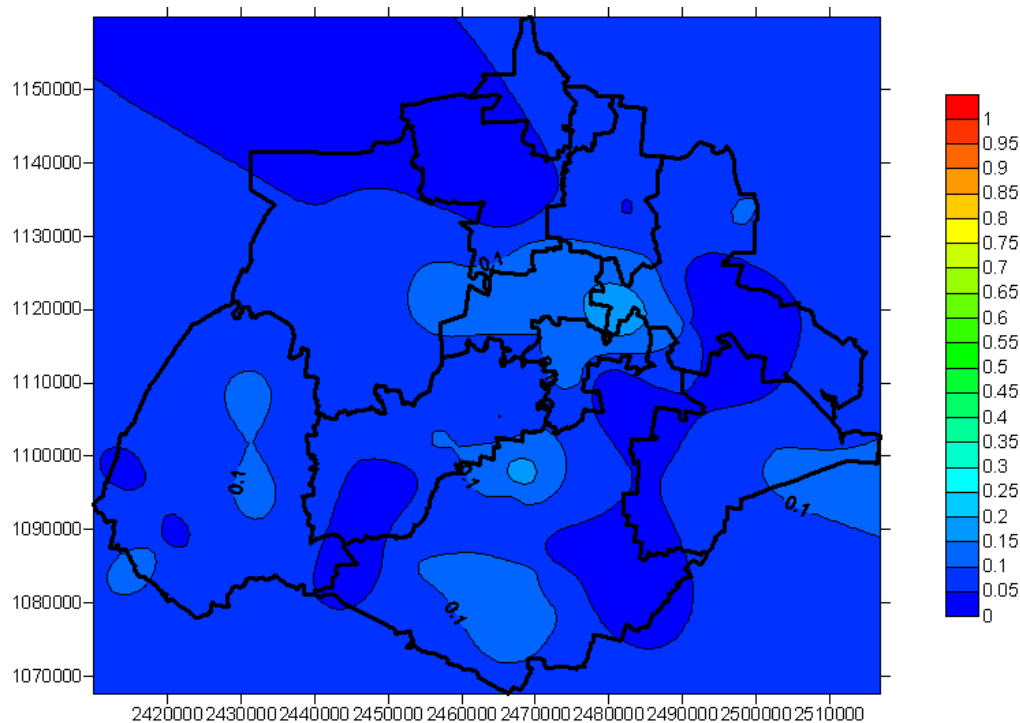
**Mapa 4.9 Probabilidad de que ocurra al menos una Ola de Calor en un año. Aguascalientes, México**



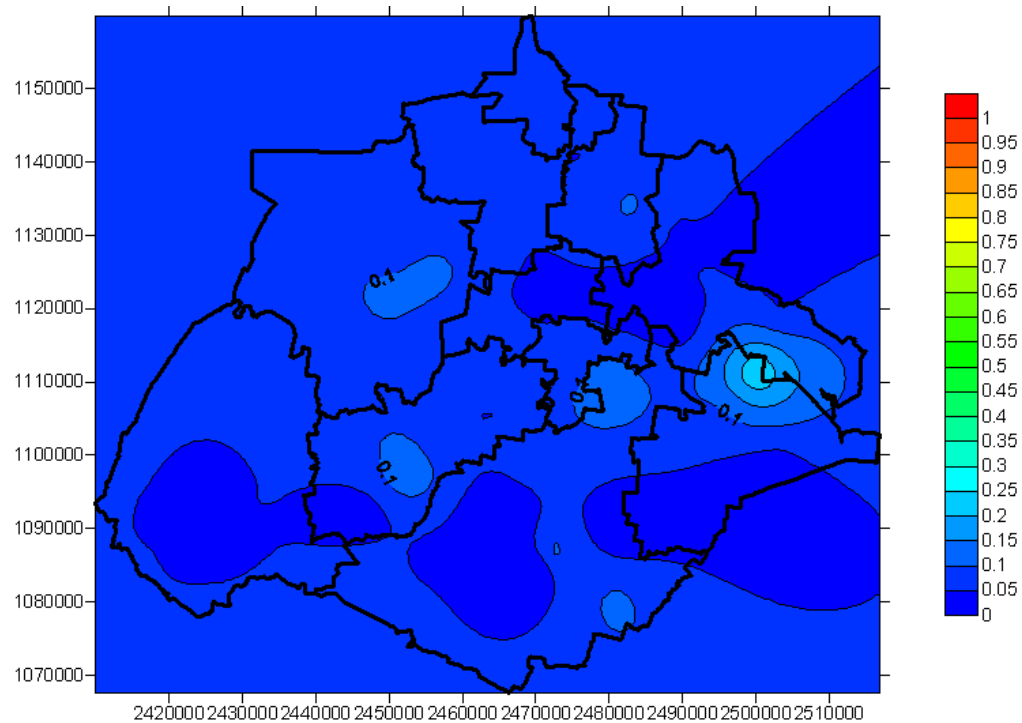
**Mapa 4.10 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 2 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



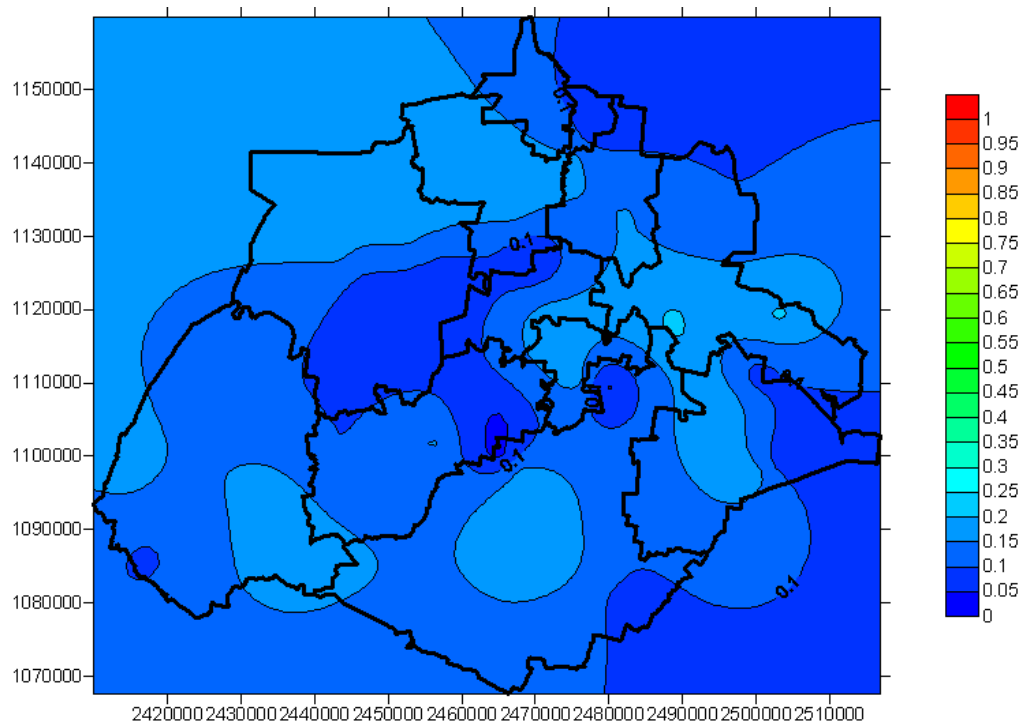
**Mapa 4.11 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 3 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



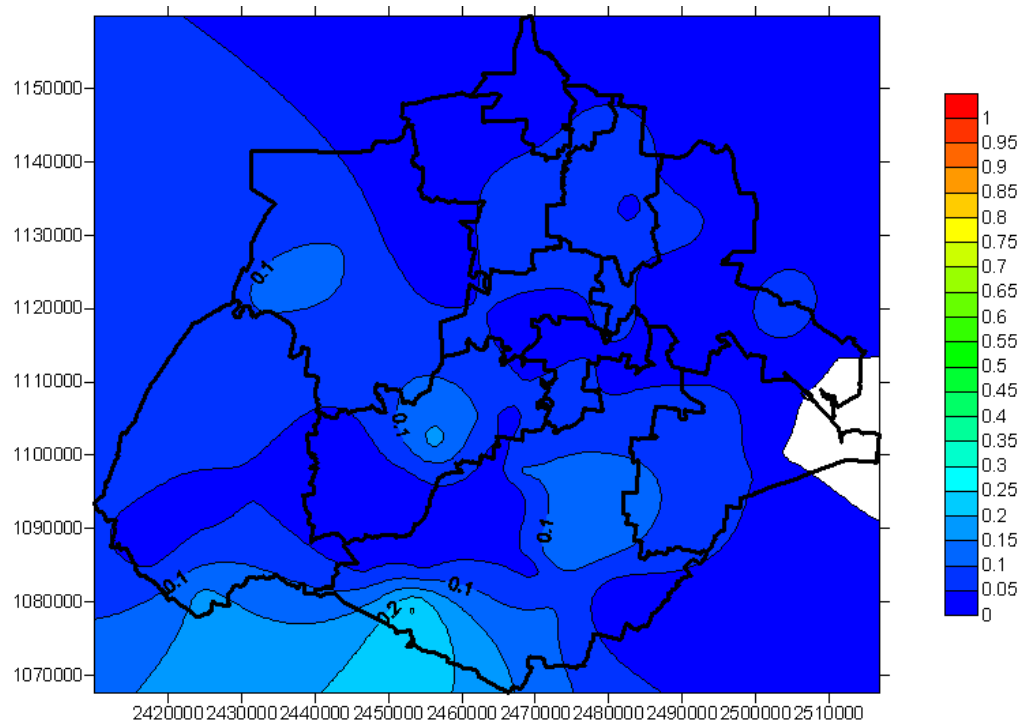
**Mapa 4.12 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 4 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



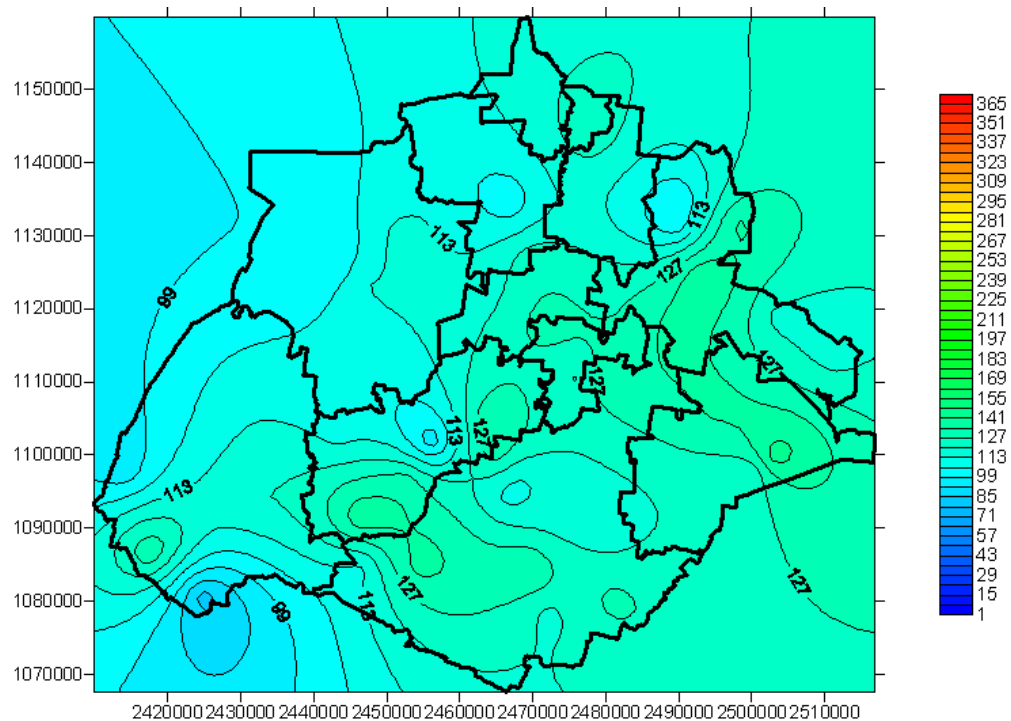
**Mapa 4.13 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 5 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



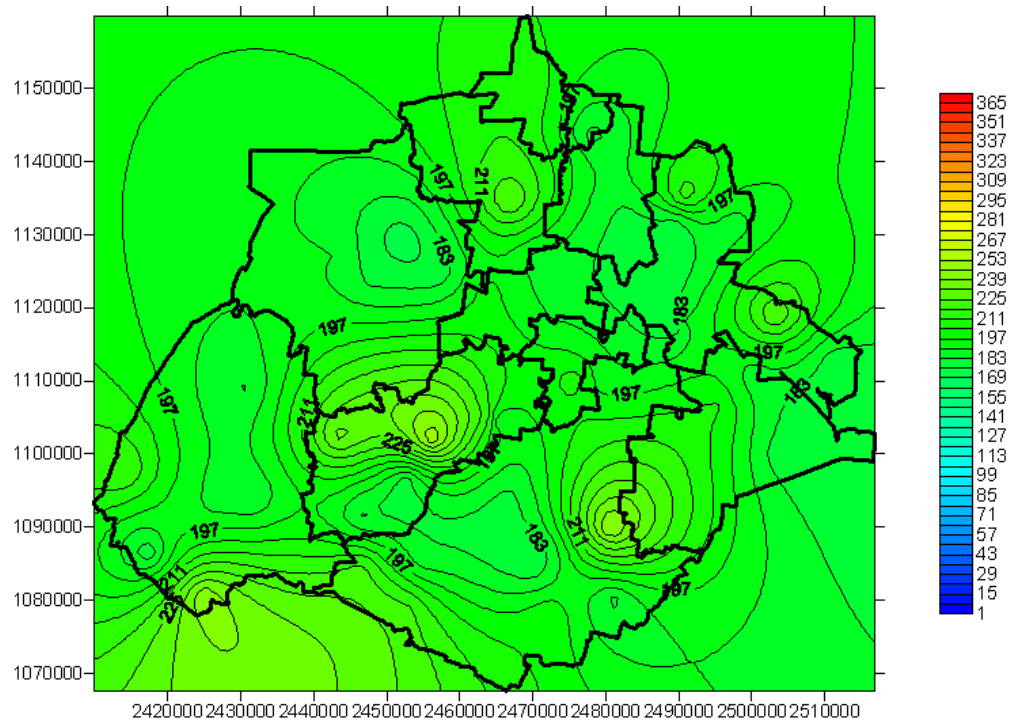
**Mapa 4.14 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración entre 6 y 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



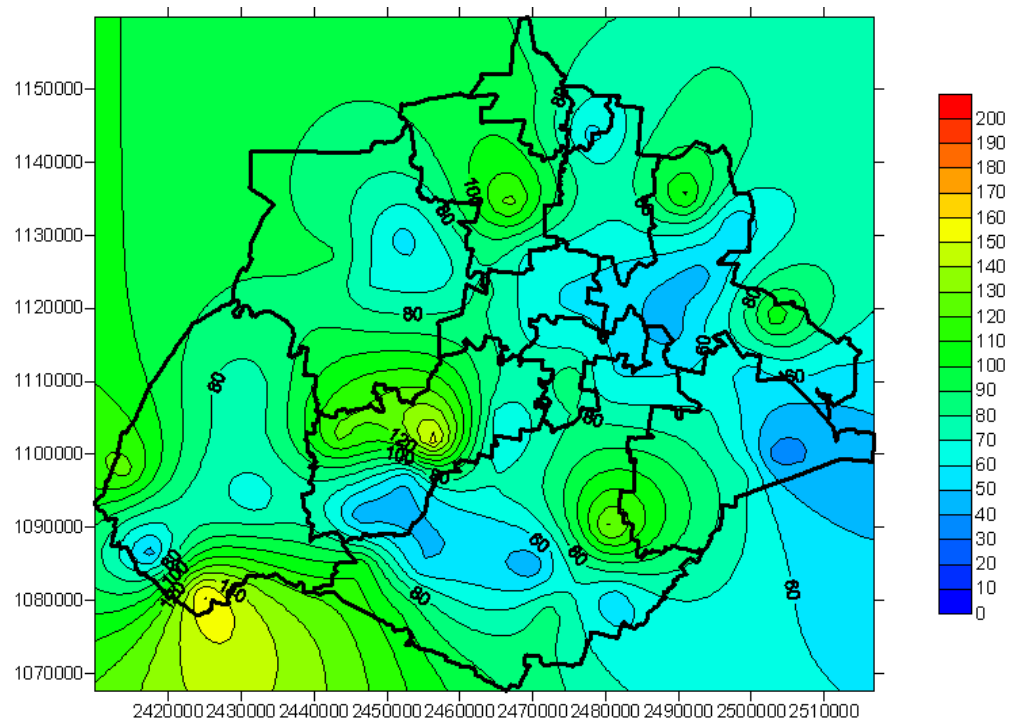
**Mapa 4.15 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración mayor de 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



**Mapa 4.16 Día de inicio de la temporada de Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México**



**Mapa 4.17** Día de término de la temporada de Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México

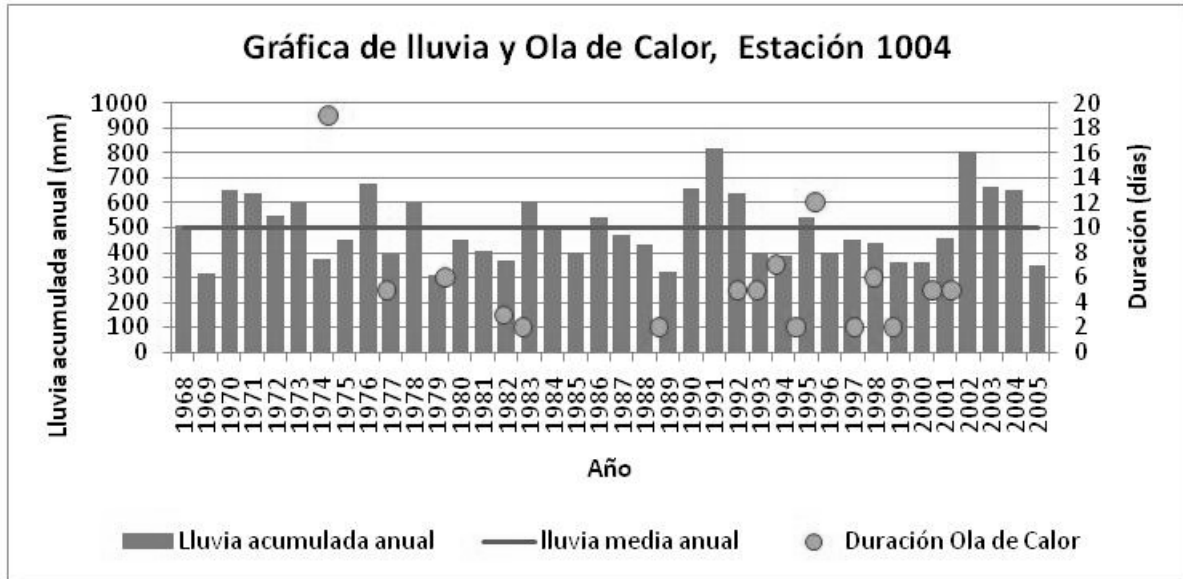


**Mapa 4.18** Duración de la temporada de la Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México

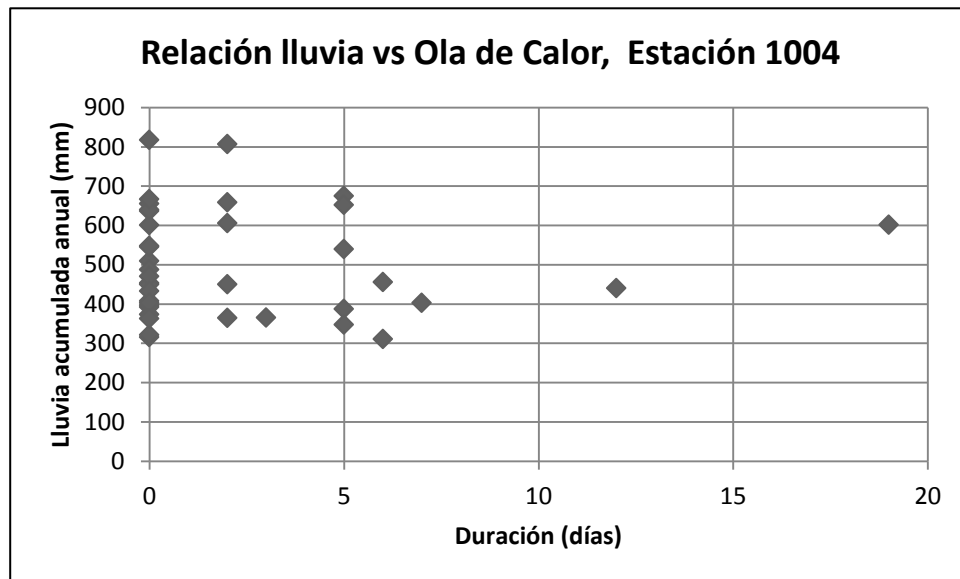
Se tomaron dos estaciones para observar el comportamiento de la Ola de Calor con respecto a un periodo de sequía. En la Gráfica 4.1 se muestra la lluvia acumulada anual y la duración anual de la Ola de Calor en la estación 1004, la línea de la lluvia media separa los años de sequía de los años



húmedos. Se observa una mayor presencia de la Ola de Calor en los años de sequía, sin embargo en la Gráfica 4.2 no se observa ninguna relación entre la duración de la Ola de Calor, incluso su aparición, con la precipitación acumulada anual.

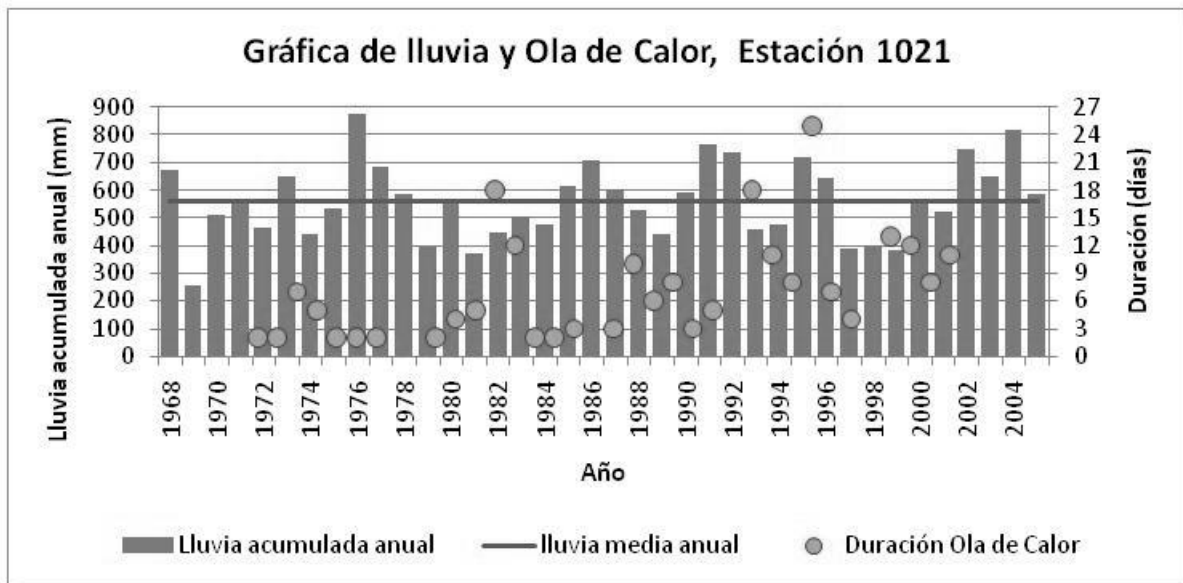


Gráfica 4.1 Lluvia acumulada anual y duración de la Ola de Calor, Estación 1004. Aguascalientes, México

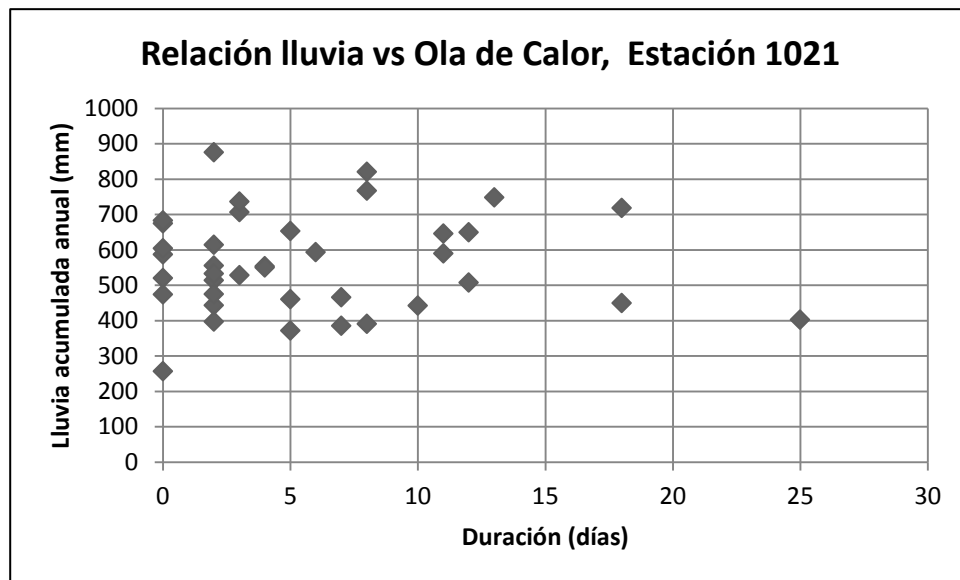


Gráfica 4.2 Relación de Lluvia vs Ola de Calor, Estación 1004. Aguascalientes, México

La estación 1021 presenta más eventos que la estación anterior. Tiene una lluvia media de 560 mm al año pero tampoco se observa ninguna relación entre la duración de la Ola de Calor y la precipitación acumulada anual.



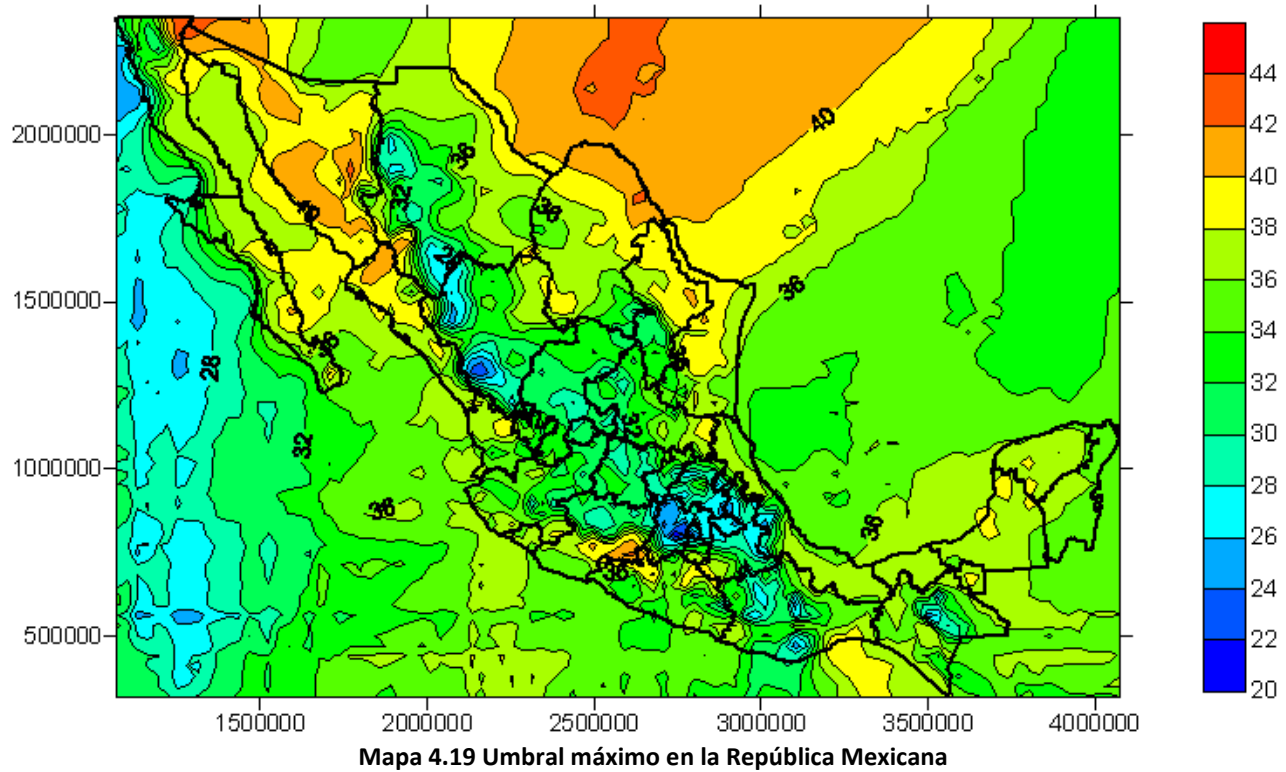
Gráfica 4.3 Lluvia acumulada anual y duración de la Ola de Calor, Estación 1021. Aguascalientes, México

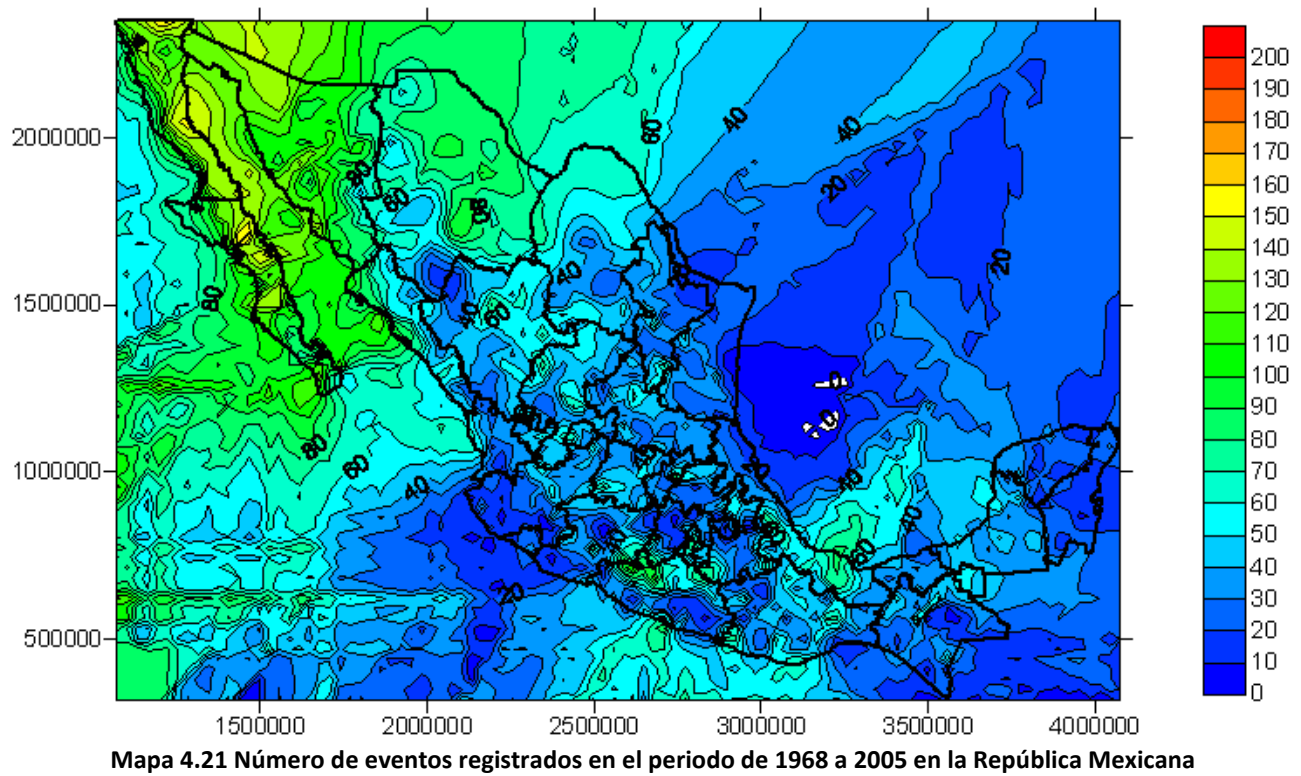
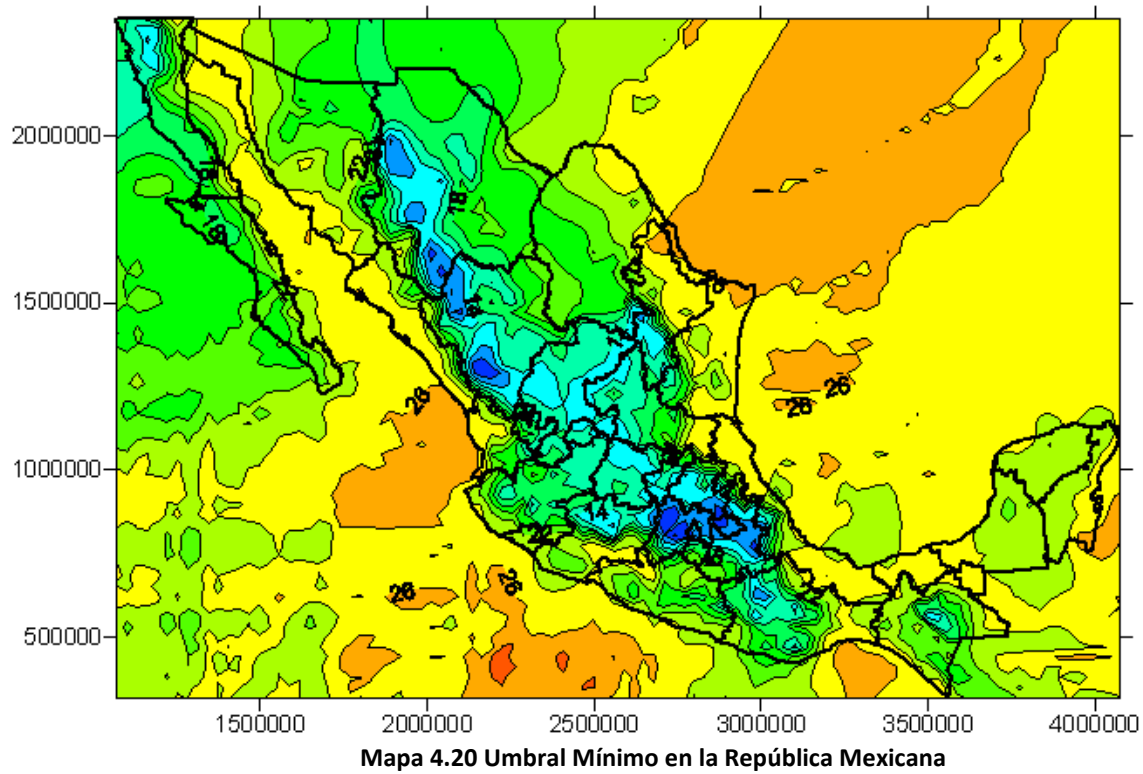


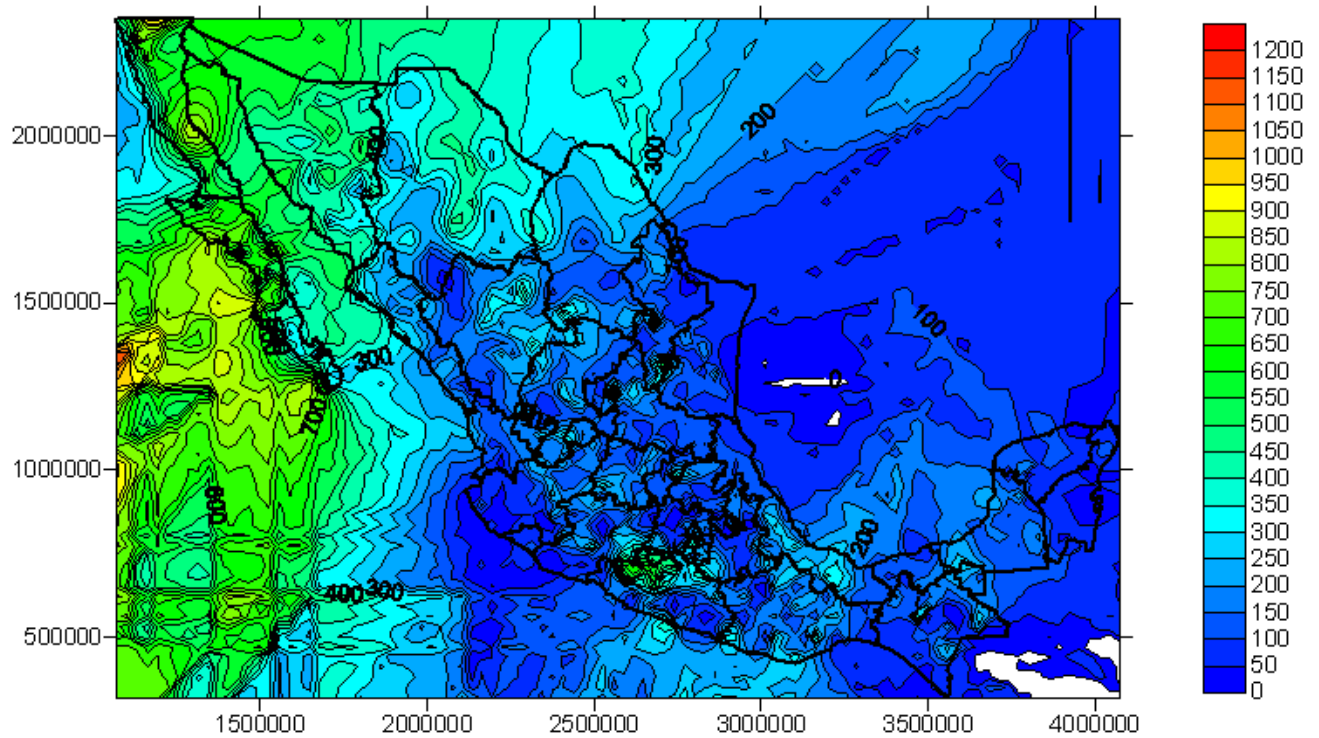
Gráfica 4. 4 Relación de Lluvia vs Ola de Calor, Estación 1021. Aguascalientes, México

## 4.2 Aplicación del Primer Criterio de Ola de Calor en la República Mexicana.

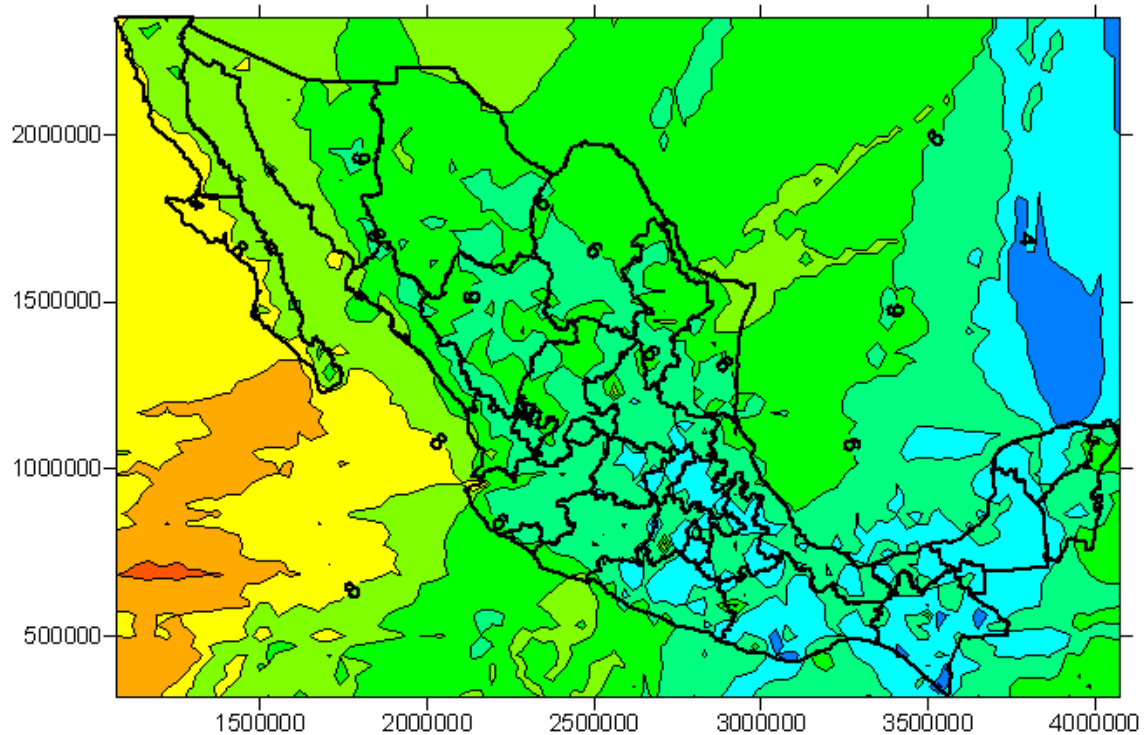
A continuación se muestran los mapas de los diferentes parámetros en la República Mexicana.



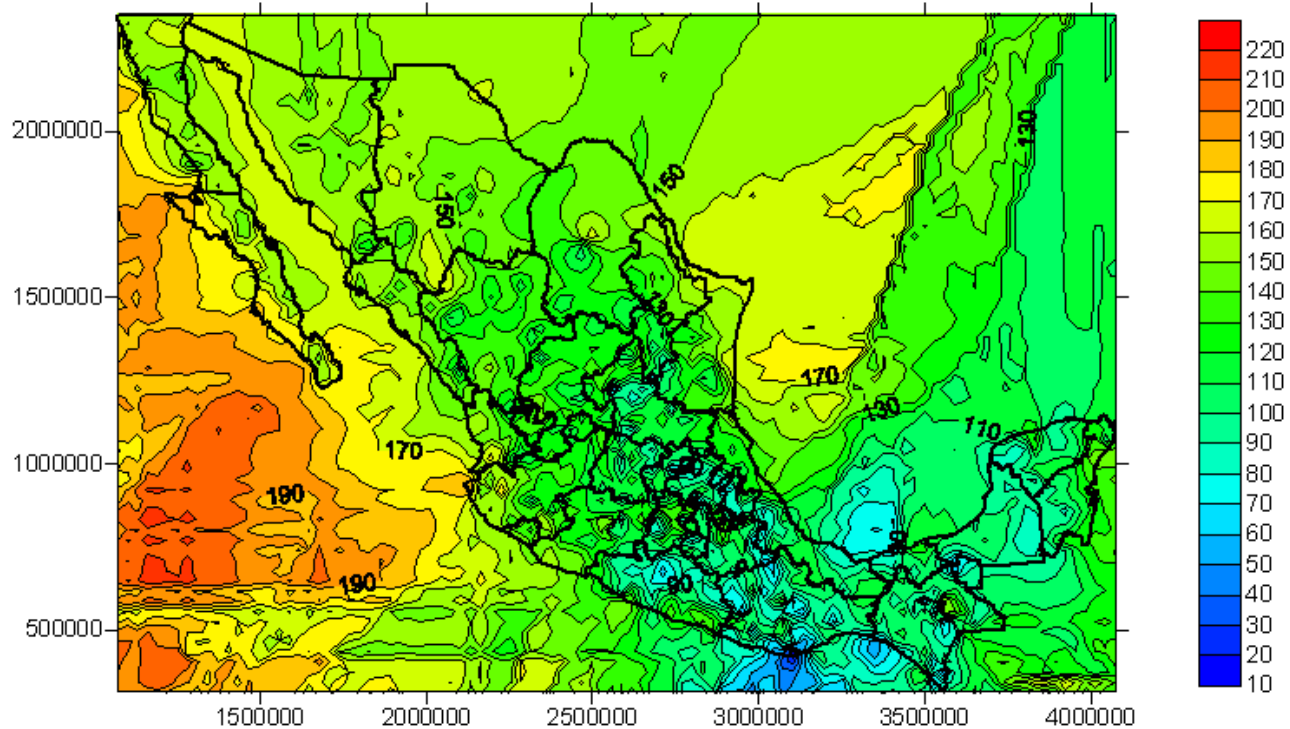
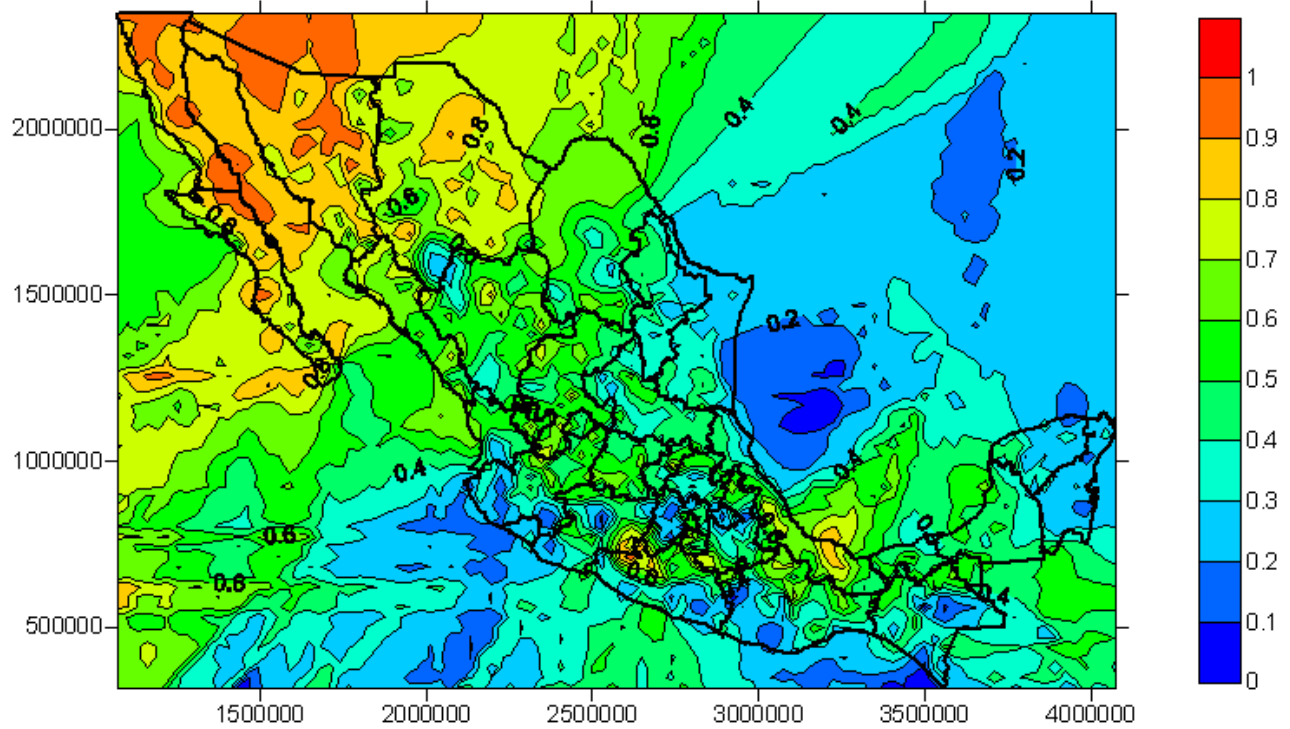




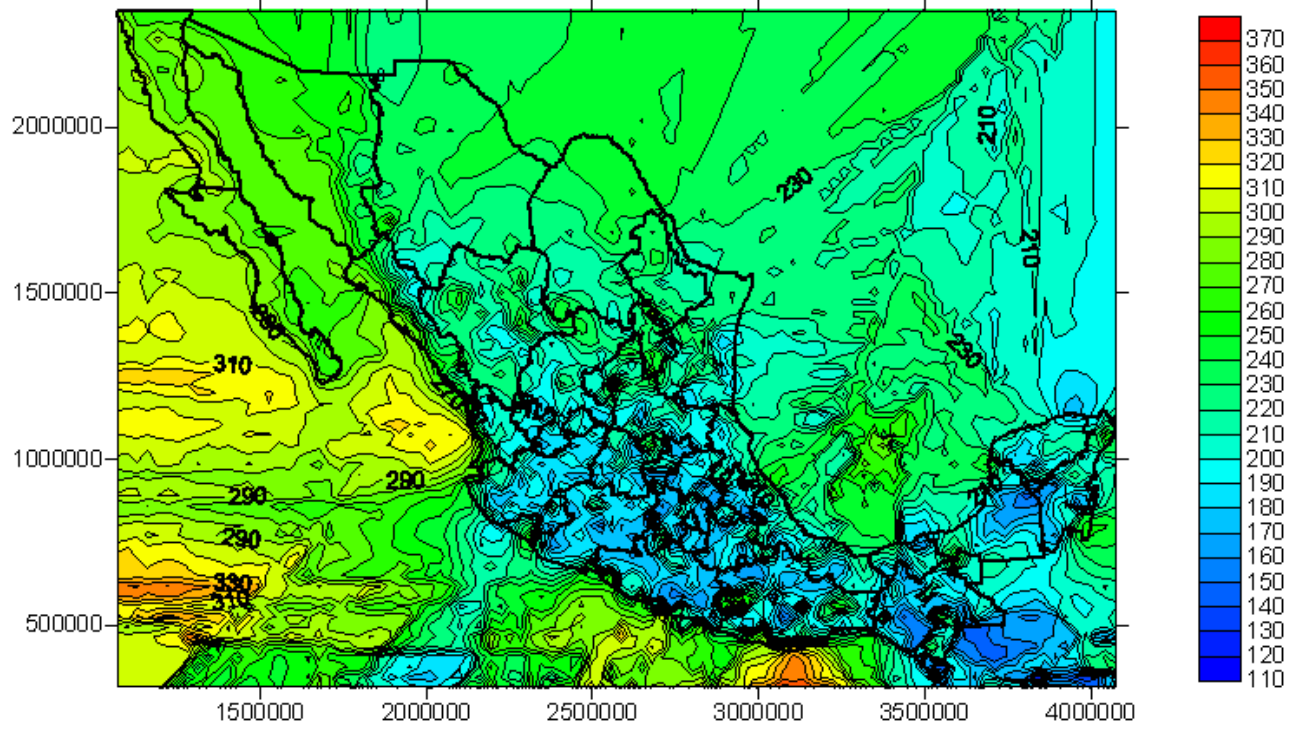
Mapa 4.22 Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005 en la República Mexicana



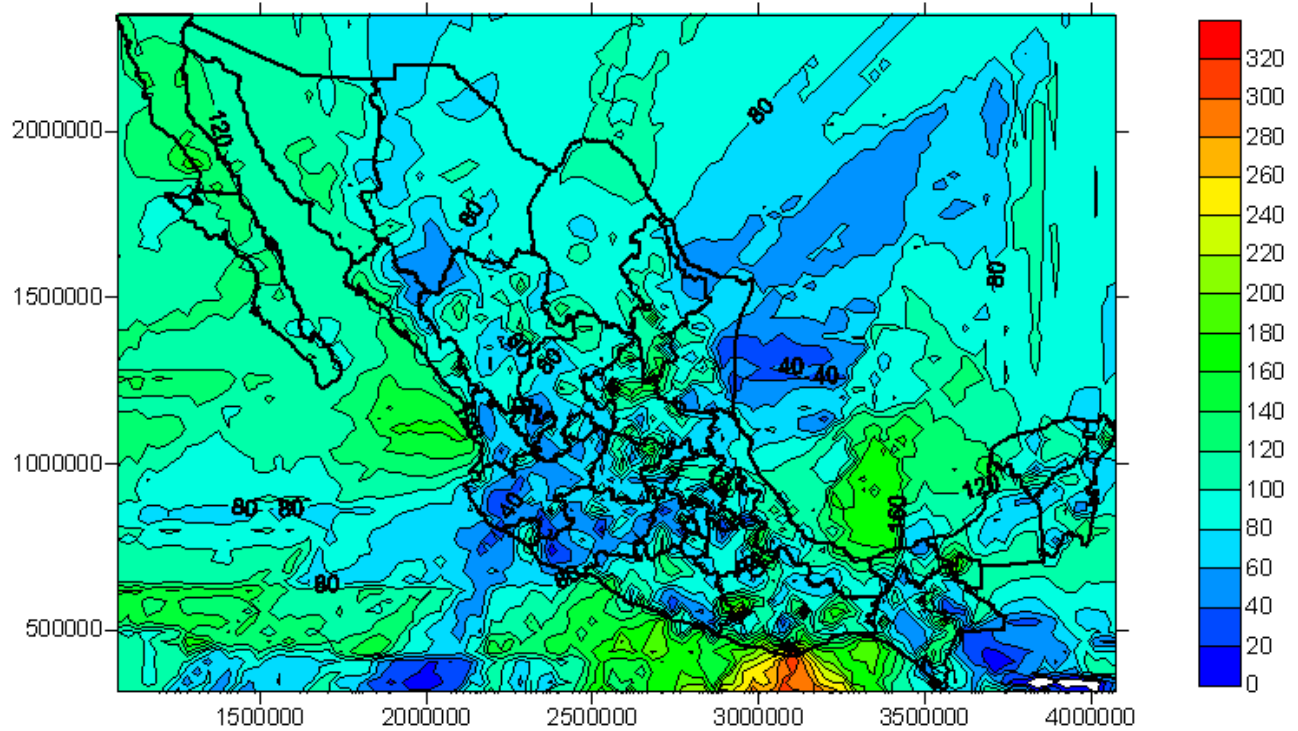
Mapa 4.23 Mes más probable de aparición de la Ola de Calor en la República Mexicana







Mapa 4.26 Día de Término de la Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$  en la República Mexicana

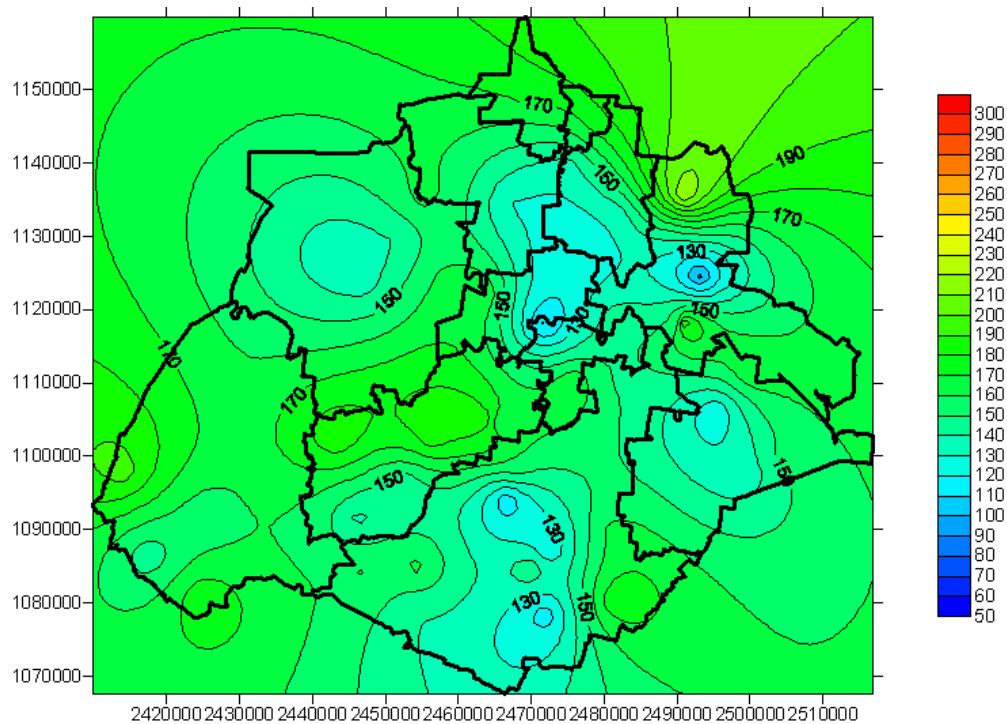


Mapa 4.27 Duración de la temporada de la Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$  en la República Mexicana

### 4.3 Aplicación del Segundo Criterio de Ola de Calor en el estado de Aguascalientes

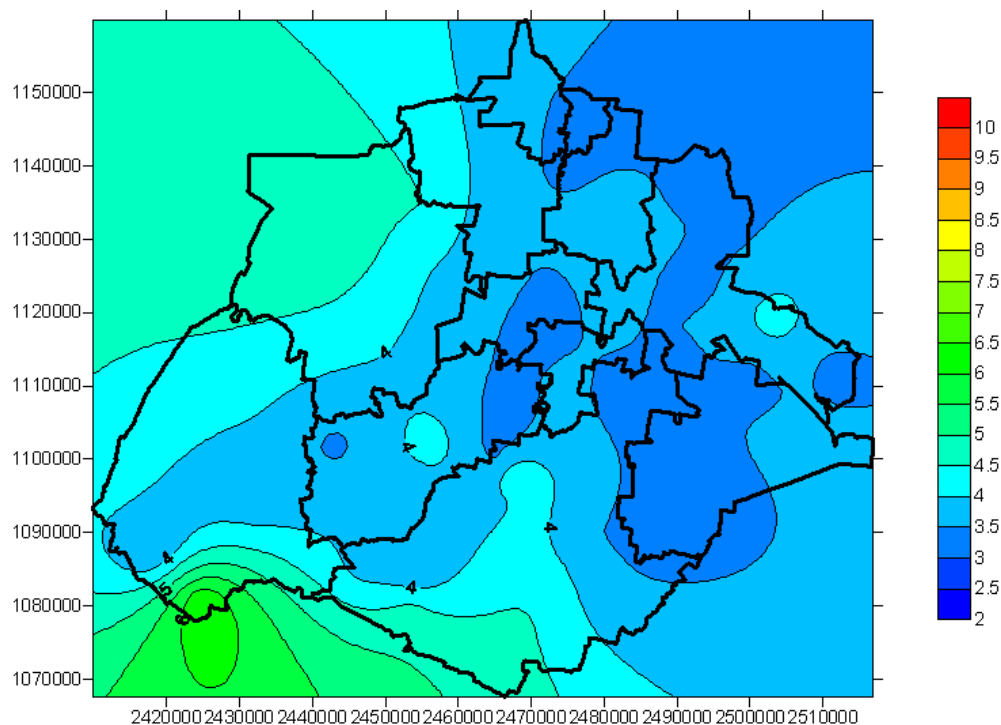
Aplicando el segundo criterio, se obtiene en el Estado de Aguascalientes un promedio de 153 eventos de Ola de Calor entre los años 1968 a 2005. La duración promedio es de 4.0 días, esto es, 620 días con Olas el fenómeno de Olas de Calor. Si entre 1968 y 2005 hay 13880 días, las olas de Calor representan solo el 4.5% lo cual. Este porcentaje es mayor que en el criterio anterior, sin embargo al ser un porcentaje bajo se afirma que el evento es extremo.

