

## RELACIONES TÉRMICAS EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA DURANTE LA INCIDENCIA DEL FENÓMENO DE ENFRIAMIENTO O HELADA

### THERMIC RELATIONSHIPS AMONG SOIL, PLANT AND ATMOSPHERE UNDER FREEZING OR CHILLING CONDITIONS

José Sergio Barrales Domínguez<sup>1,3\*</sup>, Manuel Livera Muñoz<sup>1</sup>, Victor Arturo González Hernández<sup>1</sup>, Cecilia Peña Valdivia<sup>2</sup>, Josué Kohashi-Shibata<sup>2</sup> y Fernando Castillo González<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. C.P. 56230 Montecillo, Estado de México. Tel. y Fax: 01(595) 952-0262. <sup>2</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. C.P. 56230 Montecillo, Estado de México. <sup>3</sup> Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carr. México-Texcoco, C.P. 56230 Chapingo Estado de México. Tel. y Fax 01 (595) 952-1642. Correo electrónico barrales@correo.chapingo.mx.

\*Autor responsable

#### RESUMEN

Durante el otoño-invierno de 1991-92 se sembraron seis cultivares de maíz (*Zea mays* L.) (H-28, H-30, H-32, CPV20, Zac.58 SMC15 y Zac.58Or) y tres de haba (*Vicia faba* L.) (CAOr, CASel y CrJuch), en cinco fechas de siembra; las fechas de emergencia para maíz fueron 21 jun, 12 jul, 4 y 20 ago y 8 de sep y para haba 24 jun, 15 de jul, 6 y 23 ago y 12 sep. El objetivo del presente estudio fue analizar las relaciones térmicas entre el cultivo y el ambiente físico antes, durante y después de la incidencia de enfriamiento o helada, así como sus efectos sobre las plantas, con la hipótesis de que ninguna de las especies cultivadas evaluadas toleran las bajas temperaturas que se presentan durante las heladas. Se encontró diferencia en tolerancia al frío entre especies. El maíz mostró menor tolerancia que el haba. Con temperaturas foliares de  $-0.4$  y  $-0.7$  °C ocurrió muerte total de plantas de maíz, mientras que en haba afectó sólo a las flores. Las plantas de haba sufrieron daños letales con temperatura de  $-5$  °C y 7.5 horas de exposición, encontrando que las hojas y frutos ubicados en el estrato foliar inferior sufrieron menos daños por la protección que les brindan los estratos superiores.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., *Vicia faba*, temperatura foliar, frío, tolerancia a frío.

#### SUMMARY

During the Autumn-Winter season of 1991-92, the thermic relations between soil, plant, and atmosphere were studied in an experiment including six corn (*Zea mays* L.) varieties (H-28, H-30, H-32, CPV20, Zac.58 SMC15 and Zac.58Or) and three cultivars of faba beans (*Vicia faba* L.) (CAOr, CASel and CrJuch) in five sowing dates. The objective was to analyze the thermal relationships between plant and its environment before, during, and after chilling or freezing conditions and their effects on the plants. There were differences in cold tolerance between corn and faba beans, corn being the less tolerant. Lethal injury in corn occurred with leaf temperature of  $-0.4$  and  $-0.7$  °C, while in faba beans occurred at  $-5$  °C and 7.5 hours under freezing conditions. In faba beans, leaves and fruits covered with foliage, suffered less damage due to canopy protection.

**Index words:** *Zea mays* L., *Vicia faba* L., leaf temperature, cold, cold tolerance.

#### INTRODUCCIÓN

La variación climática regional y estacional origina que en las regiones tropicales y subtropicales de México con riego tengan estaciones de crecimiento (EC) de 12 meses. En contraste, en sus regiones templadas la EC es corta, ya que dura de 3 a 4 meses, y en las que la escasa precipitación y las bajas temperaturas, tanto al inicio como al final de la EC, son factores críticos para el crecimiento y desarrollo de las plantas de los Valles Altos de México, donde se practica agricultura adaptando los ciclos biológicos de diferentes cultivos a estas condiciones ambientales.

Las heladas ocurren cuando en la superficie del suelo y en los objetos situados sobre la misma, la temperatura es igual o inferior al punto de congelación del agua (Rosenberg *et al.*, 1983). Los daños a las plantas dependen de la especie, de la susceptibilidad del genotipo, de la etapa fenológica de la planta, del nivel mínimo de temperatura, de la tasa de enfriamiento, del tiempo de exposición y del preacondicionamiento de la planta. Además de los daños causados por las heladas, existen otros provocados por enfriamiento con temperaturas entre 0 y 10 °C, que no causan la muerte inmediata de las plantas, sino un desbalance fisiológico que afecta el rendimiento. Para reducir los daños provocados por las heladas sobre la producción de maíz (*Zea mays* L.), se ha planteado la explotación de características genéticas de tolerancia al frío y precocidad. Alternativamente, se buscan cultivos tolerantes al frío, como el haba (*Vicia faba* L.), especie que podría ser explotada durante el invierno para hacer coincidir el periodo de crecimiento vegetativo con el periodo de heladas y mantener el desarrollo reproductivo fuera de este último (Barrales y Aguilar, 1986).

La planta y su ambiente forman una unidad que funciona como tal. Sin embargo, el estudio sobre el efecto de los