Al igual que el primer criterio, es posible dibujar un mapa de isolíneas que muestren algunos parámetros y su comportamiento espacial. El umbral de la serie de temperatura máxima es igual que el Mapa 4.1, aunque en este criterio no es posible dibujar un mapa con el umbral mínimo. El umbral mínimo se estableció con la temperatura mínima esperada para cada día, por lo que se tendría un valor umbral para cada día del año y eso hace que sea poco práctico graficarlo.

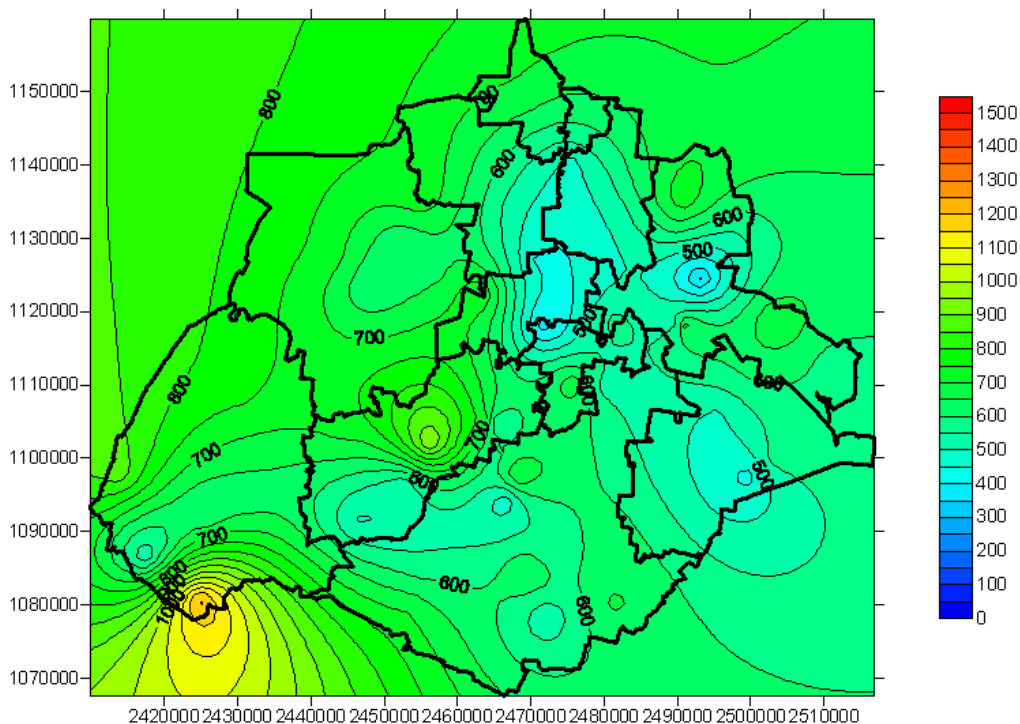


Mapa 4.28 Total de eventos de Ola de Calor registrados en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México.

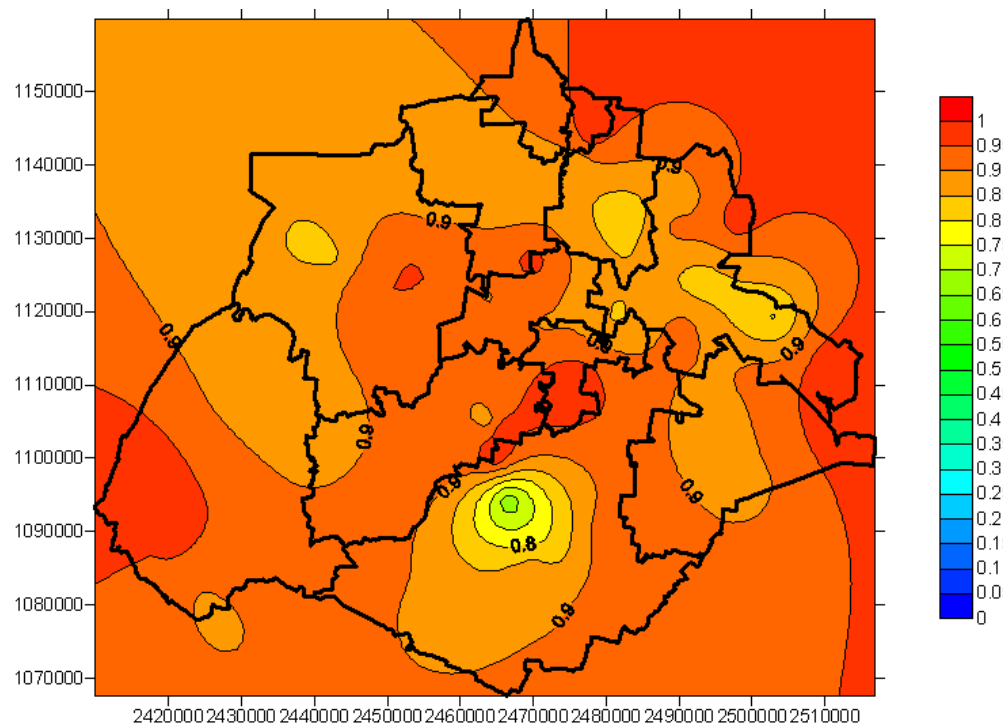
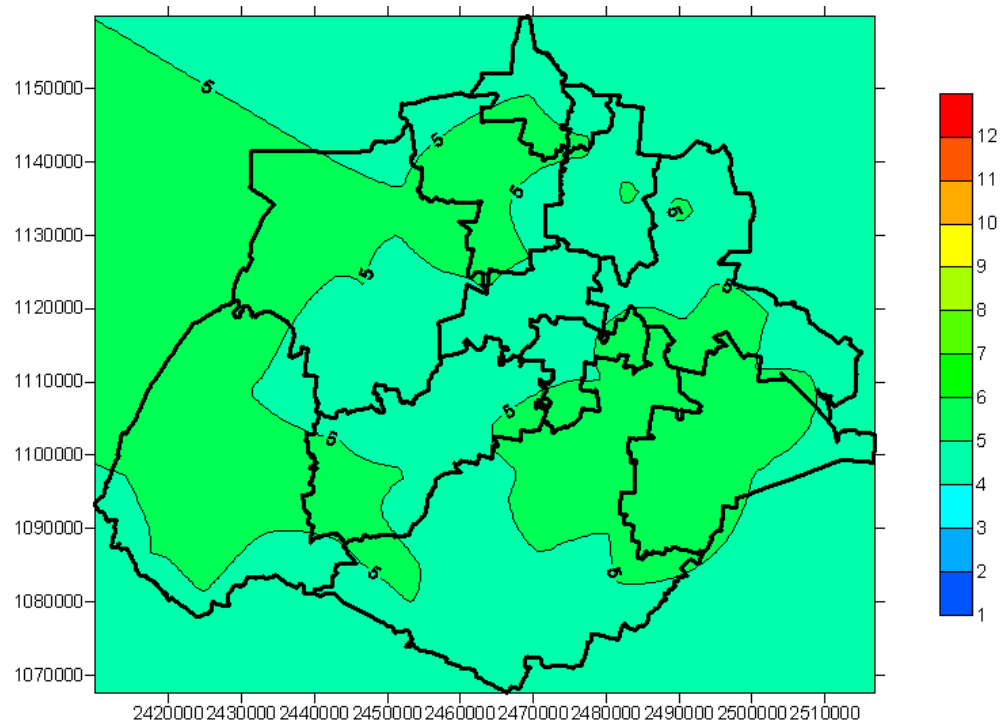


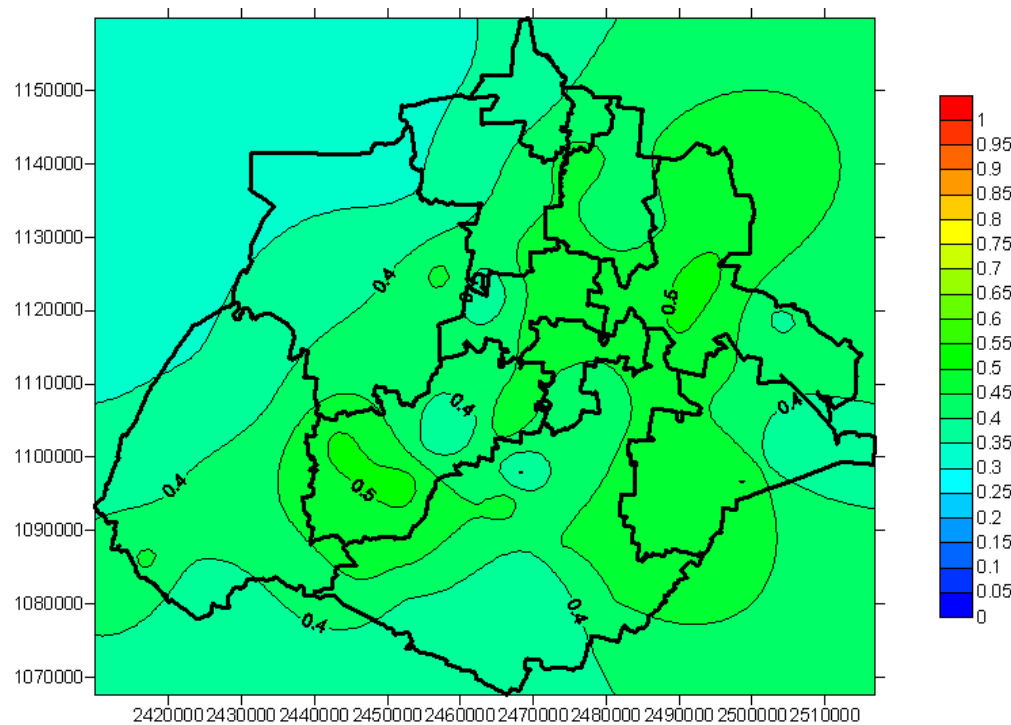


**Mapa 4.29** Duración promedio de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México.

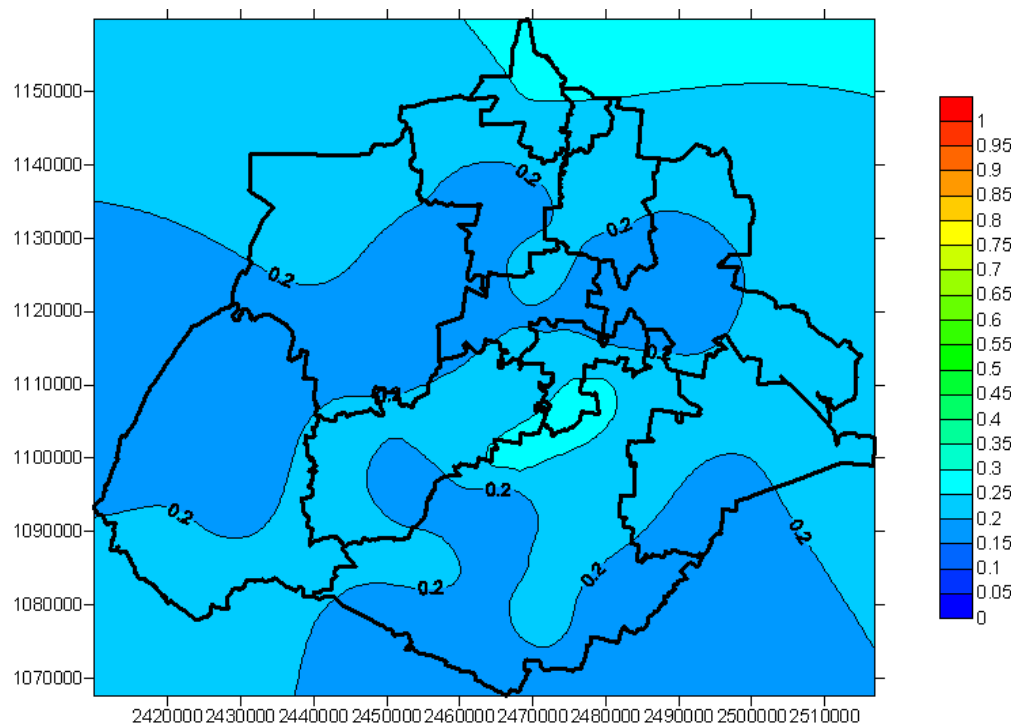


**Mapa 4.30** Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005. Aguascalientes, México.

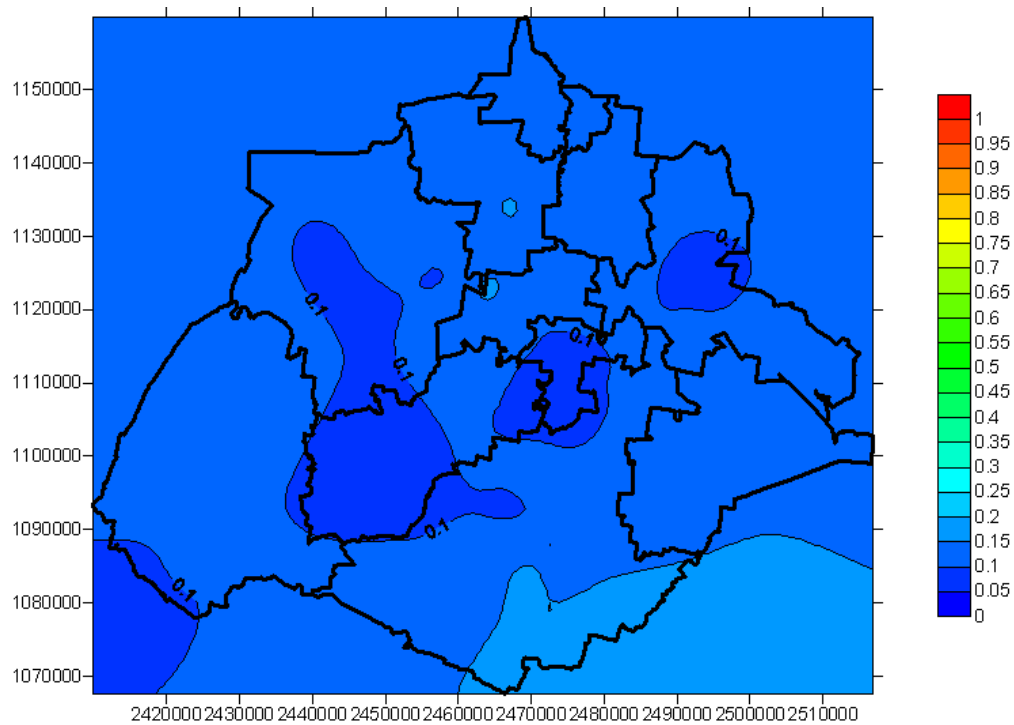




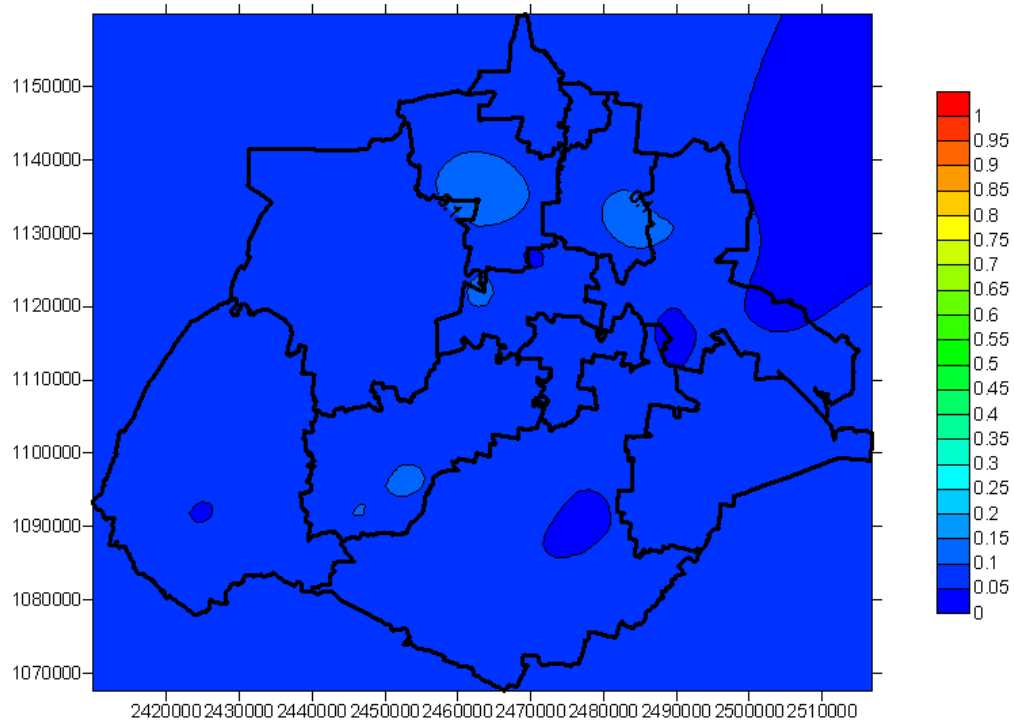
**Mapa 4.33 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 2 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



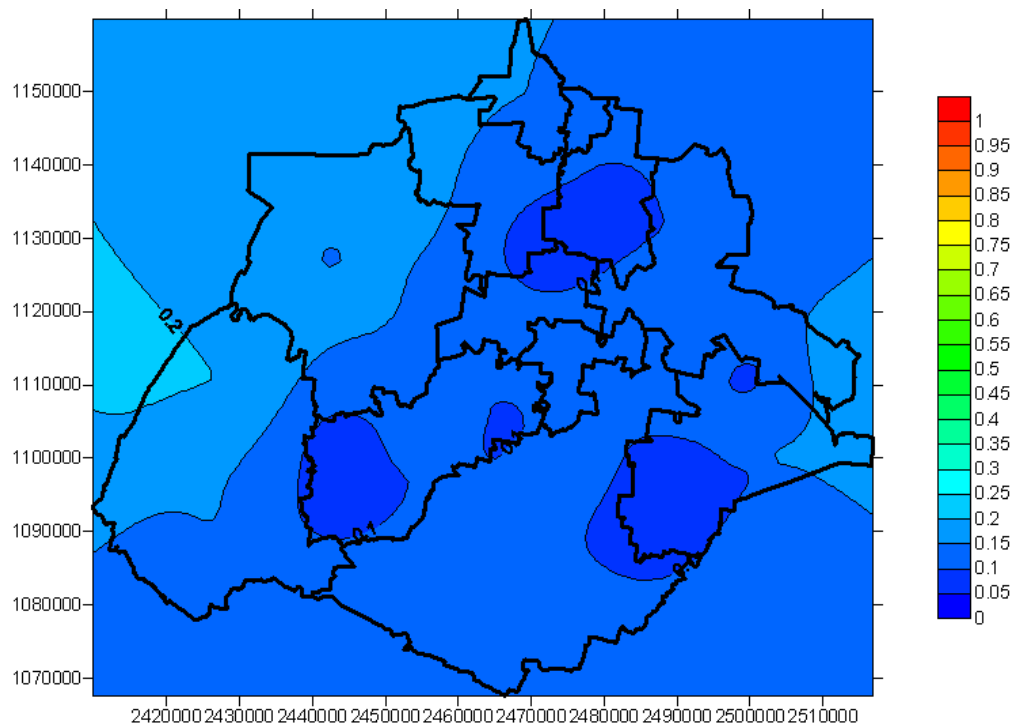
**Mapa 4.34 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 3 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



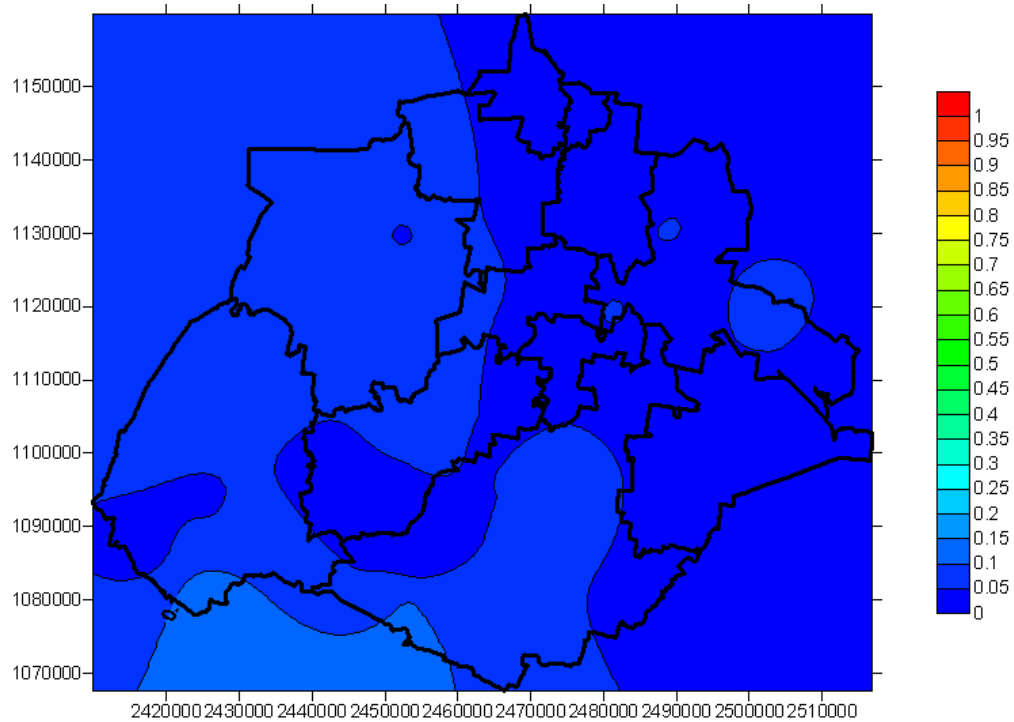
**Mapa 4.35 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 4 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



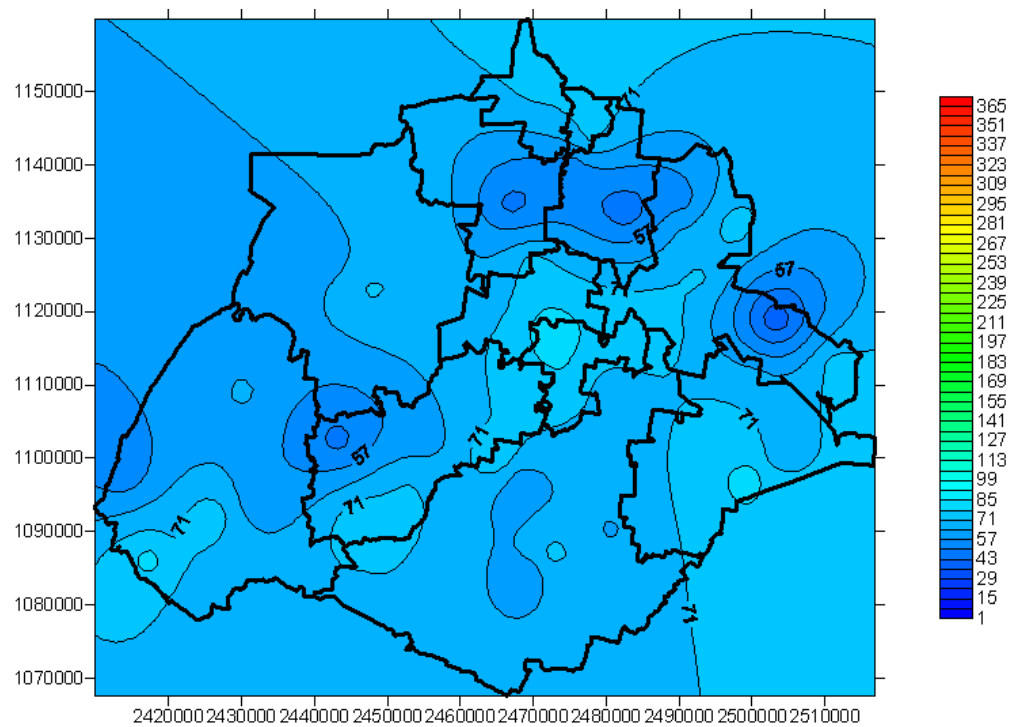
**Mapa 4.36 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración de 5 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



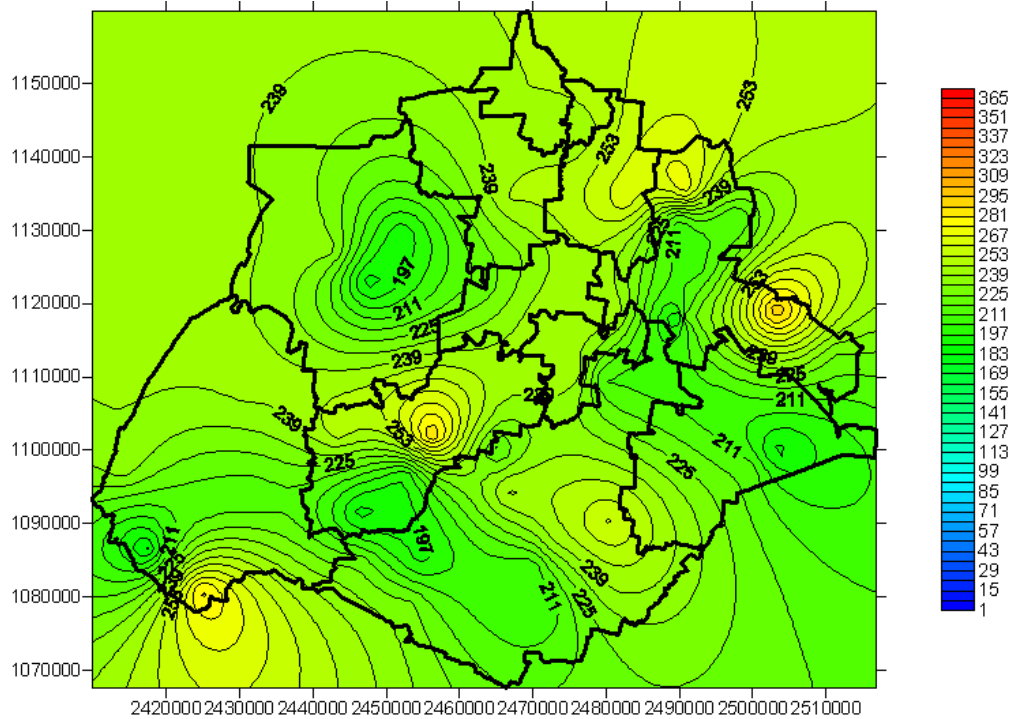
**Mapa 4.37 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración entre 6 a 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



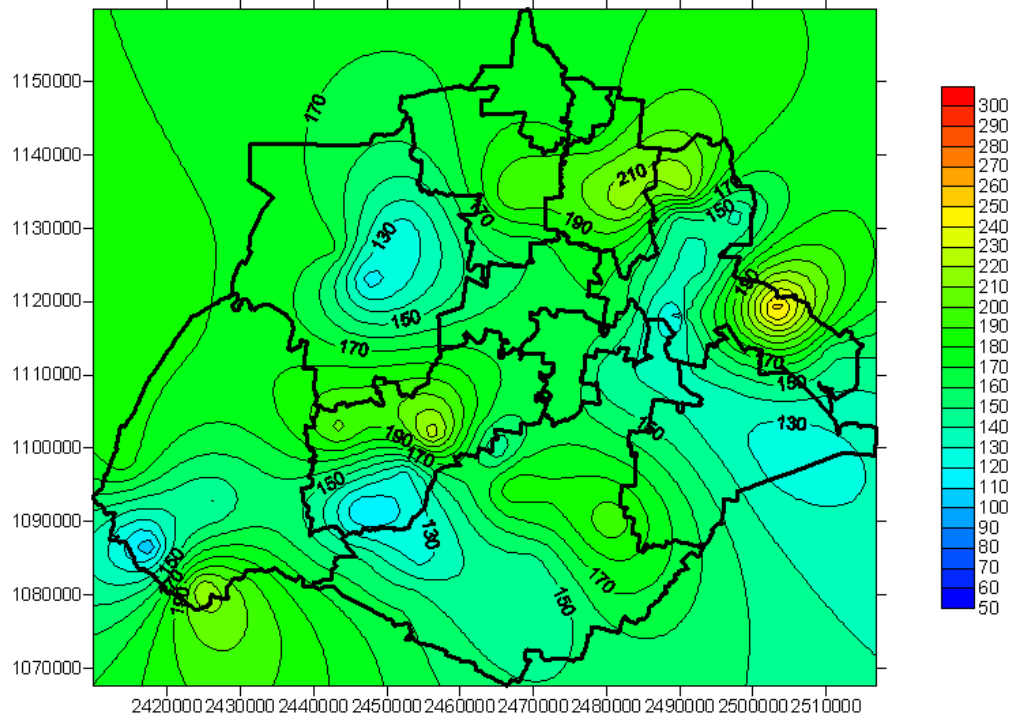
**Mapa 4.38 Probabilidad de que la Ola de Calor tenga una duración mayor a 10 días, dado que se presentó una Ola de Calor. Aguascalientes, México.**



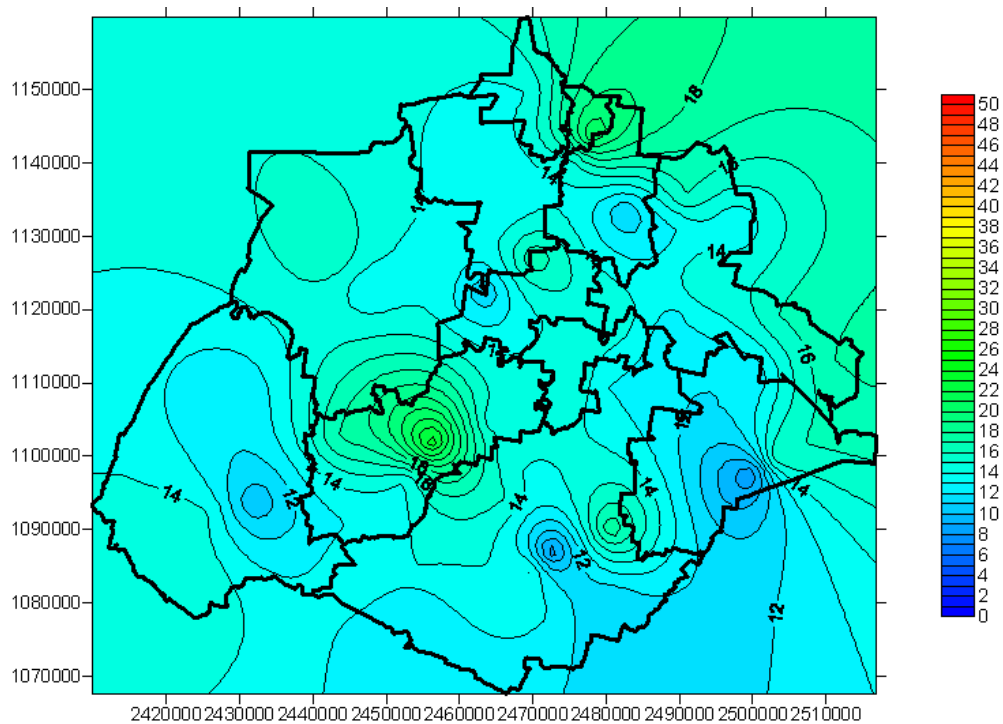
**Mapa 4.39** Día de inicio de la temporada de Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México



**Mapa 4.40** Día de término de la temporada de Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México.



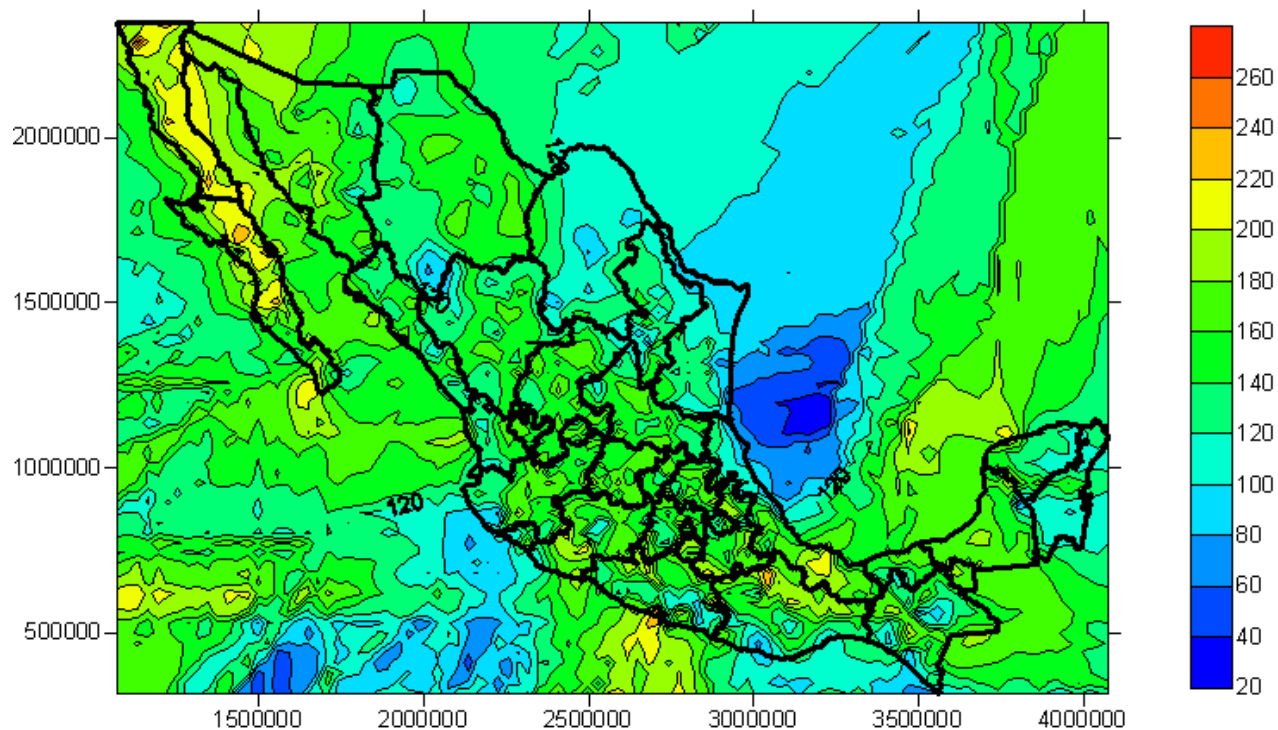
**Mapa 4.41** Días de duración de la temporada de Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$ . Aguascalientes, México



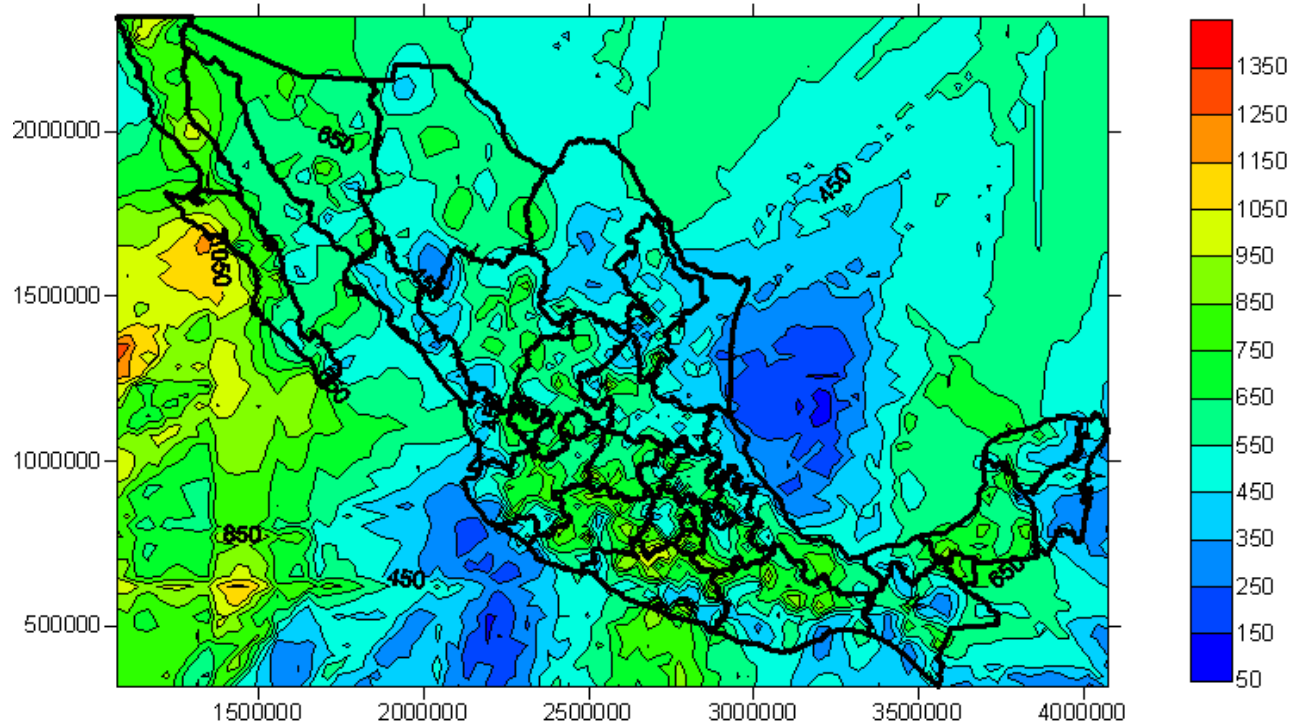
**Mapa 4.42** Periodicidad de aparición de las Olas de Calor para un mismo año.

#### 4.4 Aplicación del Segundo Criterio de Ola de Calor en la República Mexicana

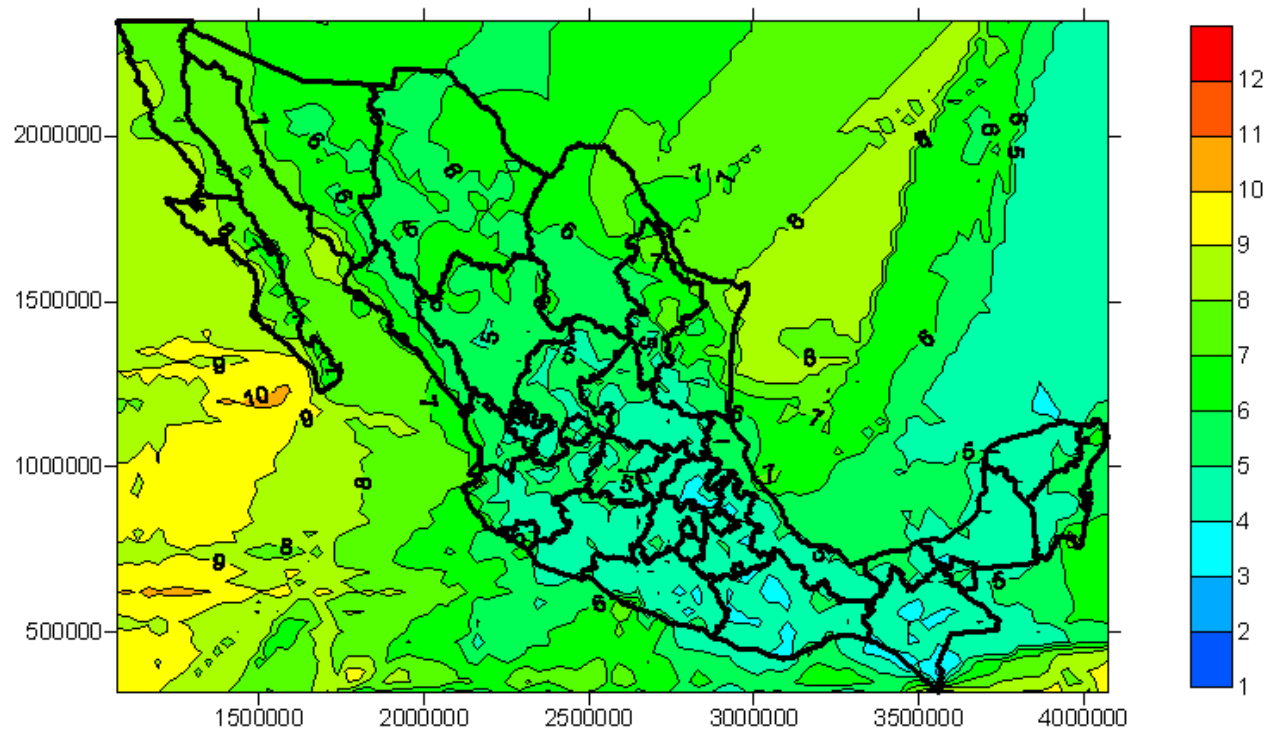
A continuación se presentan los mapas de los parámetros de este segundo criterio en la República Mexicana.



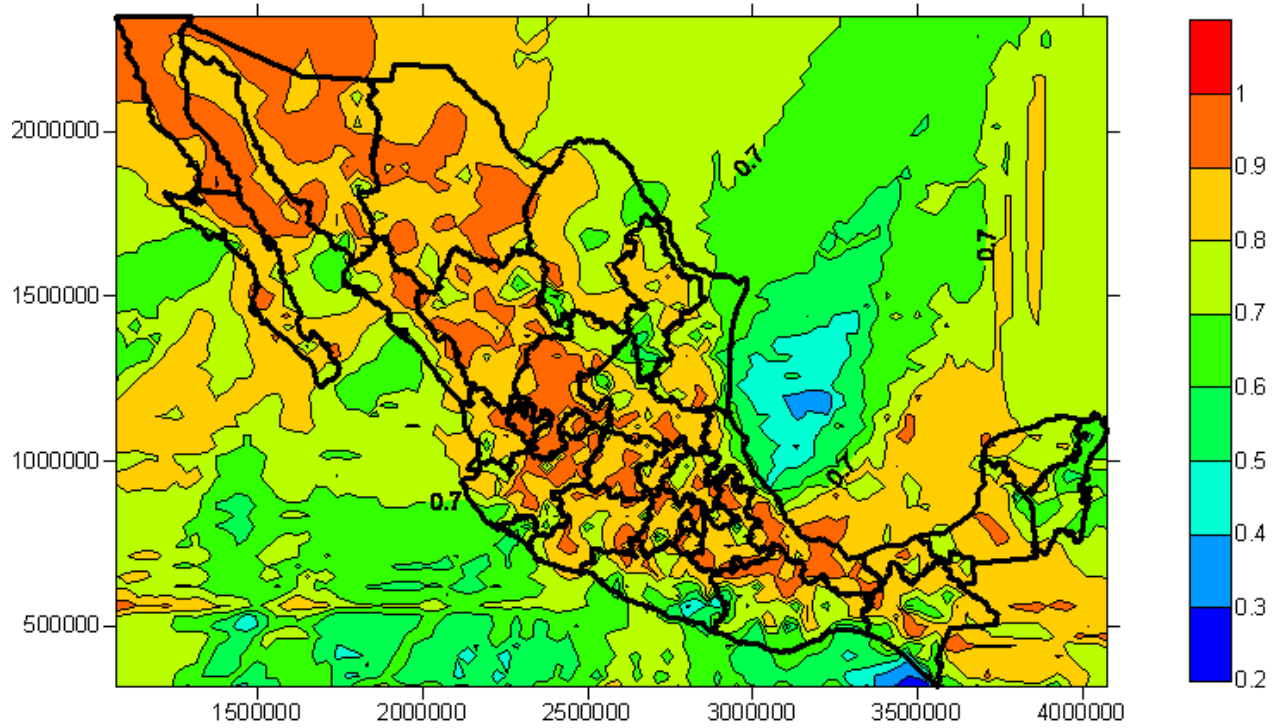




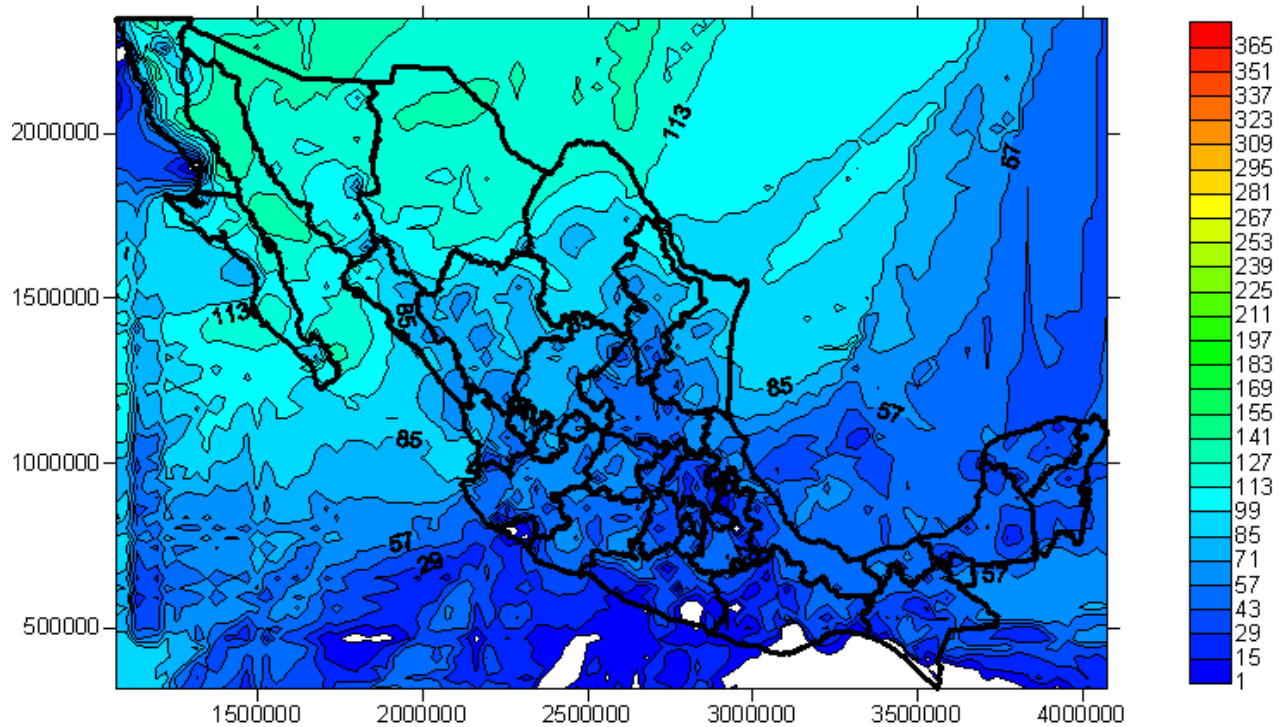
**Mapa 4.44 Duración total de las Olas de Calor en el periodo de 1968 a 2005 en la República Mexicana**



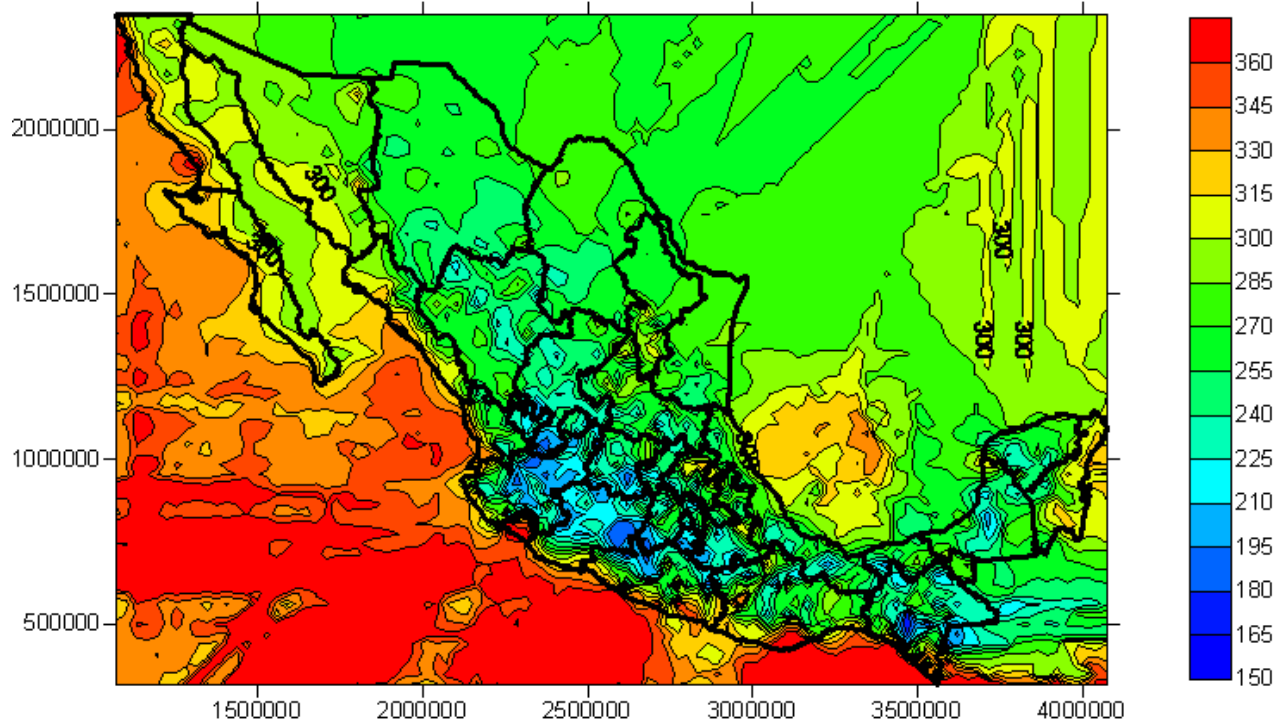
**Mapa 4.45 Mes más probable de aparición de la Ola de Calor en la República Mexicana**



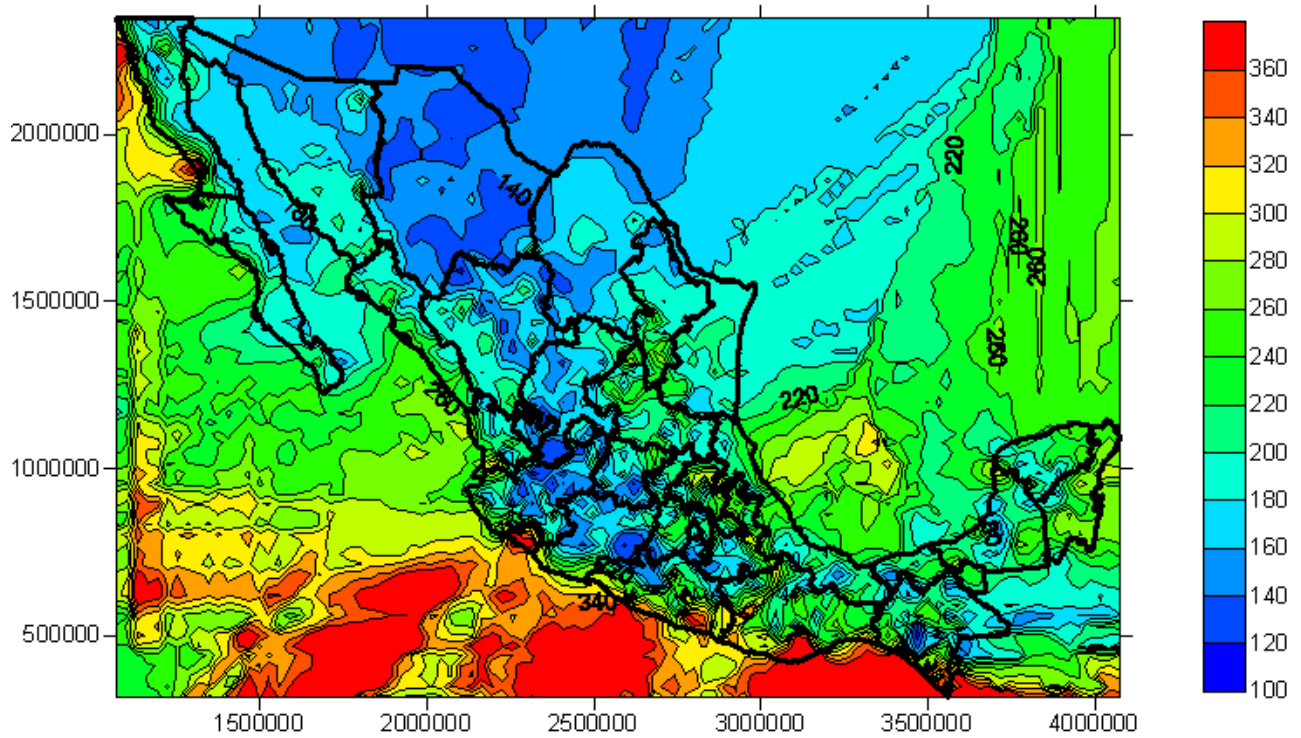
Mapa 4.46 Probabilidad de que ocurra al menos una Ola de Calor en un año en la República Mexicana



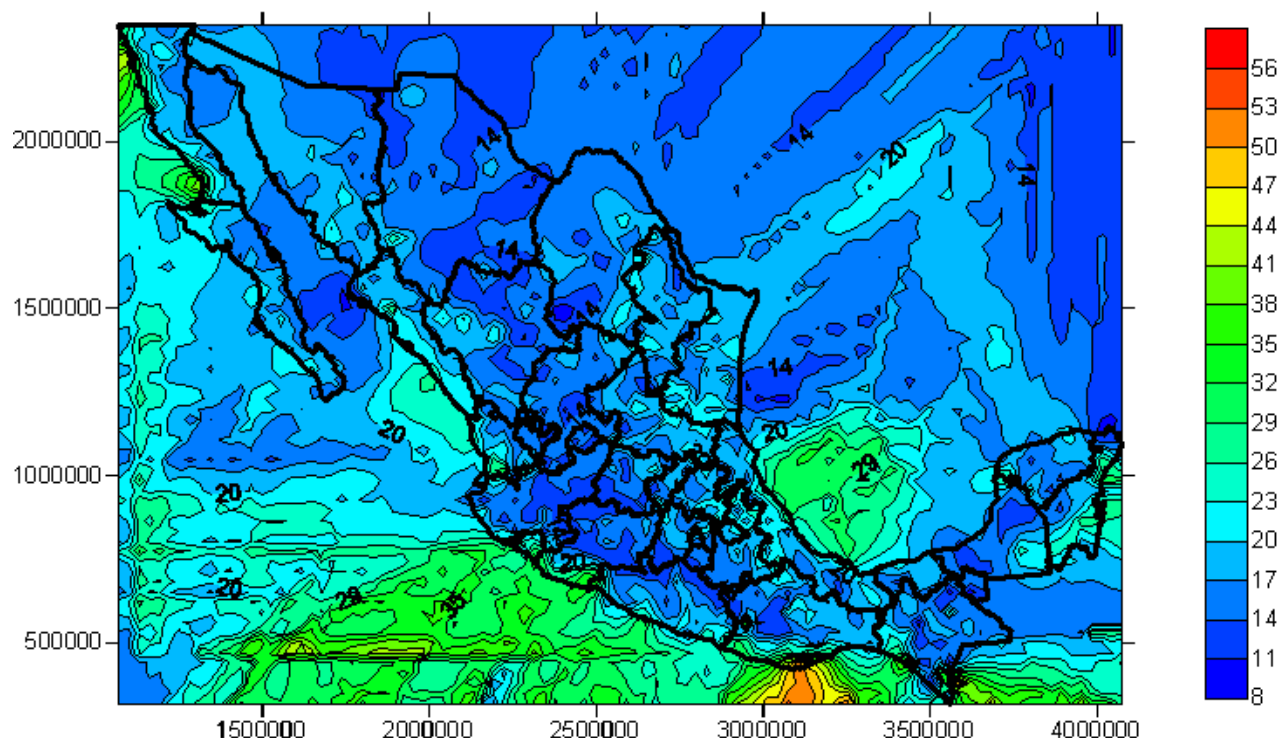
Mapa 4.47 Día de Inicio de la temporada de Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$  en la República Mexicana



Mapa 4.48 Día de termino de la temporada de la Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$  en la República Mexicana



Mapa 4.49 Duración de la temporada de la Ola de Calor para una  $G(x)=0.95$  en la República Mexicana

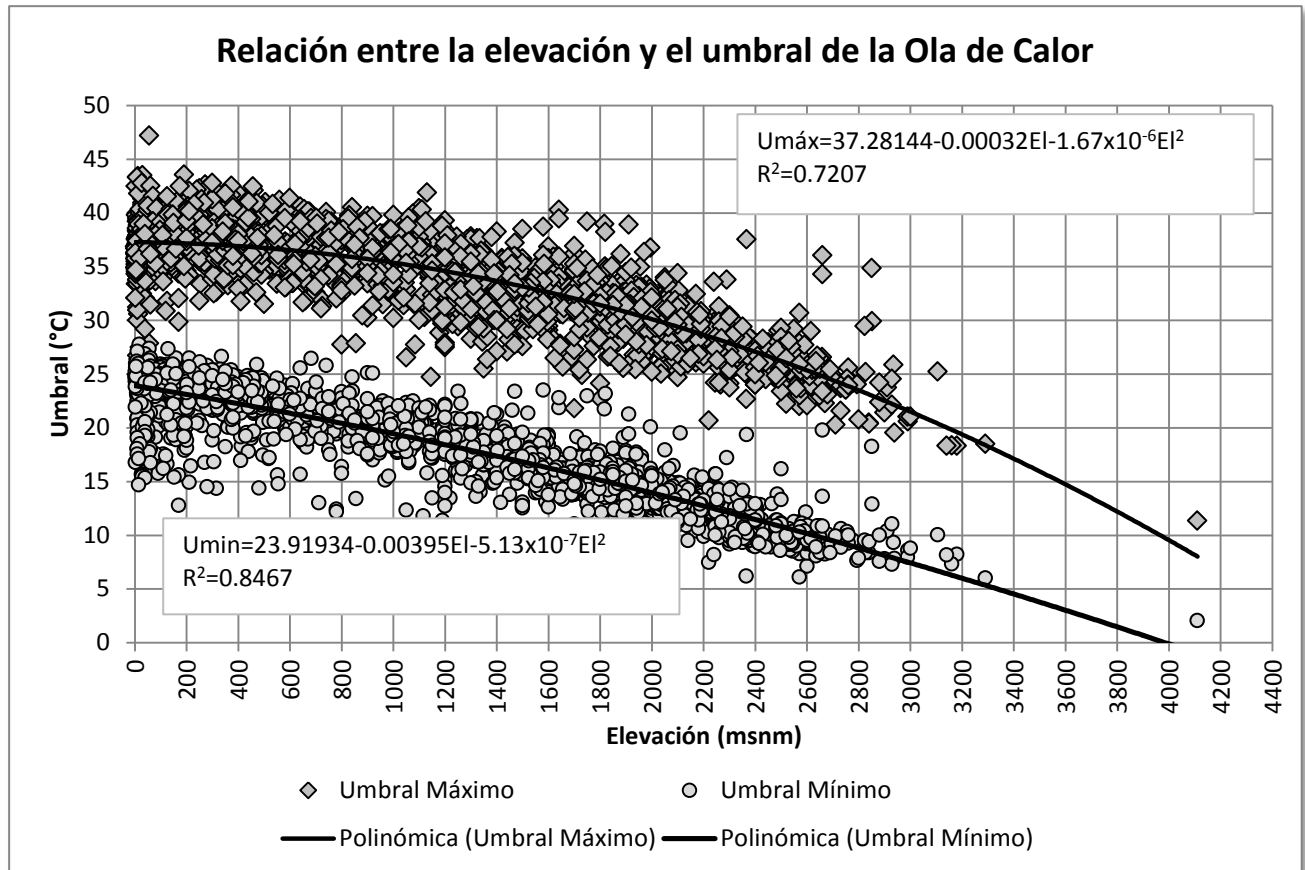


Mapa 4.50 Periodicidad de aparición de las Olas de Calor para un mismo año en la República Mexicana

#### 4.5 Umbrales de la Ola de Calor en sitios no medidos

Los umbrales para la determinar un evento de Ola de Calor, es con el percentil 90 tanto de las series máximas como mínimas. Sin embargo, se tiene una baja densidad de estaciones a lo largo de país y realizar una interpolación puede arrojar umbrales que no correspondan a la zona. Para estimar los umbrales en sitios no medidos se presenta la siguiente gráfica que relaciona la elevación con el umbral buscado. Los umbrales obtenidos están relacionados con la elevación, lo cual físicamente es correcto ya que la elevación influye de manera importante en el clima de una zona geográfica determinada. La elevación de algún punto en particular se puede obtener de cartas topográficas o de un modelo digital del terreno (MDT) en la página de INEGI. En este trabajo se tomo la elevación de las estaciones del CLICOM.

La siguiente gráfica solo se utiliza para determinar los umbrales de la Ola de Calor para el primer criterio. No se puede utilizar para el segundo criterio dado no se utiliza un umbral mínimo para la estación, sino que se usa el valor esperado de temperatura mínima diaria.



**Gráfica 4.5 Relación entre la Elevación y los Umbrales de la Ola de Calor.**



## 5 Estimación de los impactos

Una vez definidos los parámetros de la Ola de Calor, se determinan sus efectos en los sectores productivos (agricultura y ganadería).

A través de los datos de los anuarios de INEGI se obtuvo información de cultivos y ganados. El rendimiento en los cultivos se estimó como la relación entre el volumen producido y el área cosechada en toneladas por hectáreas. El rendimiento del ganado como la relación entre el volumen de carne en canal y el número de animales sacrificados. Con el rendimiento y los parámetros obtenidos de las Olas de Calor se establecen relaciones, las cuales se mostrarán en las siguientes gráficas. A manera de ejemplo se muestran las dos siguientes tablas de rendimientos en el municipio de Aguascalientes, Aguascalientes.

Se tomaron 4 cultivos como los más representativos: Maíz de grano, Frijol, Alfalfa y vid. Los dos primeros tanto en riego como en temporal y los dos últimos solo en riego.

**Tabla 5.1 Rendimiento anual (ton/ha) por cultivo y forma de riego en el municipio de Aguascalientes, Ags.**

Cultivo	MAÍZ GRANO		FRIJOL		ALFALFA	VID
AÑO	Riego	Temporal	Riego	Temporal	Riego	Riego
1987	3.62	0.07	1.56	0.06	65.86	12.65
1991	3.97	0.30	1.04	0.19	95.79	7.15
1992	4.29	0.29	1.52	0.18	95.65	9.51
1993	4.60	0.18	1.62	0.03	92.15	10.08
1994	4.70	0.08	1.87	0.02	85.62	
1995	4.43	0.55	1.83	0.25	94.42	
1996	4.74	0.18	2.28	0.16	105.09	11.28
1997	4.79	0.04	1.95	0.03	73.52	8.24
1998	4.05	0.23	2.17	0.18	84.30	4.86
1999	4.82	0.06	1.75	0.10	94.12	5.10
2000	5.23	0.05	2.02	0.00	93.59	8.66
2001	5.81	0.52	2.00	0.31	85.27	6.46
2002	5.84	0.48	2.01	0.39	100.53	9.46
2003	6.57	0.58	2.13	0.40	90.39	1.37
2004	6.57	0.58	2.33	0.37	97.98	10.00
2005	7.47	0.34	2.50	0.34	97.40	

En la Tabla 5.2 se muestran los datos de rendimiento en kilogramos por cabeza en el municipio de Aguascalientes en el estado de Aguascalientes.

**Tabla 5.2 Rendimiento del ganado en kg/cab en el municipio de Aguascalientes, Ags.**

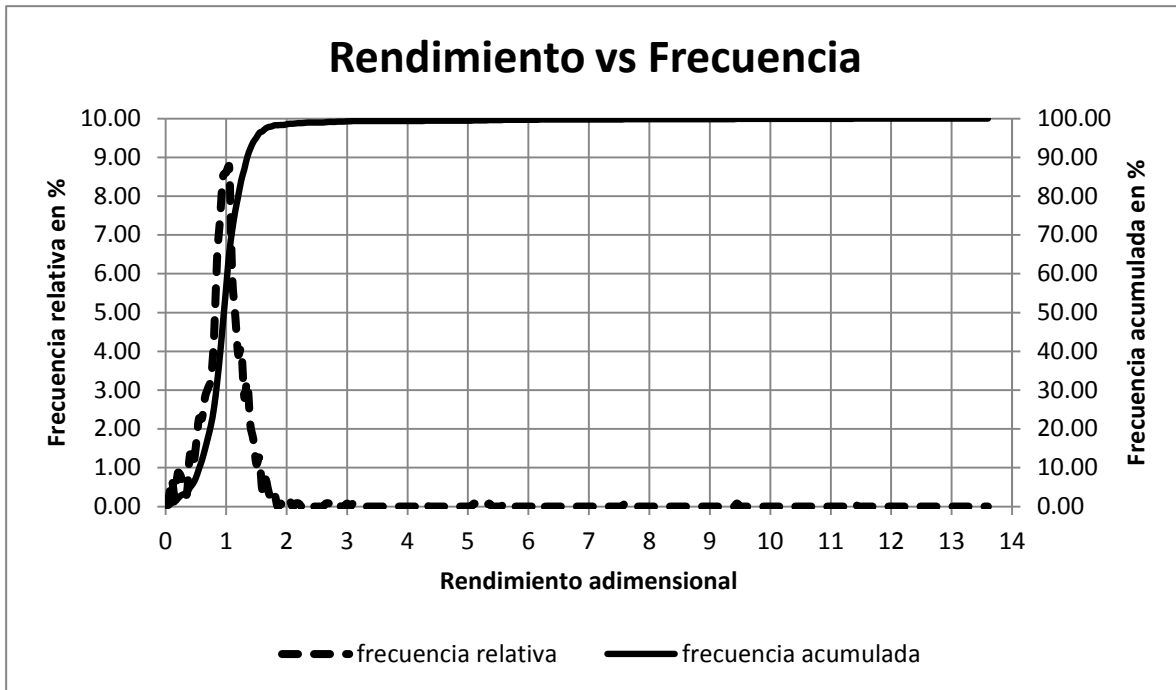
<b>Año</b>	<b>Bovino</b>	<b>Porcino</b>	<b>Ovino</b>	<b>Caprino</b>
1985	176.2	85.4	14.1	13.0
1986	90.6	35.9	7.5	9.3
1987	88.6	53.0	14.1	14.1
1991	1777322*	50094.4*	15223.9*	15433.2*
1992	150.0	50.0	15.0	15.0
1993	145.2	50.5	16.2	15.8
1994	162.9	51.3	19.6	19.6
1995	195.4	77.1	19.4	18.5
1996	102.2	74.7	26.8	13.9
1997				
1998	116.9	52.7	8.9	7.9
1999	124.1	85.8	12.9	9.8
2000	102.9	112.9*	12.4	10.5
2001	32.8*	28.5*	13.1	8.3
2002	85.2	73.4	13.0	11.0
2003	85.6	73.2	13.2	11.0
2004	112.1	70.9	18.1	12.7
2005	78.9	49.3	26.8	17.1

\*Valores incongruentes

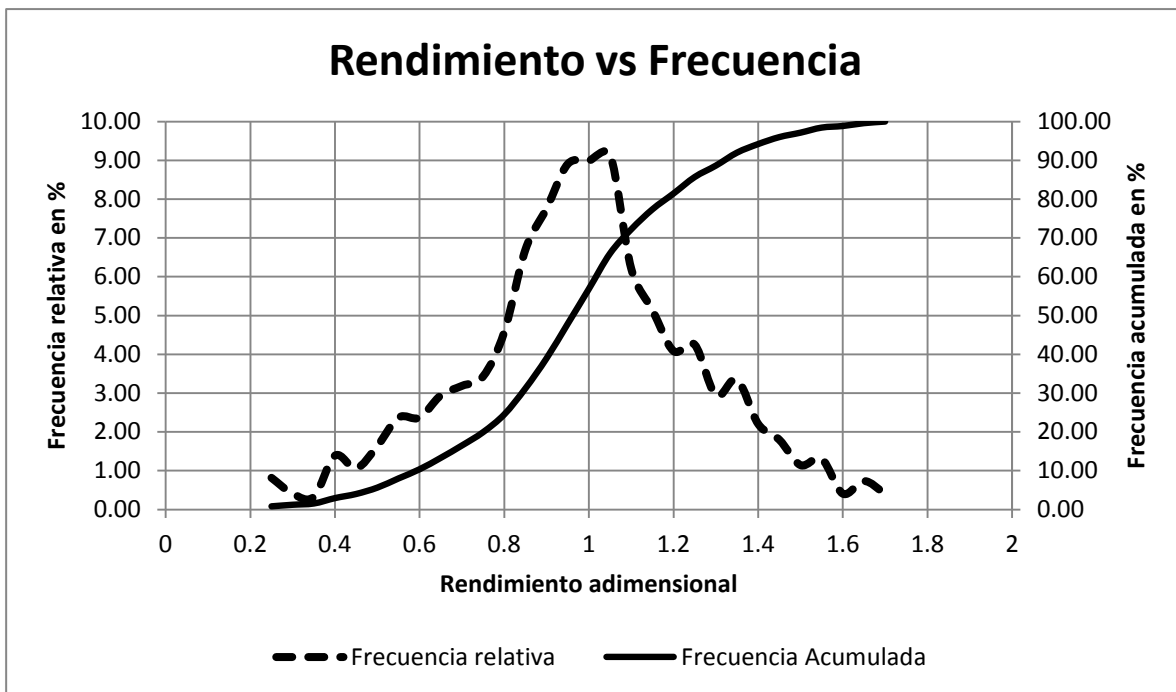
Los datos de INEGI presentan varias inconsistencias cuando se calculan los rendimientos. Se observan rendimientos muy bajos o exageradamente altos en relación con los demás datos. Con el fin de disminuir esas inconsistencias se redujo la muestra quitando el 2.5% de los datos extremos con el fin de quitar tanto los datos muy grandes como los muy pequeños.

Se construyó una serie de rendimientos por municipio, dividiendo cada valor entre su media. Con lo anterior se obtuvo una serie de datos modulados (adimensionales). En la Gráfica 5. 1, se observa que el rango del rendimiento va de 0 a 13.5, sin embargo la mayor concentración de datos esta en el rango de 0 a 2. Si se quitan los extremos (2.5%) se tiene la gráfica 5.2 la cual conserva el 95% de la información.





**Gráfica 5. 1 Rendimiento adimensional vs Frecuencia. Datos completos**



**Gráfica 5. 2 Rendimiento adimensional vs Frecuencia. Datos depurados**

Como se observa, se mejora la información y los datos presentan una forma de distribución normal. Los estadísticos son:

**Tabla 5.3 Estadísticos del Rendimiento adimensional.**

	Datos	
	Completo	Depurados
Media	0.999	0.966
Desviación estándar.	0.601	0.267
C. de asimetría	8.799	0.024
C. de Curtosis	123.759	2.969

Con los datos depurados, se estiman las relaciones entre los rendimientos y los parámetros de las Olas de Calor. Dada la gran cantidad de información, solo se mostrará un ejemplo para el clima Seco Templado. Los resultados completos (municipios y climas) se entregarán en un CD.

Para realizar las gráficas, es necesario determinar el rendimiento esperado, el cual se puede tener más información en Herrera (2006). Para las relaciones se eliminó un dato de acuerdo con la distancia de Cook con el fin de mejorar el ajuste y también por la calidad de los datos. También se puso de condición para realizar la regresión que al menos se tengan 4 puntos. En las gráficas los puntos indican los valores del rendimiento con respecto al parámetro de la Ola de Calor. La línea es el ajuste de los puntos. El color azul indica los años húmedos y el color rojo los años secos. Para las líneas de ajuste se usaron 5 regresiones: Lineal, Cuadrática, Logarítmica, Exponencial y Potencial. Se determinó el mejor ajuste con el coeficiente de determinación.

Los estados que cuentan con información a nivel municipal son: Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Campeche, Colima, Chihuahua, Guanajuato, Morelos, Nayarit, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, Tabasco y Zacatecas.

El análisis se hizo para los municipios que conforman los estados antes mencionados y además se realizó por clima. Para el análisis por clima se tomo el clima de cada municipio y se formo una nueva tabla. Los municipios que presentan más de un clima, se tomo el clima predominante.

En la Tabla 5.4 se muestra el número de municipios que se presentan en los diversos climas.

**Tabla 5.4 Climas y número de municipios**

Clima	No. De Municipios	Clima	No. De Municipios
Cálido húmedo	21	Semicálido húmedo	26
Cálido Subhúmedo	85	Semicálido subhúmedo	39
Muy seco cálido	13	Semifrío subhúmedo	7
Muy seco muy cálido	5	Semiseco cálido	3
Muy seco semicálido	7	Semiseco muy cálido	24
Seco cálido	3	Semiseco semicálido	15
Seco muy cálido	1	Semiseco semifrío	34
Seco semicálido	1	Semiseco templado	6
seco templado	8	Templado húmedo	62

## 5.1 Relación de rendimientos en el sector agrícola

### 5.1.1 Relación de rendimientos con el primer criterio

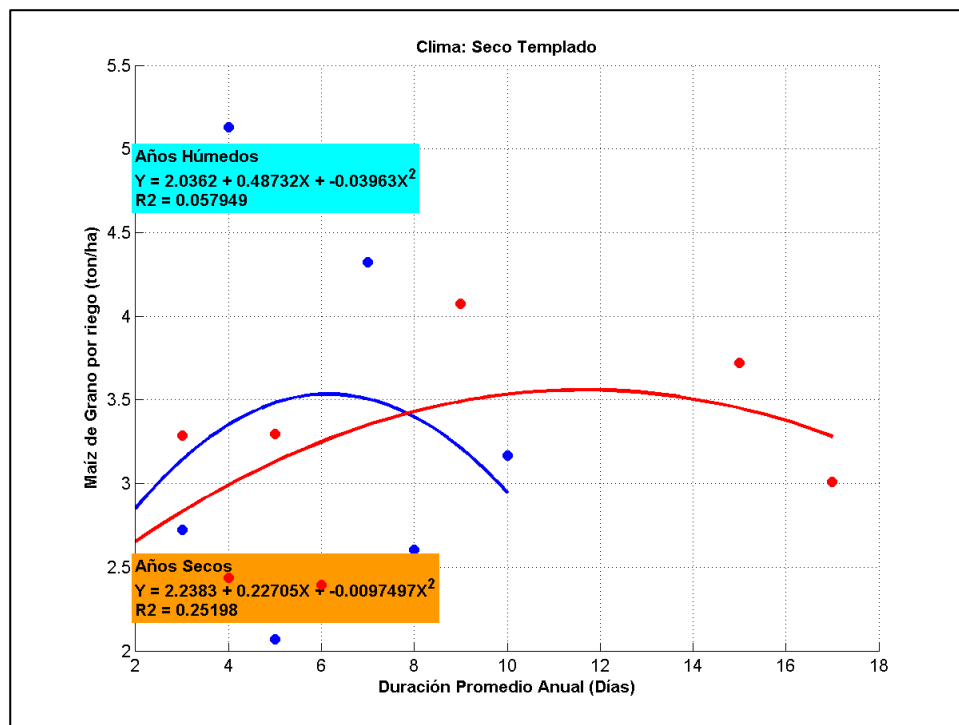
En la siguiente tabla se muestran algunos parámetros de la Ola de Calor obtenidos con el primer criterio para el municipio de Aguascalientes, Aguascalientes.

**Tabla 5.5 Parámetros de Ola de Calor del primer criterio en el municipio de Aguascalientes**

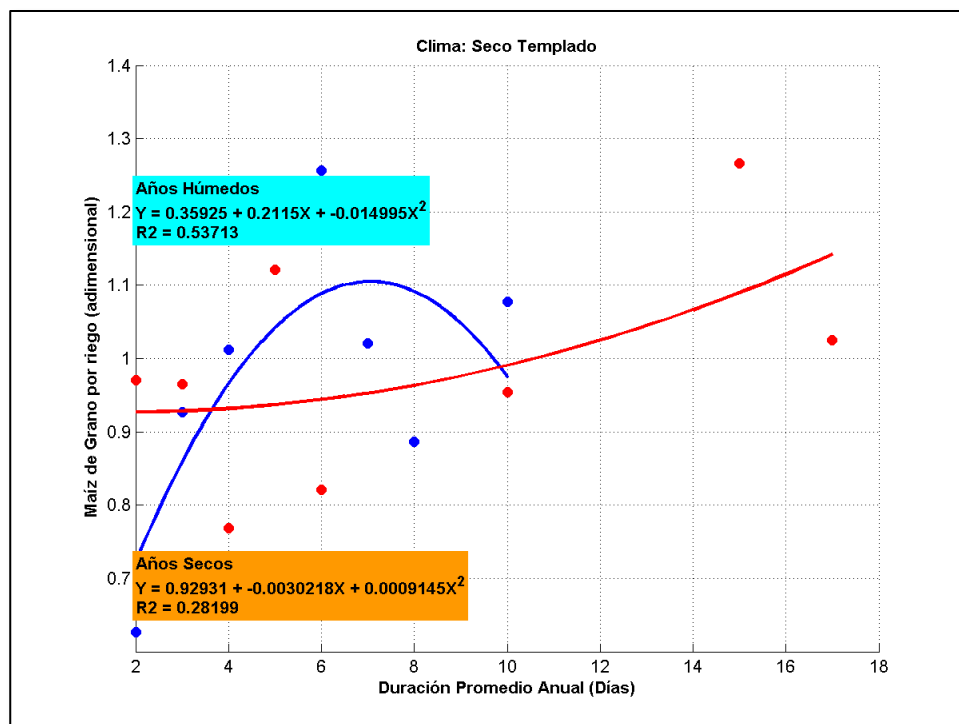
Año	Número de Eventos	Duración Total	Intensidad Promedio		Temperatura Alivio	Severidad Total	Día	
			Máxima	Mínima			Inicio	Término
1969	1	2	33.493	13.930	19.563	2.424	200	166
1973	1	2	31.013	14.114	16.899	2.670	196	170
1974	1	2	31.330	14.087	17.243	2.634	208	158
1979	2	6	31.476	14.981	16.756	8.152	196	188
1980	1	2	32.838	13.673	19.165	2.427	215	152
1981	2	7	31.117	14.687	16.839	9.485	212	162
1982	3	20	32.322	14.722	17.799	26.050	218	180
1983	1	2	30.717	14.572	16.145	2.805	188	178
1985	1	4	31.533	13.928	17.605	5.165	220	148
1989	1	7	33.095	14.268	18.828	8.805	209	162
1990	4	11	31.851	14.278	17.839	14.241	229	158
1992	1	3	31.587	14.192	17.395	3.948	185	183
1993	1	5	33.078	14.173	18.905	6.248	209	160
1994	1	4	31.528	14.699	16.829	5.494	208	160
1995	3	10	31.684	14.361	17.473	13.227	230	167
1996	1	2	31.496	13.937	17.559	2.587	215	152
1997	1	10	31.969	14.107	17.862	12.898	204	170
1998	2	14	32.733	14.526	18.326	18.034	211	173
1999	1	3	31.402	13.882	17.520	3.877	208	159
2000	1	3	31.010	13.742	17.268	3.887	220	148
2001	1	3	31.091	14.046	17.045	3.972	209	158
2002	1	3	32.977	13.743	19.234	3.643	239	128

Siguiendo el ejemplo de la Tabla 5.5, se obtuvieron los rendimientos para todos los municipios y se agruparon por clima.

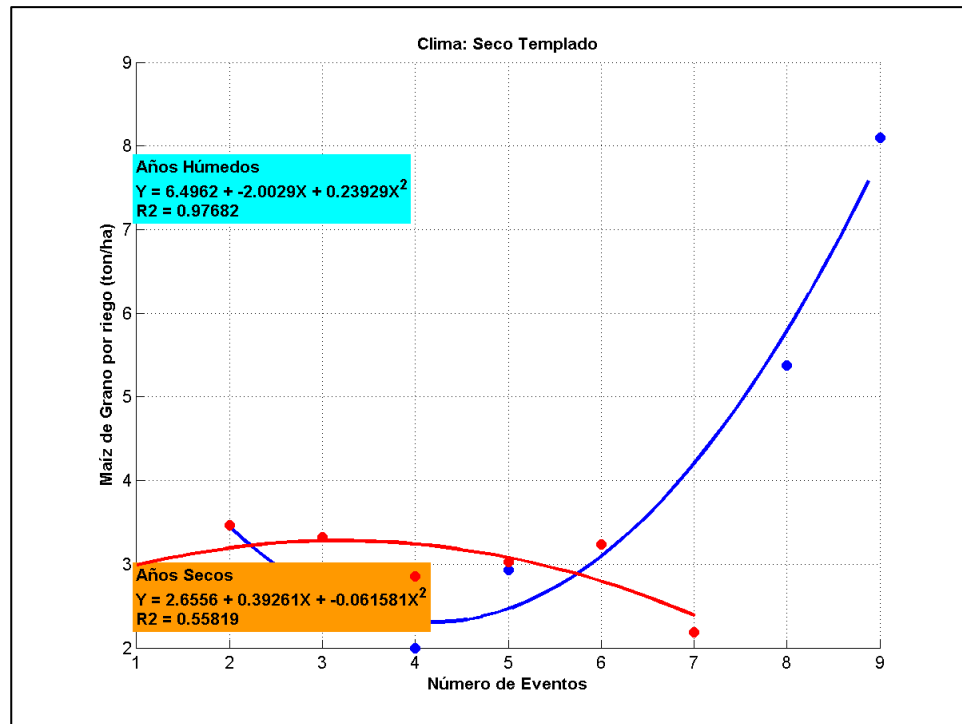
A continuación se muestran las gráficas del cultivo de Maíz de grano por riego para el clima seco templado. Se presentan datos reales y adimensionales tanto en los rendimientos como en los parámetros. Se determinaron los valores esperados de los rendimientos y los parámetros, solo se graficaron los que presentaban al menos 4 puntos por lo que habrá relaciones que no se graficaron.



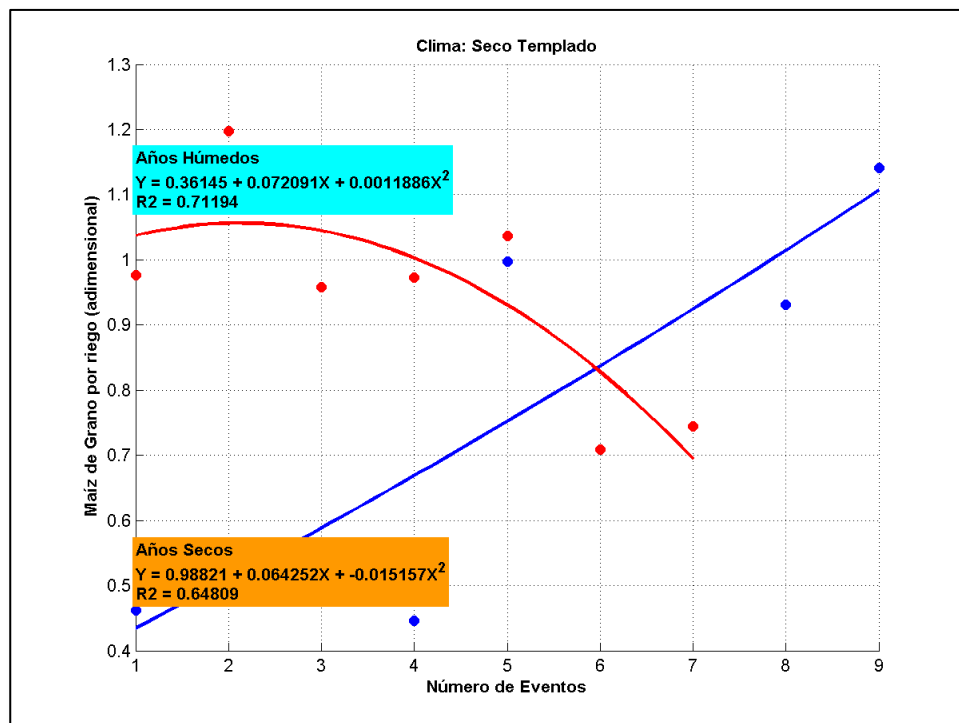
Gráfica 5.3 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Duración promedio anual.



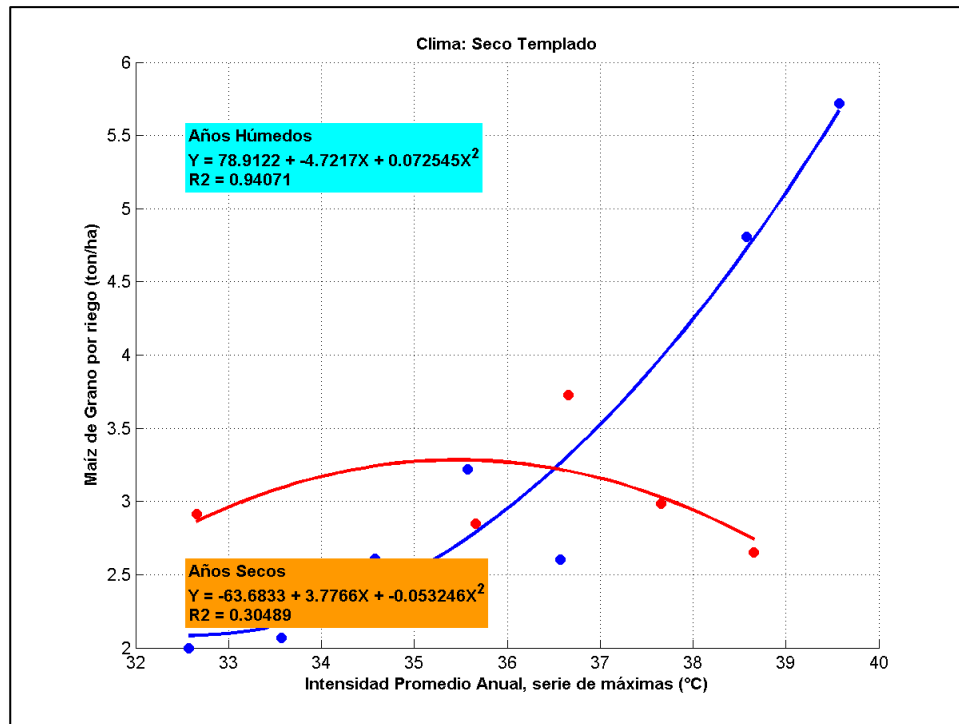
Gráfica 5.4 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Duración promedio anual.



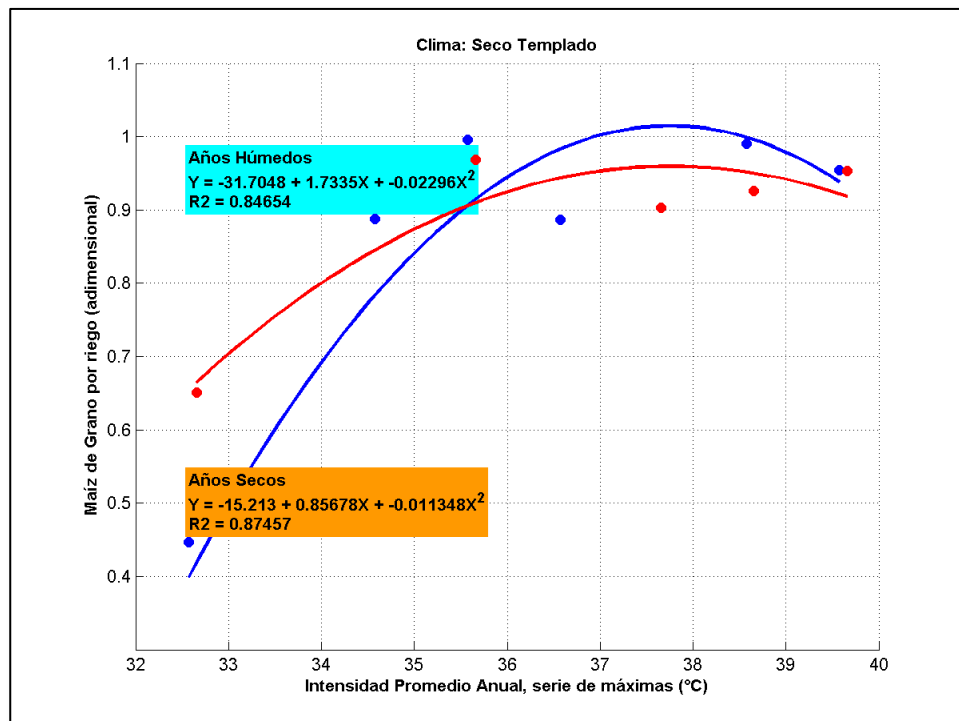
Gráfica 5.5 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Número de eventos al año.



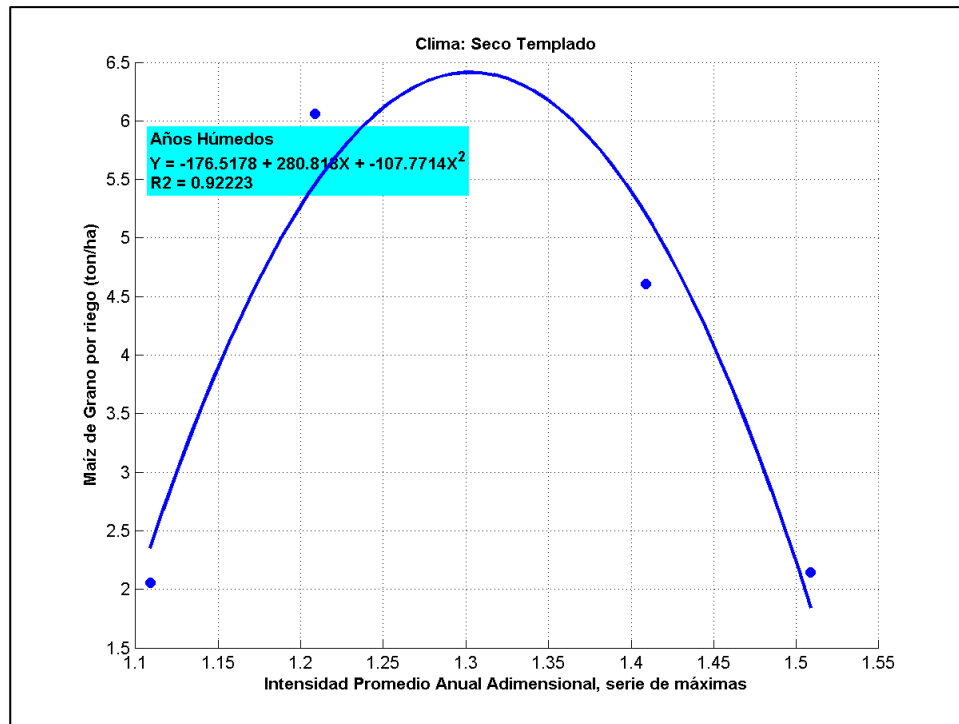
Gráfica 5.6 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Número de eventos al año.



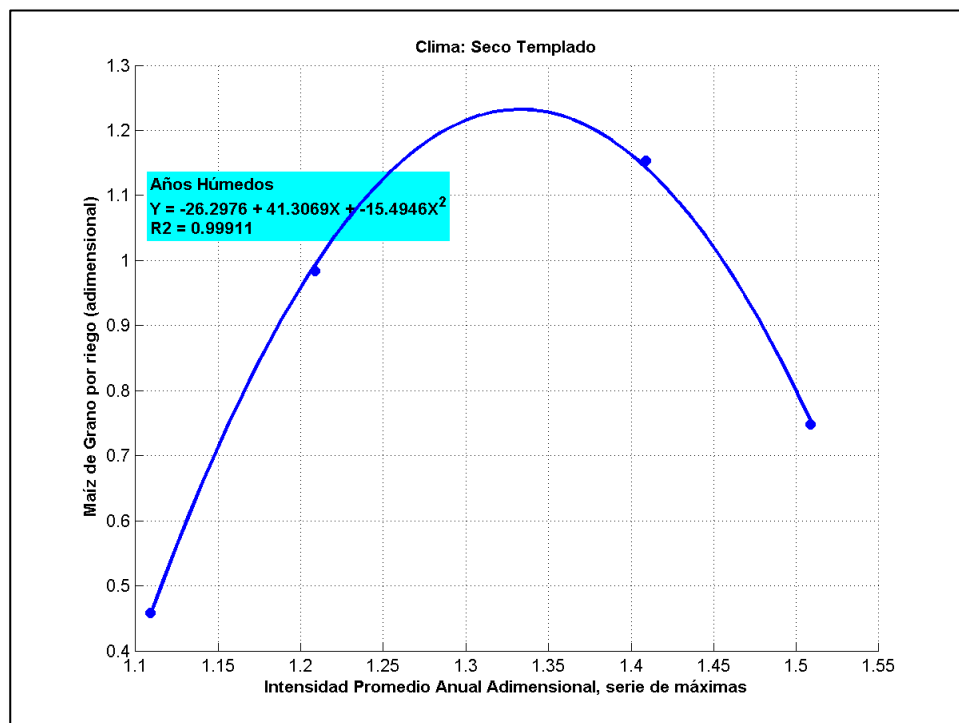
Gráfica 5.7 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas.



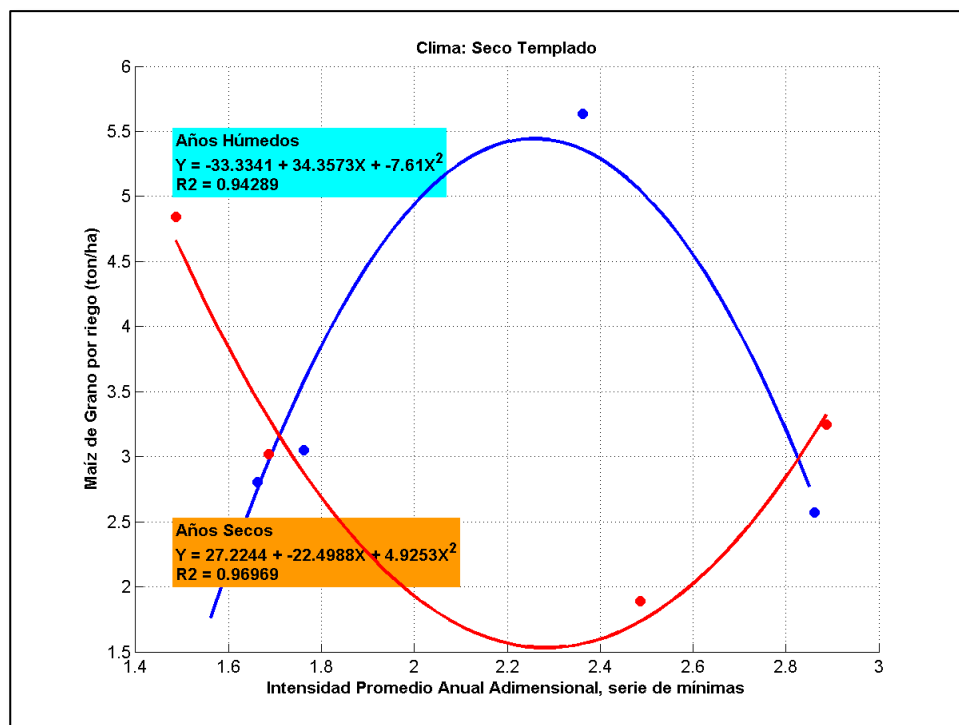
Gráfica 5.8 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas.



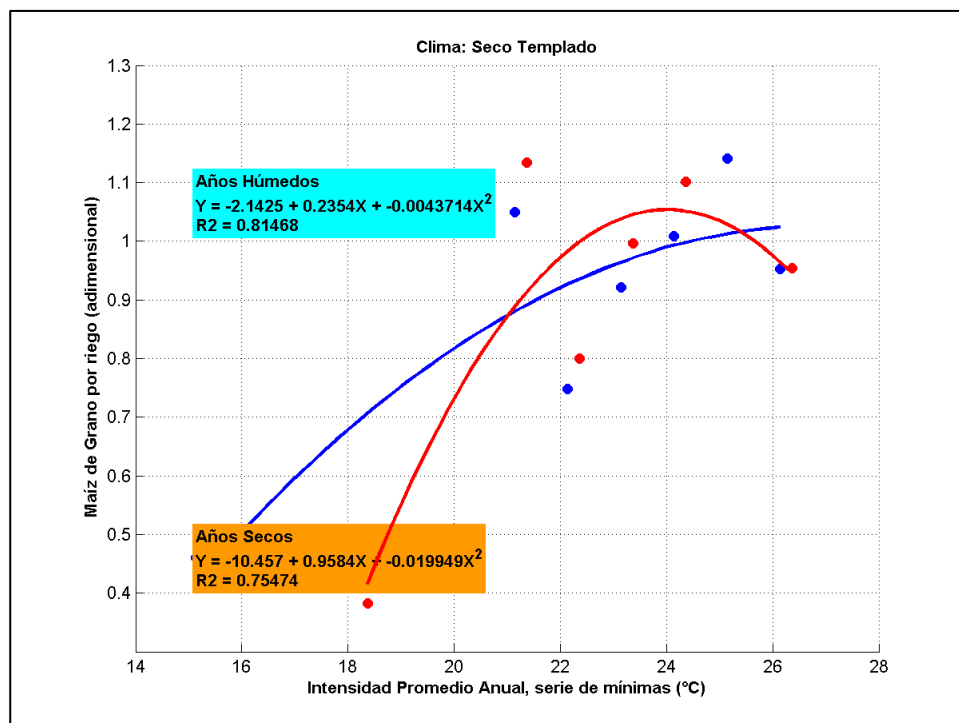
Gráfica 5.9 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas máximas.



Gráfica 5.10 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas máximas.

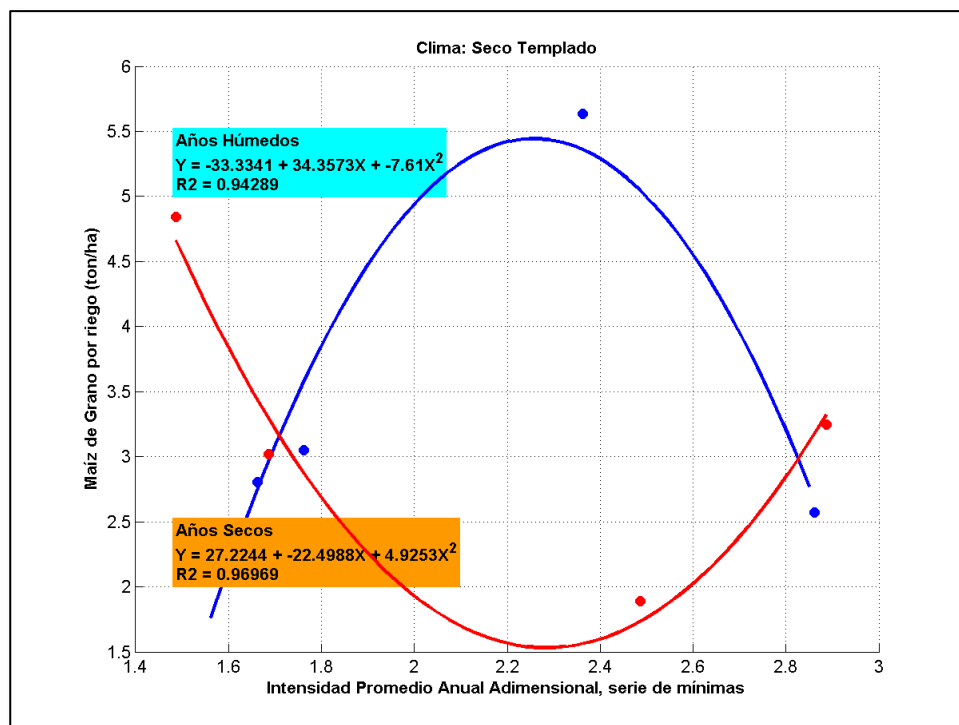


Gráfica 5.11 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas.

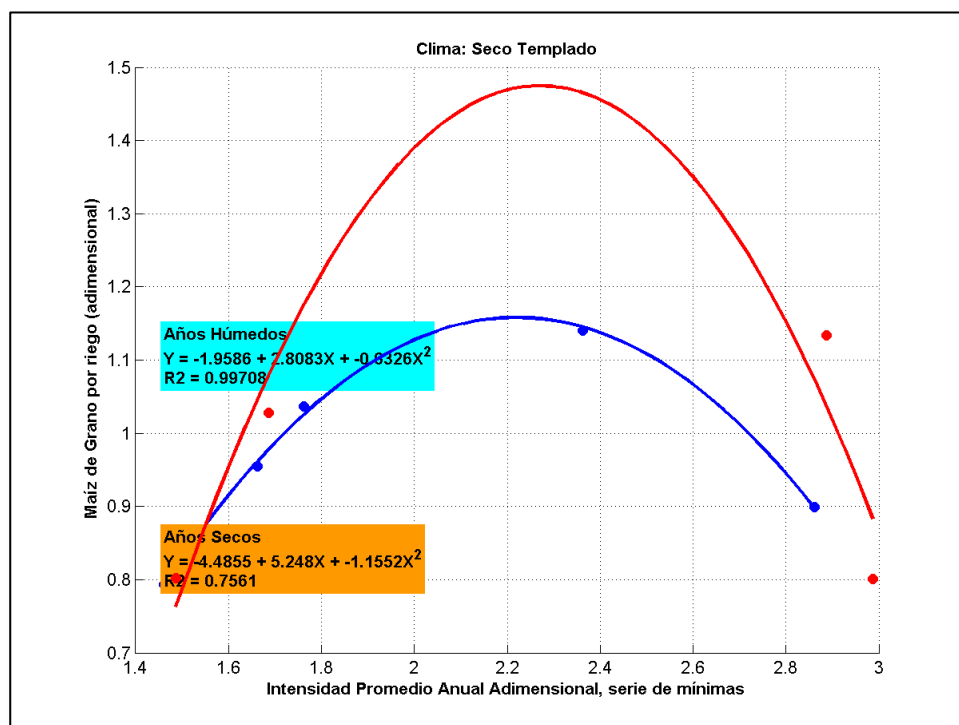


Gráfica 5.12 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas

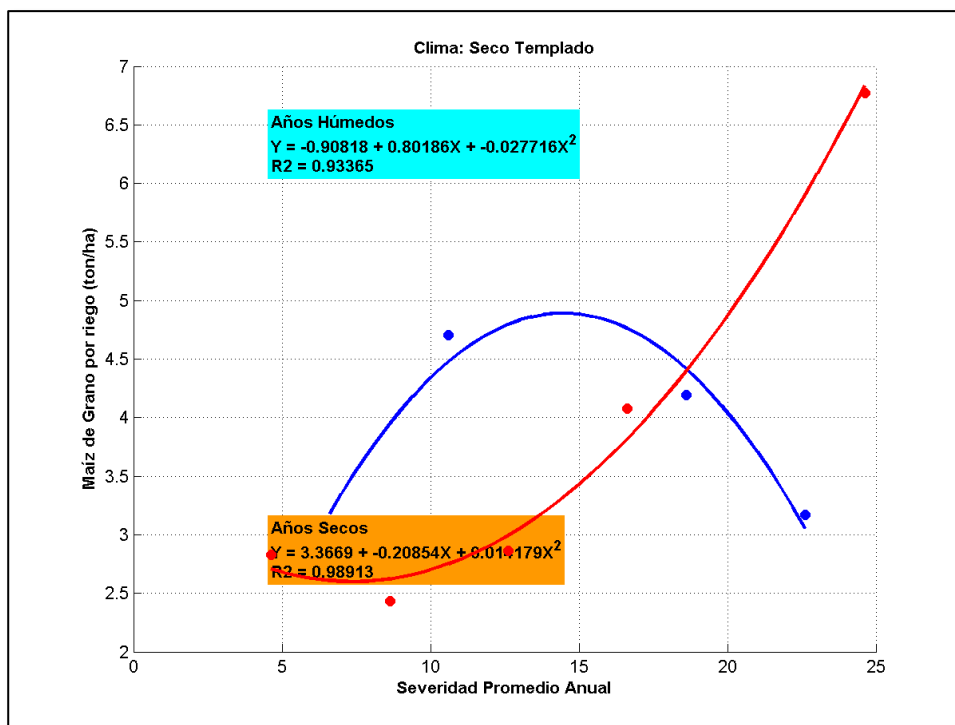




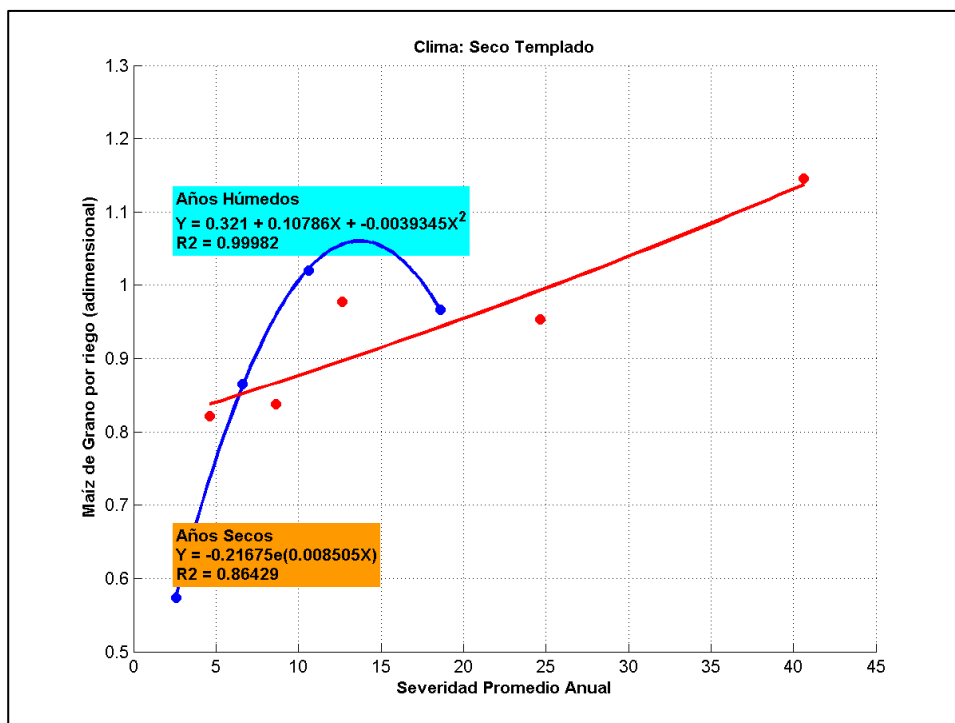
Gráfica 5.13 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas mínimas



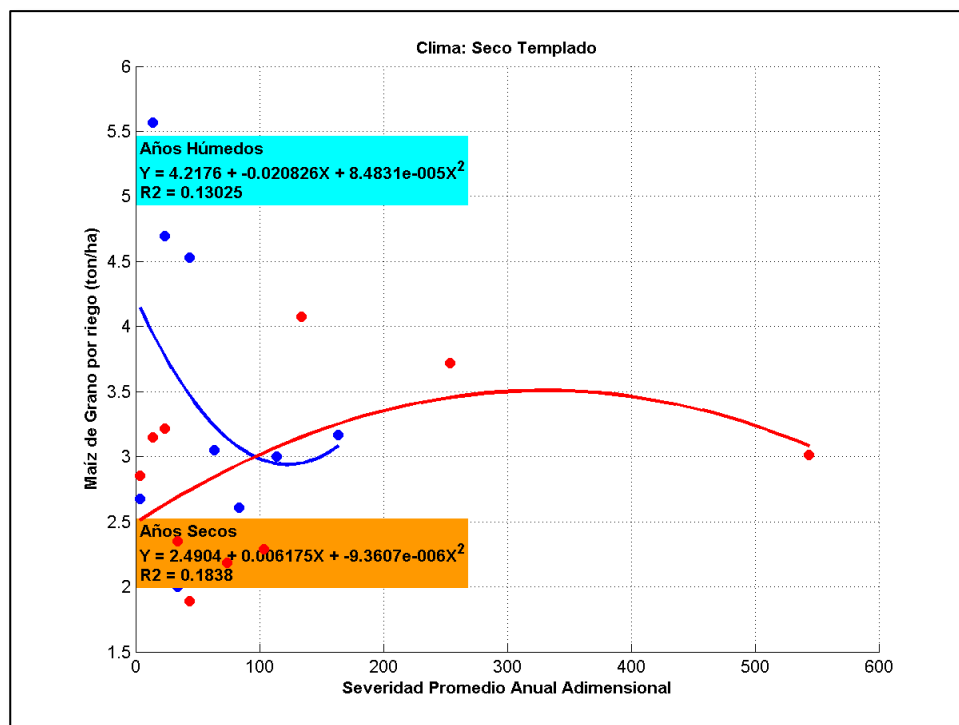
Gráfica 5.14 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional, serie de temperaturas mínimas



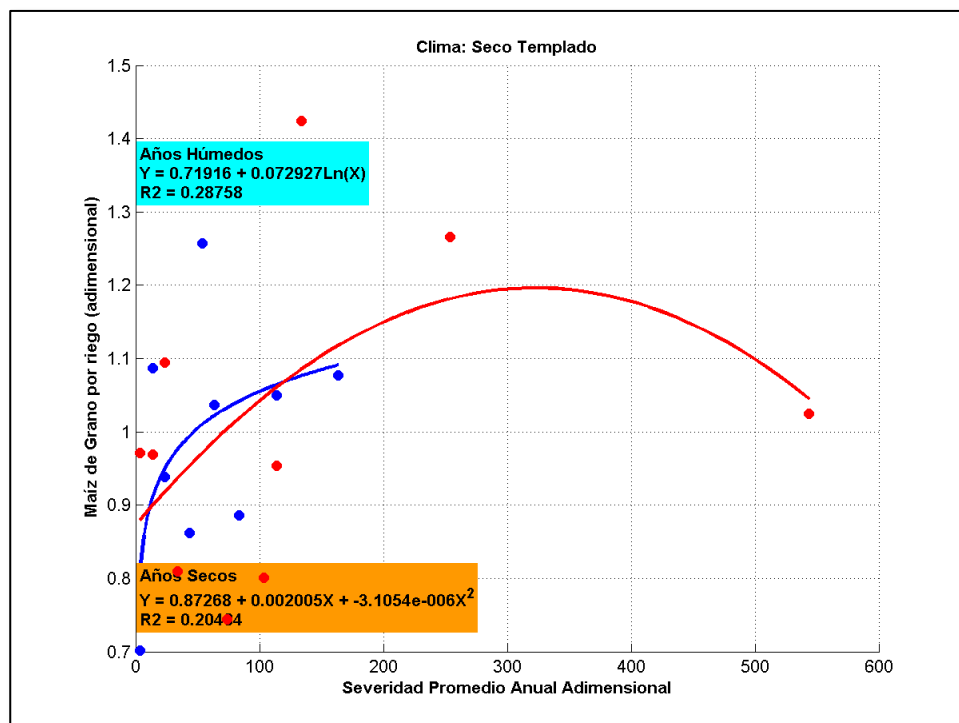
Gráfica 5.15 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Severidad promedio anual.



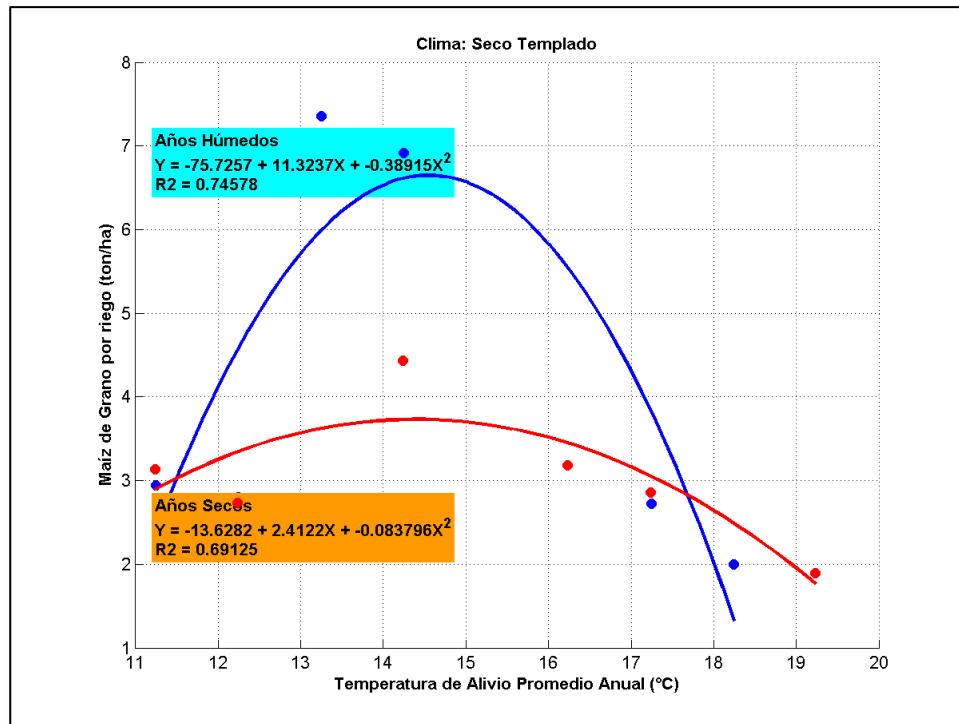
Gráfica 5.16 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Severidad promedio anual.



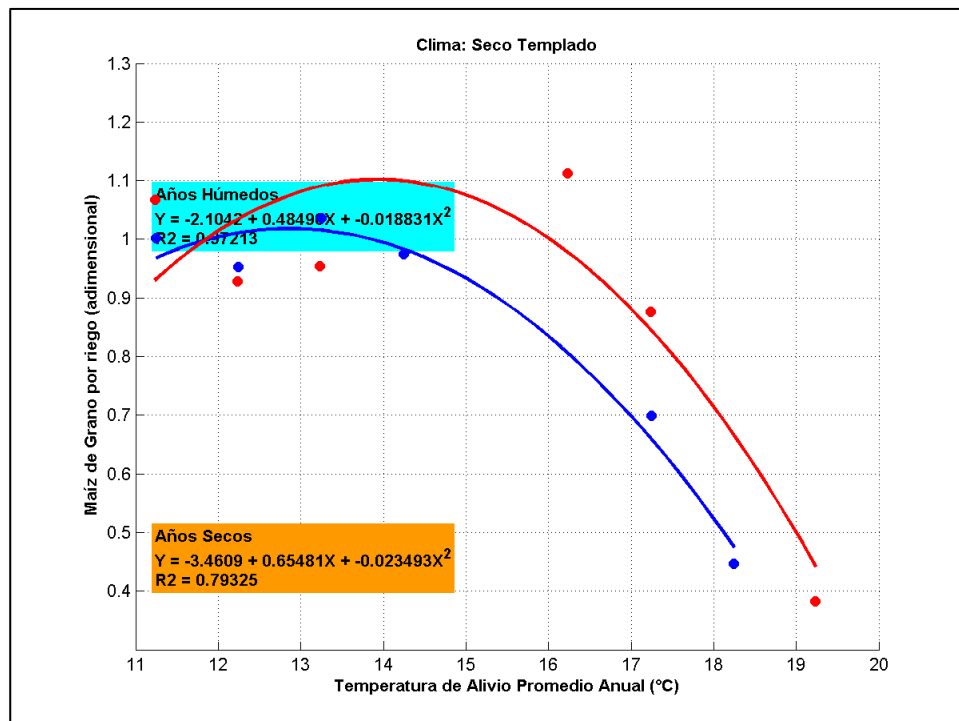
Gráfica 5.17 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Severidad promedio anual adimensional.



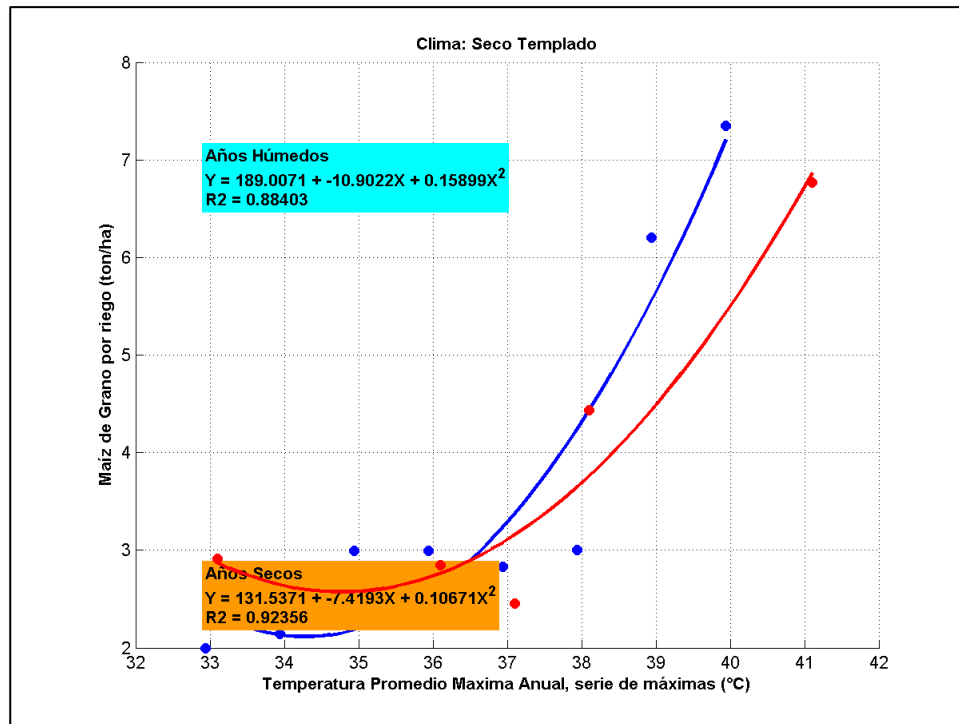
Gráfica 5.18 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual adimensional.



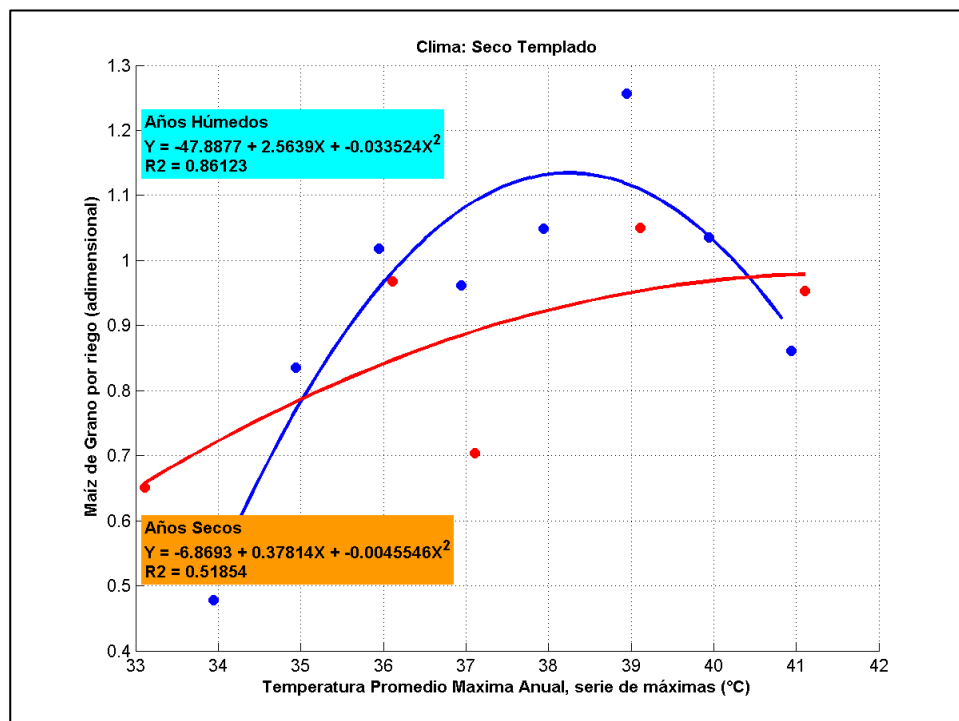
Gráfica 5.19 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura de alivio promedio anual.



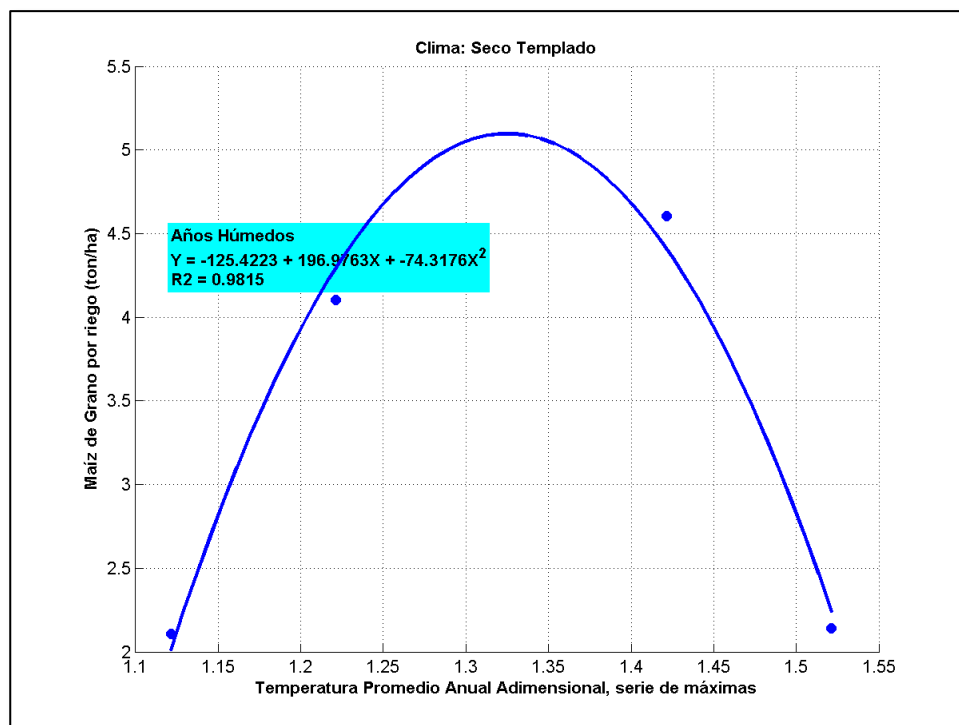
Gráfica 5.20 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura de alivio promedio anual.



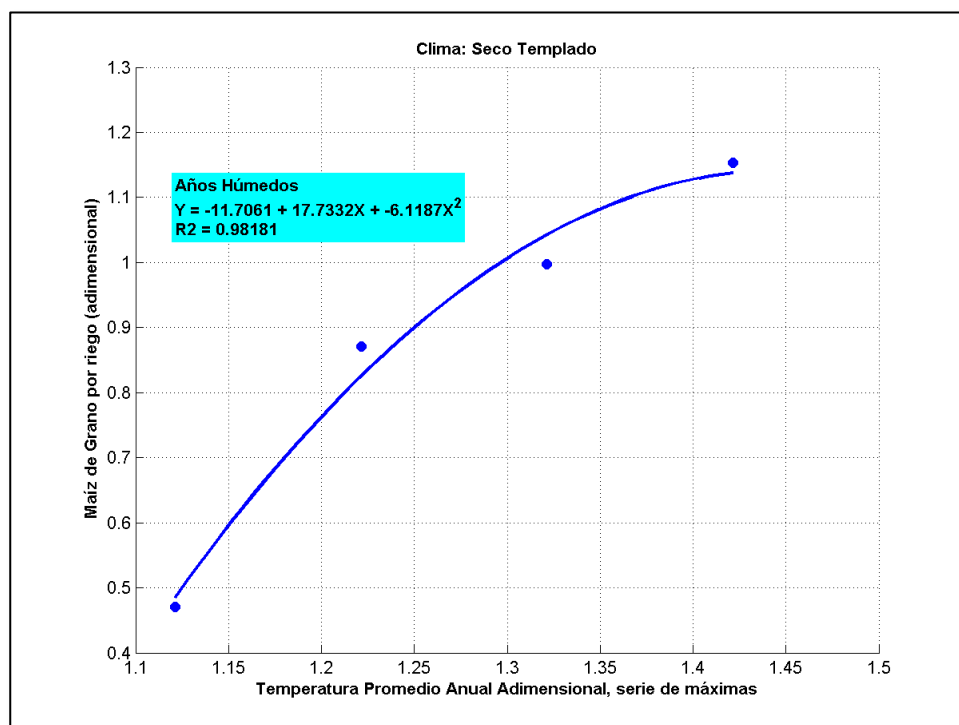
Gráfica 5.21 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas.



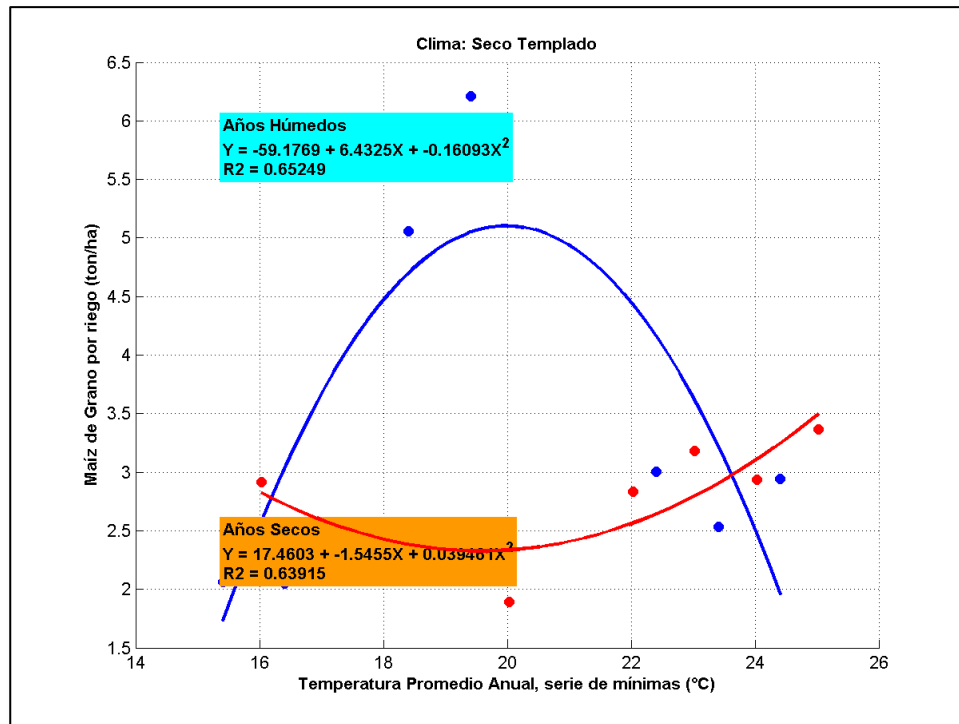
Gráfica 5.22 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas.



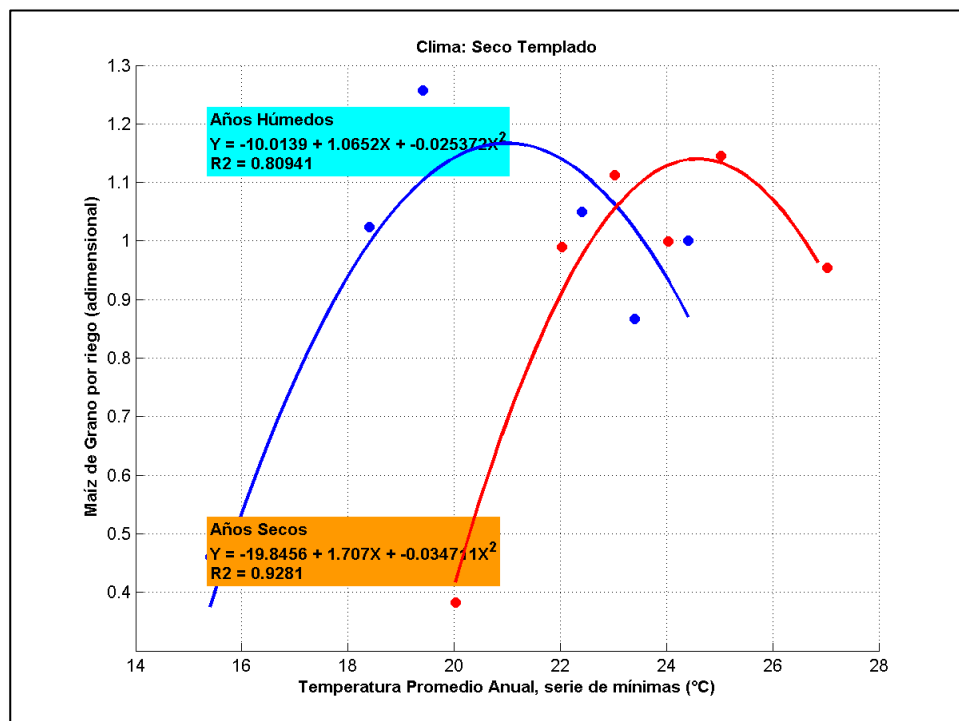
Gráfica 5.23 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas.



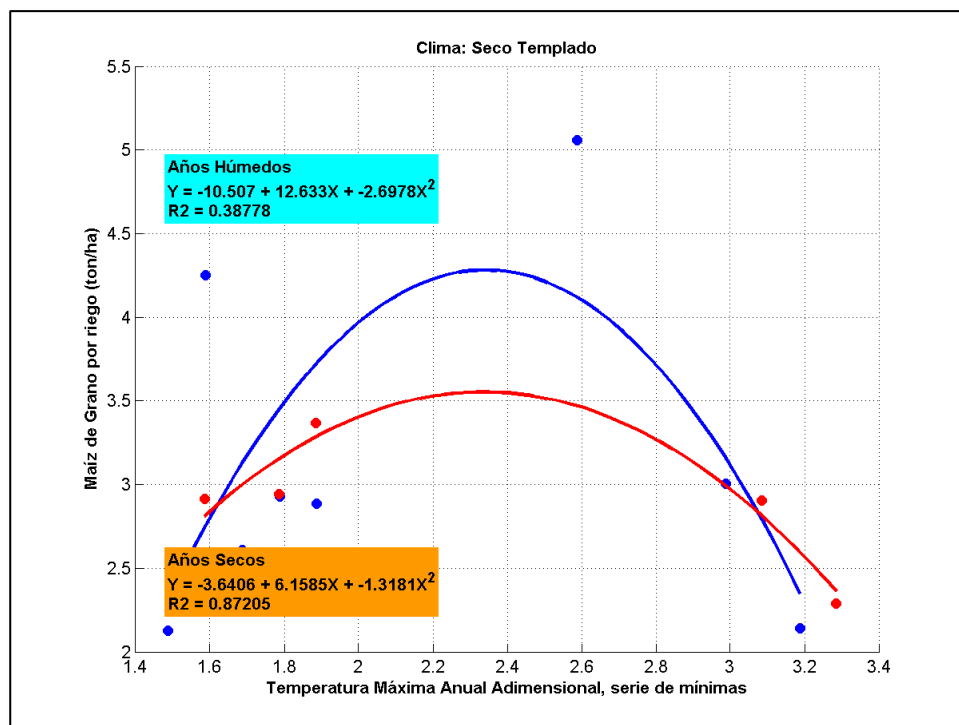
Gráfica 5.24 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas.



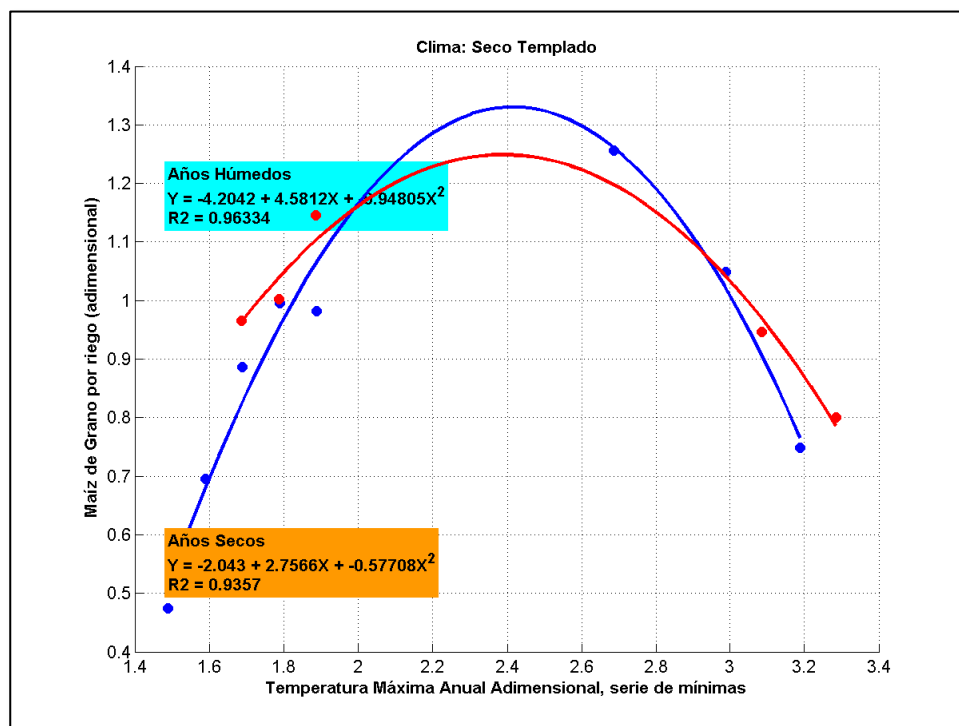
Gráfica 5.25 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas mínimas.



Gráfica 5.26 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas.

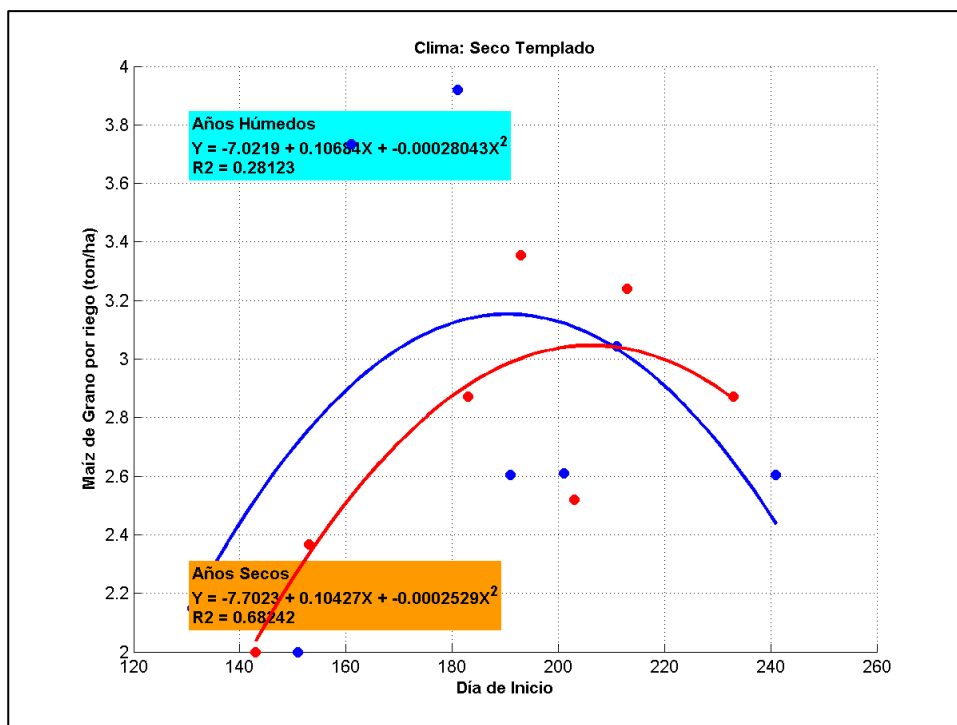


Gráfica 5.27 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas.

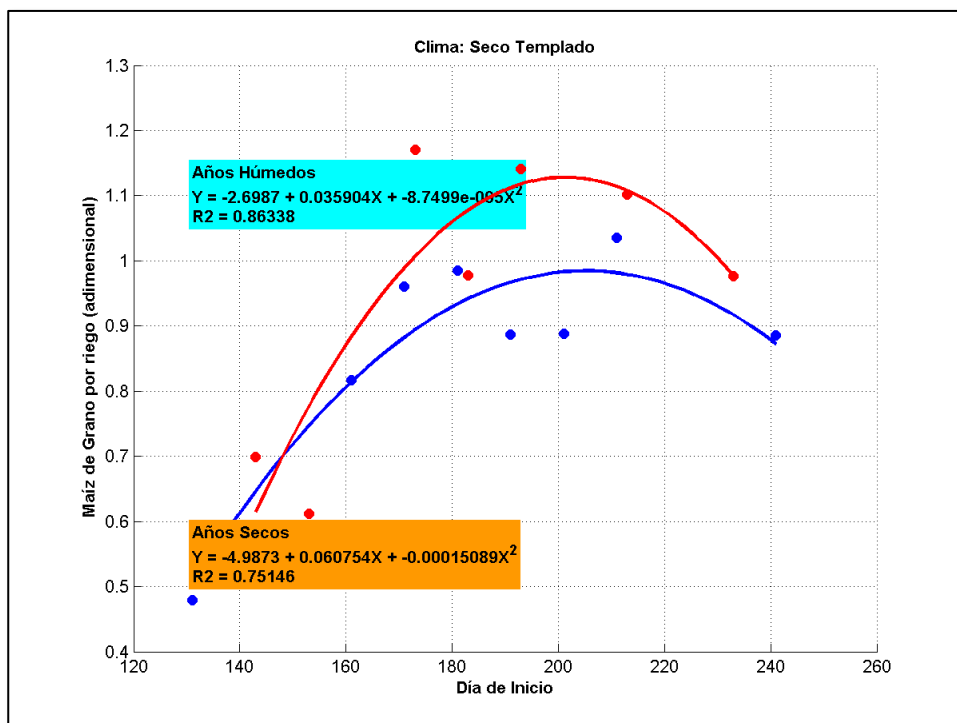


Gráfica 5.28 Rendimiento adimensional de maíz de grano por riego vs Temperatura promedio máxima anual adimensional, serie de temperaturas máximas.

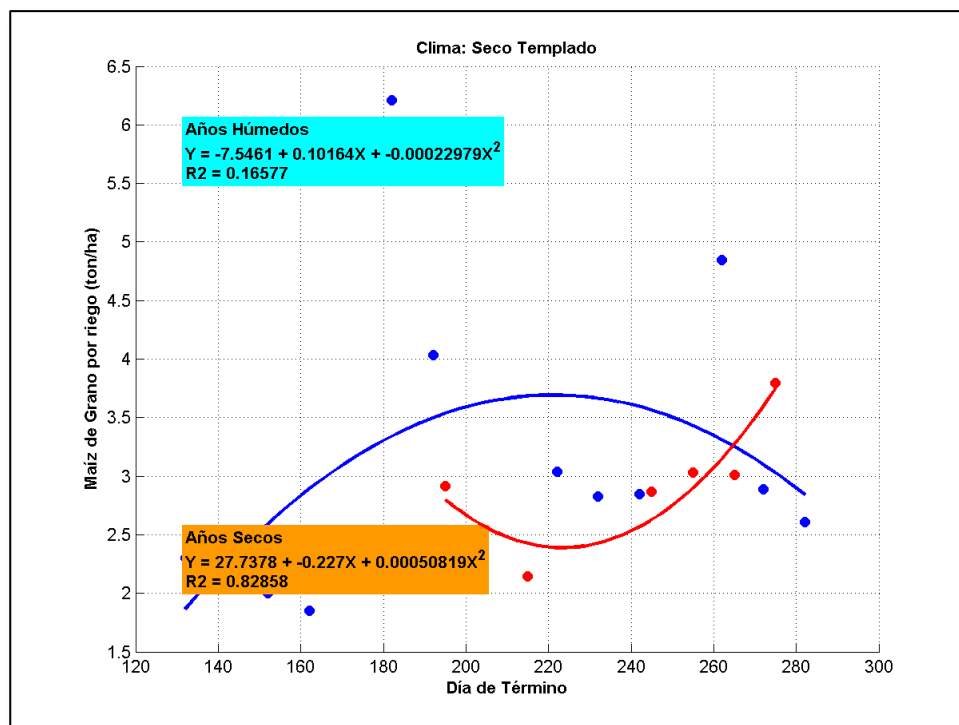




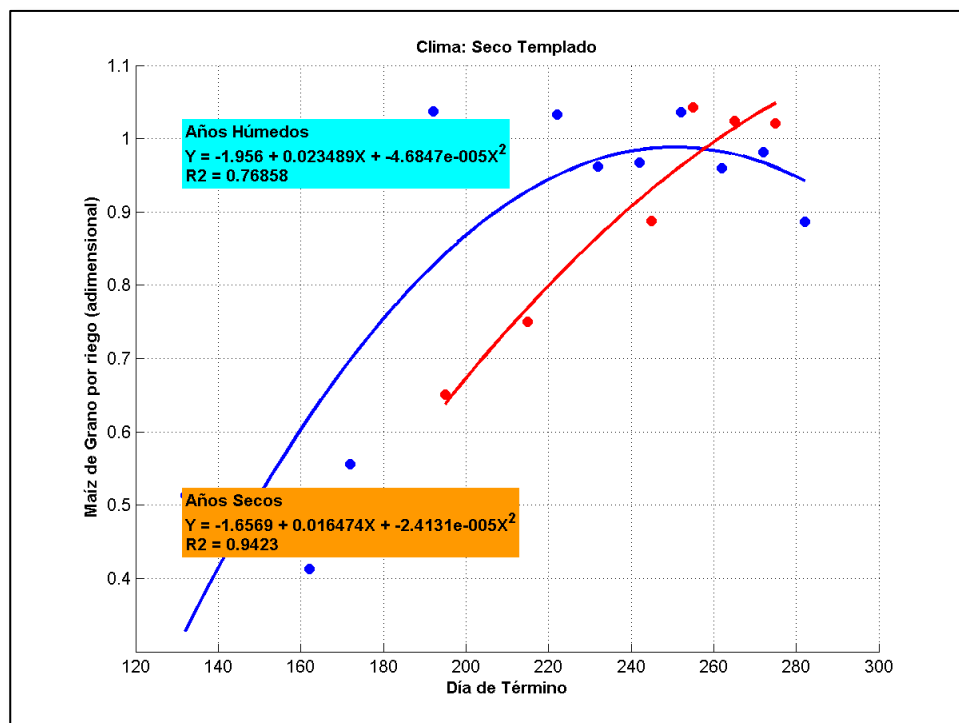
Gráfica 5.29 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de inicio.



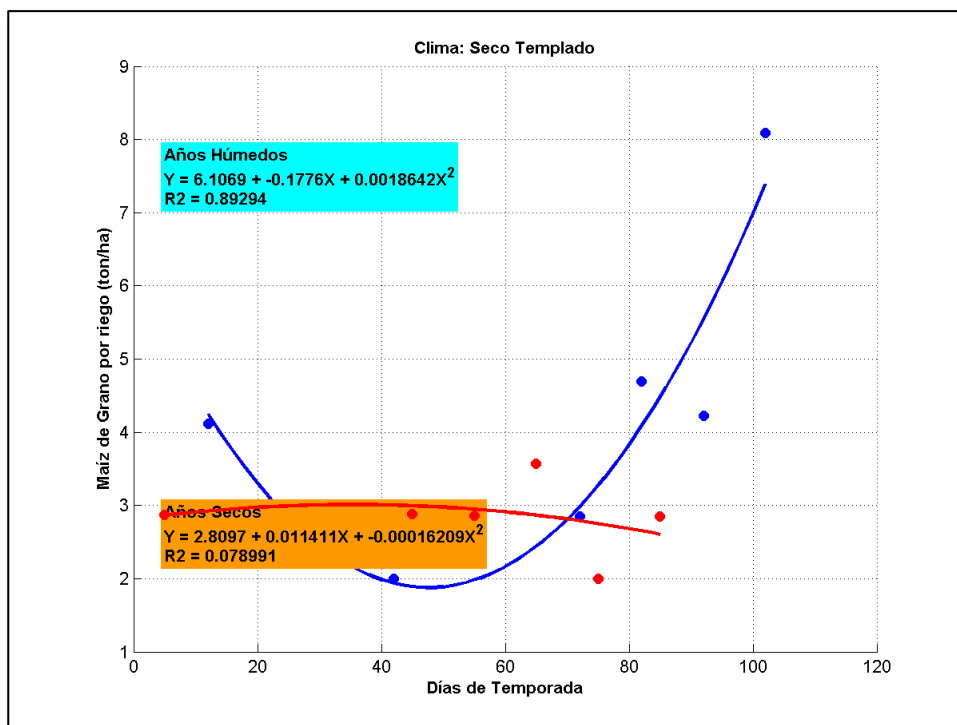
Gráfica 5.30 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de inicio



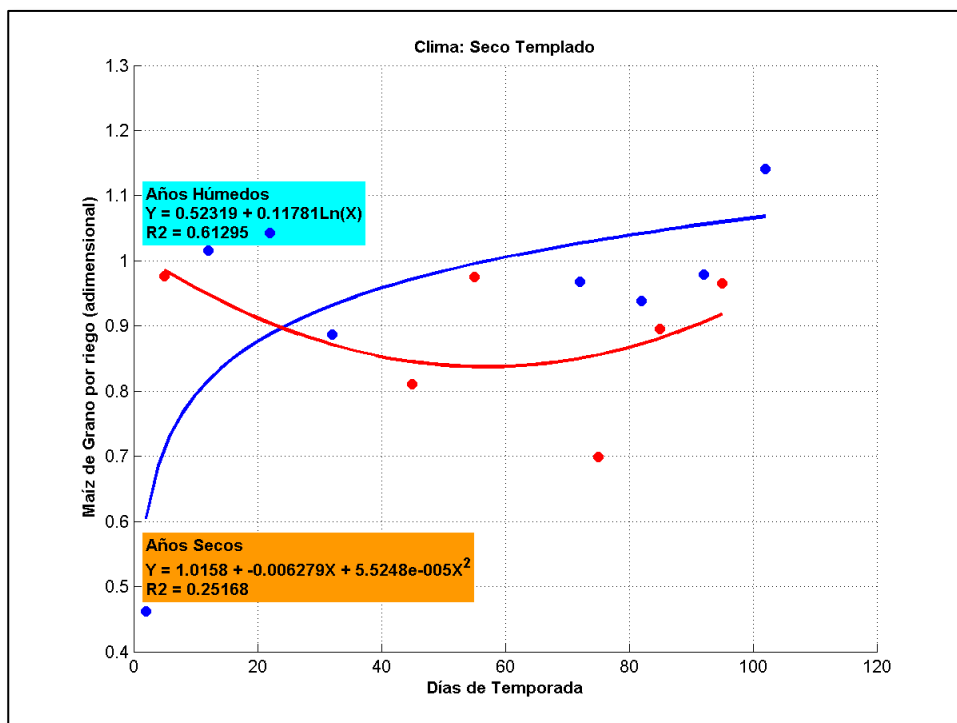
Gráfica 5.31 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de término.



Gráfica 5.32 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de término



Gráfica 5.33 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Días de temporada.



Gráfica 5.34 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Días de temporada.

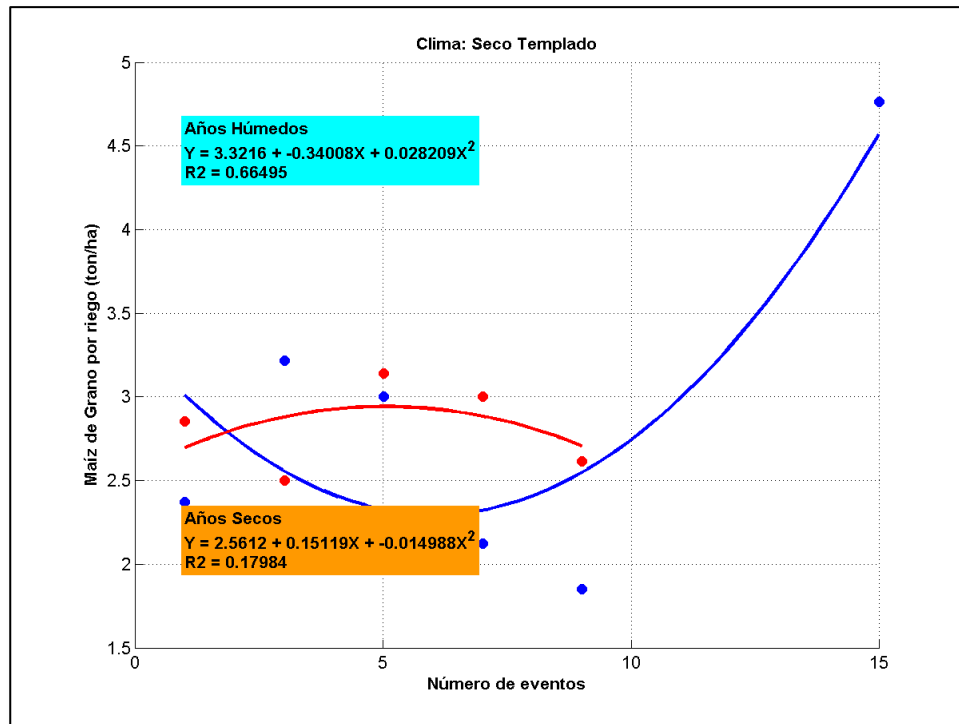
### 5.1.2 Relación de rendimientos con el segundo criterio

En la siguiente Tabla 5.6 se muestran los parámetros promedio de la Ola de Calor obtenidos con el segundo criterio para el municipio de Aguascalientes, Aguascalientes.

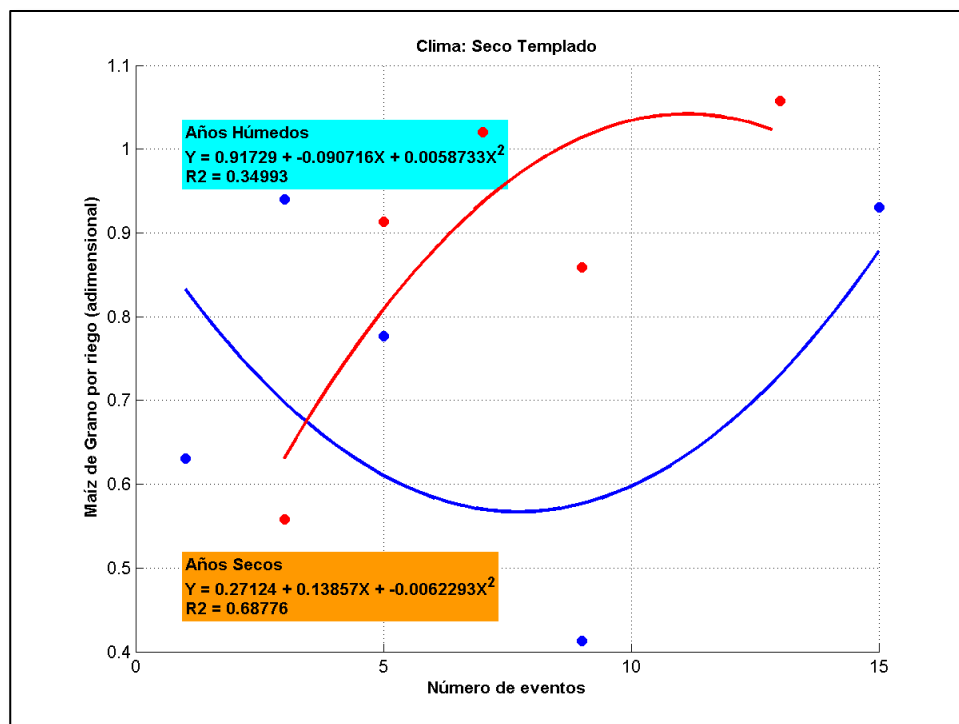
**Tabla 5.6 Parámetros de Ola de Calor del segundo criterio en el municipio de Aguascalientes**

año	Eventos	Duración	intensidad	Sensibilidad Térmica	Ola de Calor	Temp. Esperada	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
1985	4	3.00	-0.15	30.24	1.40	31.80	130	151	22	6.667
1986	4	3.75	-0.32	30.08	1.01	31.41	96	138	43	12.000
1991	6	3.00	1.11	31.50	1.82	32.21	109	158	50	9.400
1992	1	4.00	0.18	30.58	1.20	31.60	180	183	4	0.000
1993	3	4.00	0.65	31.05	1.66	32.06	116	160	45	19.500
1994	3	10.00	-0.06	30.34	1.25	31.65	119	160	42	19.000
1995	8	4.50	-0.10	30.30	1.51	31.90	82	167	86	11.857
1996	2	10.50	0.13	30.53	1.58	31.98	124	152	29	17.000
1997	1	12.00	0.52	30.91	1.60	31.99	159	170	12	0.000
1998	5	6.20	1.37	31.77	2.63	33.02	127	174	48	9.500
1999	5	6.20	0.39	30.79	1.71	32.11	96	164	69	14.750
2000	4	8.50	0.08	30.47	1.39	31.79	108	148	41	10.333
2001	5	7.20	-0.58	29.82	1.31	31.71	93	159	67	15.000
2002	8	6.63	-0.02	30.38	1.58	31.98	85	178	94	13.143
2003	13	3.23	1.42	31.82	2.22	32.62	95	172	78	6.333
2004	3	5.00	0.90	31.29	1.60	31.99	108	150	43	17.000
2005	3	4.67	0.62	31.01	1.59	31.99	107	170	64	31.000

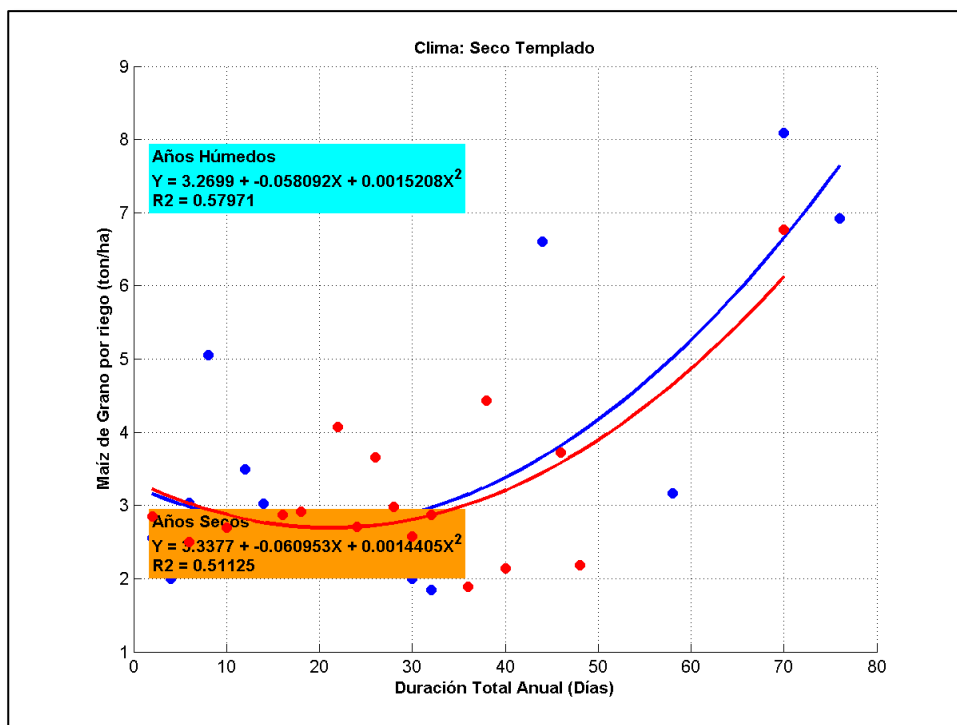
Siguiendo el ejemplo del primer criterio, se muestran las gráficas del cultivo de Maíz de grano por riego para el clima seco templado. Se presentan datos reales y adimensionales de los rendimientos. Se determinaron los valores esperados de los rendimientos y los parámetros, solo se graficaron los que presentaban más de 4 puntos por lo que habrá relaciones que no se graficaron.



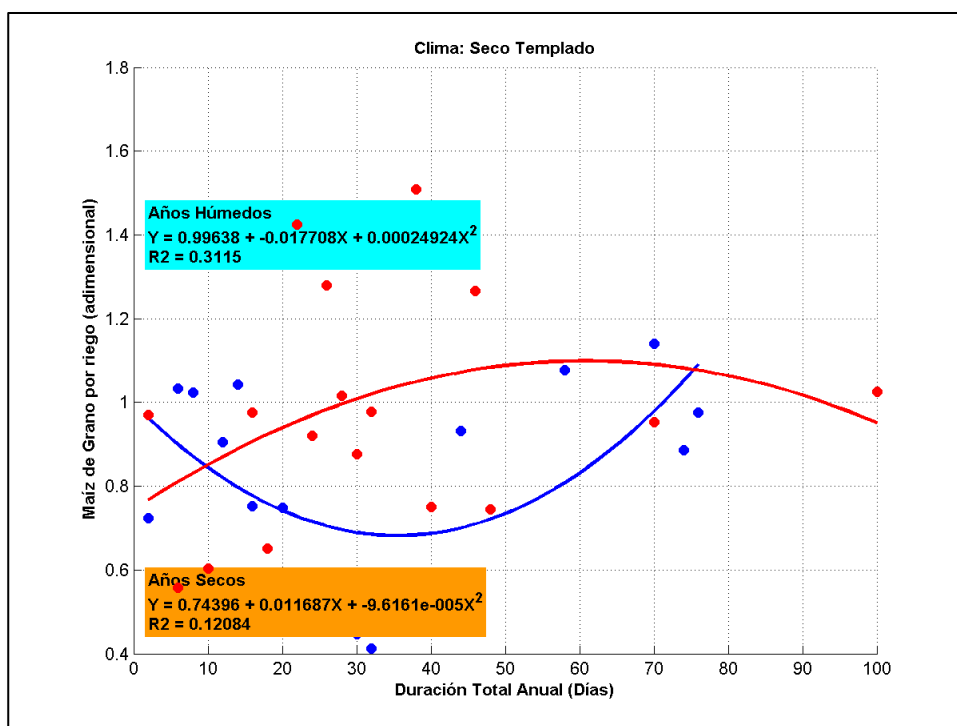
Gráfica 5.35 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Número de eventos por año.



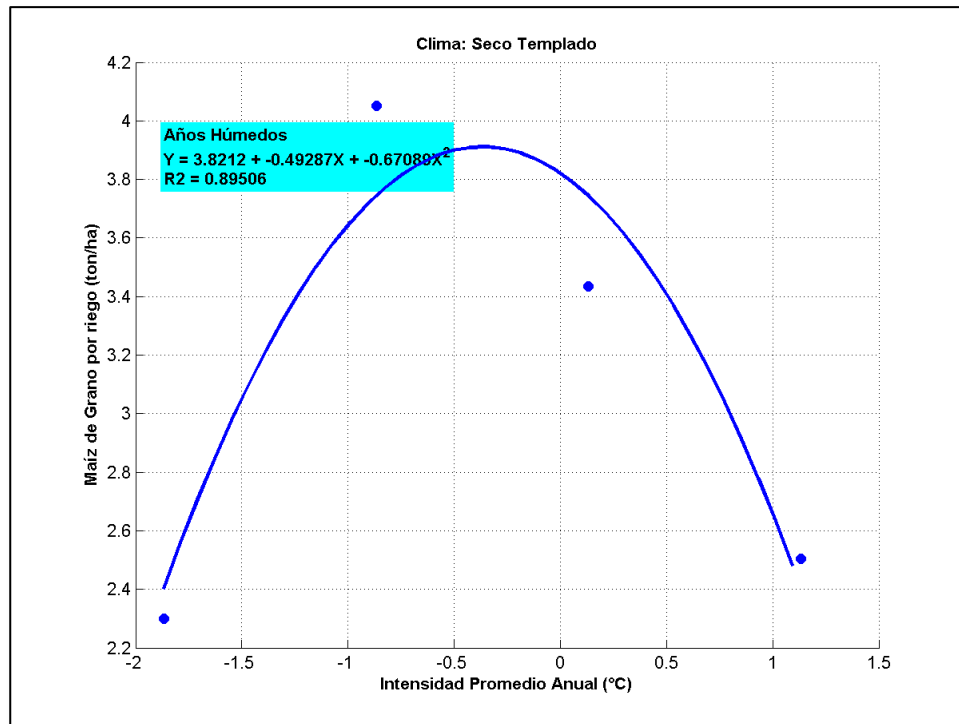
Gráfica 5.36 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Número de eventos por año.



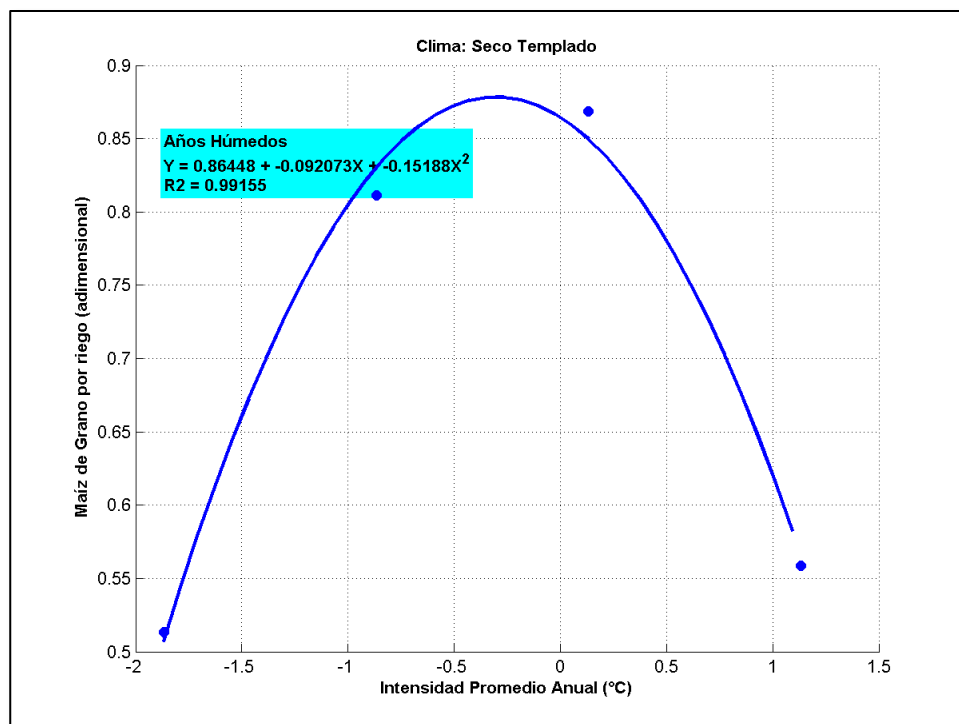
Gráfica 5.37 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Duración total anual.



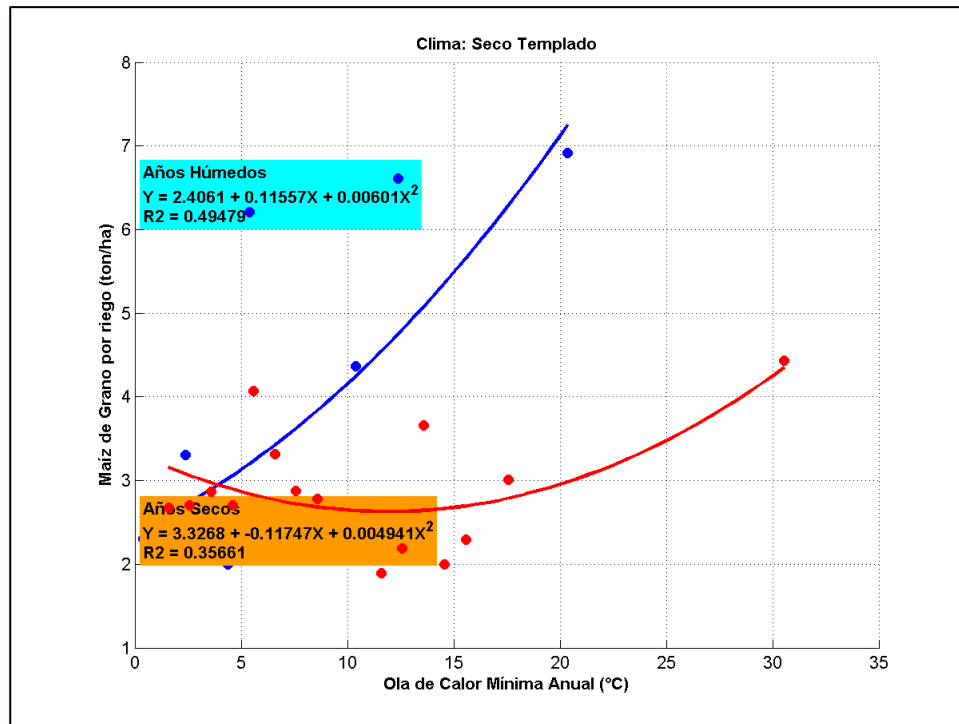
Gráfica 5.38 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Duración total anual.



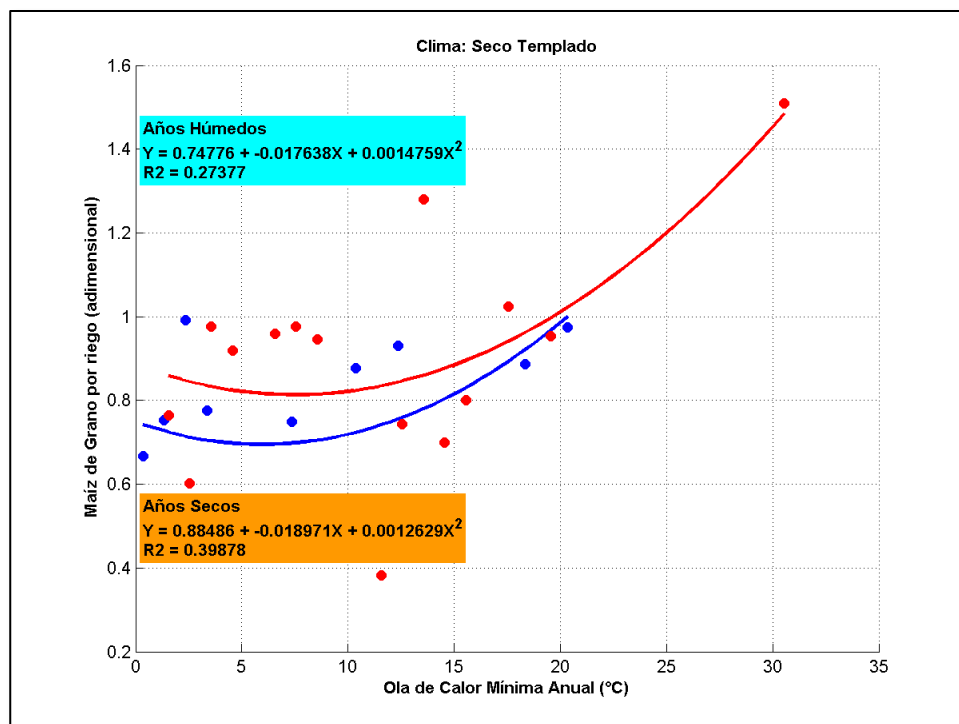
Gráfica 5.39 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual.



Gráfica 5.40 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Intensidad promedio anual.

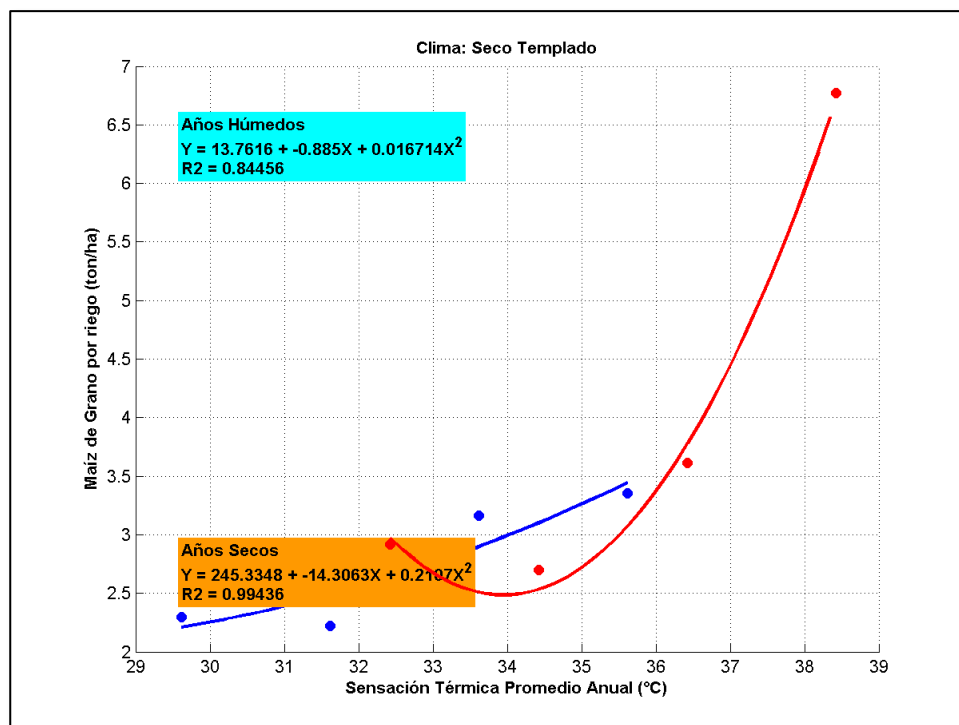


Gráfica 5.41 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Ola de Calor mínima anual.

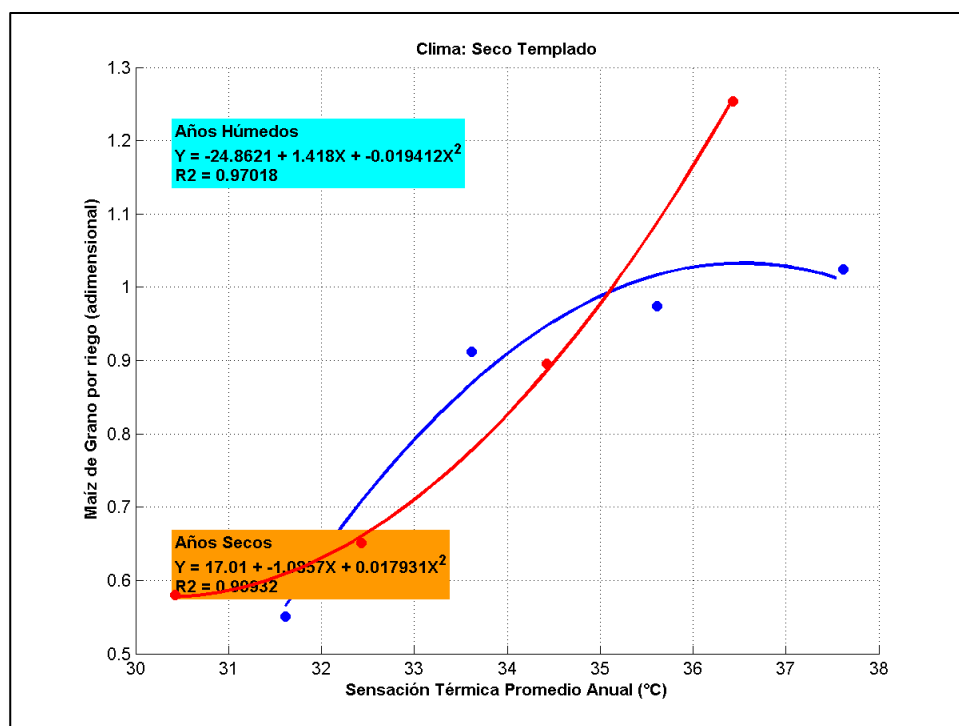


Gráfica 5.42 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Ola de Calor mínima anual.

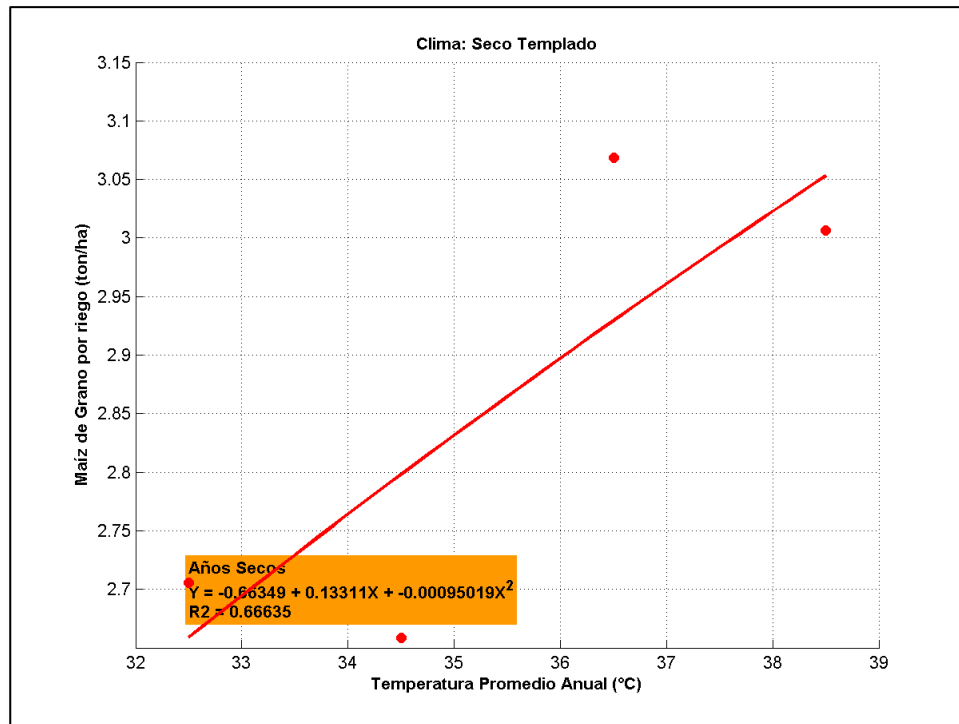




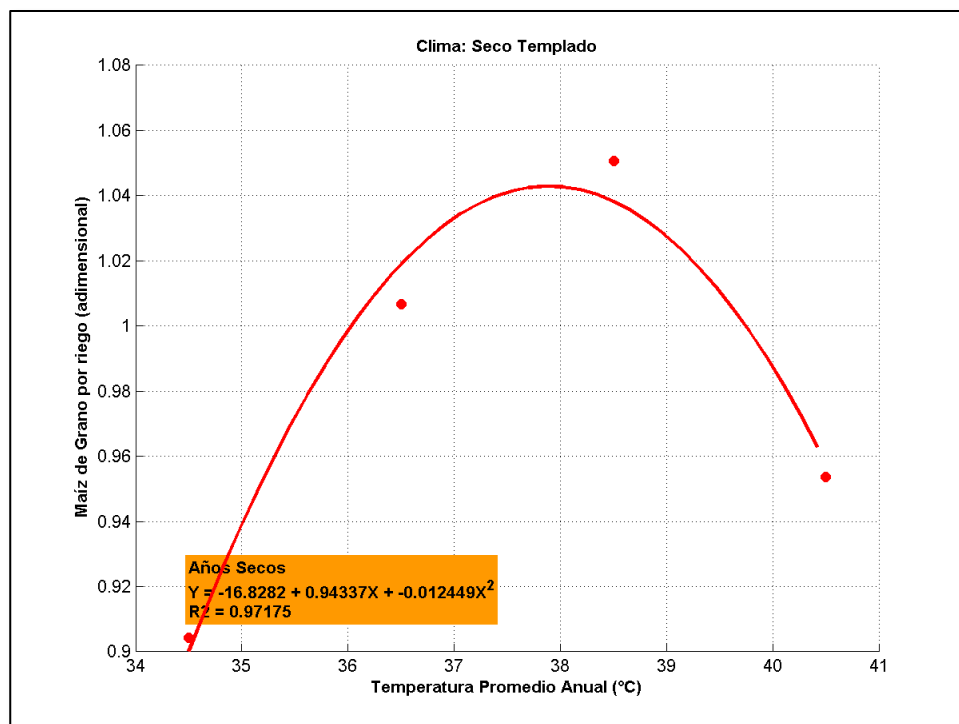
Gráfica 5.43 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Sensibilidad térmica promedio anual.



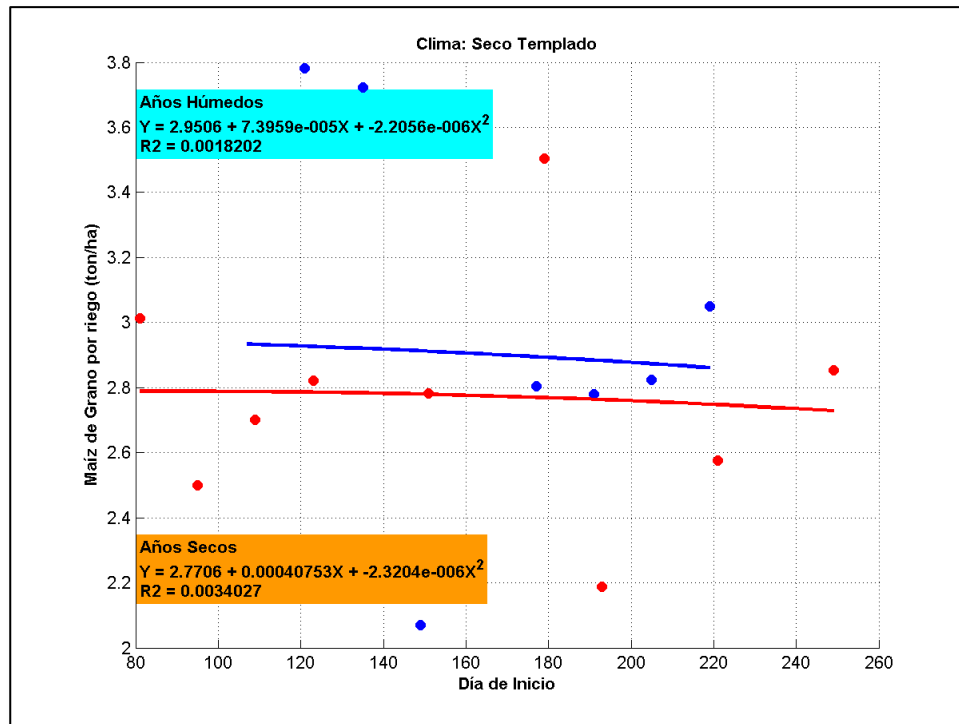
Gráfica 5.44 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Sensibilidad térmica promedio anual.



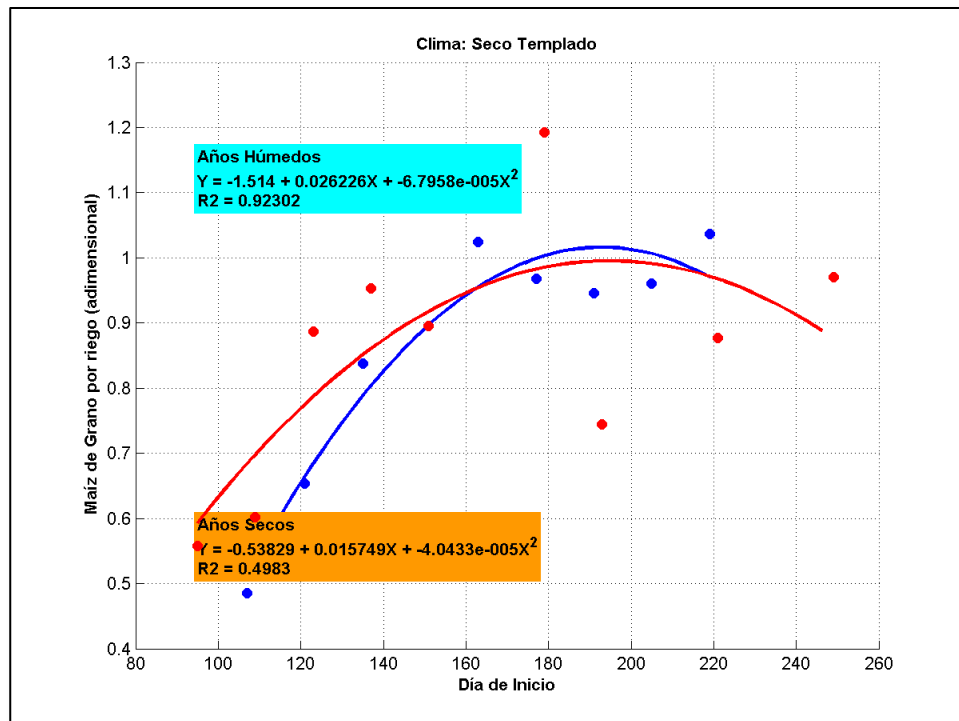
Gráfica 5.45 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Temperatura esperada promedio anual.



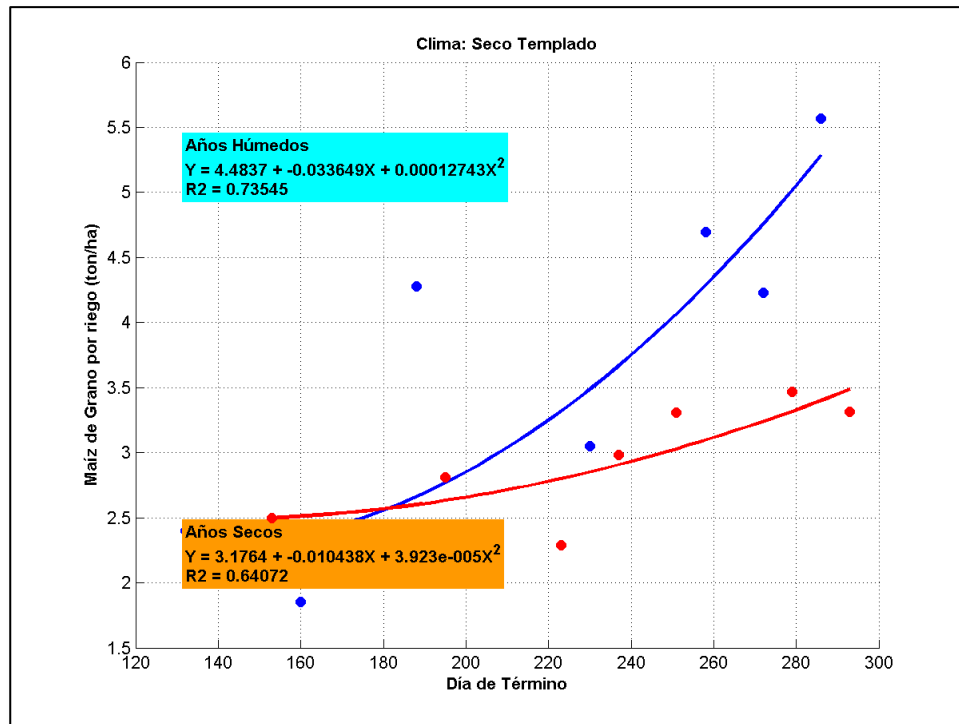
Gráfica 5.46 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Temperatura esperada promedio anual.



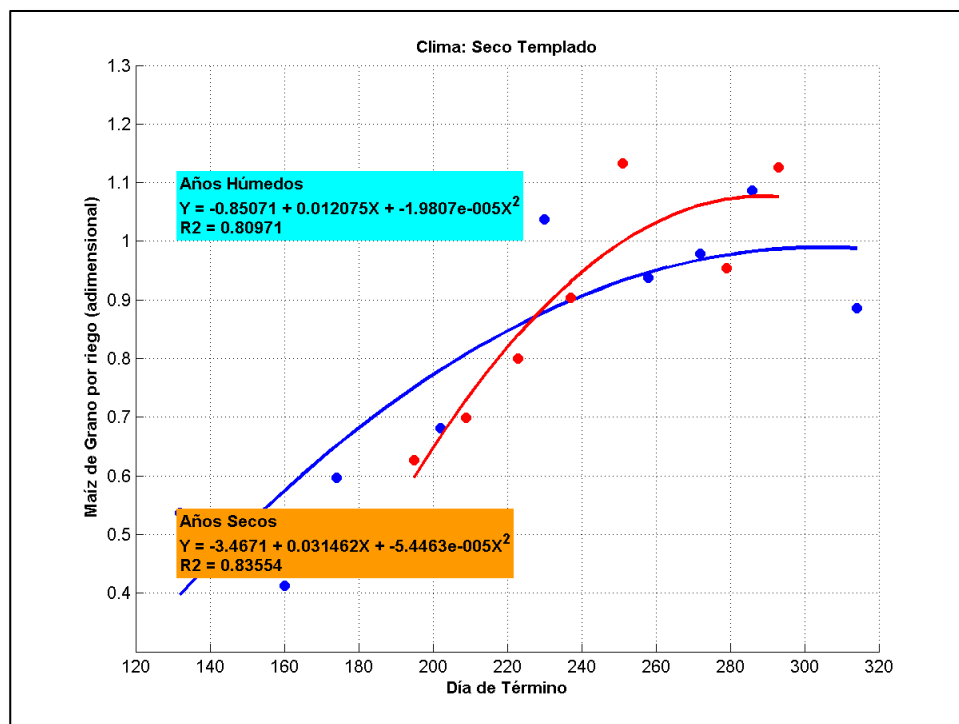
Gráfica 5.47 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de Inicio.



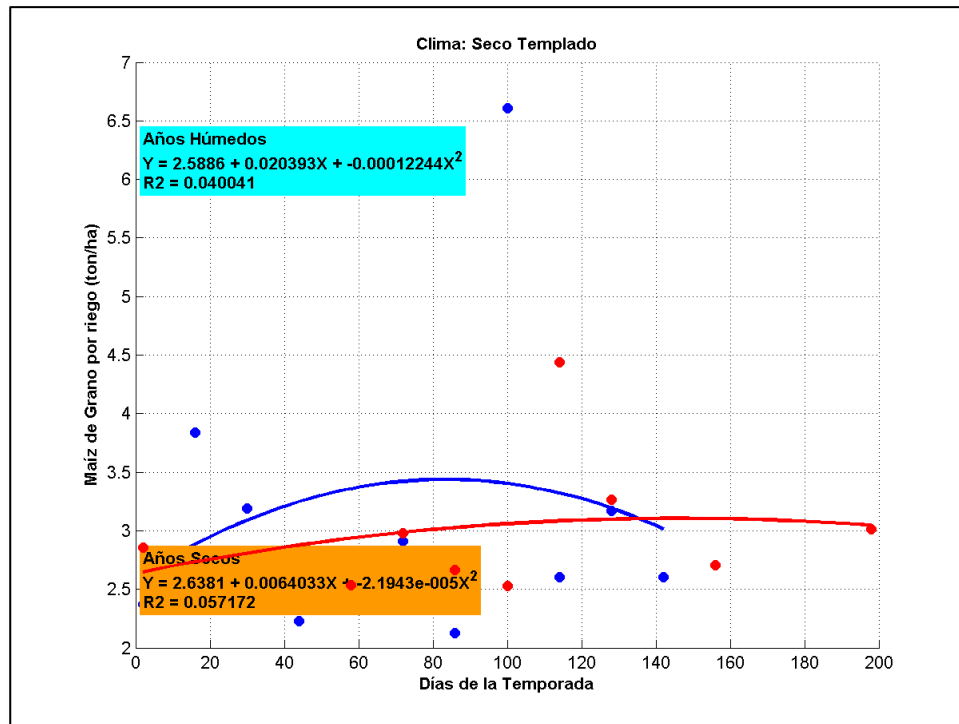
Gráfica 5.48 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de Inicio.



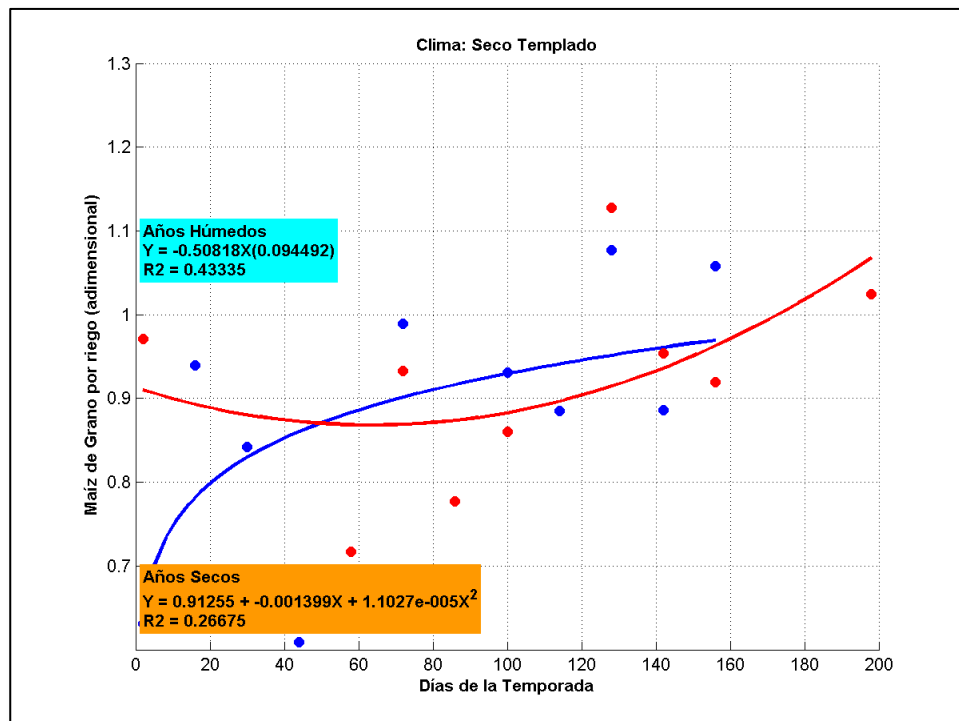
Gráfica 5.49 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de Término.



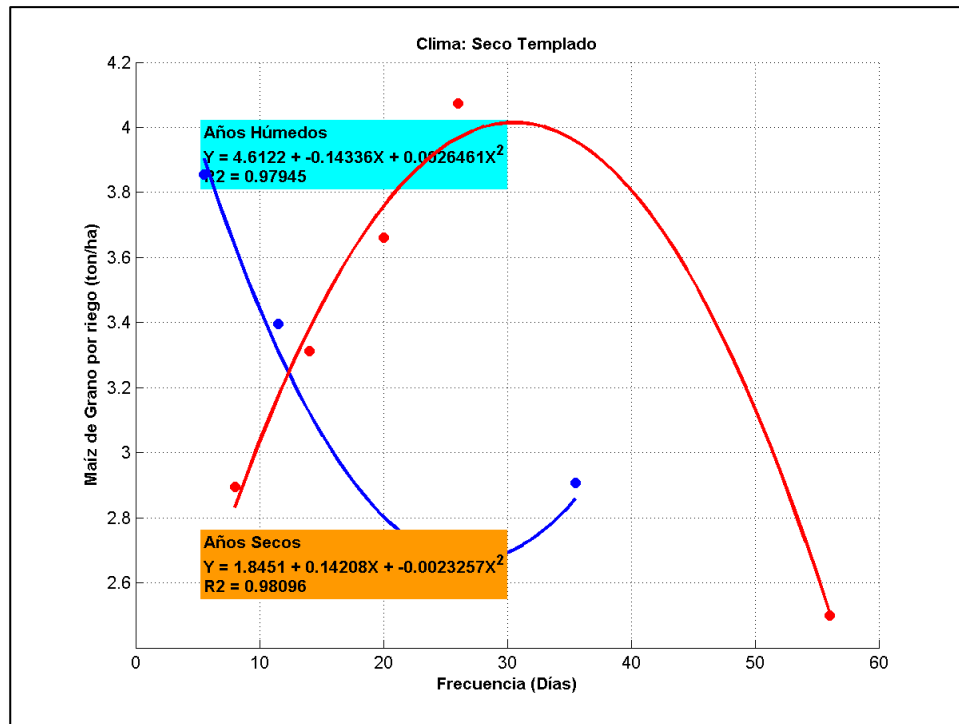
Gráfica 5.50 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de Término.



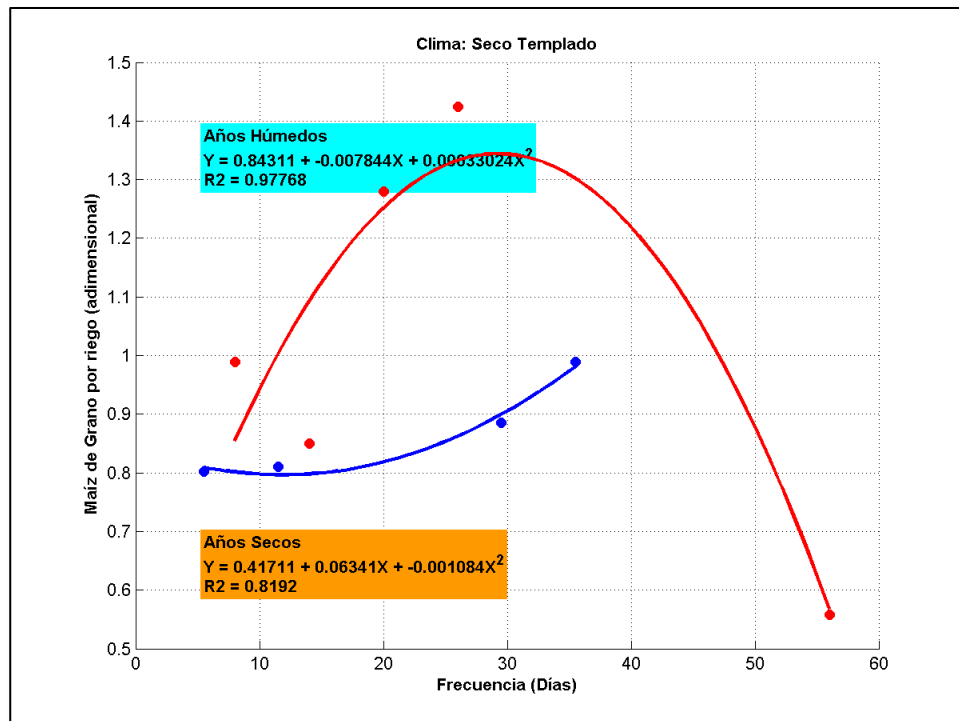
Gráfica 5.51 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Día de Temporada.



Gráfica 5.52 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Día de Temporada.



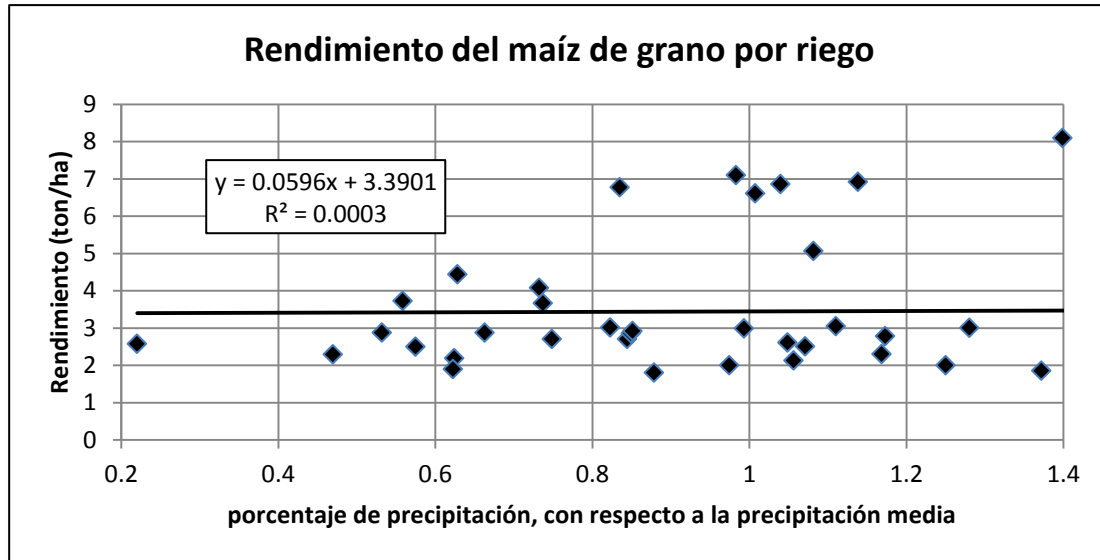
Gráfica 5.53 Rendimiento del maíz de grano por riego vs Frecuencia.



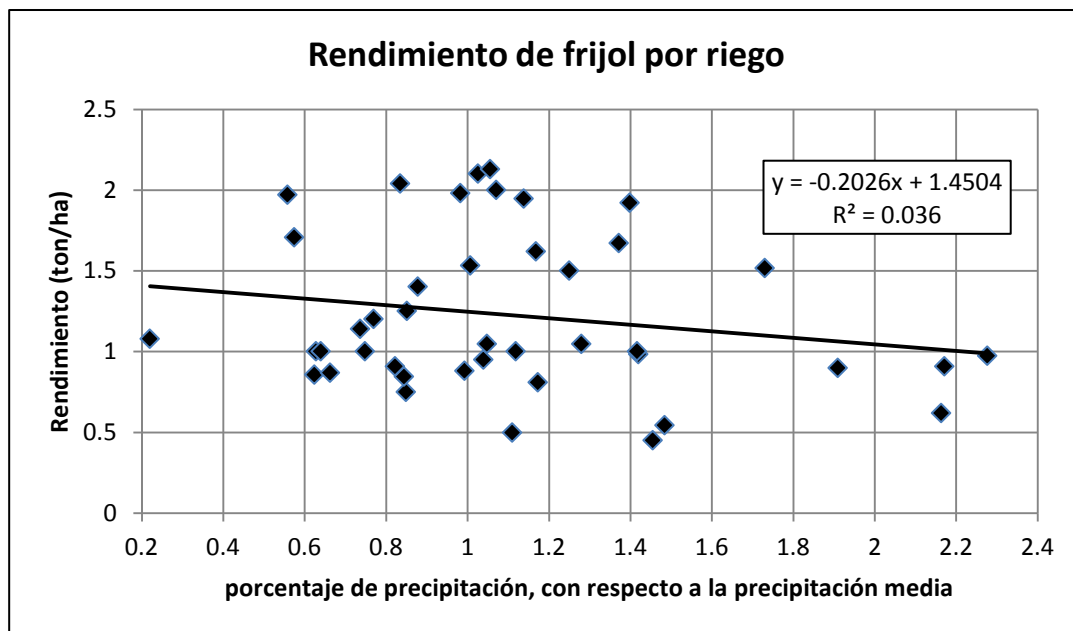
Gráfica 5.54 Rendimiento adimensional del maíz de grano por riego vs Frecuencia.

### 5.1.3 Análisis de sequía en el sector agrícola

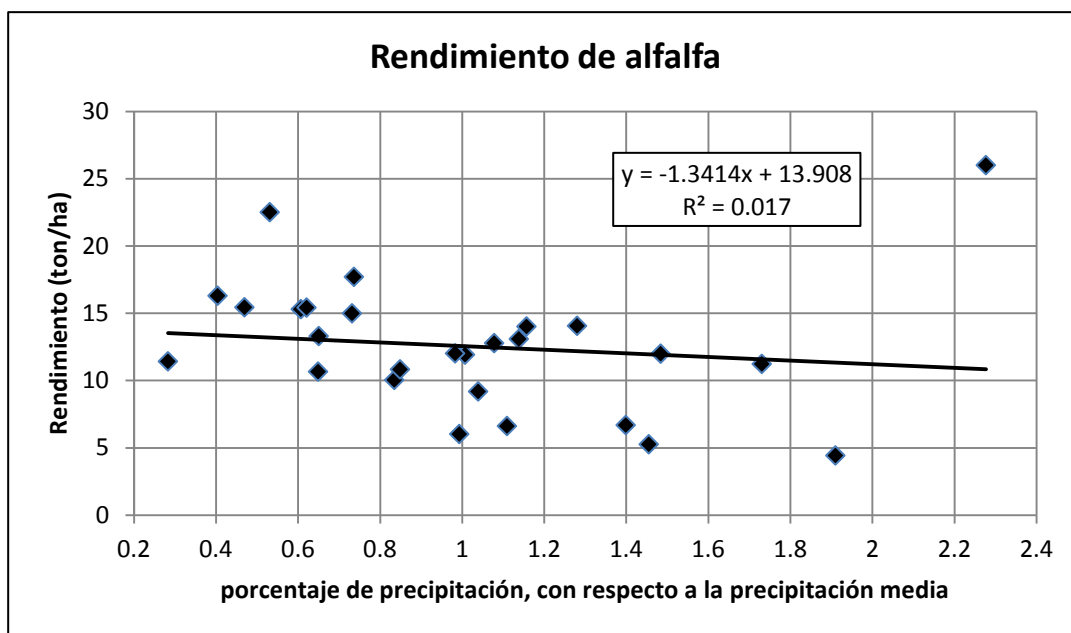
Es importante en el estudio del rendimiento en los cultivos, la relación que hay entre el rendimiento y la precipitación. Existen relaciones conocidas entre ambas variables, las cuales como referencia se pueden observar en Herrera (2006). Se presentan las siguientes gráficas en donde se muestra la relación entre la precipitación y el rendimiento, la precipitación esta en porcentaje con respecto a la precipitación media. Los porcentajes menores a uno los periodos de sequía y los mayores a los años húmedos.



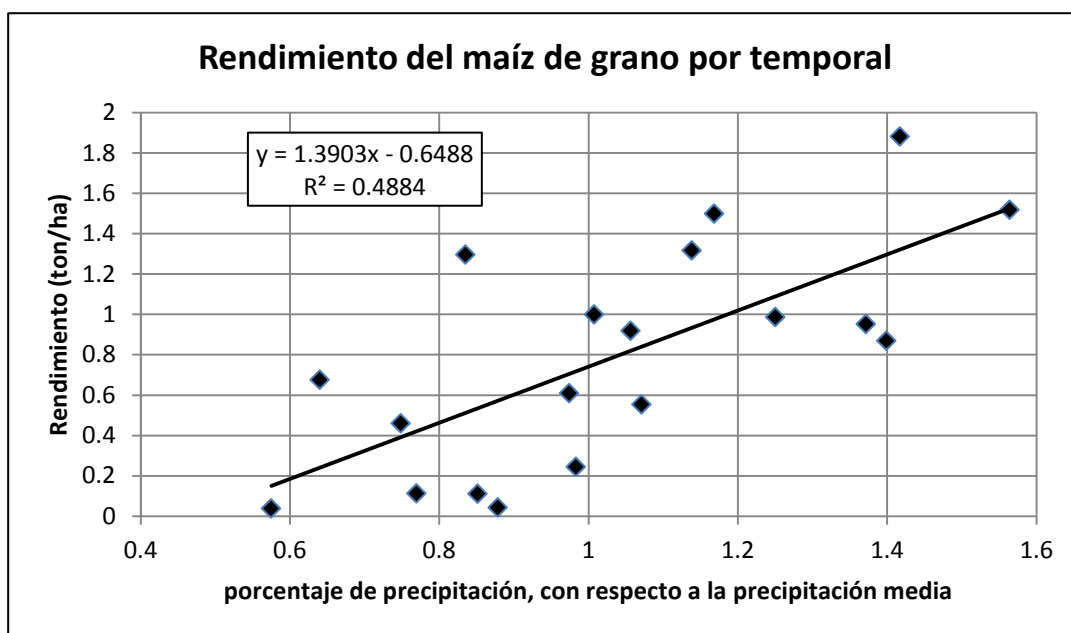
Gráfica 5.55 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el maíz de grano por riego.



Gráfica 5.56 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el frijol por riego.

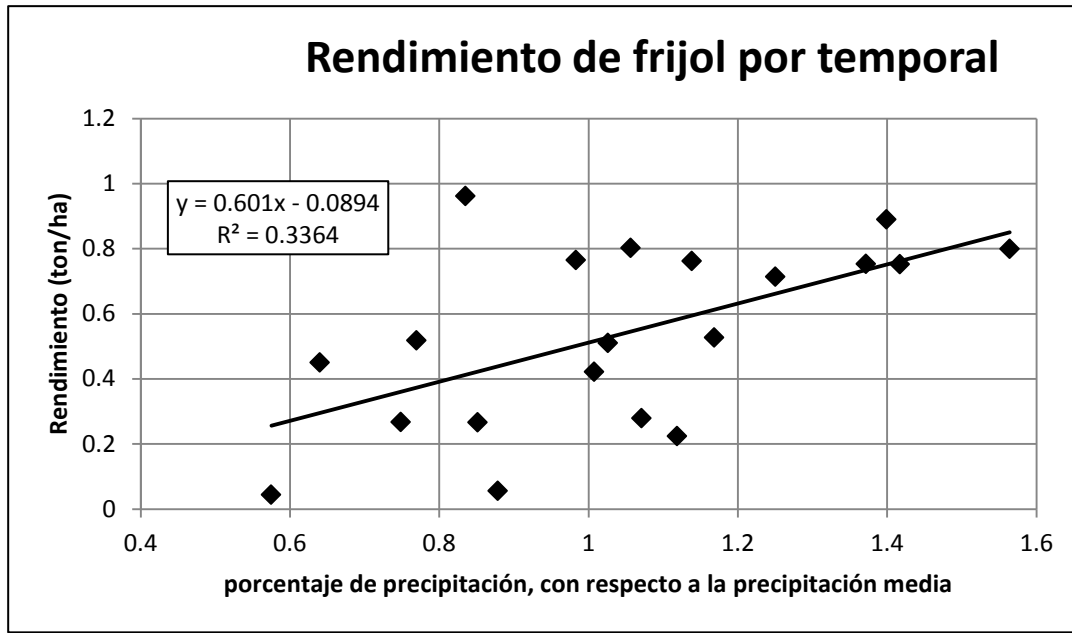


Gráfica 5.57 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para la alfalfa.



Gráfica 5.58 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el maíz de grano por temporal.





Gráfica 5.59 Relación entre el rendimiento y el porcentaje de precipitación, para el frijol por temporal.

Como se observa en la Gráfica 5.55, el rendimiento del maíz de grano por riego presenta una gran dispersión en los datos. Los rendimientos mayores a 6 ton/ha son en la mayoría del municipio de Ahome en Sinaloa. El frijol por riego (Gráfica 5.56) también presenta una gran dispersión en los datos con una línea descendente aunque con poca correlación. En la alfalfa (Gráfica 5.57) se observa una línea descendente conforme aumenta la precipitación, sin embargo también hay una gran dispersión en los datos y poca correlación.

En los cultivos por temporal se observa una mayor correlación y una línea de tendencia ascendente tanto en el maíz de grano (Gráfica 5.58) como en el frijol (Gráfica 5.59). Se observa una mayor relación entre el rendimiento y la precipitación.

Con estas gráficas se observa que los cultivos por riego no son susceptibles a los eventos de sequía.

Los parámetros estadísticos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.7 Parámetros estadísticos de los diferentes cultivos para el clima Seco Templado

	Maíz riego	Frijol riego	Alfalfa	Maíz Temporal	Frijol Temporal
<b>Media</b>	3.4549	1.2260	12.5459	0.7928	0.5377
<b>Desv. estándar</b>	1.6806	0.4839	4.8693	0.5496	0.2789
<b>C. Variación</b>	0.4864	0.3947	0.3881	0.6933	0.5186
<b>C. Asimetría</b>	1.4313	0.5142	0.7204	0.2219	-0.3241
<b>C. Curtosis</b>	3.8849	2.1001	4.3993	2.1867	1.9279

### 5.1.4 Comentarios sobre las relaciones en el sector agrícola

En los cultivos se hizo una separación entre los años húmedos y los años que se presenta sequía. Esta separación se hizo a través de la técnica del porcentaje de la normal. También se considero si el cultivo es de temporal o de riego.

A continuación se muestran la Tabla 5.8 y Tabla 5.9 en donde se da un breve resumen de las relaciones entre el rendimiento y los diferentes parámetros de la Ola de Calor del primer criterio. Los cuadros en color gris oscuro indican que el rendimiento disminuye conforme aumenta el parámetro, en color gris claro se indica que el rendimiento aumenta conforme aumenta el parámetro.

**Tabla 5.8 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio.**

		Maíz Riego		Frijol Riego		Alfalfa		Vid		Maíz Temporal		Frijol Temporal	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
No. Eventos													
Duración													
Intensidad	Máxima												
	Mínima												
Temp.	Alivio												
Severidad													
Temp.	Máxima												
	Mínima												
Día (s)	Inicio												
	Término												
	Tempor.												
Intensidad Adim.	Máxima												
	Mínima												
Severidad adim.													
Temp. Adim.	Máxima												
	Mínima												
Clasificación	Máxima												
	Mínima												

De esta tabla se observa que el maíz de riego es el cultivo que más se ve afectado por el evento de Ola de Calor, aunque los parámetros se refieren al promedio. En cuanto a los parámetros, la Temperatura Promedio Adimensional de la serie de Temperaturas Mínimas es la que presenta los menores rendimientos en casi todos los cultivos. Le sigue la Intensidad promedio Adimensional de la serie de Temperaturas Mínimas y en tercer lugar la Duración y la Temperatura Máxima promedio de la serie de Temperaturas Máximas.

**Tabla 5.9 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio.**

		Maíz Riego		Frijol Riego		Alfalfa		Vid		Maíz Temporal		Frijol Temporal	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
No. Eventos													
Duración													
Intensidad	Máxima												
	Mínima												
Temp.	Alivio												
Severidad													
Temp.	Máxima												
	Mínima												
Día (s)	Inicio												
	Término												
	Tempor.												
Intensidad Adim.	Máxima												
	Mínima												
Severidad adim.													
Temp. Adim.	Máxima												
	Mínima												
Clasificación	Máxima												
	Mínima												

En los años secos, son la Temperatura Máxima Promedio de la serie de Temperaturas Máximas y el Día de Inicio los parámetros que inciden más en el rendimiento. Le siguen la Intensidad Promedio de la serie de Temperaturas Máximas y la clasificación de acuerdo al percentil de la Temperatura Mínima. En tercer lugar está el Número de Eventos, la Intensidad Promedio de la serie de Temperatura Mínima y el Día de Término. El maíz de grano por riego es el cultivo que presenta los menores rendimientos en la mayoría de los eventos de Ola de Calor.

**Tabla 5.10 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio.**

		Maíz Riego		Frijol Riego		Alfalfa		Vid		Maíz Temporal		Frijol Temporal	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
No. Eventos		0.706	0.725	0.825	0.701	0.871	0.926	0.991	0.989	0.845	0.719	0.888	0.787
Duración		<b>0.365</b>	<b>0.330</b>	<b>0.336</b>	<b>0.365</b>	0.407	<b>0.358</b>	0.606	0.404	0.529	0.444	0.498	<b>0.376</b>
Intensidad	Máxima	0.636	0.576	0.840	0.547	0.834	0.713	0.949	0.965	0.445	0.544	0.782	0.700
	Mínima	0.824	0.715	0.803	0.589	0.768	0.685			0.742	0.632	0.714	0.534
Temp.	Alivio	0.726	0.747	0.809	0.755	0.657	0.746	0.961	0.987	0.808	0.749	0.803	0.817
Severidad		0.820	0.679	0.572	0.872	0.527	0.596		0.999	0.785	0.662	0.808	0.794
Temperatura	Máxima	0.625	0.518	0.862	0.670	0.706	0.615	0.996	0.979	0.658	0.446	0.766	0.559
	Mínima	0.731	0.555	0.782	0.574	0.818	0.575			0.797	0.519	0.806	0.594
Día (s)	Inicio	0.721	0.699	0.679	0.558	0.738	0.743	0.704	0.435	0.636	0.607	0.740	0.601
	Término	0.577	0.653	0.630	0.533	0.762	0.769	0.791	0.897	0.743	0.580	0.612	0.624
	Temporada	0.550	0.587	0.753	0.847	0.733	0.753	0.859	0.942	0.794	0.689	0.731	0.660
Intensidad Adim.	Máxima	0.791	0.893	0.893	0.576	0.918	0.803			0.920	0.911	0.915	0.678
	Mínima	0.749	0.676	0.795	0.706	0.719	0.688	0.964	0.995	0.704	0.467	0.662	0.482
Severidad adim.		<b>0.305</b>	<b>0.379</b>	0.542	0.489	0.405	0.415	0.914	0.716	0.536	0.536	0.525	<b>0.372</b>
Temp. Adim.	Máxima	0.848	0.904	0.919	0.750	0.921	0.682			0.859	0.809	0.938	0.844
	Mínima	0.643	0.523	0.813	0.535	0.687	0.712	0.849	0.789	0.611	0.525	0.724	0.590
Clasificación	Máxima	0.964	0.886	0.958	0.984	0.995	0.961	0.631	0.881	0.961	0.985	0.975	0.915
	Mínima	0.965	0.826	0.992	0.931					0.980	0.861		

En la Tabla 5.10 y la Tabla 5.11 se muestran los promedios de los Coeficientes de Determinación. En rojo están los coeficientes menores a 0.4. Se tienen coeficientes muy altos en casi todos los parámetros. Los promedios se determinaron a través del promedio aritmético.

**Tabla 5.11 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio.**

		Maíz Riego		Frijol Riego		Alfalfa		Vid		Maíz Temporal		Frijol Temporal	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
No. Eventos		0.767	0.733	0.706	0.863	0.750	0.796	0.937	0.960	0.883	0.839	0.830	0.673
Duración		<b>0.308</b>	<b>0.311</b>	<b>0.354</b>	<b>0.343</b>	<b>0.308</b>	<b>0.324</b>	<b>0.379</b>	0.417	<b>0.363</b>	<b>0.281</b>	0.539	<b>0.387</b>
Intensidad	Máxima	0.605	0.693	0.708	0.699	0.852	0.745	0.753	0.437	0.702	0.626	0.725	0.641
	Mínima	0.702	0.603	0.844	0.789	0.949	0.741			0.555	<b>0.397</b>	0.822	0.696
Temp.	Alivio	0.691	0.676	0.719	0.684	0.689	0.558	0.663	0.795	0.621	0.719	0.821	0.620
Severidad		0.751	0.734	0.731	0.862	0.773	0.618	0.993	0.993	0.843	0.768	0.866	0.883
Temperatura	Máxima	0.636	0.482	0.792	0.561	0.759	0.655	0.455	<b>0.207</b>	0.653	0.596	0.705	0.449
	Mínima	0.639	0.605	0.850	0.762	0.863	0.739			0.666	0.573	0.775	0.619
Día (s)	Inicio	0.704	0.589	0.802	0.497	0.813	0.868	0.709	0.761	0.570	0.500	0.553	0.585
	Término	0.567	0.455	0.665	0.658	0.598	0.593	0.456	0.547	0.401	<b>0.373</b>	0.654	0.437
	Temporada	<b>0.395</b>	<b>0.365</b>	0.681	0.689	0.678	0.618	0.679	0.676	0.599	0.600	0.730	0.522
Intensidad Adim.	Máxima	0.777	0.904	0.880	0.741	0.886	0.711			0.904	0.590	0.699	0.887
	Mínima	0.761	0.515	0.836	0.640	0.601	0.807	0.971	0.936	0.737	<b>0.373</b>	0.729	0.520
Severidad adim.		0.447	0.410	0.422	0.546	0.519	0.448	0.700	0.711	0.488	<b>0.370</b>	0.625	0.523
Temp. Adim.	Máxima	0.895	0.844	0.936	0.760	0.878	0.744			0.893	0.736	0.832	0.911
	Mínima	0.660	<b>0.397</b>	0.694	0.638	0.715	0.687	0.762	0.830	0.729	0.520	0.682	0.417
Clasificación	Máxima	0.955	0.945	0.941	0.831	0.961	0.981	0.948	0.944	0.924	0.967	0.947	0.972
	Mínima	0.986	0.908	0.989	<b>0.121</b>	0.995	0.988			0.903	0.917	0.998	0.993

A continuación se muestran los resultados para el segundo criterio.

**Tabla 5.12 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio.**

	No.			Sensación	Ola de	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
Maíz Riego										
Maíz Riego Adim										
Frijol Riego										
Frijol Riego Adim										
Alfalfa										
Alfalfa Adim										
Vid										
Vid Adim										
Maíz Temporal										
Maíz Temporal Adim										
Frijol Temporal										
Frijol Temporal Adim										

**Tabla 5.13 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio**

	No.			Sensación	Ola de	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
Maíz Riego										
Maíz Riego Adim										
Frijol Riego										
Frijol Riego Adim										
Alfalfa										
Alfalfa Adim										
Vid										
Vid Adim										
Maíz Temporal										
Maíz Temporal Adim										
Frijol Temporal										
Frijol Temporal Adim										

En la Tabla 5.12 se observa que el Frijol por temporal es el más afectado. Los parámetros que más afectan el rendimiento son: Día de Inicio, Día de Término y Días de Temporada.

En los años secos, como se observa en la Tabla 5.13, se tiene que el maíz de riego es el cultivo que más se ve afectado por la Ola de Calor bajo el segundo criterio. Los parámetros que más afectan los rendimientos son: Los Días de Temporada, la Temperatura Máxima y la Duración.

**Tabla 5.14 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio.**

	No.			Sensación	Ola de	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
Maíz Riego	0.714	0.787	0.931	0.877		0.796	0.676	0.650	0.489	0.825
Maíz Riego Adim	0.780	0.764	0.938	0.886	0.999	0.815	0.523	0.686	0.543	0.852
Frijol Riego	0.857	0.819	0.955	0.980		0.905	0.736	0.697	0.639	0.887
Frijol Riego Adim	0.846	0.855	0.847	0.945		0.905	0.666	0.702	0.667	0.664
Alfalfa	0.929	0.677	0.885	0.903		0.887	0.652	0.821	0.428	0.764
Alfalfa Adim	0.755	0.869	0.956	0.765		0.828	0.577	0.698	0.523	0.924
Vid	0.584						0.778	0.930	0.588	
Vid Adim	0.785	0.969					0.902	0.771	0.738	0.980
Maíz Temporal	0.702	0.730	0.936	0.868	0.937	0.872	0.682	0.554	0.591	0.867
Maíz Temporal Adim	0.763	0.621	0.937	0.704	0.990	0.824	0.470	0.591	0.649	0.863
Frijol Temporal	0.837	0.822	0.958	0.856	0.994	0.923	0.742	0.596	0.616	0.771
Frijol Temporal Adim	0.594	0.761	0.984	0.787	1.000	0.786	0.597	0.503	0.490	0.678

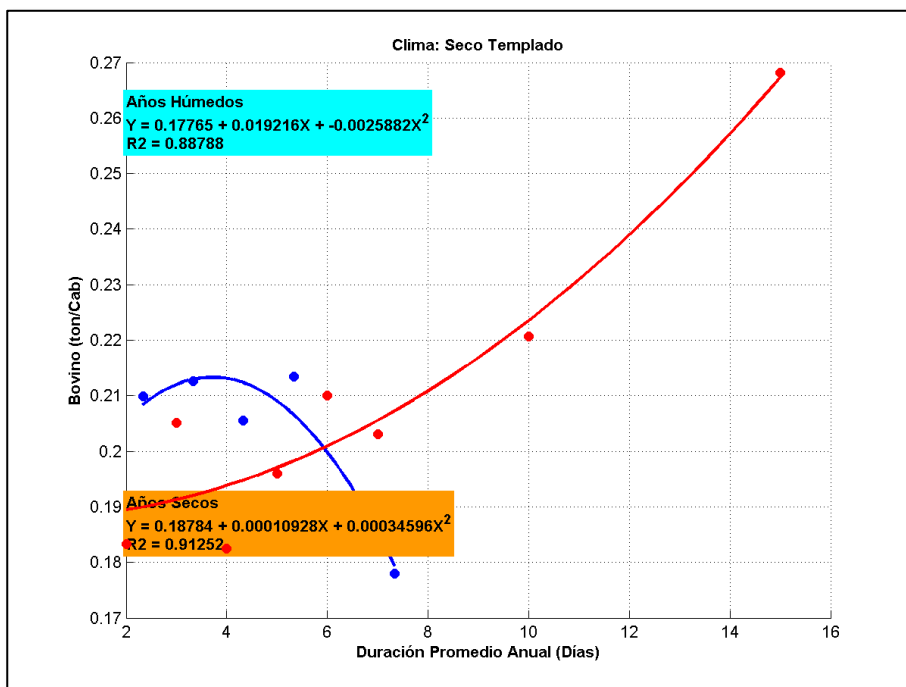
**Tabla 5.15 de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio.**

	No.			Sensación	Ola de	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
Maíz Riego	0.618	0.800	0.843	0.861	0.924	0.661	<b>0.364</b>	0.506	<b>0.268</b>	0.766
Maíz Riego Adim	0.654	0.577	0.856	0.901	0.913	0.953	0.528	<b>0.378</b>	<b>0.329</b>	0.863
Frijol Riego	0.738	0.787	0.831	0.790		0.804	0.584	0.583	0.509	0.812
Frijol Riego Adim	0.822	0.751	0.896	0.911		0.878	0.531	0.486	0.408	0.790
Alfalfa	0.821	0.666	0.757	0.838		0.688	0.668	0.612	0.669	0.882
Alfalfa Adim	0.736	0.840	0.464	0.978		0.870	0.706	0.647	0.535	0.563
Vid	0.911	0.731	0.823				0.866	0.796	0.639	
Vid Adim	0.929	0.844	0.811				0.822	0.735	0.748	
Maíz Temporal	0.775	0.717	0.762	0.766	0.961	0.765	0.558	0.430	0.457	0.784
Maíz Temporal Adim	0.799	0.783	0.597	0.896	0.956	0.780	0.596	<b>0.343</b>	<b>0.378</b>	0.765
Frijol Temporal	0.780	0.772	0.842	0.958		0.978	0.615	0.624	0.507	0.762
Frijol Temporal Adim	0.601	0.745	0.903	0.773		0.685	0.589	0.525	0.428	0.738

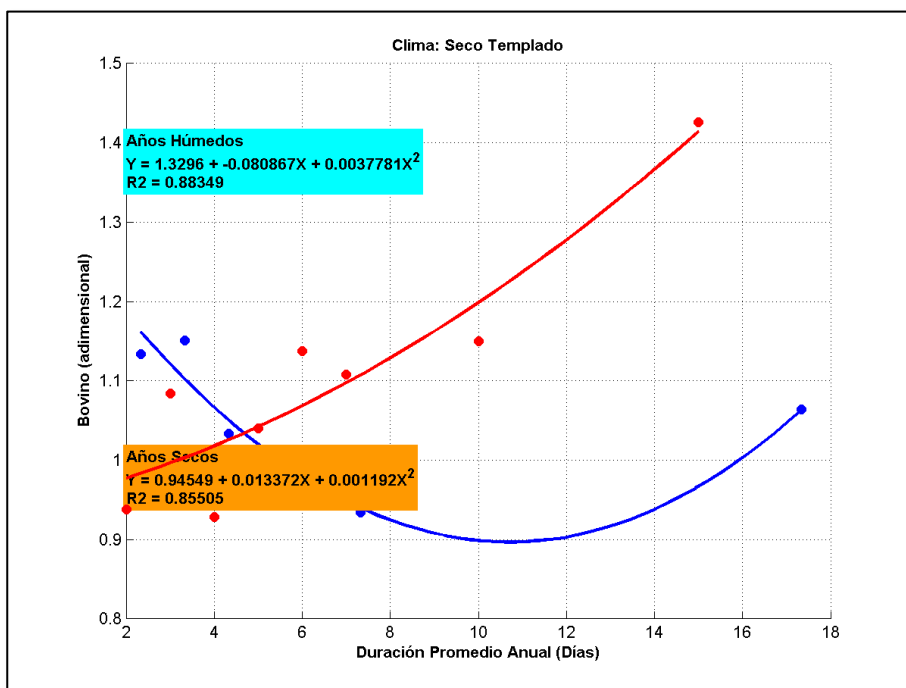
En la Tabla 5.14 y Tabla 5.15 se muestran el promedio de los coeficientes de rendimiento. Al igual que en el primer criterio se tienen coeficientes muy altos.

## 5.2 Relación de rendimientos en el sector ganadero

### 5.2.1 Relación de rendimientos con el primer criterio

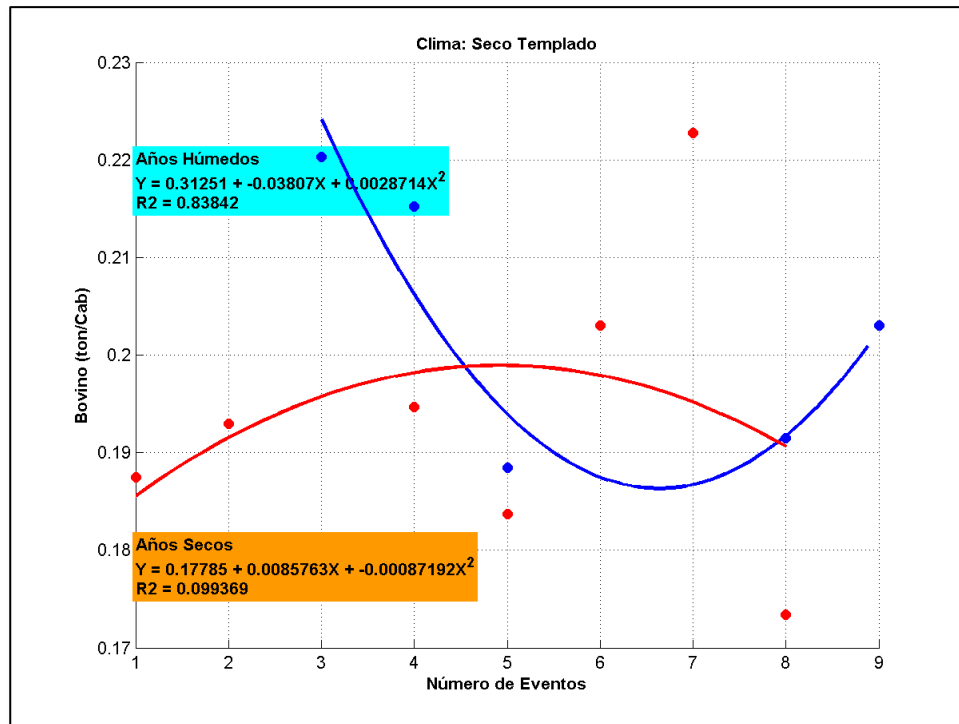


Gráfica 5.60 Rendimiento del ganado bovino vs Duración promedio anual.

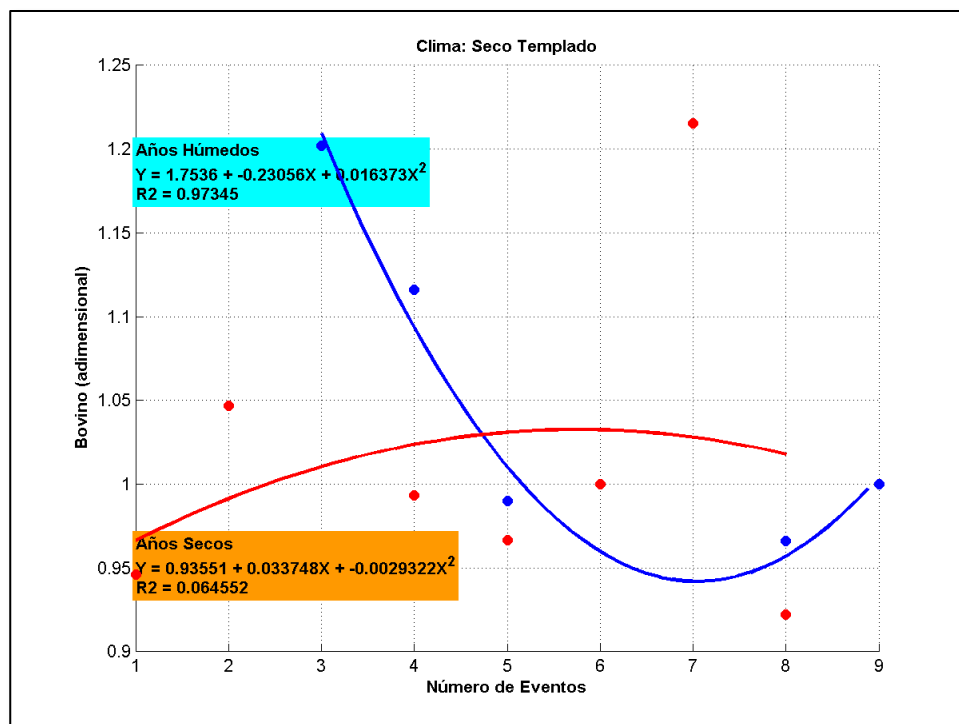


Gráfica 5.61 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Duración promedio anual.

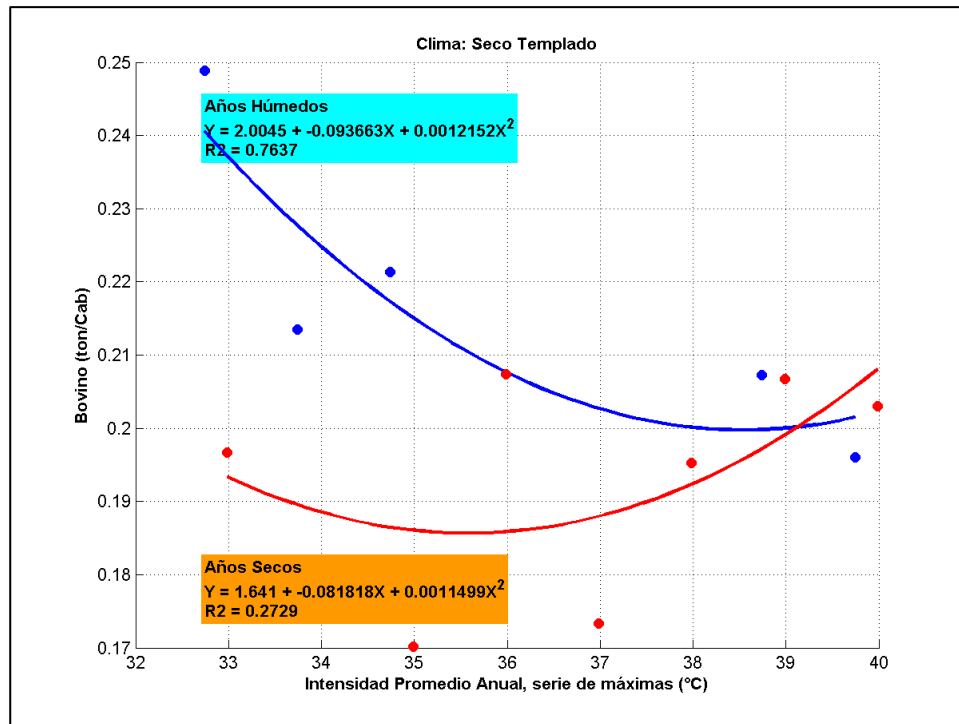




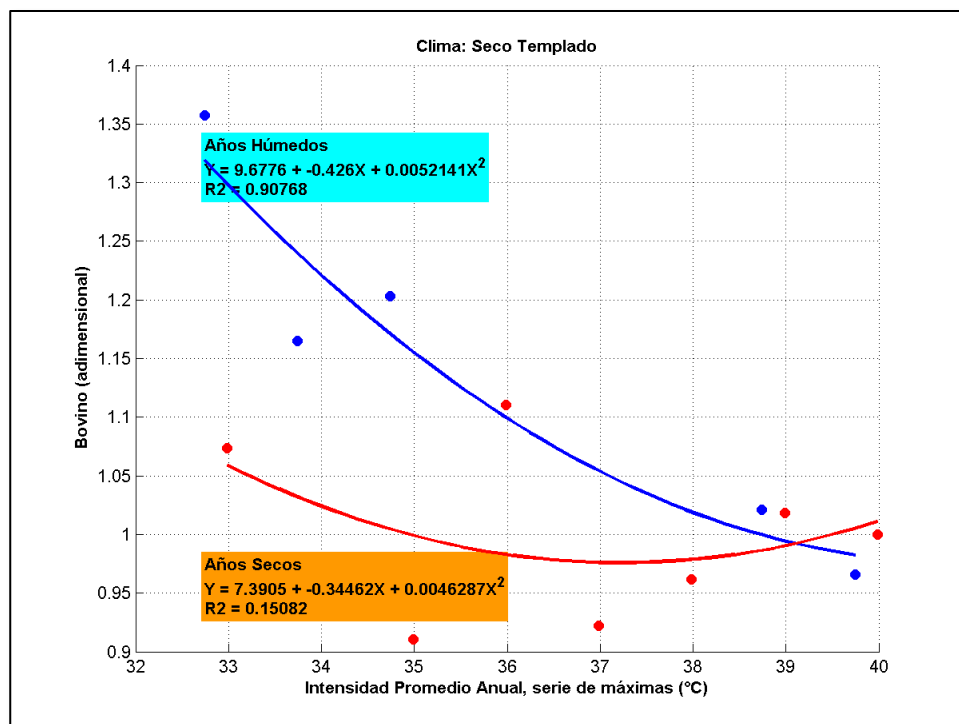
Gráfica 5.62 Rendimiento del ganado bovino vs Número de eventos por año.



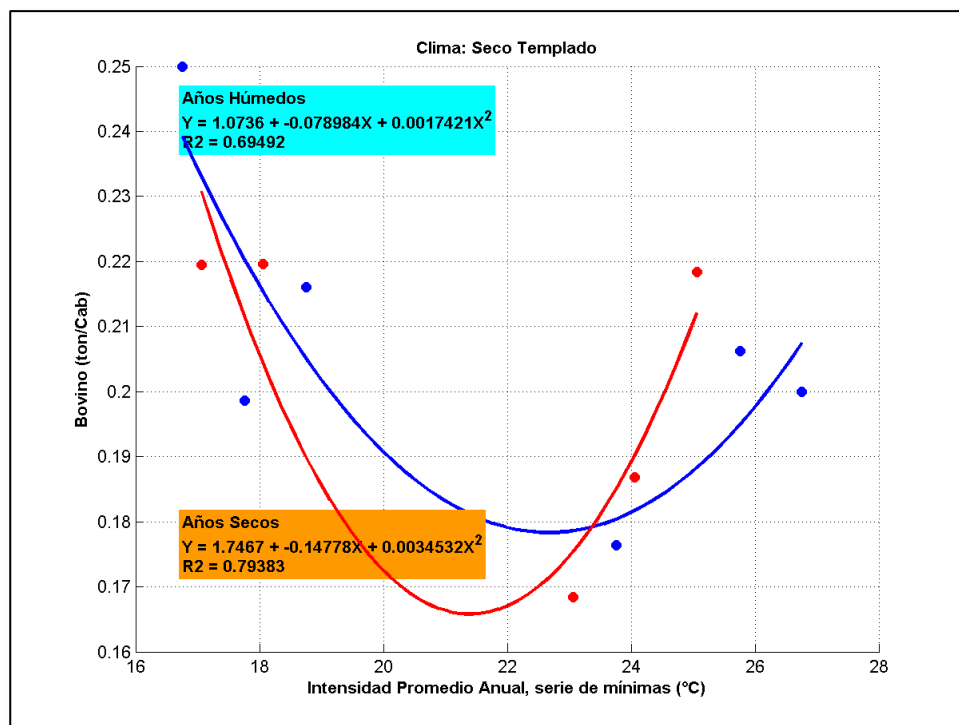
Gráfica 5.63 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Número de eventos por año.



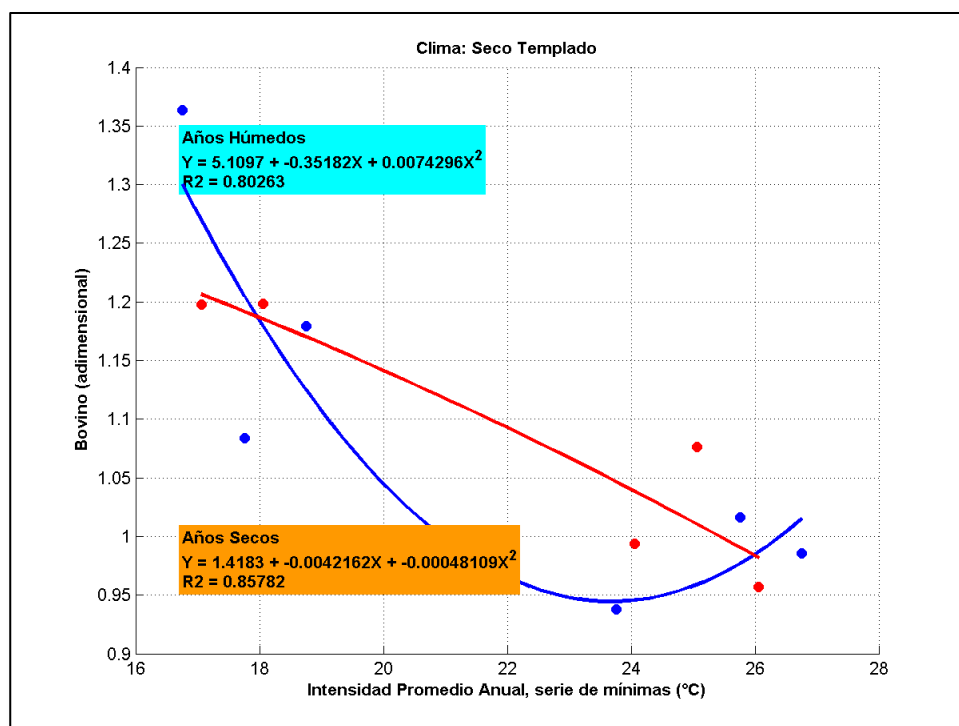
Gráfica 5.64 Rendimiento del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas.



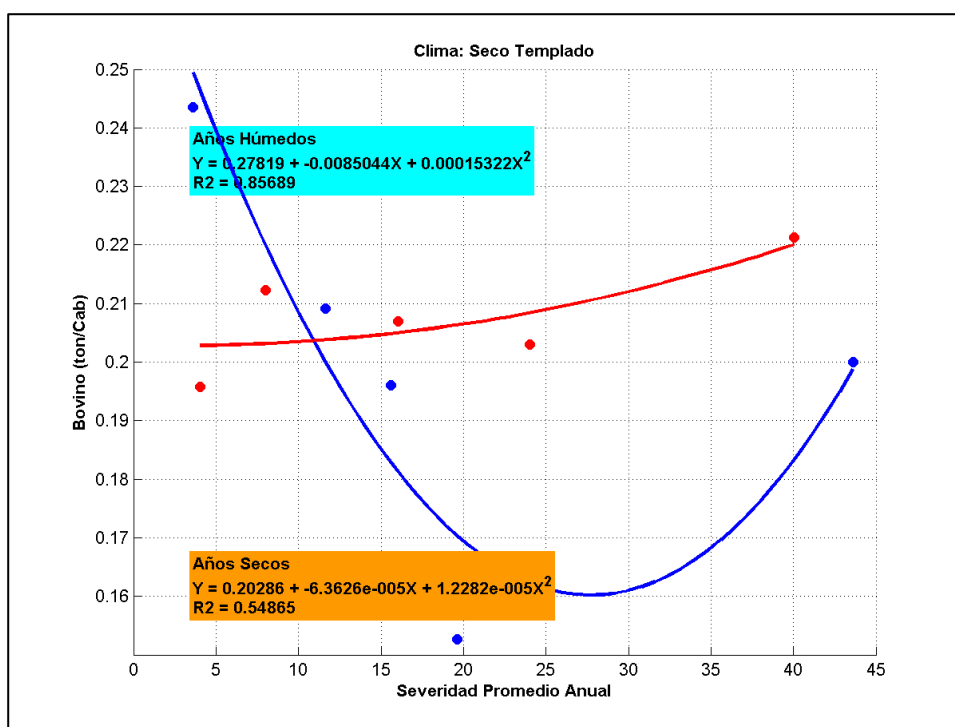
Gráfica 5.65 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas máximas



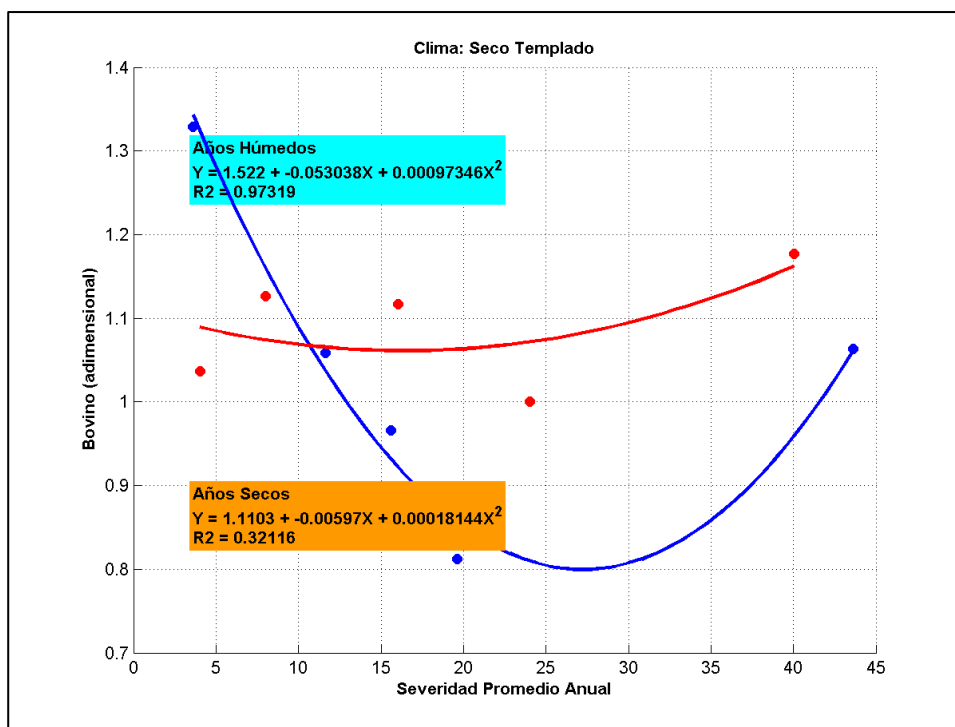
Gráfica 5.66 Rendimiento del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas



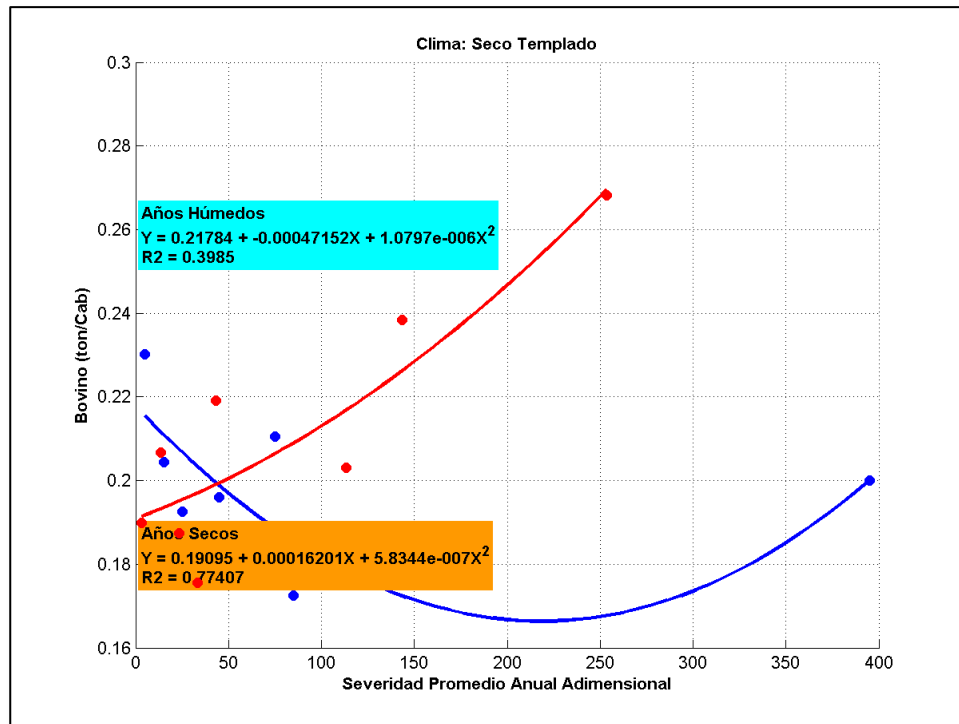
Gráfica 5.67 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Intensidad promedio anual, serie de temperaturas mínimas



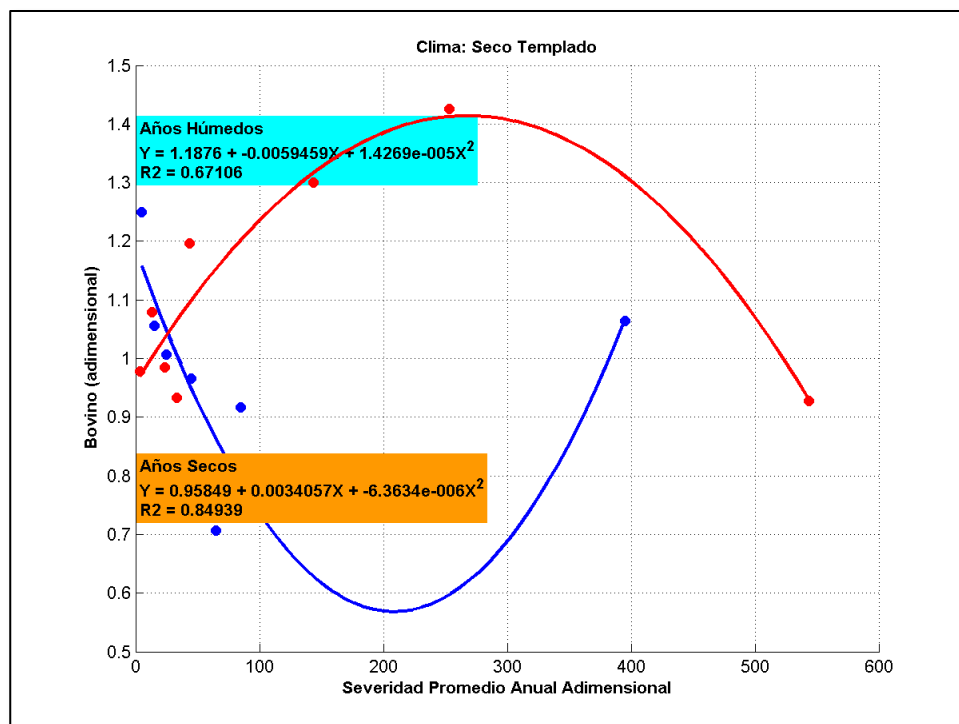
Gráfica 5.68 Rendimiento del ganado bovino vs Severidad promedio anual.



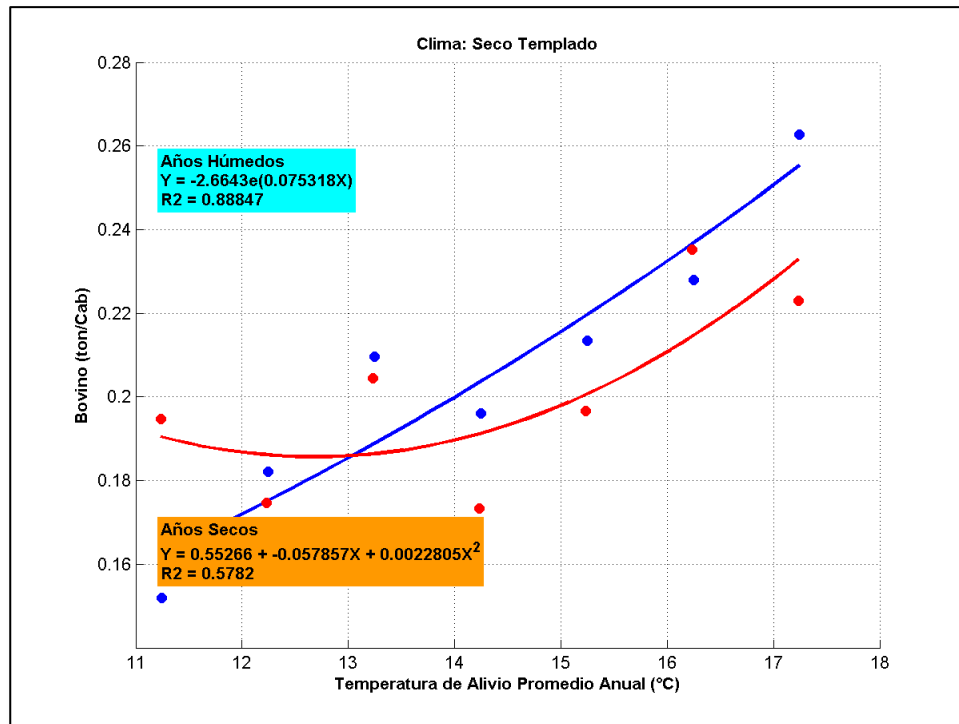
Gráfica 5.69 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Severidad promedio anual.



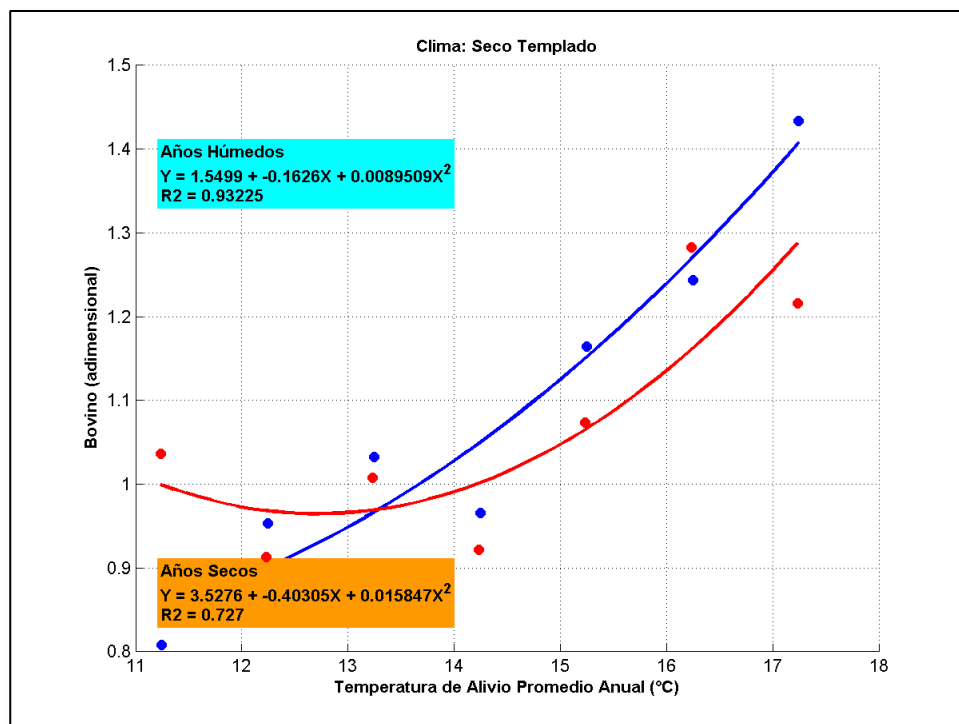
Gráfica 5.70 Rendimiento del ganado bovino vs Severidad adimensional promedio anual.



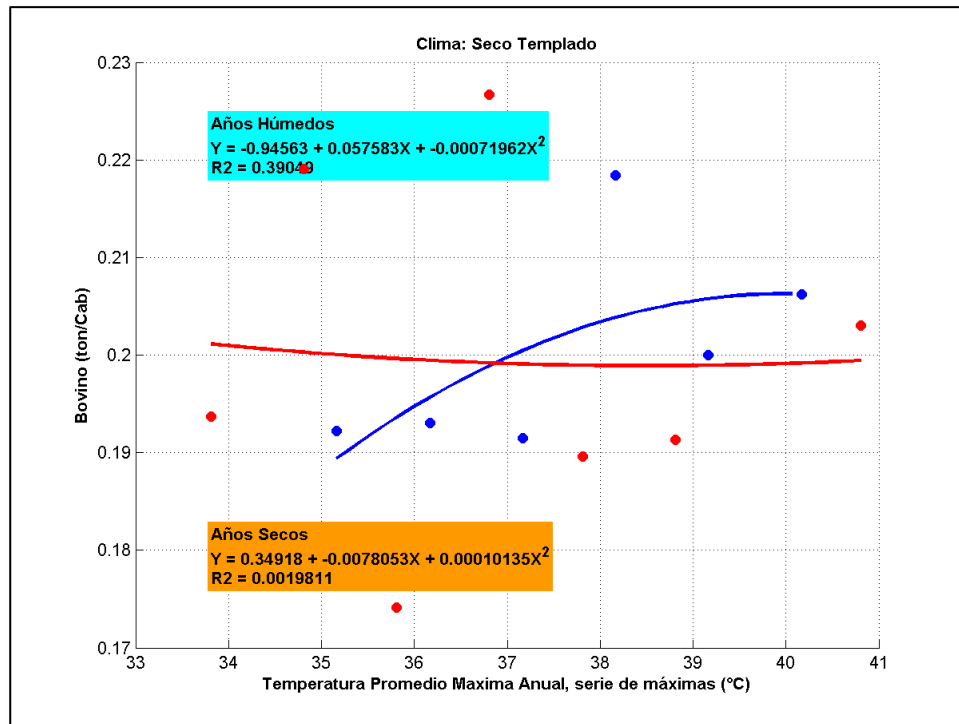
Gráfica 5.71 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Severidad adimensional promedio anual.



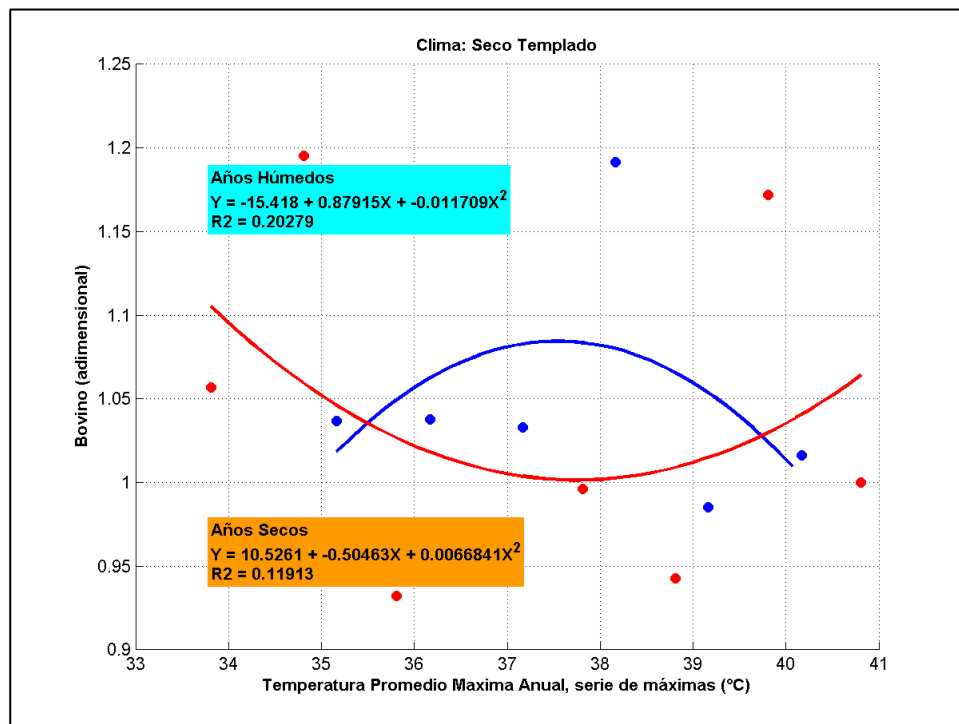
Gráfica 5.72 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura de alivio promedio anual



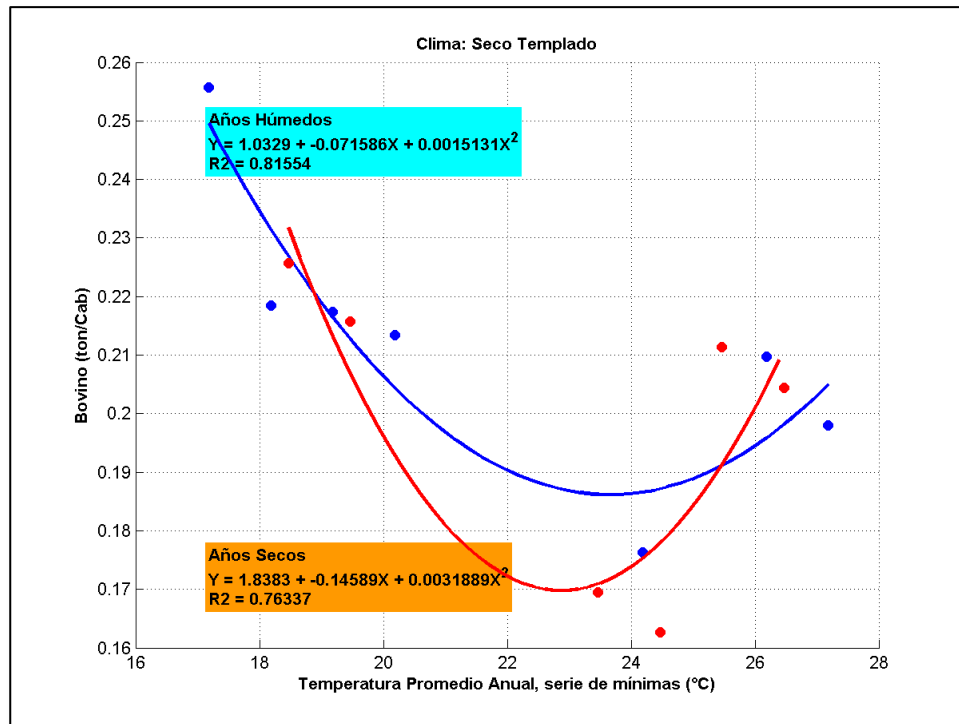
Gráfica 5.73 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura de alivio promedio anual



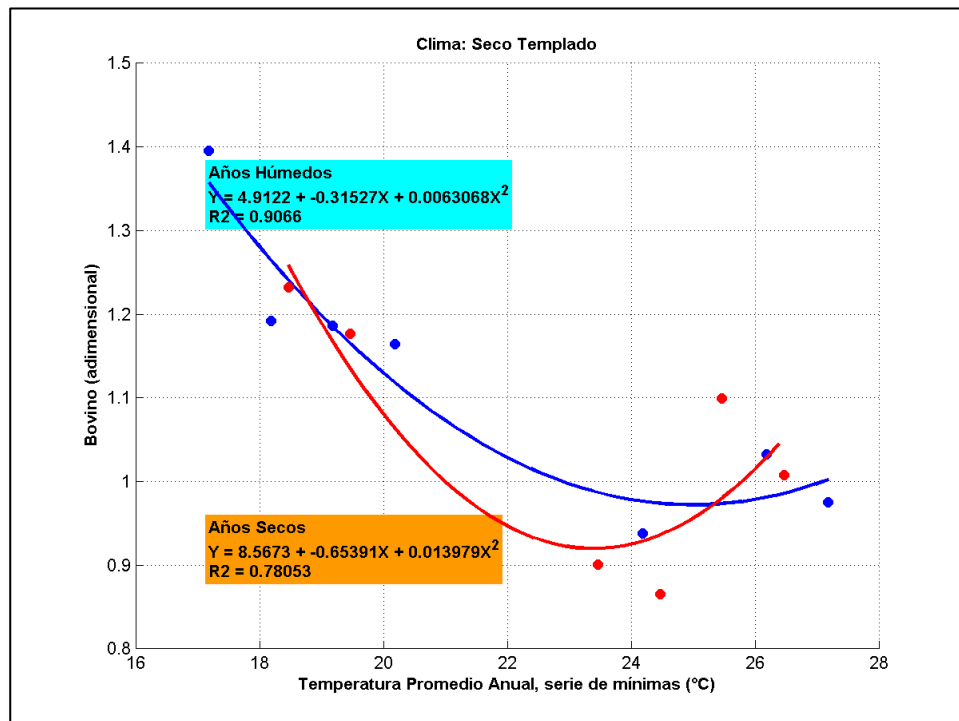
Gráfica 5.74 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas.



Gráfica 5.75 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas máximas

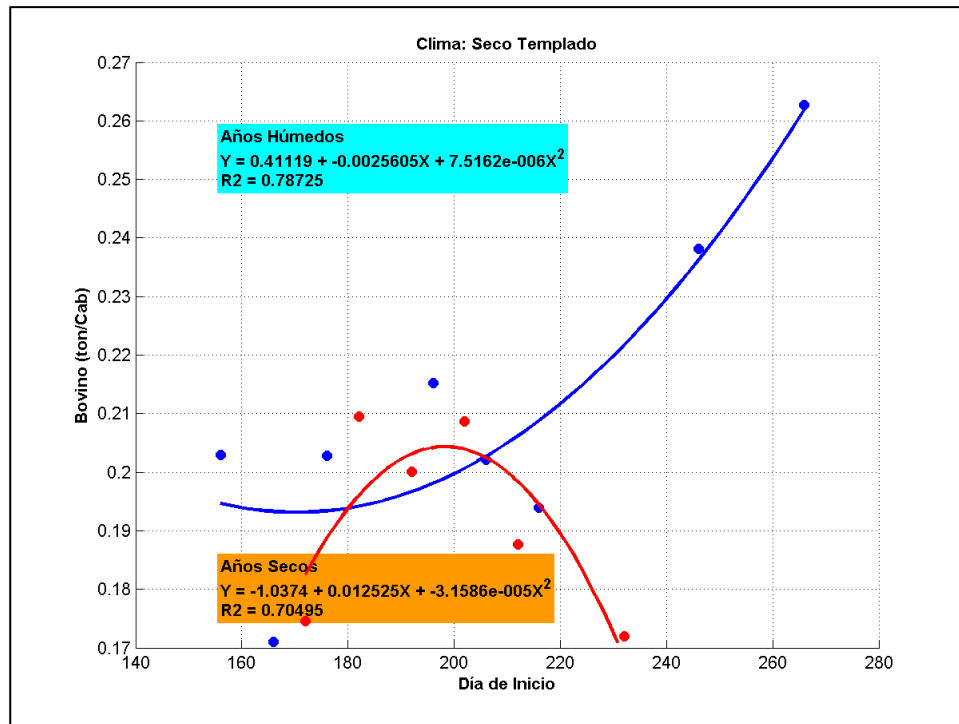


Gráfica 5.76 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas mínimas

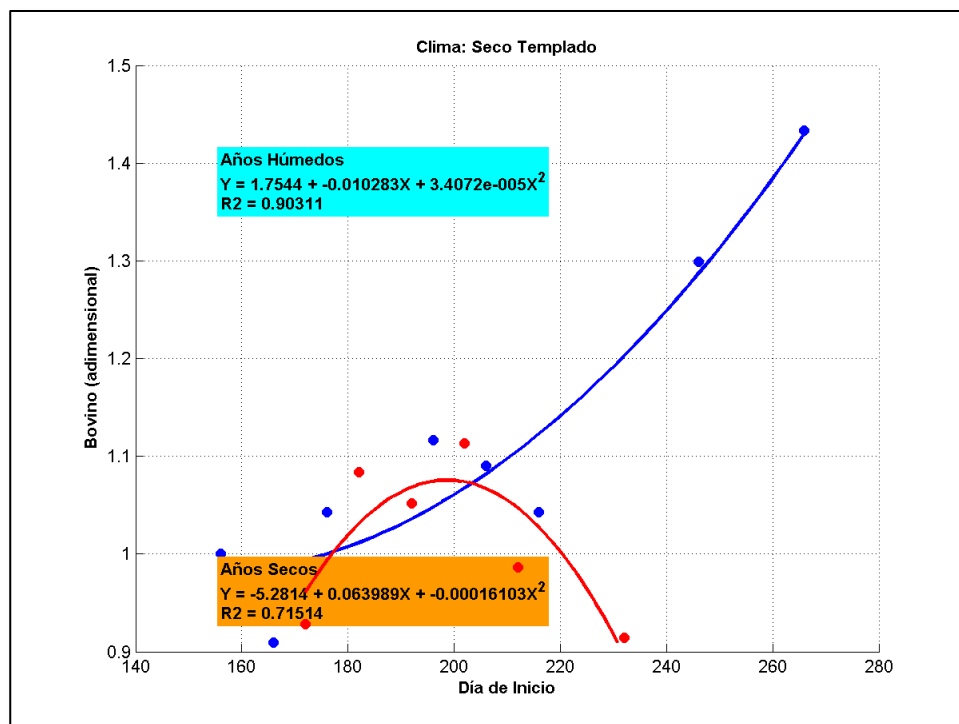


Gráfica 5.77 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura promedio máxima anual, serie de temperaturas mínimas

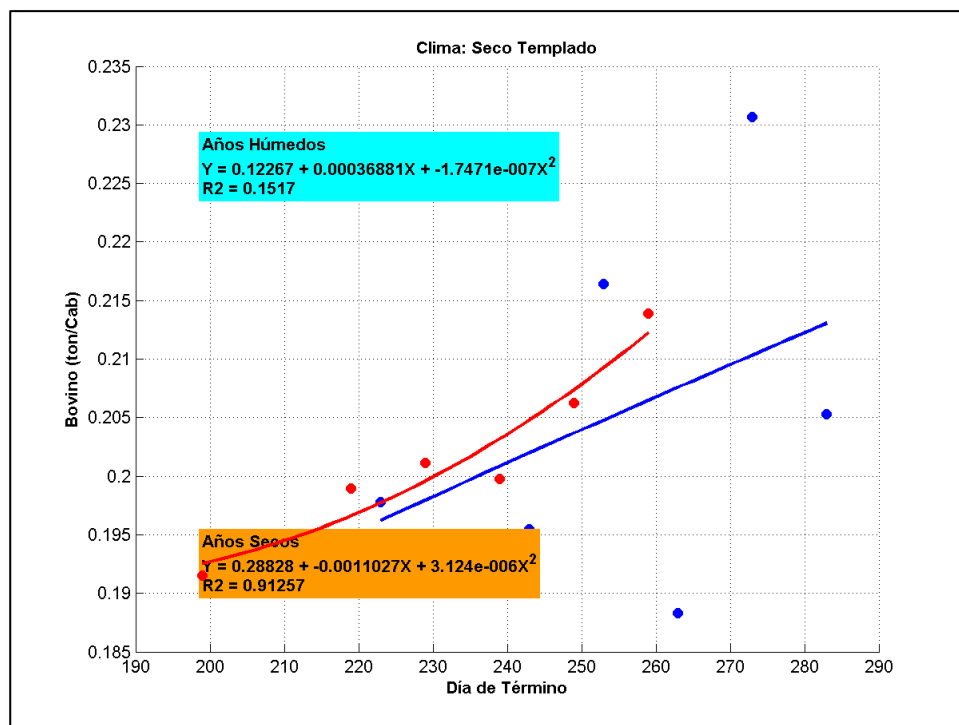




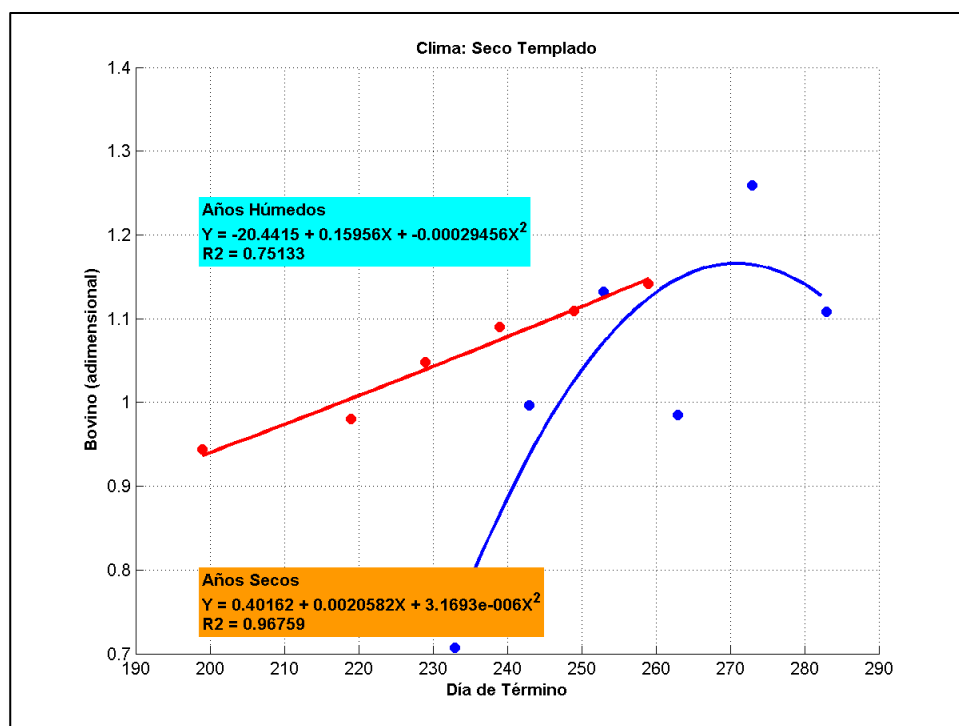
Gráfica 5.78 Rendimiento del ganado bovino vs Día de inicio.



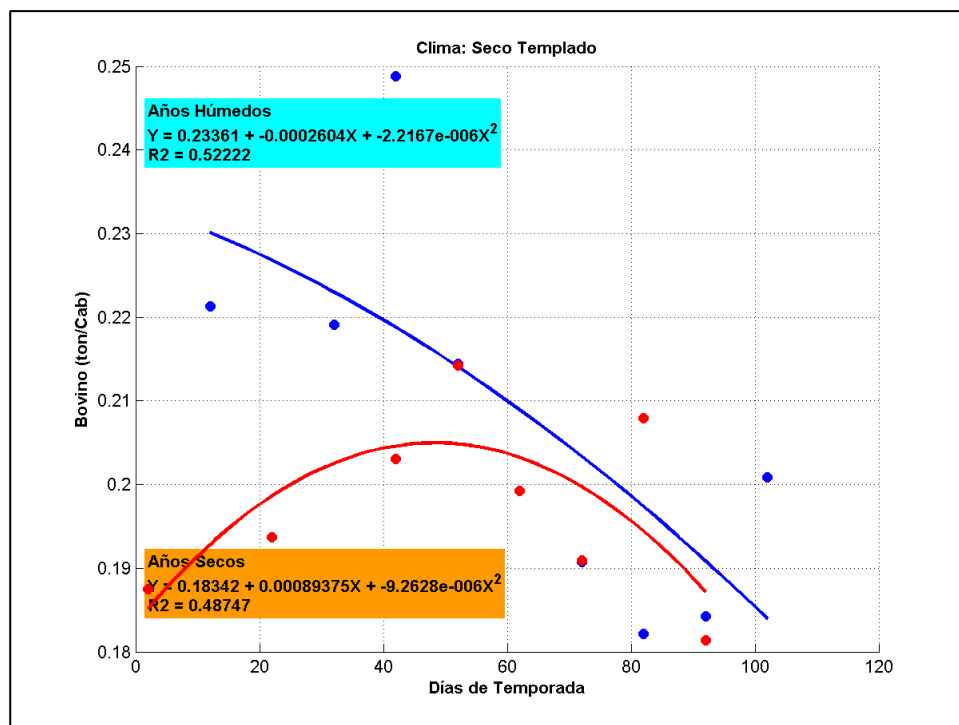
Gráfica 5.79 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de inicio.



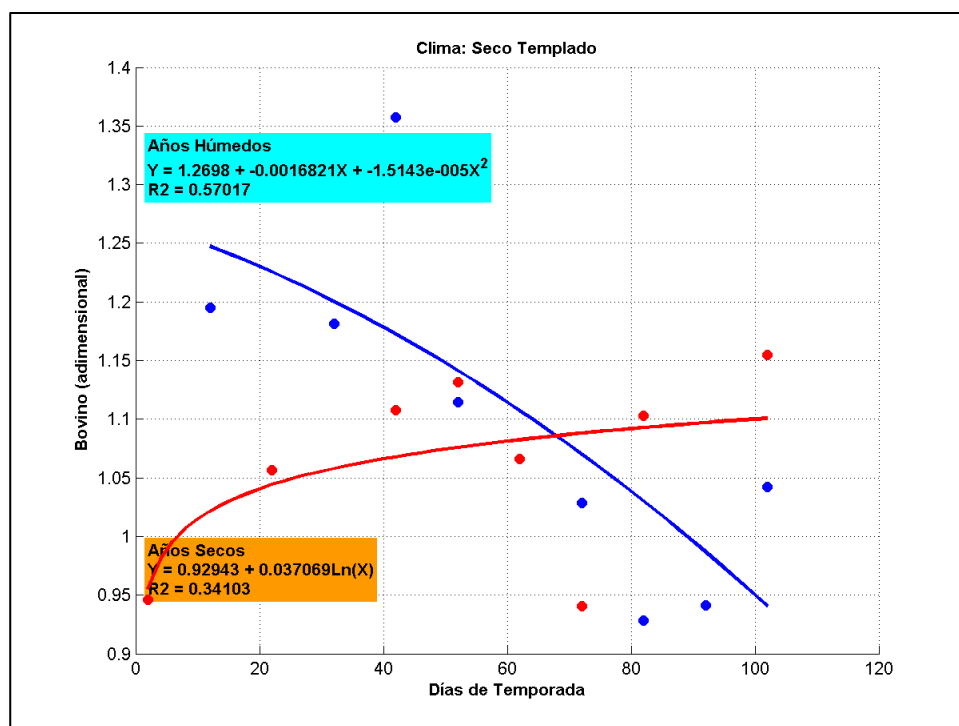
Gráfica 5.80 Rendimiento del ganado bovino vs Día de término



Gráfica 5.81 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de término

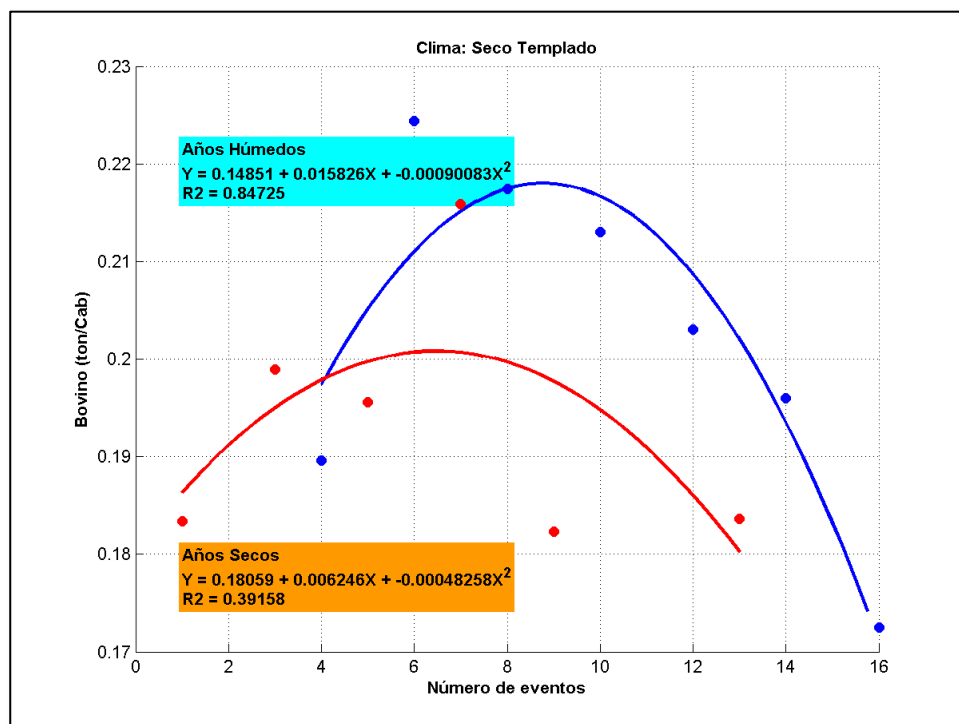


Gráfica 5.82 Rendimiento del ganado bovino vs Días de temporada.

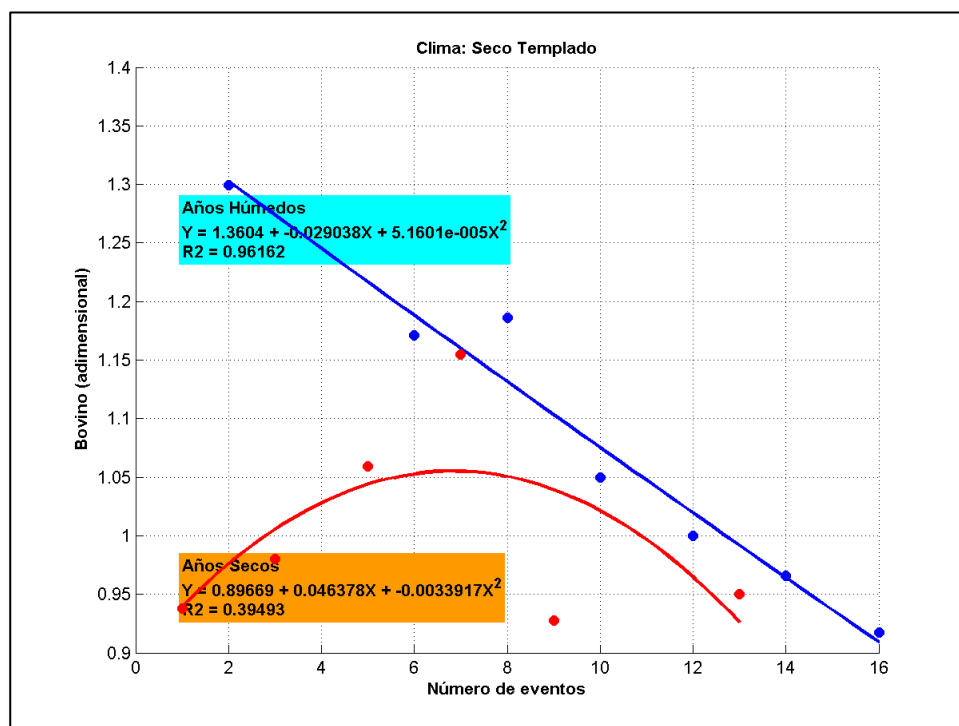


Gráfica 5.83 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de temporada.

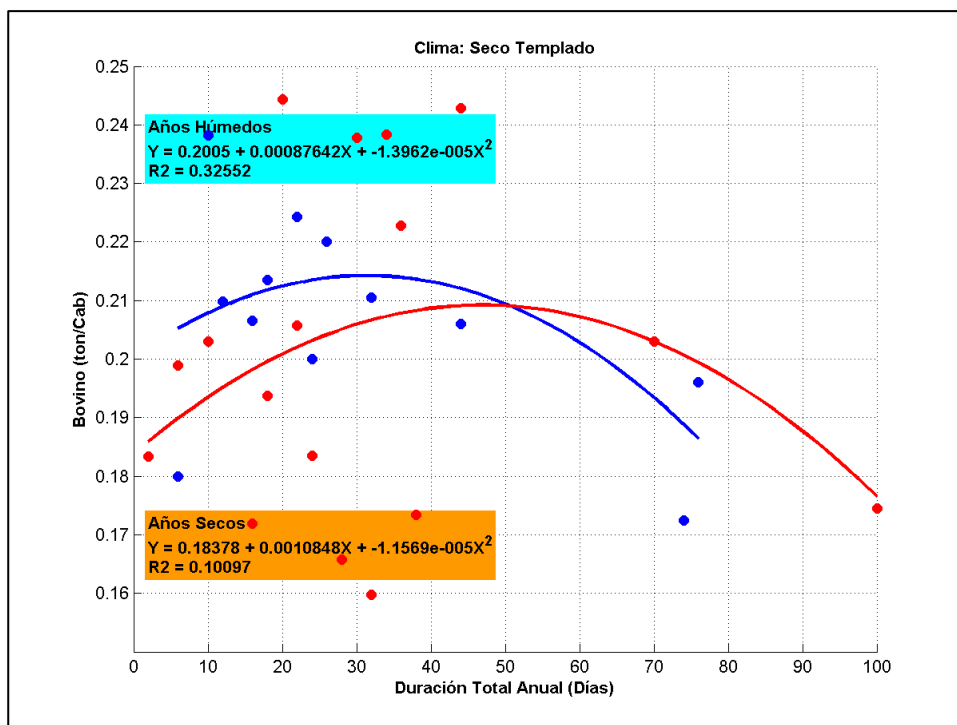
## 5.2.2 Relación de rendimientos con el segundo criterio



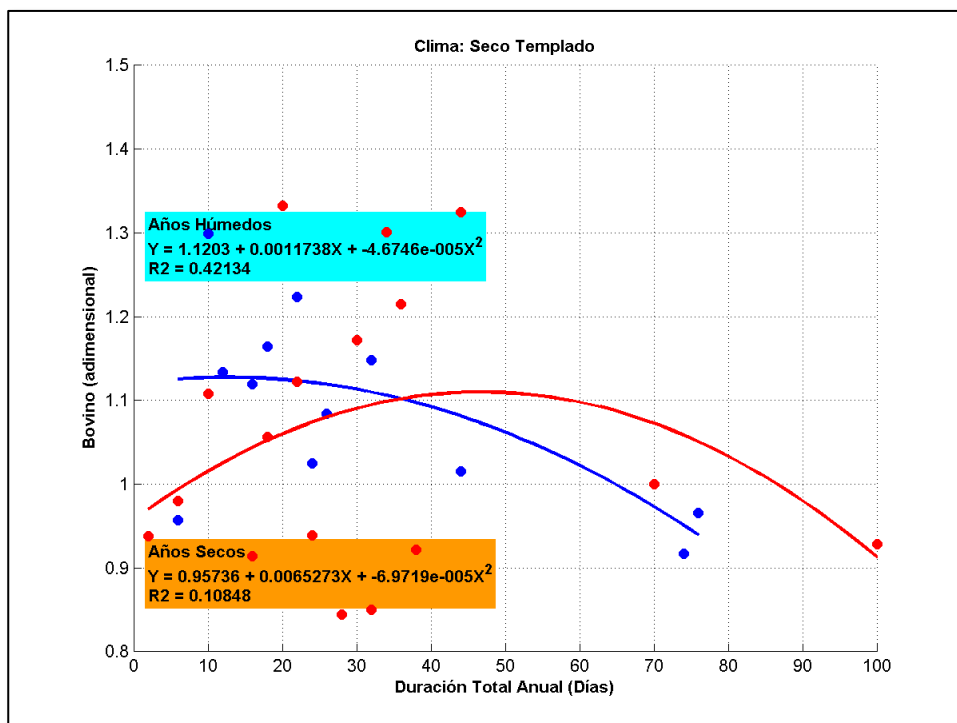
Gráfica 5.84 Rendimiento del ganado bovino vs Número de eventos por año.



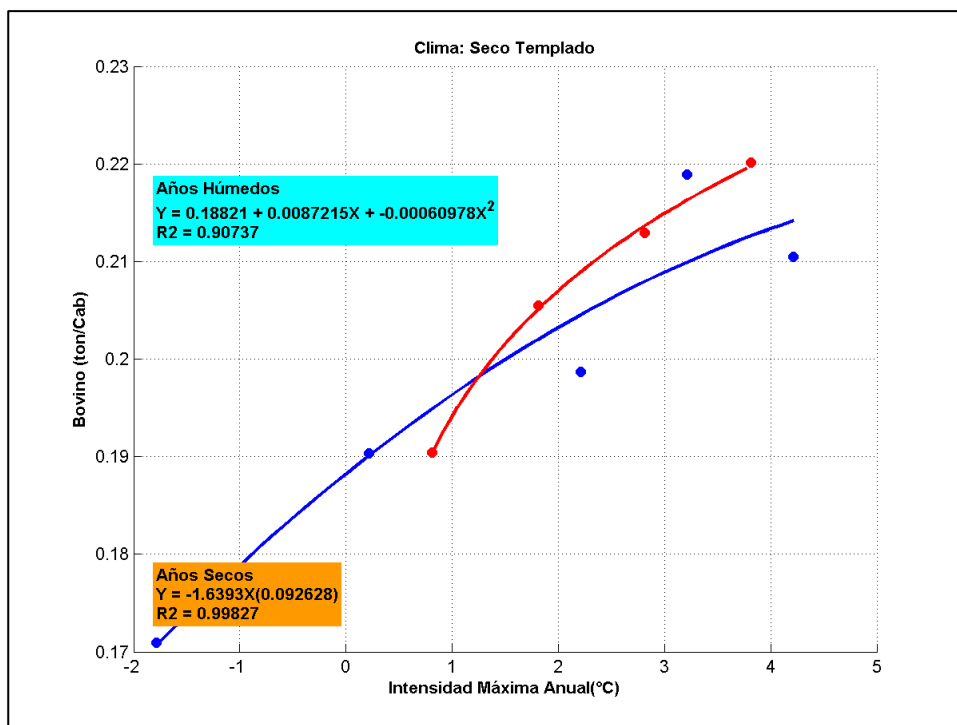
Gráfica 5.85 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Número de eventos por año.



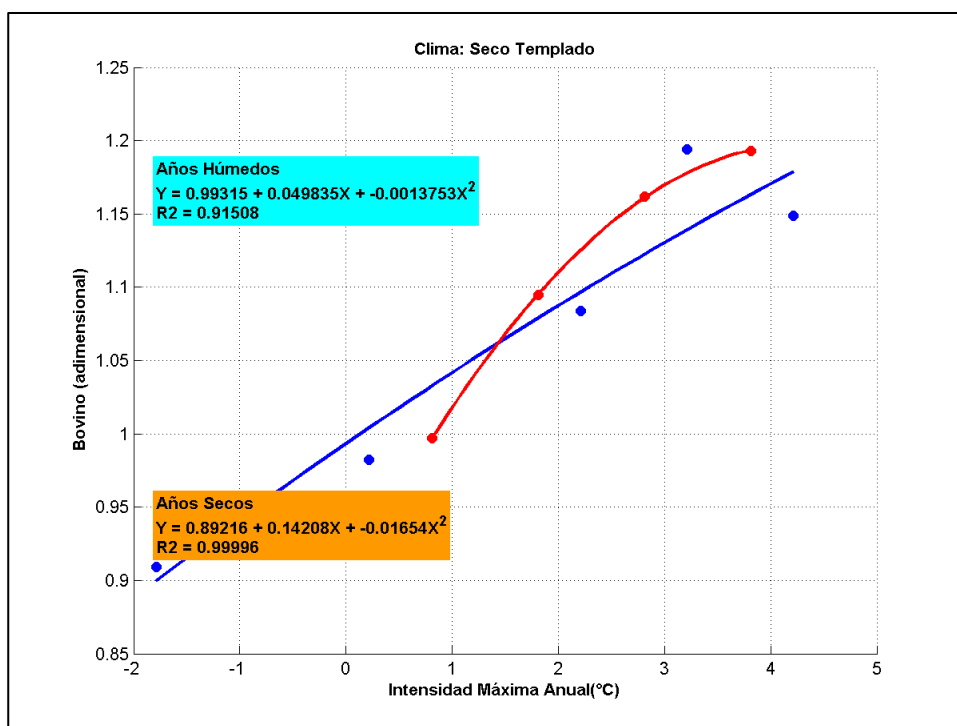
Gráfica 5.86 Rendimiento del ganado bovino vs Duración total anual.



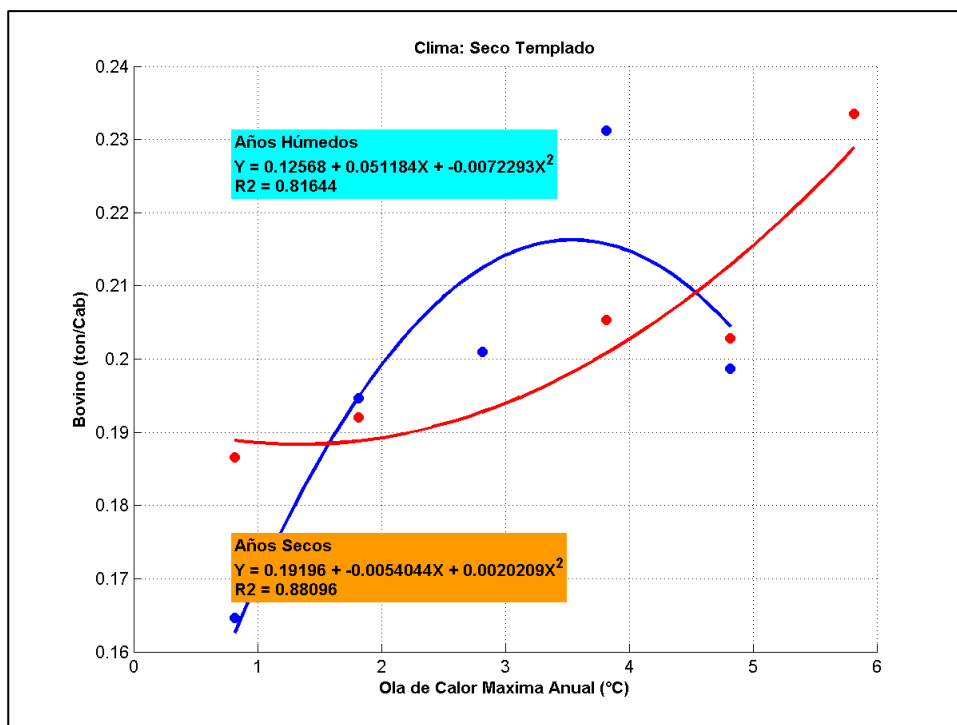
Gráfica 5.87 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Duración total anual.



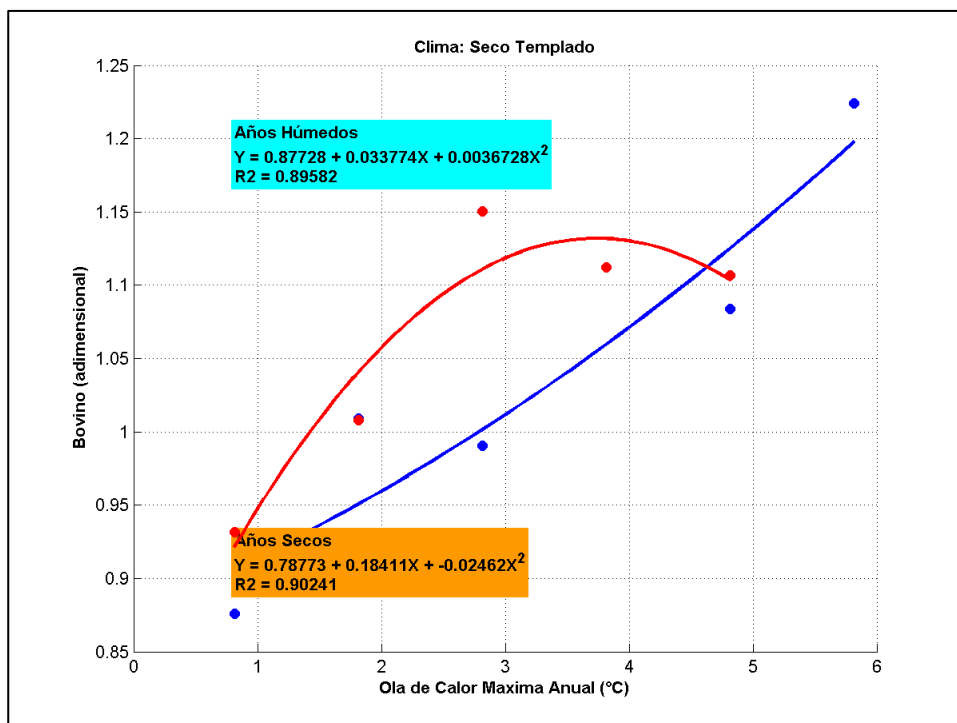
Gráfica 5.88 Rendimiento del ganado bovino vs Intensidad máxima anual



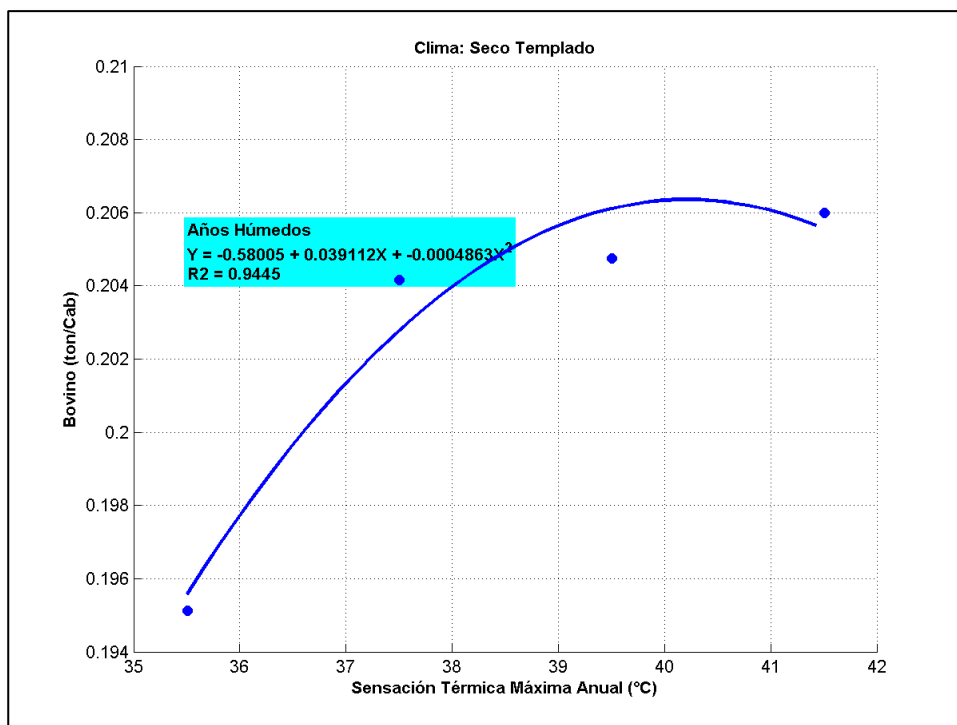
Gráfica 5.89 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Intensidad máxima anual



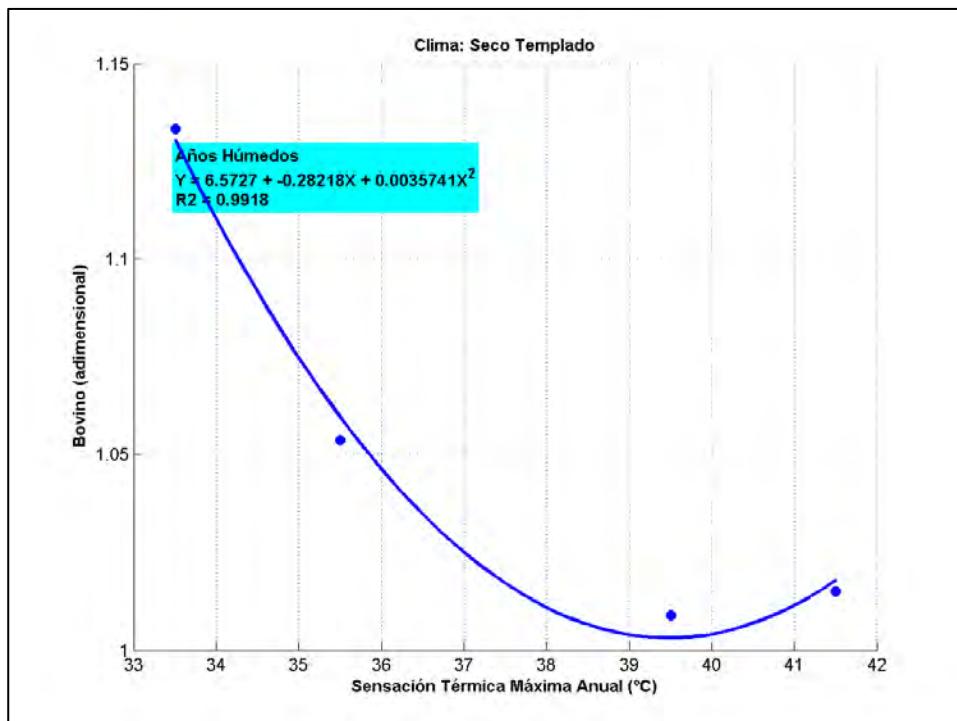
Gráfica 5.90 Rendimiento del ganado bovino vs Ola de calor máxima anual.



Gráfica 5.91 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Ola de calor máxima anual.

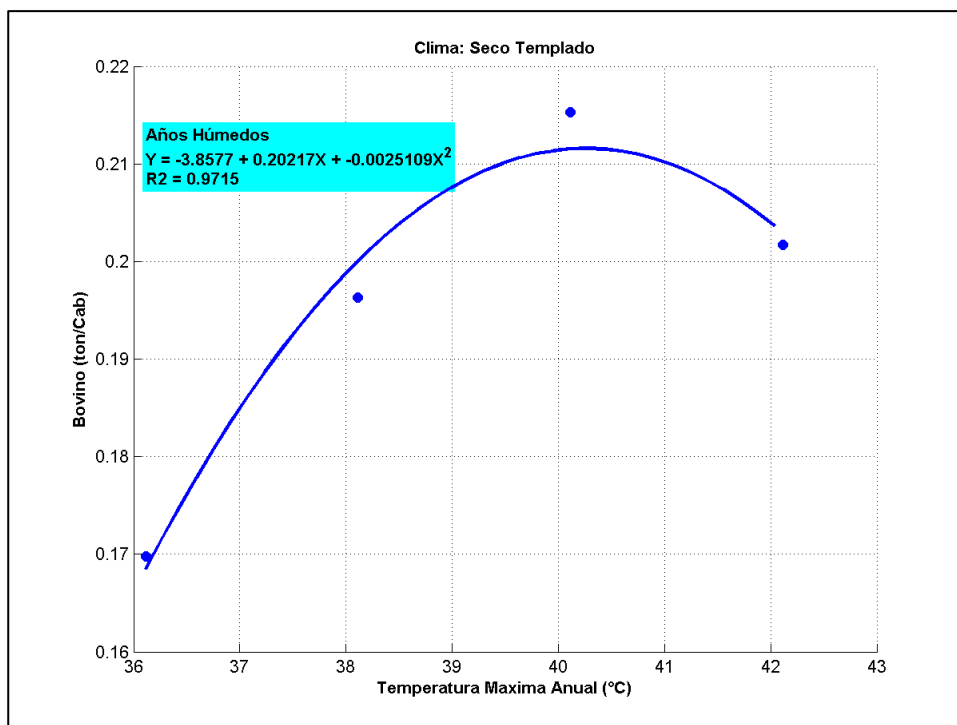


Gráfica 5.92 Rendimiento del ganado bovino vs Sensibilidad térmica máxima anual

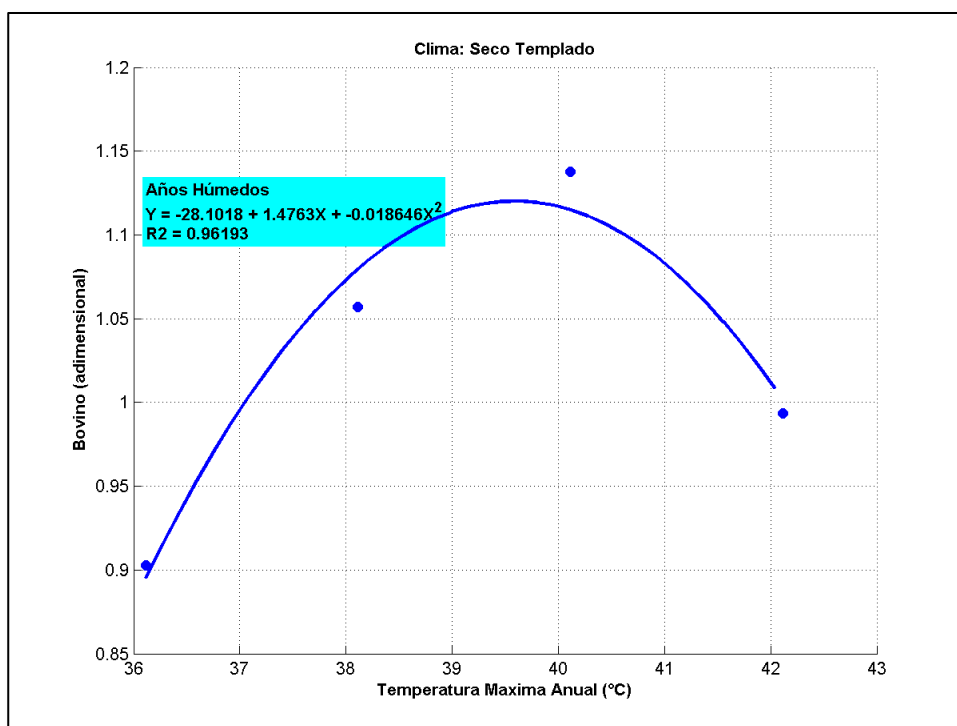


Gráfica 5.93 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Sensibilidad térmica máxima anual

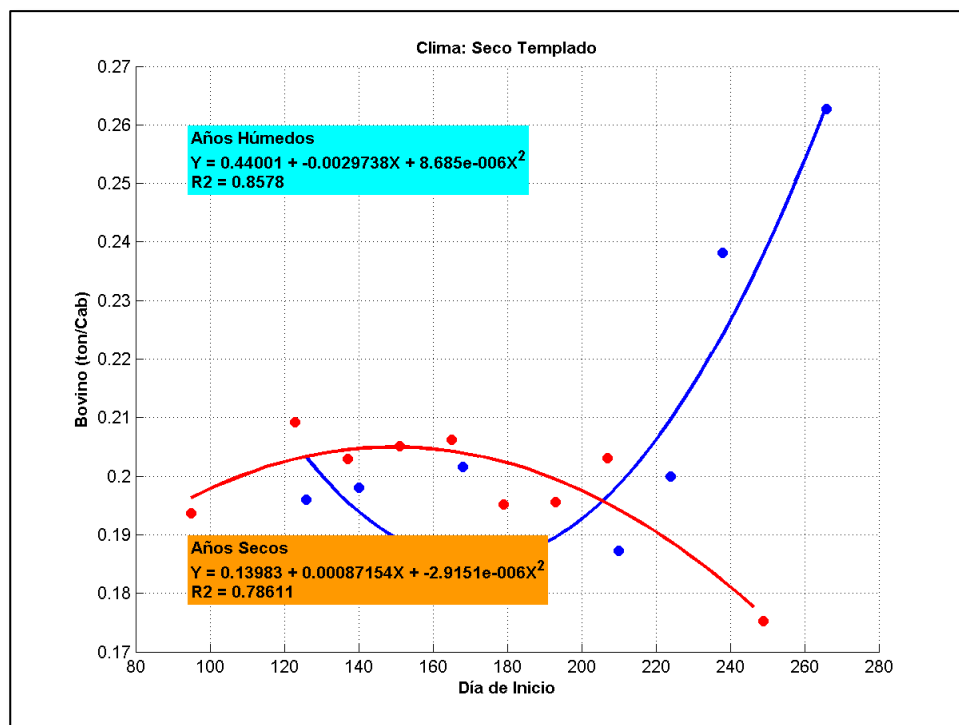




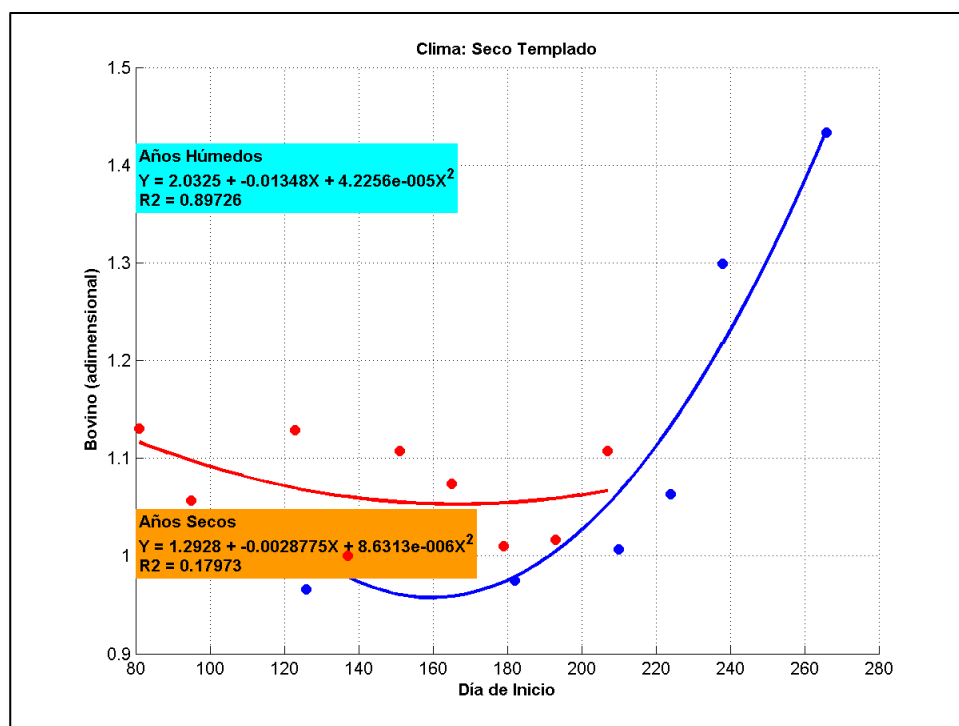
Gráfica 5.94 Rendimiento del ganado bovino vs Temperatura máxima anual.



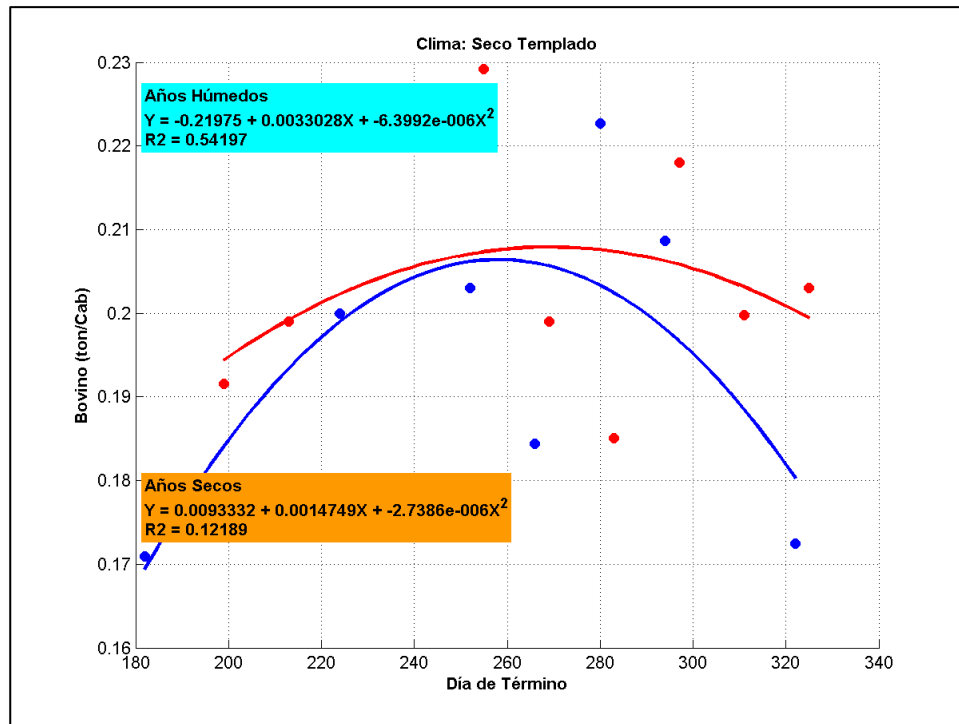
Gráfica 5.95 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Temperatura máxima anual



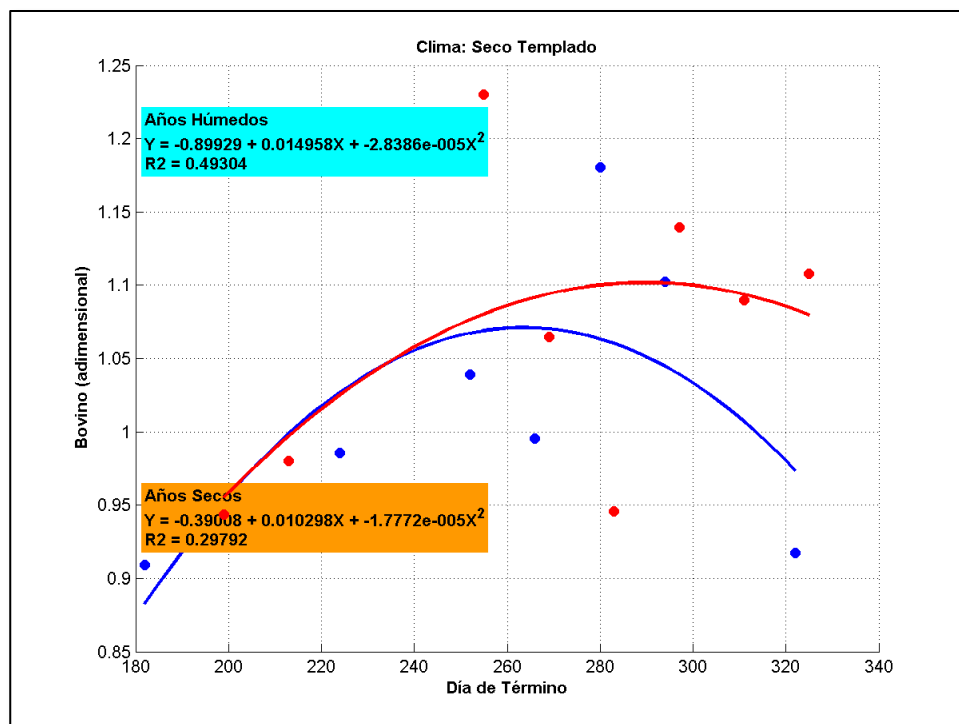
Gráfica 5.96 Rendimiento del ganado bovino vs Día de inicio



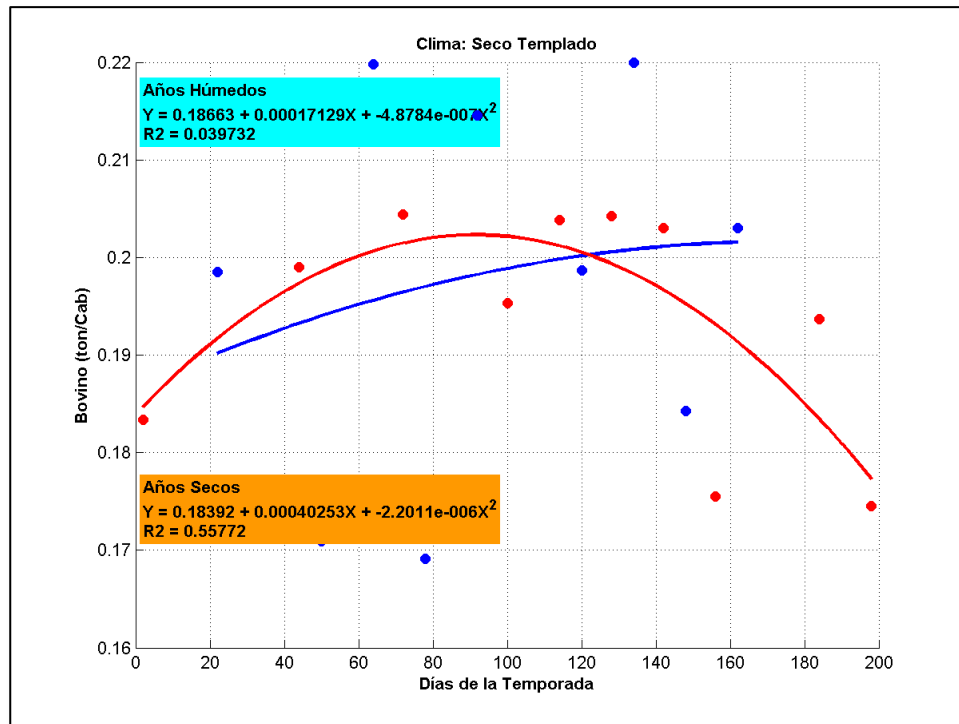
Gráfica 5.97 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de inicio.



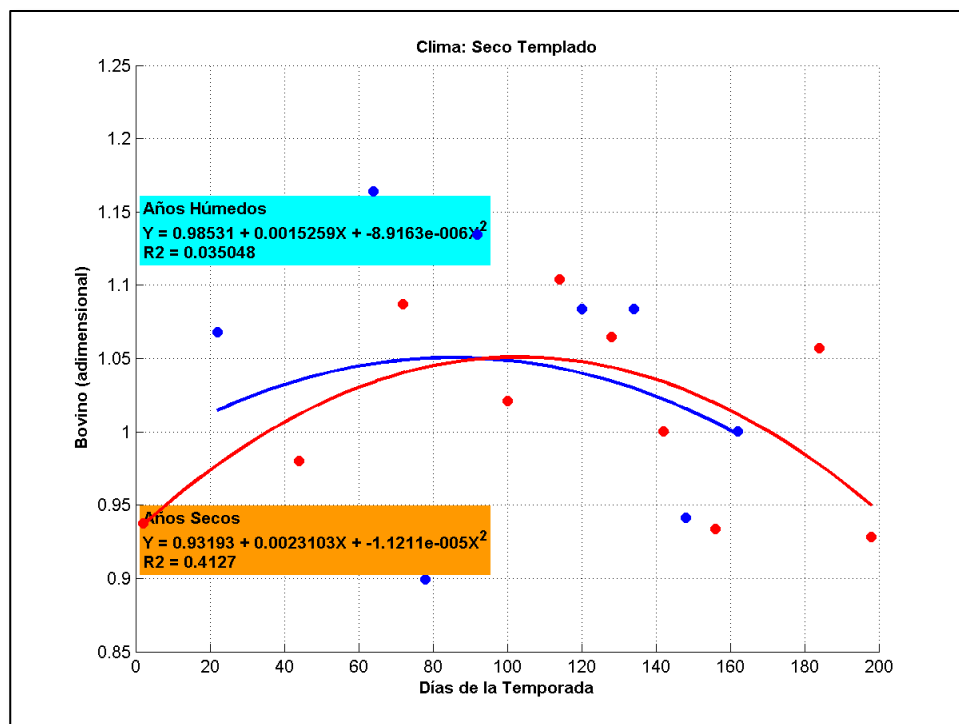
Gráfica 5.98 Rendimiento del ganado bovino vs Día de término



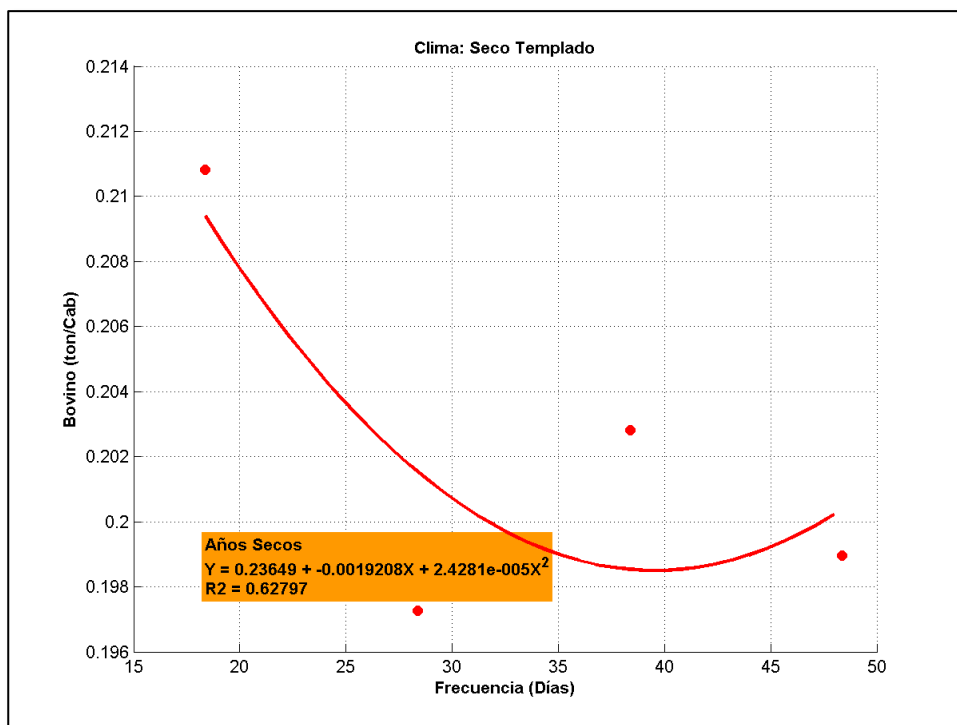
Gráfica 5.99 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Día de término



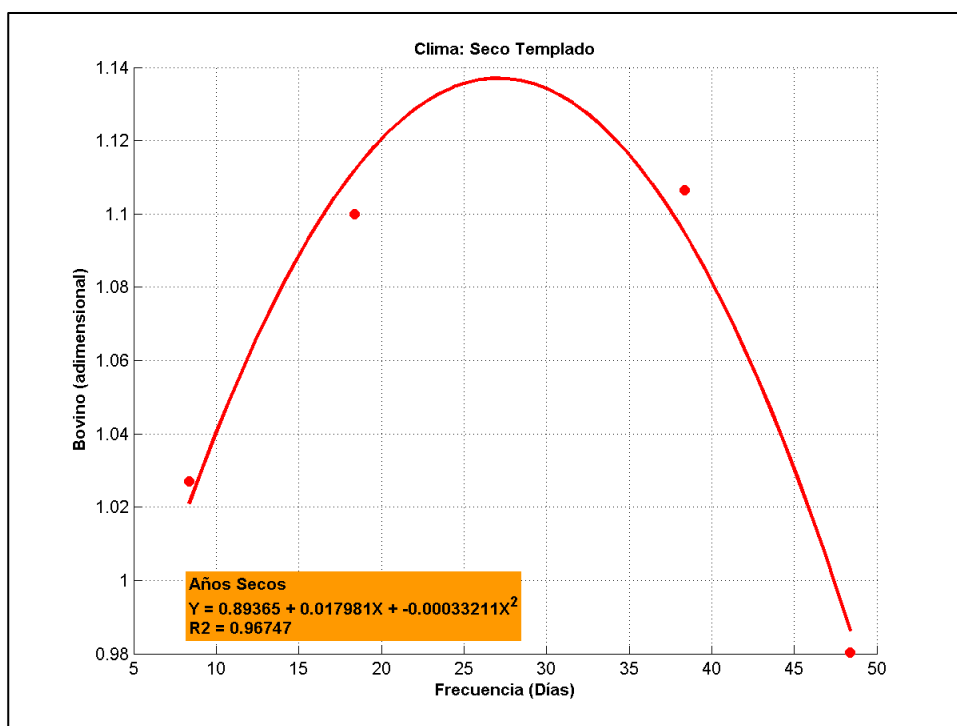
Gráfica 5.100 Rendimiento del ganado bovino vs Días de temporada.



Gráfica 5.101 Rendimiento adimensional del ganado bovino vs Días de temporada



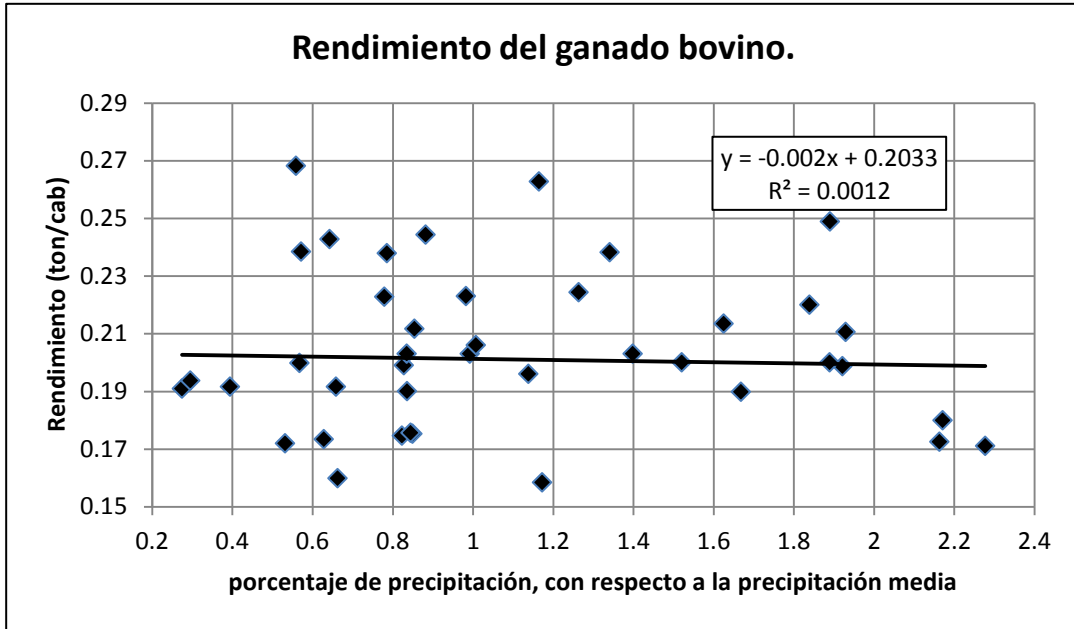
Gráfica 5.102 Rendimiento del ganado bovino vs Frecuencia.



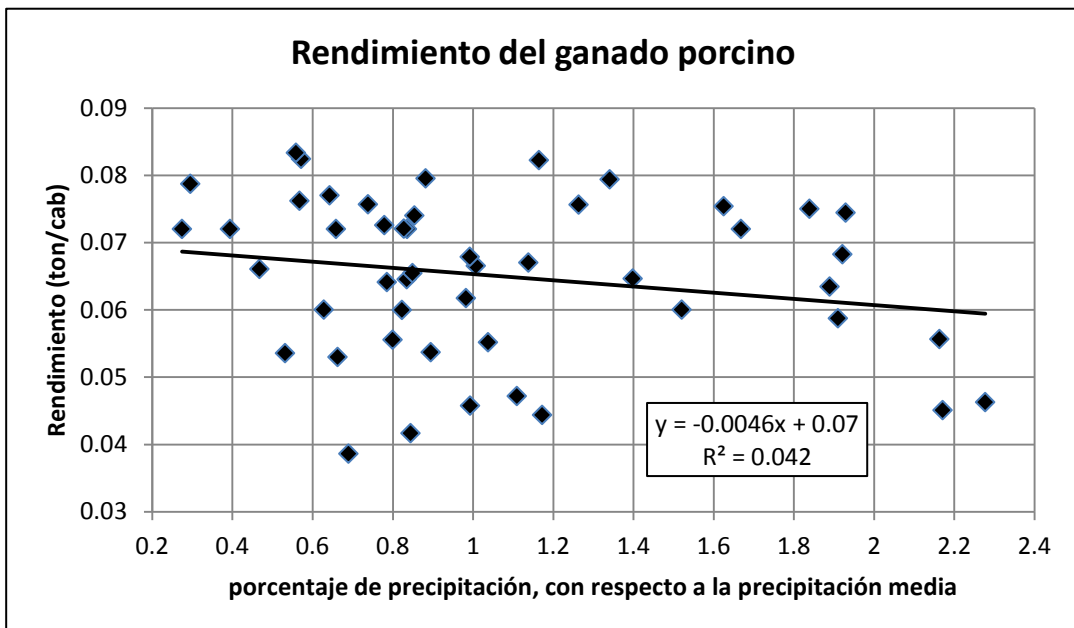
Gráfica 5.103 Rendimiento del ganado bovino vs Frecuencia.

### 5.2.3 Análisis de sequía en el sector ganadero

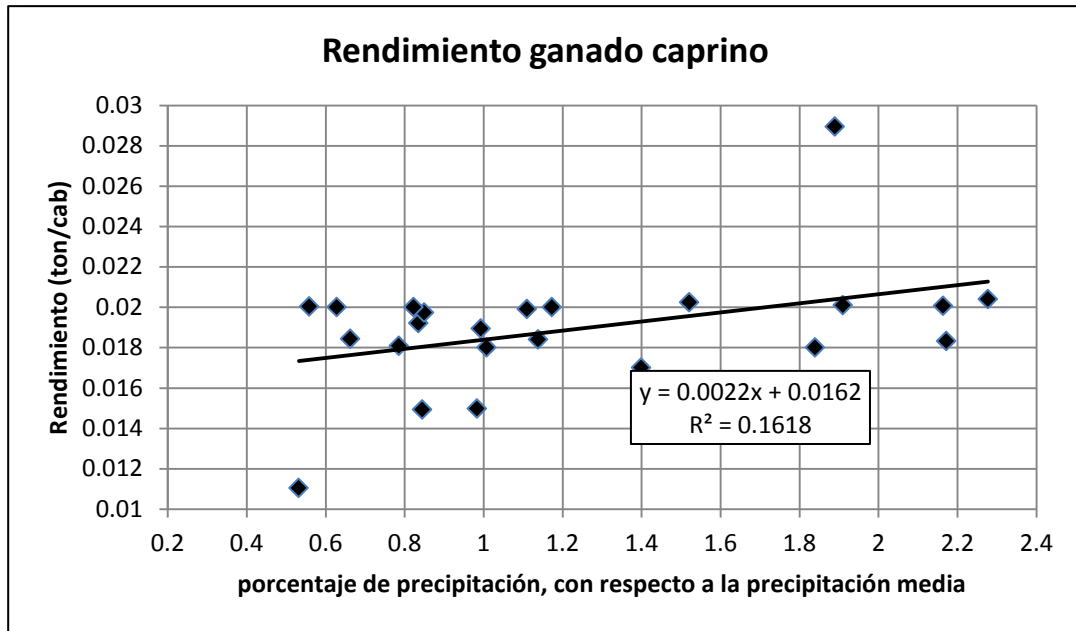
Se presentan las gráficas que relacionan el porcentaje de la precipitación y el rendimiento para el ganado. Estos datos al igual que en la agricultura son del clima Seco Templado.



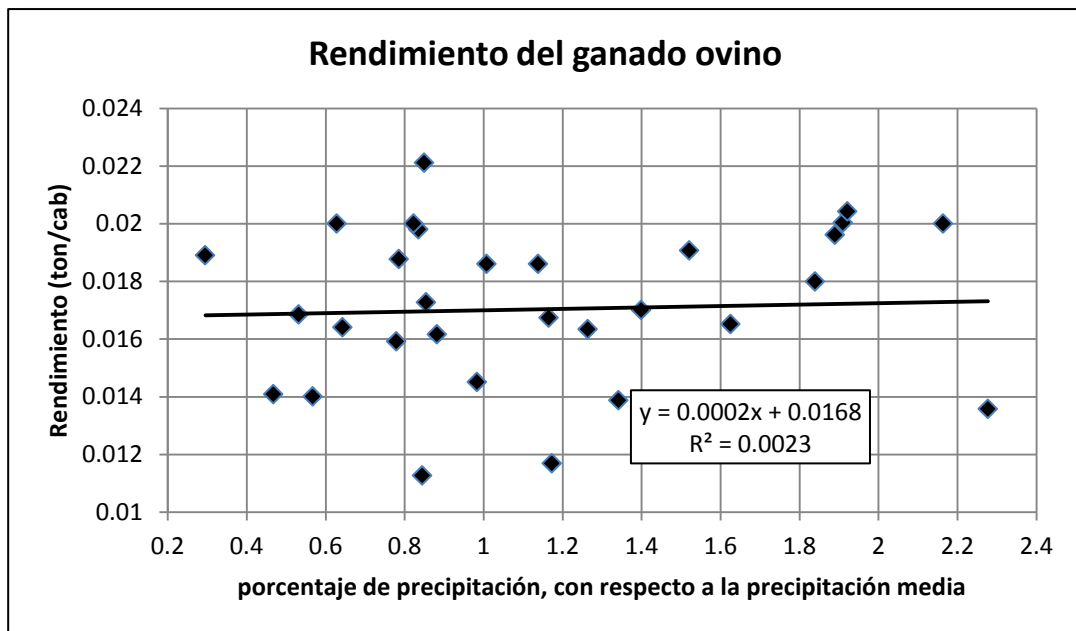
Gráfica 5.104 Relación entre el rendimiento del ganado bovino y el porcentaje de la precipitación.



Gráfica 5.105 Relación entre el rendimiento del ganado porcino y el porcentaje de la precipitación



Gráfica 5.106 Relación entre el rendimiento del ganado caprino y el porcentaje de la precipitación



Gráfica 5.107 Relación entre el rendimiento del ganado ovino y el porcentaje de la precipitación

El rendimiento del sector ganadero, presenta dispersión en los datos así como baja correlación. Se observa poca relación entre la sequía y el rendimiento.

En la Tabla 5.16 se muestran los parámetros estadísticos del rendimiento de los diferentes ganados en el clima Seco Templado

**Tabla 5.16 Parámetros estadísticos del ganado para el clima seco templado.**

	Bovino	Porcino	Caprino	Ovino
<b>Media</b>	0.201	0.065	0.019	0.017
<b>Desv. Estándar</b>	0.030	0.012	0.003	0.003
<b>C. Variación</b>	0.151	0.182	0.165	0.165
<b>C. Asimetría</b>	0.123	-0.514	0.674	-0.416
<b>C. Curtosis</b>	2.942	2.349	8.703	2.374

## 5.2.4 Comentarios sobre las relaciones en el sector ganadero

En el sector ganadero, también se hizo una separación entre los años húmedos y los años que se presenta sequía a través de la técnica del porcentaje de la normal. En la Tabla 5.17 se presenta un breve resumen de las relaciones entre el rendimiento y los diferentes parámetros de la Ola de Calor. Las celdas en gris oscuro indican que el rendimiento disminuye conforme aumenta el parámetro, las celdas en gris claro indican que el rendimiento aumenta conforme aumenta el parámetro.

**Tabla 5.17 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio**

		Bovino		Porcino		Caprino		Ovino	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
<b>No. Eventos</b>									
<b>Duración</b>									
<b>Intensidad</b>	<b>Máxima</b>								
	<b>Mínima</b>								
<b>Temp.</b>	<b>Alivio</b>								
<b>Severidad</b>									
<b>Temperatura</b>	<b>Máxima</b>								
	<b>Mínima</b>								
<b>Día (s)</b>	<b>Inicio</b>								
	<b>Término</b>								
	<b>Temporada</b>								
<b>Intensidad Adim.</b>	<b>Máxima</b>								
	<b>Mínima</b>								
<b>Severidad adim.</b>									
<b>Temp. Adim.</b>	<b>Máxima</b>								
	<b>Mínima</b>								
<b>Clasificación</b>	<b>Máxima</b>								
	<b>Mínima</b>								



**Tabla 5.18 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio**

		Bovino		Porcino		Caprino		Ovino	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
No. Eventos									
Duración									
Intensidad	Máxima								
	Mínima								
Temp.	Alivio								
Severidad									
Temperatura	Máxima								
	Mínima								
Día (s)	Inicio								
	Término								
	Temporada								
Intensidad Adim.	Máxima								
	Mínima								
Severidad adim.									
Temp. Adim.	Máxima								
	Mínima								
Clasificación	Máxima								
	Mínima								

En general en el ganado se observa un decremento del rendimiento del ganado porcino en casi todos los parámetros de la Ola de Calor tanto en años secos como años húmedos. La temperatura máxima y la temperatura de alivio son los parámetros que más afectan los rendimientos en los años húmedos. En los años secos, son los parámetros adimensionales de la temperatura máxima y la intensidad tanto en la serie máxima como en la mínima las que más afectan el rendimiento en el ganado.

Algunos rendimientos no se ven tan afectados en época húmeda y en este caso es por la disponibilidad de agua que además de servir para bajar la temperatura corporal es usada para aumentar el peso del ganado. A diferencia de los cultivos, en este sector, la temperatura de alivio no es determinante incluso es inversa y eso se debe a que cuando hace mucho calor (que puede indicar la presencia de una Ola de Calor) los ganaderos no pastorean a su ganado sino que los mantienen dentro de los establos o en lugares a la sombra, además de que el propio ganado busca bajar su temperatura de alguna forma.

En la Tabla 5. 19 y la Tabla 5. 20 se presentan los coeficientes de determinación entre los diferentes tipos de ganado y la época (seco o húmedo) con relación a los parámetros de la Ola de Calor. En general presenta mayores coeficientes si se compara con los cultivos, aunque en el caso de la temperatura de alivio presenta coeficientes bajos. También se observan coeficientes bajos en

la época de sequía, excepto con el ganado bovino, los demás presentan coeficientes son bajos casi para cualquier parámetro de Ola de Calor.

**Tabla 5. 19 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el primer criterio**

		Bovino		Porcino		Caprino		Ovino	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
<b>No. Eventos</b>		0.763	0.630	0.809	0.773	0.675	0.831	0.697	0.601
<b>Duración</b>		<b>0.175</b>	<b>0.230</b>	<b>0.176</b>	<b>0.211</b>	<b>0.184</b>	<b>0.264</b>	<b>0.256</b>	<b>0.222</b>
<b>Intensidad</b>	<b>Máxima</b>	0.516	0.522	0.586	0.506	0.641	0.549	0.614	0.580
	<b>Mínima</b>	0.811	0.611	0.795	0.709	0.536	0.469	0.558	0.436
<b>Temp.</b>	<b>Alivio</b>	0.825	0.654	0.766	0.446	0.698	0.762	0.673	0.592
<b>Severidad</b>		0.599	0.705	0.650	0.613	0.778	0.528	0.602	0.736
<b>Temperatura</b>	<b>Máxima</b>	0.496	0.430	0.770	0.672	0.543	0.459	0.519	0.482
	<b>Mínima</b>	0.736	0.578	0.732	0.703	0.574	0.433	0.643	0.542
<b>Día (s)</b>	<b>Inicio</b>	0.619	0.481	0.620	0.542	0.582	0.520	0.496	0.489
	<b>Término</b>	0.469	0.523	0.406	0.547	0.682	0.438	0.617	0.472
	<b>Temporada</b>	0.556	0.583	0.544	0.402	0.669	0.423	0.592	0.557
<b>Intensidad Adim.</b>	<b>Máxima</b>	0.922	0.923	0.905	0.927	0.758	0.691	0.769	0.920
	<b>Mínima</b>	0.664	0.533	0.672	0.747	0.743	0.833	0.813	0.549
<b>Severidad adim.</b>		<b>0.381</b>	0.482	0.413	0.496	0.629	0.661	0.540	0.550
<b>Temp. Adim.</b>	<b>Máxima</b>	0.877	0.817	0.812	0.871	0.796	0.820	0.792	0.866
	<b>Mínima</b>	0.761	0.686	0.704	0.558	0.631	0.596	0.735	0.628
<b>Clasificación</b>	<b>Máxima</b>	0.947	0.943	0.957	0.981	0.938	0.929	0.879	0.919
	<b>Mínima</b>	0.998	1.000	0.993	0.899	0.957	0.917	0.952	0.987

**Tabla 5. 20 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el primer criterio**

		Bovino		Porcino		Caprino		Ovino	
		Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.	Real	Adim.
No. Eventos		0.774	0.665	0.807	0.712	0.754	0.801	0.738	0.705
Duración		<b>0.276</b>	<b>0.245</b>	<b>0.211</b>	<b>0.197</b>	<b>0.384</b>	<b>0.319</b>	0.424	<b>0.283</b>
Intensidad	Máxima	0.556	0.415	0.442	0.554	0.721	0.507	0.597	0.645
	Mínima	0.677	0.672	0.739	0.755	0.658	0.520	0.766	0.809
Temp.	Alivio	0.776	0.621	0.774	0.689	0.721	0.716	0.710	0.725
Severidad		0.636	0.554	0.778	0.738	0.746	0.699	0.676	0.596
Temperatura	Máxima	0.600	0.467	0.486	0.585	0.571	0.468	0.588	0.559
	Mínima	0.665	0.519	0.726	0.500	0.619	0.545	0.599	0.709
Día (s)	Inicio	0.596	0.515	0.542	0.512	0.556	0.543	0.525	0.510
	Término	0.669	0.605	0.628	0.509	0.530	0.512	0.445	0.551
	Temporada	0.414	0.464	0.500	0.554	0.637	0.538	0.596	0.557
Intensidad Adim.	Máxima	0.746	0.568	0.833	0.829	0.665	0.780	0.813	0.881
	Mínima	0.614	0.557	0.786	0.508	0.461	0.690	0.696	0.638
Severidad adim.		0.434	0.485	<b>0.361</b>	<b>0.366</b>	0.585	0.531	0.572	0.595
Temp. Adim.	Máxima	0.784	0.753	0.672	0.720	0.812	0.874	0.811	0.815
	Mínima	0.556	0.520	0.689	0.619	0.531	0.615	0.537	0.612
Clasificación	Máxima	0.873	0.872	0.917	0.945	0.993	0.913	0.926	0.957
	Mínima	0.919	0.932	0.808	0.938	0.871	0.824	0.989	0.972

Los resultados para el segundo criterio son:

**Tabla 5. 21 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio.**

	No.			Sensación	Temp Ola	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	de Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
Bovino										
Bovino Adim										
Porcino										
Porcino Adim										
Caprino										
Caprino Adim										
Ovino										
Ovino Adim										

**Tabla 5. 22 Resumen de los rendimientos promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio.**

	No.			Sensación	Temp. Ola	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	de Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
<b>Bovino</b>										
<b>Bovino Adim</b>										
<b>Porcino</b>										
<b>Porcino Adim</b>										
<b>Caprino</b>										
<b>Caprino Adim</b>										
<b>Ovino</b>										
<b>Ovino Adim</b>										

Con el segundo criterio, se observa que en los años húmedos el ganado porcino es el más afectado para la mayoría de los parámetros. En los años secos es el ganado el que presenta los menores rendimientos. En cuanto a las variables, la temperatura de la Ola de Calor es el que presenta los menores rendimientos en los años húmedos, mientras que la Intensidad es el parámetro más importante en los años secos.

En cuanto a los coeficientes de determinación, presenta alta correlación, solamente los días de temporada en los años secos presentan coeficientes de determinación menores a 0.4.

**Tabla 5. 23 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años húmedos y utilizando el segundo criterio**

	No.			Sensación	Temp. Ola	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	de Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
<b>Bovino</b>	0.870	0.768	0.935	0.846	0.993	0.707	0.621	0.599	0.430	0.656
<b>Bovino Adim</b>	0.746	0.789	0.836	0.812	0.929	0.671	0.519	0.492	0.464	0.719
<b>Porcino</b>	0.759	0.680	0.765	0.755	0.979	0.623	0.664	0.448	0.421	0.695
<b>Porcino Adim</b>	0.595	0.651	0.751	0.787	0.952	0.813	0.559	0.477	0.427	0.661
<b>Caprino</b>	0.735	0.676	0.708	0.737	0.955	0.803	0.615	0.615	0.581	0.805
<b>Caprino Adim</b>	0.640	0.778	0.795	0.695	0.874	0.540	0.647	0.481	0.559	0.581
<b>Ovino</b>	0.591	0.725	0.851	0.797	0.933	0.769	0.536	0.490	0.469	0.557
<b>Ovino Adim</b>	0.740	0.783	0.915	0.636	0.912	0.619	0.549	0.539	0.442	0.617

**Tabla 5. 24 Resumen de los coeficientes de determinación promediando los climas para diferentes parámetros de la Ola de Calor, para los años secos y utilizando el segundo criterio**

	No.			Sensación	Temp. Ola	Temp.	Día (s)			
	Eventos	Duración	Intensidad	Térmica	de Calor	Máxima	Inicio	Término	Temporada	Frecuencia
<b>Bovino</b>	0.780	0.779	0.871	0.880	0.966	0.843	0.567	0.494	0.435	0.717
<b>Bovino Adim</b>	0.580	0.793	0.733	0.860	0.963	0.819	0.448	0.448	<b>0.389</b>	0.867
<b>Porcino</b>	0.703	0.672	0.694	0.713	0.993	0.743	0.575	0.552	<b>0.351</b>	0.641
<b>Porcino Adim</b>	0.777	0.747	0.817	0.762	0.980	0.660	0.567	0.410	0.403	0.728
<b>Caprino</b>	0.723	0.773	0.950	0.873	0.970	0.862	0.471	0.517	0.490	0.666
<b>Caprino Adim</b>	0.642	0.591	0.863	0.783	0.963	0.684	0.414	0.473	<b>0.356</b>	0.610
<b>Ovino</b>	0.603	0.690	0.765	0.797	0.937	0.663	0.470	0.642	0.485	0.839
<b>Ovino Adim</b>	0.547	0.668	0.636	0.897	0.810	0.877	0.480	0.466	<b>0.291</b>	0.665

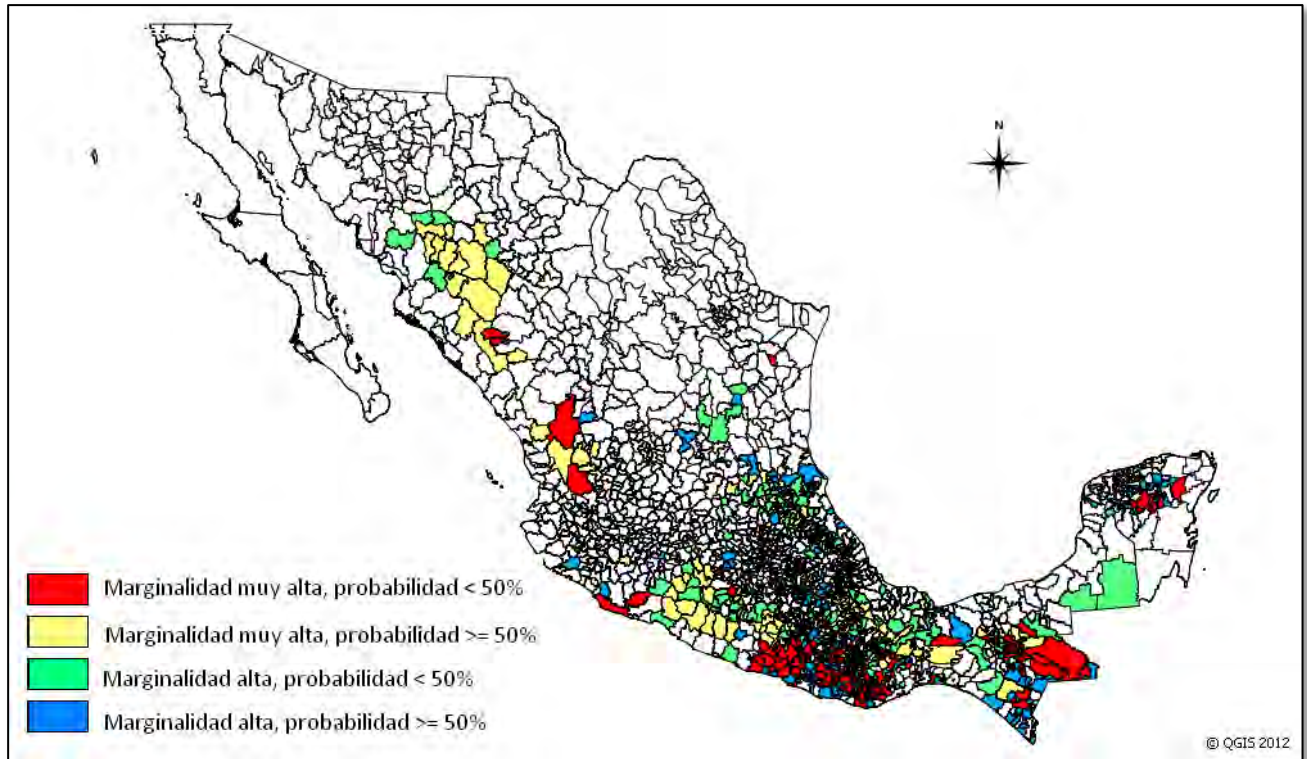
En general se observa que los años húmedos tienen mayor impacto negativo en comparación con los años secos. Y esto se explica ya que en los años secos el rendimiento tiene mayor relación con los parámetros de sequía que con los de Ola de Calor. En los años húmedos las diferencias en el rendimiento no se pueden explicar con los parámetros de Sequía, sin embargo es factible que los efectos de la Ola de Calor den una orientación sobre la estimación de los rendimientos.

Es importante señalar, que en este trabajo solo se toma en cuenta los parámetros de la Ola de Calor y la separación de años húmedos y secos. Existen más variables que pueden afectar estos rendimientos, como el tipo de suelo, técnicas de cultivo, el tipo de especie, inicio de cultivo, heladas, etc.

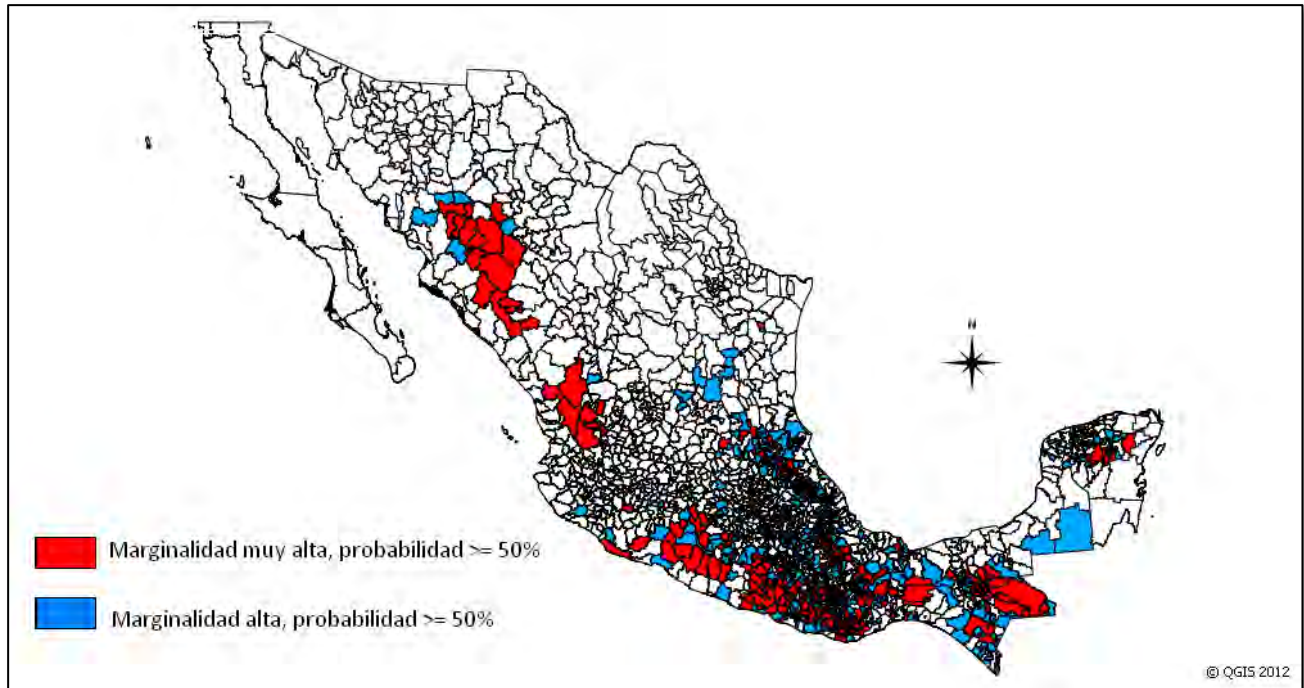
Como se mencionó anteriormente, los parámetros adimensionales dan una idea más general de los efectos en el rendimiento por el fenómeno de la Ola de Calor, aunque dan buenas correlaciones el análisis se mejora cuando se hace puntual (por municipio). Aquí se presentaron los resultados por clima por facilidad en el manejo de información, sin embargo en el CD que se entrega en este trabajo viene el análisis por municipio. Se desarrollaron los parámetros adimensionales para cubrir el hueco de información que existe en la información del sector agropecuario, ya que solo 10 de los estados presentan información de este sector a nivel municipal. El uso de los parámetros adimensionales da una idea del rendimiento esperado bajo las condiciones de Ola de Calor en sitios donde no se cuente con información.

### 5.3 Relación de Marginalidad y las Olas de Calor

Además de los sectores productivos como es la ganadería y la agricultura. Las Olas de Calor afectan la salud de la población. Como se ha citado anteriormente hay una relación directa entre el clima y la salud. Aunque para este trabajo no fue posible encontrar datos de salud en la calidad necesaria para establecer estas relaciones, se presentan los siguientes mapas en donde se indican los municipios que presentan marginalidad alta y muy alta que son las zonas más vulnerables.



**Mapa 5. 1 Municipios con marginalidad alta y muy alta. Primer criterio.**



**Mapa 5. 2 Municipios con marginalidad muy alta y alta. Segundo criterio**

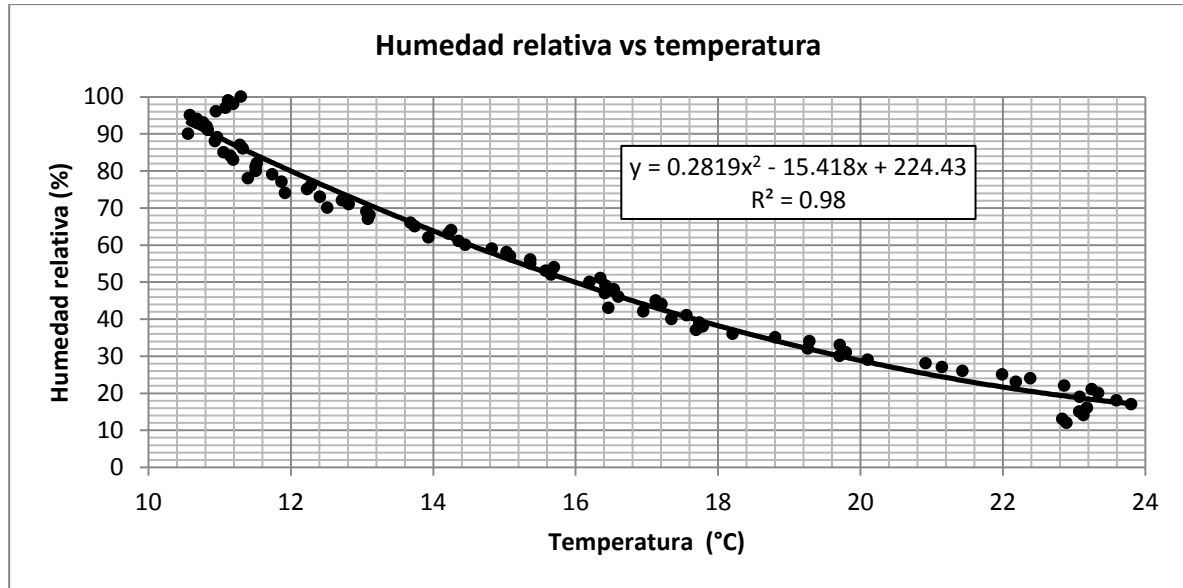
#### **5.4 Comparación de resultados en el cálculo de la evaporación**

Para estudios de balances y aprovechamientos hidráulicos, la estimación de la evaporación es uno de los parámetros importantes y de los llamados “pérdidas”. En general, para la estimación de la evaporación se toman solo las características promedios de la zona en estudio (promedios mensuales), sin embargo, al hacer estos promedios se pueden tener varios errores que llevan a una subestimación de la evaporación.

A continuación se presenta a manera de ejemplo, el cálculo de la evaporación usando las ecuaciones [1. 70] y [1. 71] mostradas en el capítulo 1.

La zona de estudio es el municipio Atlacomulco en el estado de México. Se utilizó este municipio ya que cuenta con una estación EMA, la cual nos proporciona información de humedad relativa. La estación está a la elevación 2526 msnm y sus coordenadas son: Latitud = 19.8, Longitud = 99.88

Con la humedad relativa y la temperatura promedio, se construyó la siguiente grafica que correlaciona ambas variables. Se hizo un ajuste cuadrático el cual presenta un coeficiente de determinación de 0.98.



Gráfica 5. 108 Humedad relativa vs Temperatura promedio, municipio de Atlacomulco en el Estado de México.

Al aplicar la ecuación [1. 70] se tienen los siguientes resultados:

Tabla 5. 25 Estimación de la evaporación (mm), aplicando la ecuación 1.70

Ecuación 1.70		
Promedio	Ola de Calor	Diferencia
43.4	55.1	11.8
65.5	82.7	17.2
142.9	160.4	17.5
187.1	197.1	10.0
193.4	198.0	4.6
169.1	206.4	37.3
139.8	163.9	24.2
133.7	145.1	11.5
123.0	125.7	2.7
98.9	107.8	8.9
60.4	71.4	11.0
35.2	40.7	5.5

La columna promedio muestra la estimación mensual de la evaporación cuando se utilizan datos promedios, en este caso un año promedio (el promedio es diario y usando el intervalo de 1968 a



2005). La columna Ola de Calor, es la estimación de la evaporación usando un año en donde se presentó el fenómeno de la Ola de Calor. En la columna de Diferencia se observa que se puede subestimar demasiado el efecto de la evaporación al utilizar los datos promediados, subestimaciones de alrededor de 13 mm/mes en promedio con una máxima de 37 mm/mes.

Utilizando la ecuación [1. 71], se tiene la siguiente estimación:

**Tabla 5. 26 Estimación de la evaporación (mm), aplicando la ecuación 1.72**

Ecuación 1.72		
Promedio	Ola de Calor	Diferencia
99.2	107.3	8.1
103	116.6	13.5
146.3	162.6	16.3
173.8	183.6	9.8
198.1	202.8	4.7
184.7	221	36.3
174.1	197.6	23.6
172.8	183.9	11.1
164.2	166.8	2.6
150	158.6	8.5
118.6	127.8	9.2
104.1	108.2	4.2

Al aplicar la ecuación [1. 71] se obtienen mayores estimaciones de la evaporación, sobre todo en los meses de enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre. En esta parte la diferencia tiene un promedio mensual de 12 mm con una máxima de 36 mm.

El municipio de Atlacomulco presenta pocos eventos de Ola de Calor (tiene alrededor del 10% de probabilidad de que ocurra en un año). Esta baja ocurrencia es lo que resalta la diferencia de usar datos promedios o datos con el evento de la Ola de Calor, ya que los datos promedios no aportan la suficiente información sobre las altas temperaturas que se puede presentar en la zona. Si el fenómeno de la Ola de Calor es recurrente, entonces el promedio de los datos puede ser suficiente para estimar la evaporación.



## 6 Conclusiones y observaciones

Para el estudio de cualquier fenómeno, se requiere como primera parte definirlo. Una vez definido se procede a determinar sus propiedades o características. Esta es la parte fundamental de este trabajo. Se tomo el fenómeno de Ola de Calor, se dio una definición, se determinaron sus parámetros y se observaron sus efectos.

Dada la información climática disponible, la temperatura (máxima y mínima) es la variable que mejor puede describir el fenómeno. Todos los criterios encontrados sobre el tema hacen uso de esta variable.

Los umbrales relativos dan una mejor descripción del fenómeno. Pueden ser usados para toda la República Mexicana al considerar las características climáticas del lugar; por lo que estos umbrales deben ser usados en los sectores que involucren la interacción con seres vivos (agricultura, ganadería, salud, etc.). Los umbrales absolutos solo deben ser usados para considerar efectos en los sectores de servicio (agua potable, caminos, aprovechamientos hidráulicos, etc.).

Los parámetros que se propusieron en el primer criterio, se pueden clasificar en dos: Primarios y Secundarios. Los parámetros primarios son los que se obtienen directamente del fenómeno de la Ola de Calor y los parámetros secundarios son los que se obtienen a través de alguna combinación de los anteriores.

Los parámetros primarios fueron:

- Fecha de inicio.
- Fecha de término.
- Duración.
- Número de eventos al año.
- Temperaturas máximas.

Los parámetros secundarios son:

- Intensidad.
- Temperatura de alivio.
- Severidad.
- Mes más probable.
- Día de inicio de la temporada de la Ola de Calor.
- Día de término de la temporada de la Ola de Calor.
- Probabilidad de ocurrencia.
- Días de temperada.

Los parámetros que se proponen en el segundo criterio, también se clasificaron en dos:

Parámetros primarios.

- Duración.
- Número de eventos.
- Día de inicio
- Día de Término.

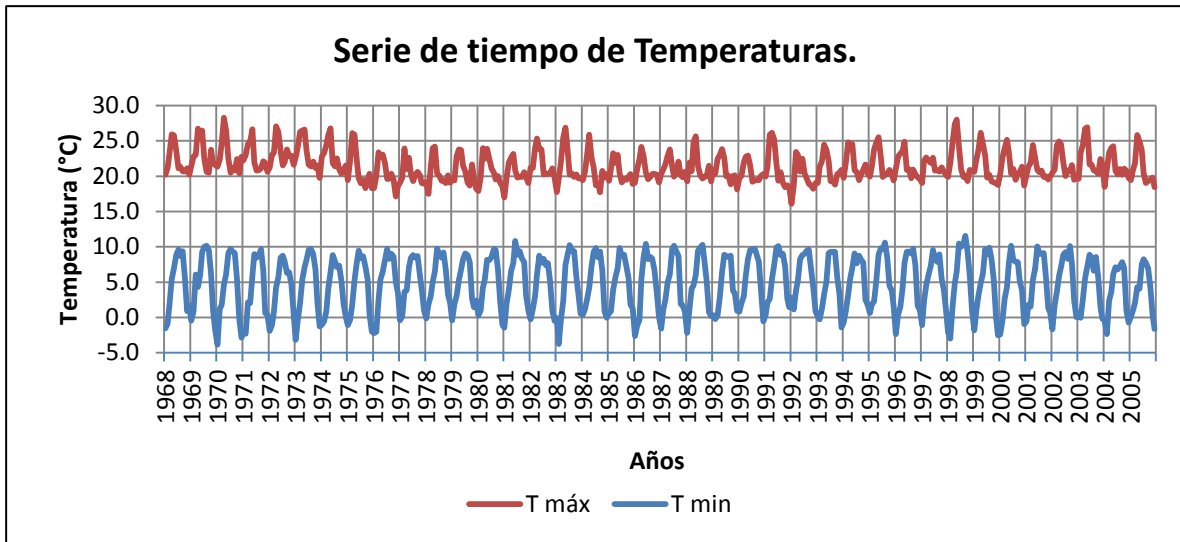
Parámetros secundarios.

- Sensibilidad térmica.
- Intensidad en exceso.
- Temperatura de la Ola de Calor.
- Temperatura esperada.
- Periodicidad.
- Mes más probable.
- Probabilidad de ocurrencia.

Al igual que en el primer criterio, los parámetros primarios son los que se obtienen directamente del fenómeno de Ola de Calor, los secundarios se obtienen con alguna combinación de los parámetros primarios.

A través del análisis de las Olas de Calor, se observó que aunque son cíclicas son aperiódicas, por lo que no es posible predecir el fenómeno sobre todo para períodos largos. El tomar años o meses anteriores no aporta información relevante sobre la aparición de las Olas de Calor.

Se observa que el fenómeno de ola de calor, la anomalía de la temperatura mínima es la que genera el evento. En la Gráfica 6.1, se observa la temperatura promedio mensual, tanto de la serie máxima como mínima. Los años con Ola de Calor fueron: 1969, 1972, 1974, 1979, 1980, 1995, 1996, 1997, 1998. Como se puede observar en la gráfica, no se observa ninguna anomalía en los promedios de las temperaturas.

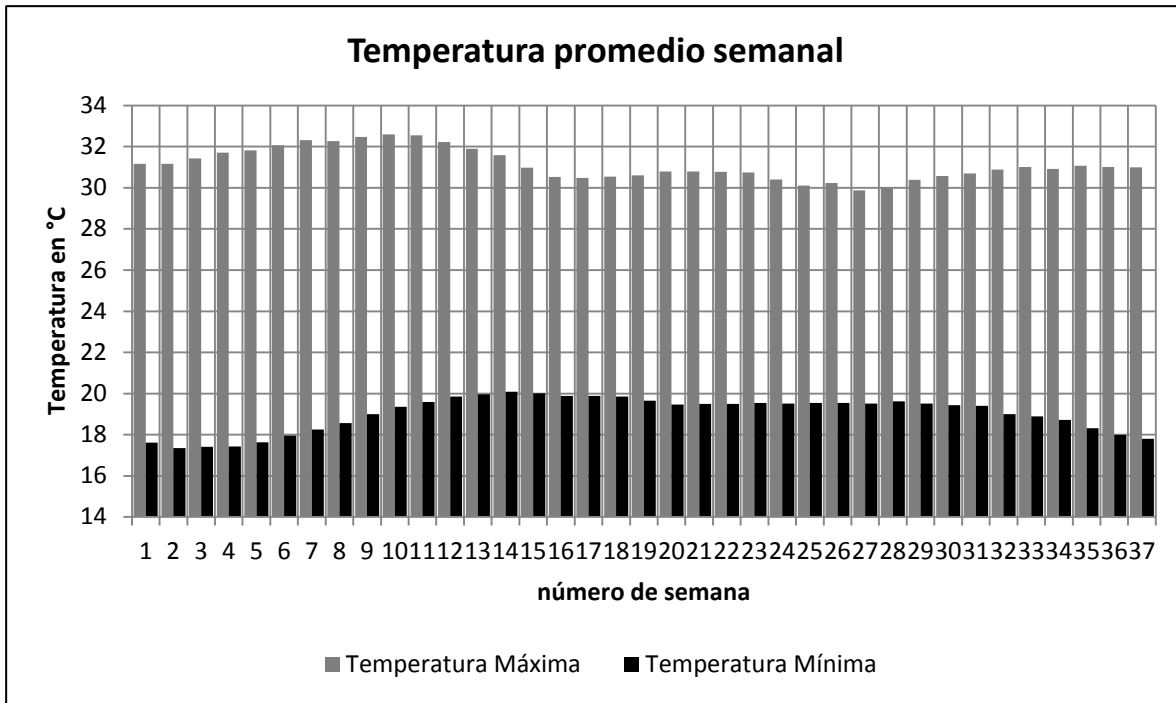


Gráfica 6.1 Serie de tiempo de temperatura.

Predecir la temperatura, utilizando la temperatura de días anteriores, en general no da buenos coeficientes de determinación. Por lo que no se profundizó mucho en ese aspecto.

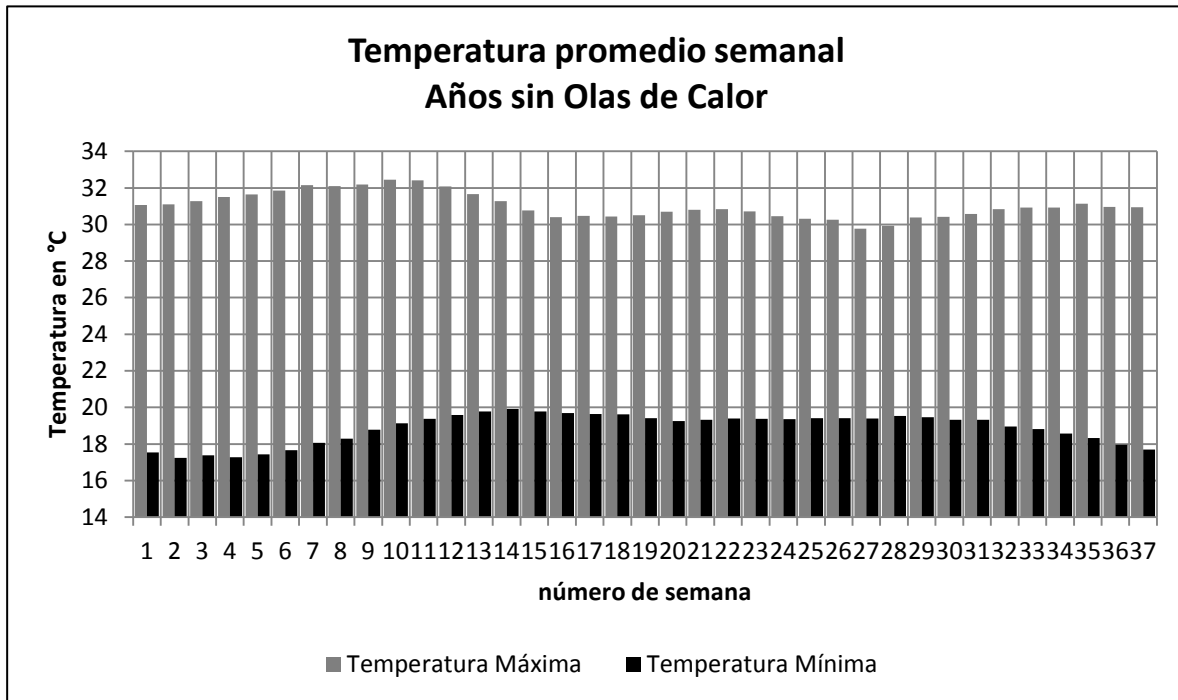
El Sistema Meteorológico Nacional (SMN), así como diversos organismos climatológicos, ofrecen un servicio de pronóstico del clima de 1 a 7 días (en el caso de SMN). Esos pronósticos utilizan varias variables climáticas, incluso imágenes satelitales o de radar para su elaboración. Esta información puede ser utilizada para predecir una Ola de Calor con una anticipación máxima de 6 días.

Las Olas de Calor son una anomalía de altas temperatura, tanto en la serie de temperaturas máximas como en la de mínimas. En general, hay un desfase de altas temperaturas de la serie de máximas con respecto a la serie de mínimas. Esto se puede observar en la siguiente gráfica.



Gráfica 6.2 Temperatura promedio semanal de un año promedio

Las máximas temperaturas en la serie de las máximas, ocurren entre la semana 7 y la 11 (empezando la cuenta en enero), mientras que las máximas temperaturas en la serie de las mínimas ocurren entre la semana 13 y 15. Si se toman el promedio de los años sin Olas de Calor, se presenta prácticamente el mismo comportamiento.

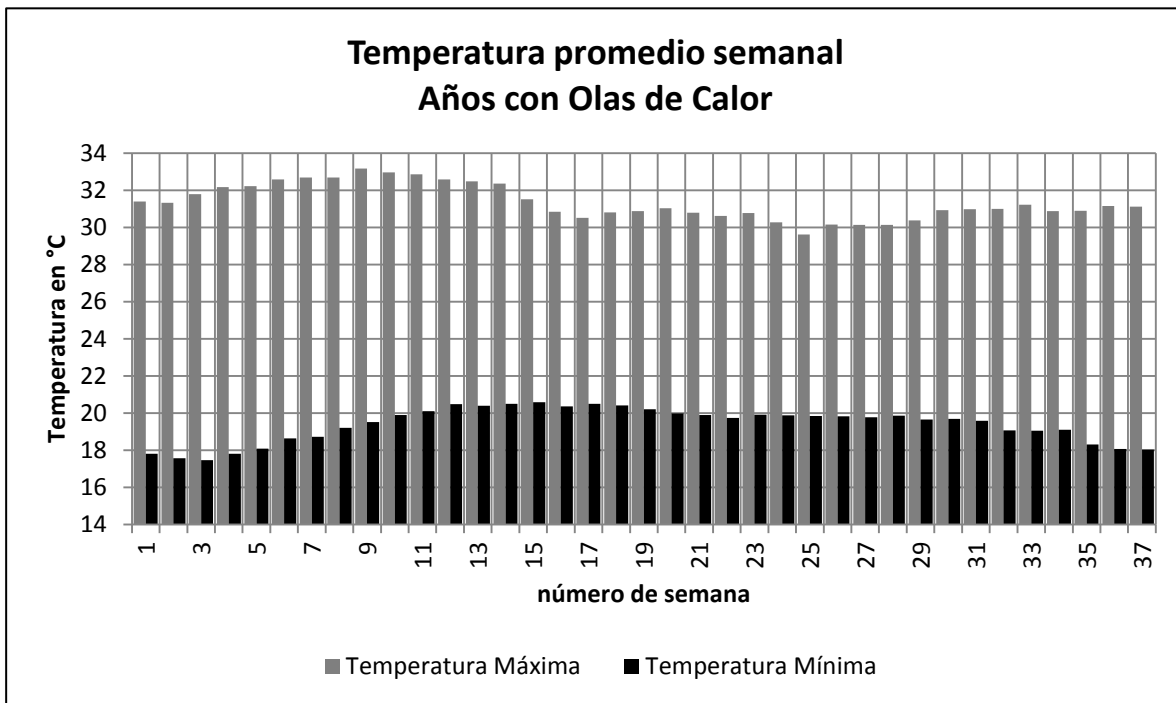


Gráfica 6.3 Temperatura promedio semanal, promedio de años sin Olas de Calor

La Gráfica 6.3 muestra que la serie de temperatura máxima presenta sus temperaturas más altas entre la semana 7 y la 11, mientras que en la serie de temperaturas mínimas se presentan entre la semana 14 a la 16.

En los años que se presenta el fenómeno de la Ola de Calor. En la serie de temperatura mínima se adelanta la aparición de las altas temperaturas, comenzando desde la semana 10 y terminando en la semana 19. Las altas temperaturas de la serie de temperatura máxima empiezan en la semana 6 y terminan en la 14.

Como se observa, hay un período común entre ambas, en este caso entre la semana 10 y la 14. Esto Conlleva a la aparición de la Ola de Calor, ya que de acuerdo con la definición, es cuando se presenta una anomalía en ambas series de temperatura en al menos dos días consecutivos. Sin embargo se desconoce el mecanismo que hace que las temperaturas mínimas se adelanten.



Gráfica 6.4 Temperatura promedio semanal, promedio de años con Olas de Calor

En el primer criterio, el día de inicio es un parámetro importante en el rendimiento de los cultivos, ya que al aparecer en semanas tempranas, afecta principalmente la etapa de germinación de las plantas. Otro de los parámetros que mayor impacto tienen en el rendimiento es la Severidad, la duración y la temperatura de alivio. Los demás parámetros no muestran relaciones tan claras, aunque la cantidad de información no es lo suficientemente grande como para descartarlos.

En cuanto al segundo criterio, el día de inicio, de término y de temporada son los parámetros más importantes, seguidos de la sensibilidad térmica, la duración.

Los impactos de la Ola de Calor se observan en mayor medida en los años húmedos. Esto puede deberse a que en los años de sequía, es la sequía la que tiene el mayor impacto sobre el rendimiento, dejando a la Ola de Calor como un fenómeno secundario. En los años húmedos, en donde se tiene mayor disponibilidad de agua, es la Ola de Calor el fenómeno que tiene mayor relevancia o puede explicar la diferencia de los rendimientos. Esto es congruente con los cultivos que son por riego, ya que el rendimiento no guarda relación con el año húmedo o seco, sin embargo las diferencias entre los rendimientos si guarda relación con algunos parámetros de la Ola de Calor.

Es importante señalar, que falta estudiar más fenómenos hidrometeorológico (heladas, huracanes, inundaciones, etc.,) para poder separar y definir más concretamente la participación de la Ola de Calor en el rendimiento, sin embargo por la extensión de la zona de estudio y por los tiempos, no fue posible realizar esta parte y solo analizó la sequía.

En el estudio, no se observa un aumento o una tendencia en la duración ni en el número de eventos. Estudios sobre el cambio climático, afirman que la temperatura está aumentando, sin embargo en este trabajo se concluye que, bajo la definición propuesta, el evento es extremo, aleatorio, cíclico y aperiódico.

Este estudio también arroja que existen zonas de mayor riesgo de presentar el fenómeno de la Ola de Calor, como se puede observar en el mapa 4.8 la parte Norte y Oeste del estado de Aguascalientes presenta una probabilidad anual de ocurrencia de 0.7, mientras que la zona centro las probabilidades son de 0.5 y 0.4

En este trabajo se propuso un umbral y una duración que se uso para la caracterización de la Ola de Calor y con ellos analizar los efectos en el sector agropecuario, así como observar la diferencia en el cálculo de la evaporación al considerar un año promedio y uno en donde se presentó el fenómeno.

Es importante señalar que el umbral propuesto es estadístico y se uso indistintamente en el sector agropecuario. Sin embargo es posible determinar umbrales y duraciones propias para cada especie y con ello mejorar los resultados.

De acuerdo con el trabajo realizado, en lo referente a las distribuciones mixtas, se concluye que el modelo que mejor se ajusta para estimar el día de inicio y término para las Olas de Calor y las Heladas es la Distribución Normal Mixta.

Por último, también se observa que al no considerar el fenómeno de la Ola de Calor puede subestimar de una forma importante la evaporación. Esto impacta directamente el cálculo de los balances y por consiguiente el diseño de los aprovechamientos hidráulicos.



## 7 Referencias bibliográficas

[http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/faq.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/faq.html)

<http://www.astronomia.com/tierraluna/tiempoclima.htm>

[http://omega.ilce.edu.mx:3000/sities/ciencia/127/htm/sec\\_8.htm](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sities/ciencia/127/htm/sec_8.htm)

<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/367/cambioysalud.html>.

[http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/sabycono/sabyconoporque.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sabycono/sabyconoporque.html).

<http://www.uag.mx/Alma/may-jun03/climatico.htm>.

## Bibliografía

[http://64.233.179.104/translate\\_c?hl=es&sl=en&u=http://www.redcross.org/general/0,1082,0\\_243\\_4426,00.html&prev=/search%3Fq%3Dheat%2Bwave%26hl%3Des](http://64.233.179.104/translate_c?hl=es&sl=en&u=http://www.redcross.org/general/0,1082,0_243_4426,00.html&prev=/search%3Fq%3Dheat%2Bwave%26hl%3Des).

Anderson, C. A. (1989). Temperature and Agression: Ubiquitous effects of heat on occurrence of human violence. *106*(1), 74-96.

Aparicio, F. (2004). Fundamentos de la hidrología superficial. México, D. F.: Limusa.

Ballester, F. (1996). Meteorología y salud. Relación entre la temperatura ambiental y la mortalidad. *70*, 251-259.

Ballester, F., Corella, D., Pérez-Hoyos, S., Sáez, M., & Hervás, A. (1997). Mortality as a function of temperature. A study in Valencia. *26*(3), 551-561.

Barrow, E. M., & Hulme, M. (1996). Changing probabilities of daily temperature extreme in the UK related to future global warming and changes in climate variability. *6*, 21-31.

Boucher, K. (1997). Hydrological monitoring and measurement methods, contemporary hydrology: Towards holistic environment science. England: Journal Hydrological science.

Brake, R., & Bates, G. (2002). A valid method for comparing rational and empirical heat stress indices. *46*(2), 165-174.

Campos Aranda, D. F. (2000). Heladas, Orígenes, Predicción, Pronóstico y defensa. (Jul-Sep), 14-17.

Campos Aranda, D. F. (2003). *Introducción a los métodos numéricos: Software en BASIC y aplicaciones en hidrología superficial*. México: Universidad Autonoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería.

Campos Aranda, D. F. (2007). Estimación y aprovechamiento del escurrimiento.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill.

CLICOM. (2009). Base de datos de las estaciones climatológicas. Comisión Nacional del Agua. Servicio Meteorológico Nacional.

- CM. (2005). *Vigilancia y control de los efectos de las olas de calor. Plan de respuesta ante los riesgos*. Madrid. España: Comunidad de Madrid. Consejería de sanidad y consumo.
- Conde, C., & Ferrer, R. (2006). Climate change and climate variability impacts on rainfed agriculture activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *19*(3), 181-194.
- Cruzado Japan, J. H. (2004). *Algoritmos de estimación e interpolación de parámetros geofísicos*. Puerto Rico: Tesis de maestría en Ciencias de Ingeniería en computación. Universidad de Puerto Rico.
- Deraisme, J., & De Fouquet, C. (May de 1996). The geostatistical approach for reserves. *Mining Magazine*, *5*(175), 309-313.
- Escalante, C. A., & Reyes, L. (2004). *Análisis de sequías* (Vol. I y II). México, D. F.: Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Escalante, C. A., & Reyes, L. (2005). *Técnicas estadísticas en Hidrología*. México, D. F.: Facultad de Ingeniería. UNAM.
- FEMA. (USA). *Extreme heat (heat wave)*. Columbia: Federal Emergency Management Agency, University of Missouri.
- Ferris, R., Ellis, R. H., wheeler, T. R., & Hadley, P. (1998). Effect of high temperature estress at anthesis in grain yeild and biomass of field-grown crops of wheat. *82*, 631-639.
- García, J., & Alberdi, J. (2004). Mortalidad en la ciudad de Madrid durante la Ola de Calor del verano de 2003. *(5)*, 19-39.
- García, P., Cabrera, S., Sánchez, J., & Pérez, A. (2009). Rendimiento del maíz y las épocas de siembra en los llanos occidentales de Venezuela. *59*(2), 161-172.
- Gibbs, W. J., & Maher, J. V. (1967). Rainfall deciles as drought indicatos. *(48)*.
- Graves, D., & Chang, H. (s.f.). Hydrologic impacts of climate change in the Upper Clackamas River Basin. *(33)*, 143-157.
- Hair, F. (2008). *Análisis multivariante*. España: Prentice hall.
- Herrera Alanís, L. (2006). *Efectos de la escases de agua en el sector agropecuario en el estado de Querétaro, México*. México, D. F.: Tesis de Maestría. UNAM.
- Herrera Alanís, L., & Escalante Sandoval, C. A. (2010). Comparación de funciones mixtas para la determinación de fechas de inicio y término de la temporada de heladas.
- Herrera Alanís, L., & Escalante Sandoval, C. A. (2012). En Proceso.
- Herrera, S. (s.f.). *Homegeneización e interpolación de observaciones de alta resolución*. España: Instituto Nacional de Meteorología. Universidad de Cantabria.
- Huyen, M., Martens, P., Schram, D., Weijenberg, M., & Kunts, A. (2001). The impacts od heat waves and cold spell on mortality rates in the dutch population. *109*(5), 463-470.
- INEGI. (varios). *Anuarios estadísticos por estado y municipio*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Jáuregui, E. (2002). Are heat waves incresing their frequency in México city?
- Kalkstein, L., & Valimont, K. (1987). Climate effects on human health. In potencial effects of future climate changes on forests and vegetation, agriculture, water resource, and human health. *122-52*(25389).
- Linacre, E. (1997). a simple formula for estimating evaporations rates in various climates, using temperature data alone. *18*, 409-424.
- López, J. A. (2004). Análisis de tendencias en las olas de calor a partir de series largas de temperatura.

- Lucy, M. C. (s.f.). *Reproductive loss in farm animals during heat stress*. University of Missouri.
- Mahakur, M., Narkhedkar, S. G., Sinha, S. K., & Mahajan, P. N. (2004). Objective analysis of daily extreme temperature over Indian region. 207-223.
- Martínez Arias, R. (1999). *El análisis multivariante en la investigación científica*. España: La muralla.
- MMA. (2005). *Aspectos Climatológicos en relación con el exceso de temperatura. Verano 2005*. España: Ministerio del Medio Ambiente.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2007). *Probabilidad y estadística aplicada a la Ingeniería*. México, D. F.: Limusa-Wiley.
- Pennington, J., & Van Devender, K. (s.f.). Heat stress in dairy cattle.
- Robinson, P. (2001). On the definition of a heat wave. 40, 762-775.
- Smoyer-Tomic, K., Kunh, R., & Hudson, A. (2003). Heat wave hazards: An overview of heat wave impacts in Canada. (28), 463-485.
- Steadman, R. G. (1979). The assessment of sultriness. Part I: A temperature-Humidity index based on human physiology and clothing science. 18, 874-885.
- Steadman, R. G. (1979). The assessment of sultriness. Part II: Effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature. 18, 1674-1687.
- Steadman, R. G. (1984). A universal scale of apparent temperature. 23, 1674-1687.
- Sutter, S. (s.f.). *A guide to agricultural heat stress*. EEUU: University of California, cooperative extension Fresno, Kings, Madera and Tulare Countries.
- Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I. R., Utrera-Zárate, A., & Rodríguez-Viqueira, L. (2005). El concepto de Temperatura Efectiva aplicado a las tarifas eléctricas domésticas en el oriente de México. (58), 106-121.
- Trujillo, R., Lores, M., & Rasua, M. (2001). Algoritmo eficiente para procesos de estimación geoestadísticos. XVIII(3-4), 73-75.
- Went, J. W. (2003). Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131-2144.
- Went, J. W. (s.f.). Balancing diets for dairy cattle during heat stress conditions.
- Went, J. W., Mullinix, B. G., & Bernard, J. K. (2003). Effects of hot, humid weather on milk temperature, dry matter intake and milk yield of lactating dairy cows. 86(1), 232-242.



## I. Anexos

### Programas desarrollados en MATLAB

En esta parte se presentan los programas realizados para la elaboración de la Tesis Doctoral. Los programas se desarrollaron en MATLAB que es un programa de lenguaje intermedio y tiene múltiples subrutinas las cuales facilitan la programación.

Los programas aquí presentados a su vez tienen subrutinas que pueden ser compartidas por varios programas. Las subrutinas, en este caso particular, fueron necesarias para tener un mejor control de los cálculos y para la detección de errores.

No se presentan todas las subrutinas por cuestión de espacio. En la mayoría de las subrutinas se quitaron los comentarios.. Las subrutinas faltantes y los comentarios se entregaran en un CD.

### I.1 Modelos de interpolación

Los modelos de interpolación elaborados para este trabajo fueron: Polinomial, Aproximación Lagrange, Distancia inversa, Distancia inversa al cuadrado, Distancia inversa óptima, Multicuadrática, Óptima inversa, Óptima exponencial, Óptima potencial, Kriging lineal, Kriging Monómico y Regresión múltiple.

Estos programas fueron desarrollados para la preparación de un artículo (anexo 8.2), en el cual se analizaron diferentes combinaciones de estaciones.

Para reducir espacio, las siguientes instrucciones que son comunes a los programas de interpolación, se agruparon en la variable ABC1.

```
Apoyo=textread('ArchivoEstacionesApoyo.txt'); %archivo de estaciones de apoyo
[ra,ca]=size(Apoyo);
Comb=textread('combinacion.txt'); %archivos de combinaciones.
[rc,cc]=size(Comb);
    Estac=textread('ArchivoEstacionEstudio.txt');
    CoorEst(1,1)=Estac(2,4);
    CoorEst(2,1)=Estac(3,4);
    DatosEst=Estac(4:ra,4);
```

### I.1.1 Interpolación polinomial

ABC1

```
for j=4:rc
    contComb=0;
    for jj=1:cc
        if Comb(j,jj)~=0
            contComb=contComb+1;
            coodApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3);
            coodApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3);
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3);
        end
    end
    if contComb-1<2
        display('tiene dos datos')
        Mon=0;
    else
        [MonA,MonE]=Monimio(coodApoyo,CoorEst);
        W=((inv(MonA*MonA')*MonA)'*MonE)';
        interp=DatosApoyo*W';
        EEA=(interp-DatosEst).^2;
        [rw,cw]=size(W);
        for aw=1:cw
            Peso(j,aw)=W(1,aw);
        end
        sumaW(j,:)=sum(W);
        sumaEEA(j,:)=sum(EEA);
    end
    clear MonA
    clear MonE
    clear DatosApoyo
    clear coodApoyo
end
```

### I.1.2 Aproximación de Lagrange

ABC1

```
for j=4:rc
    contComb=0;
    for jj=1:cc
        if Comb(j,jj)~=0
            contComb=contComb+1;
```

```
        coodApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3);
        coodApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3);
        DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3);
    end
end
if contComb-1<2
    display('tiene dos datos')
    Mon=0;
else
    [MonA,MonE]=Monomio(coodApoyo,CoorEst);
    W=(inv(MonA)*MonE)';
    interp=DatosApoyo*W';
    EEA=(interp-DatosEst).^2;
    [rw,cw]=size(W);
    for aw=1:cw
        Peso(j,aw)=W(1,aw);
    end
    sumaW(j,:)=sum(W);
    sumaEEA(j,:)=sum(EEA);
end
clear MonA, MonE, DatosApoyo,coordApoyo
end
```

### I.1.3 Interpolación Distancia inversa

ABC1

```
for j=1:rc
    contComb=0; %este es un contador
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas
            contComb=contComb+1;
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae valores de la estación
        end
    end
    [P,W,S]=DistanciaInversa1(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
    [rp,cp]=size(P);
    for k=1:cp
        Peso(j,k)=P(1,k);
    end
    sumaW(j,:)=W;
```

```
    sumaEEA(j,:)=S;  
end  
clear P, W, S
```

#### I.1.4 Interpolación Distancia inversa al cuadrado

ABC1

```
for j=1:rc  
    contComb=0; %este es un contador  
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón  
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas  
            contComb=contComb+1;  
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo  
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y  
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación  
        end  
    end  
    [P,W,S]=DistanciaInversa2(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);  
    [rp,cp]=size(P);  
    for k=1:cp  
        Peso(j,k)=P(1,k);  
    end  
    sumaW(j,:)=W;  
    sumaEEA(j,:)=S;  
end  
clear P, W, S
```

#### I.1.5 Interpolación Distancia inversa óptima

ABC1

```
for j=1:rc  
    contComb=0; %este es un contador  
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón  
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas  
            contComb=contComb+1;  
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo  
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y  
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación  
        end  
    end  
end
```



```
        estacion(1,contComb)=Apoyo(1,Comb(j,jj)+3);
    end
end
[P,W,S,N]=DistancialInversaN(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
[rp,cp]=size(P);
for k=1:cp
    Peso(j,k)=P(1,k);
end
sumaW(j,:)=W;
sumaEEA(j,:)=S;
ExpoN(j,:)=N;
end
clear P,W,S,N
```

### I.1.6 Interpolación Multicuadrática con multiplicador de Lagrange

ABC1

```
for j=1:rc
    contComb=0; %este es un contador
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas
            contComb=contComb+1;
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación
        end
    end
    [P,W,S]=Multicuadratica(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
    [rp,cp]=size(P);
    for k=1:rp
        Peso(j,k)=P(k,1);
    end
    sumaW(j,:)=W;
    sumaEEA(j,:)=S;
end
clear P, W, S
```

### I.1.7 Interpolación Óptima lineal

ABC1

```
for j=1:rc
    contComb=0; %este es un contador
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas
            contComb=contComb+1;
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación
            estacion(1,contComb)=Apoyo(1,Comb(j,jj)+3);
        end
    end
    [P,W,S,C]=OptimaInversa1(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
    P=P';
    [rp,cp]=size(P);
    for k=1:cp
        Peso(j,k)=P(1,k);
    end
    sumaW(j,:)=W;
    sumaEEA(j,:)=S;
    ExpoC(j,:)=C;
end
clear P, W, S, C
```

**%Este programa realiza la interpolación óptima Exponencial**

ABC1

```
for j=1:rc
    contComb=0; %este es un contador
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas
            contComb=contComb+1;
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X de apoyo
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación
            estacion(1,contComb)=Apoyo(1,Comb(j,jj)+3);
        end
    end
    [P,W,S,C]=OptimaExponencial(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
    P=P';
    [rp,cp]=size(P);
    for k=1:cp
        Peso(j,k)=P(1,k);
    end
end
```

```
end
sumaW(j,:)=W;
sumaEEA(j,:)=S;
ExpoC(j,:)=C;
end
clear P, W, S, C
```

### I.1.8 Interpolación Óptima potencial

ABC1

```
for j=1:rc
    contComb=0; %este es un contador
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas
            contComb=contComb+1;
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación
            estacion(1,contComb)=Apoyo(1,Comb(j,jj)+3);
        end
    end
    [P,W,S,C]=OptimaPotencia(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
    P=P';
    [rp,cp]=size(P);
    for k=1:cp
        Peso(j,k)=P(1,k);
    end
    sumaW(j,:)=W;
    sumaEEA(j,:)=S;
    ExpoC(j,:)=C;
end
clear P, W, S, C
```

### I.1.9 Interpolación Kriging lineal

ABC1

```
for j=1:rc
    contComb=0; %este es un contador
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas
```

```
    contComb=contComb+1;
    coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo
    coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y
    DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación
    estacion(1,contComb)=Apoyo(1,Comb(j,jj)+3);
end
end
[P,W,S,C]=KrigingLineal(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
P=P';
[rp,cp]=size(P);
for k=1:cp
    Peso(j,k)=P(1,k);
end
sumaW(j,:)=W;
sumaEEA(j,:)=S;
ExpoC(j,:)=C;
end
clear P, W, S, C
```

### I.1.10 Interpolación Kriging monómico

ABC1

```
for j=1:rc
    contComb=0; %este es un contador
    for jj=1:cc %este ciclo busca las estaciones por renglón
        if Comb(j,jj)~=0 %esta condición es para buscar estaciones validas
            contComb=contComb+1;
            coorApoyo(1,contComb)=Apoyo(2,Comb(j,jj)+3); %extrae coordenada X estación apoyo
            coorApoyo(2,contComb)=Apoyo(3,Comb(j,jj)+3); %extrae la coordenada Y
            DatosApoyo(:,contComb)=Apoyo(4:ra,Comb(j,jj)+3); %extrae los valores de la estación
            estacion(1,contComb)=Apoyo(1,Comb(j,jj)+3);
        end
    end
end
[P,W,S,C]=KrigingMonomico(coorApoyo,CoorEst,DatosApoyo,DatosEst);
P=P';
[rp,cp]=size(P);
for k=1:cp
    Peso(j,k)=P(1,k);
end
sumaW(j,:)=W;
sumaEEA(j,:)=S;
ExpoC(j,:)=C;
```

```
end  
clear P, W, S, C
```

## I.2 Análisis de la Ola de Calor

### I.2.1 Programa para determinar las Olas de Calor con el primer criterio

```
A=textread('Archivotmaxima.txt');  
B=textread('Archivotminima.txt');  
C=A;  
D=C;  
[r,c]=size(A);  
C(4:r,:)=A(4:r,:)-B(4:r,:);  
D(4:r,:)=0.5*(A(4:r,:)+B(4:r,:));  
PEMAX=parametrosEstadisticos(A);  
PEMIN=parametrosEstadisticos(B);  
PEDIF=parametrosEstadisticos(C);  
PEPRO=parametrosEstadisticos(D);  
[DOC,IDOC,SMAOD,SMINOD]=datosOlaCalor(A,PEMAX,B,PEMIN,C,PEDIF,D,PEPRO);  
[POC,IPOC]=parametrosOlaCalor(DOC,IDOC,PEMAX,PEMIN,PEDIF,PEPRO);  
PAOC=parametrosAnuales(POC);  
IPAOC=parametrosAnuales(IPOC);  
PFOC=parametrosFinales(POC,PAOC);
```

### I.2.2 Subrutina para determinar los parámetros estadísticos y umbral del primer criterio

```
function A1=parametrosEstadisticos(A)  
[r,c]=size(A);  
A1(1,4:c)=A(1,4:c);  
A1(2,4:c)=mean(A(4:r,4:c));  
A1(3,4:c)=median(A(4:r,4:c));  
A1(4,4:c)=std(A(4:r,4:c));  
A1(5,4:c)=A1(2,4:c)+1.28155*A1(4,4:c);  
A1(6,4:c)=A1(2,4:c)+1.40507*A1(4,4:c);  
A1(7,4:c)=A1(2,4:c)+1.55477*A1(4,4:c);  
A1(8,4:c)=A1(2,4:c)+1.75069*A1(4,4:c);  
A1(9,4:c)=A1(2,4:c)+2.05375*A1(4,4:c);
```

### I.2.3 Programa para determinar los parámetros de las Olas de Calor de acuerdo al primer criterio

```
function D=parametrosOlaCalor(C,D);
[r,c]=size(C); %se determina el tamaño de la matriz.
C(r+1,:)=0;
n=1; %esta variable es para llevar el conteo de las columnas
for j=1:6:c;
    m=1; %lleva el conteo de los renglones
    p=0; %variable para determinar el inicio de la ola de Calor
    cont=0; %contador para la duración
    D(m,n)=C(1,j); %guarda el valor de la estación
    for i=2:r;
        if C(i,j)~=0;
            if p==0;
                D(m,n+1)=C(i,j); %año
                D(m,n+2)=C(i,j+1); %mes
                D(m,n+3)=C(i,j+2); %dia
                D(m,n+4)=DiaCalendario(D(m,n+1),D(m,n+2),D(m,n+3),0);
                stmax=C(i,j+3); %intensidad temperatura máxima
                stmin=C(i,j+4); %intensidad temperatura mínima
                ta=stmax-stmin; %temperatura de alivio mínima
                tmmax=stmax; %temperatura maxima registrada
                tmmin=stmin; %temperatura mínima registrada
                cont=cont+1; %sigue el conteo
                p=1;
            else p==1;
                if C(i,j+5)+1==C(i+1,j+5);
                    stmax=stmax+C(i,j+3); %intensidad temperatura máx
                    stmin=stmin+C(i,j+4); %intensidad temperatura mín
                    if ta>=(C(i,j+3)-C(i,j+4));
                        ta=(C(i,j+3)-C(i,j+4));
                    end
                    if tmmax<=C(i,j+3);
                        tmmax=C(i,j+3);
                    end
                    if tmmin<=C(i,j+4);
                        tmmin=C(i,j+4);
                    end
                    cont=cont+1;
                else
                    cont=cont+1;
                    D(m,n+5)=(stmax+C(i,j+3))/cont;
                end
            end
        end
    end
end
```

```
D(m,n+6)=(stmin+C(i,j+4))/cont;
D(m,n+7)=D(m,n+5)-D(m,n+6);
if ta>=(C(i,j+3)-C(i,j+4));
    D(m,n+8)=(C(i,j+3)-C(i,j+4));
else
    D(m,n+8)=ta;
end
if tmmax<=C(i,j+3);
    D(m,n+9)=C(i,j+3);
else
    D(m,n+9)=tmmax;
end
if tmmin<=C(i,j+4);
    D(m,n+10)=C(i,j+4);
else
    D(m,n+10)=tmmin;
end
D(m,n+11)=cont;
D(m,n+12)=0.5*D(m,n+7)*(D(m,n+5)+D(m,n+6))*cont;
D(m,n+13)=DiaCalendario(C(i,j),C(i,j+1),C(i,j+2),1);
cont=0;
p=0;
tmmin=0;
tmmax=0;
ta=0;
stmax=0;
stmin=0;
m=m+1;
end
end
end
D(1:m-1,n)=D(1,n);
n=n+14;
end
```

### I.3 Programa para determinar las Olas de Calor con el segundo criterio

```
A=textread('ArchivoDatos.txt');
B=textread('ArchivoTempMaximas.txt');
C=textread('ParamEstadSerieMax.txt');
[r,c]=size(B);
```

```
D=B;
for i=4:r
    D(i,4:c)=D(i,4:c)-C(5,4:c);
end
m=1;
n=1;
for j=4:c
    E(m,n:n+8)=A(1,j);
    m=m+1;
    for i=4:r-1
        if A(i,j)>0 & D(i,j)>0
            if (A(i+1,j)>0 & D(i+1,j)>0) | (A(i-1,j)>0 & D(i-1,j)>0)
                E(m,n)=A(i,1);           %año
                E(m,n+1)=A(i,2);         %mes
                E(m,n+2)=A(i,3);         %dia
                E(m,n+3)=A(i,j);         %anomalía T mínima
                E(m,n+4)=B(i,j);         %temperatura máxima
                E(m,n+5)=D(i,j);         %diferencia TM-P90
                E(m,n+6)=E(m,n+4)-E(m,n+3); %sensación térmica
                E(m,n+7)=E(m,n+6)-C(5,j); %sensación térmica - P90
                E(m,n+8)=i;              %indicador
            end
            m=m+1;
        end
    end
    n=n+9;
    m=1;
end
%se libera espacio
clear A, B, C, D
```

#### I.4 Programa para determinar el día de inicio y término de las Olas de Calor

```
function a=DiaCalendario(b,c,d,e);
switch c
    case 1
        a=0;
    case 2
        a=31;
    case 3
        if mod(b,4)==0
```



```
        a=60;
    else
        a=59;
    end
case 4
    if mod(b,4)==0
        a=91;
    else
        a=90;
    end
case 5
    if mod(b,4)==0
        a=121;
    else
        a=120;
    end
case 6
    if mod(b,4)==0
        a=152;
    else
        a=151;
    end
case 7
    if mod(b,4)==0
        a=182;
    else
        a=181;
    end
case 8
    if mod(b,4)==0
        a=213;
    else
        a=212;
    end
case 9
    if mod(b,4)==0
        a=244;
    else
        a=243;
    end
case 10
    if mod(b,4)==0
        a=274;
    else
```

```
        a=273;
    end
case 11
    if mod(b,4)==0
        a=305;
    else
        a=304;
    end
case 12
    if mod(b,4)==0
        a=335;
    else
        a=334;
    end
end
a=a+d;
if e==0
    if mod(b,4)==0
        a=366-a;
    else
        a=365-a;
    end
end
end
```

## **I.5 Programa para determinar las fechas de los eventos con una probabilidad seleccionada**

```
function a=fechaEvento(B,C);
[r,c]=size(B);
M=mean(B);
S= std(B);
p=r/38;
Fx1=0.01;
Fx3=0.99;
for i=1:20
    Fx2=(Fx1+Fx3)/2;
    [H1,X1]=CalcNormal(Fx1,M,S,p,C);
    [H2,X2]=CalcNormal(Fx2,M,S,p,C);
    [H3,X3]=CalcNormal(Fx3,M,S,p,C);
    if H1*H2<0
        Fx3=Fx2;
    else
```

```
        Fx1=Fx2;
    end
end
a=X1;
n=1;
    Z=textread(B);
    [r,c]=size(Z);
    for j=1:21:c
        tabla(n:n+r-1,1:21)=Z(1:r,j:j+20);
        n=n+r-1;
    end
```

## I.6 Programa para realizar las gráficas automáticamente

```
ArcComp=textread('resultadosAgriGan2criterio.txt');
[r,c]=size(ArcComp);
nr=0;
for t=1:19      %Clima [1,19] o Municipio[1:307]
    for l=44:44  %Parámetros [25,44]
        for j=3:22 %Rendimientos [3,22]
            ind(1,1)=t;
            ind(1,2)=l;
            ind(1,3)=j
            CT=ClimaTexto(t);
            [Varia,TVaria]=VariableTexto(l-24);
            [Rend,TRend]=RendimientoTexto(j-2);
            [X,L]=ExtraeDatos(t,l,j,ArcComp,r);
            [H,S]=VerificaValores(X,L);
            if H==0
                R2H(1,1:4)=0;
            else
                H=ValorEsperado(H,l);
                [H,HA,THA,THR2,R2H]=Regresion(H);
            end
            if S==0
                R2S(1,1:4)=0;
            else
                S=ValorEsperado(S,l);
                [S,SA,TSA,TSR2,R2S]=Regresion(S);
            end
            nr=nr+1;
            Result(nr,1)=t;
            Result(nr,2)=l;
            Result(nr,3)=j;
```

```
Result(nr,5:8)=R2H;  
Result(nr,9:12)=R2S;  
if H==0 & S==0  
    newplot  
else  
    newplot  
    GraficaDatos(Varia,Rend,H,HA,S,SA,THA,THR2,TSA,TSR2,CT,Trend,TVaria)  
end  
end  
end  
end
```

### I.6.1 Subrutina para realizar gráficas automáticas

```
function GraficaDatos(Varia,Rend,H,HA,S,SA,THA,THR2,TSA,TSR2,CT,Trend,TVaria)  
newplot  
hold on  
xlabel(Varia,'FontWeight','b');  
ylabel(Rend,'FontWeight','b');  
Limi=limites(H,S);  
IT=Limi(2,1)-Limi(1,1);  
if H~=0  
    AA='Años Húmedos';  
    t1(1,1)={AA};  
    t1(2,1)={THA};  
    t1(3,1)={THR2};  
    text(Limi(1,2),Limi(2,1)-0.1*IT,t1,'FontSize',10,'FontWeight','b','BackgroundColor','cyan')  
    plot(H(:,2),H(:,1),'o','MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b')  
    plot(HA(:,2),HA(:,1),'b','LineWidth',2)  
end  
if S~=0  
    BB='Años Secos';  
    t2(1,1)={BB};  
    t2(2,1)={TSA};  
    t2(3,1)={TSR2};  
    text(Limi(1,2),Limi(1,1)+0.1*IT,t2,'FontSize',10,'FontWeight','b','BackgroundColor',[1,.6,0])  
    plot(S(:,2),S(:,1),'o','MarkerEdgeColor','r','MarkerFaceColor','r')  
    plot(SA(:,2),SA(:,1),'r','LineWidth',2)  
end  
texto1=['Clima: ',CT];  
Titulo(1,1)={texto1};  
title(Titulo,'FontWeight','b')
```

```
grid  
hold off  
aa='-';  
archivo=[TRend,aa,TVaria];  
saveas(gcf,archivo,'png');  
im=1;  
newplot
```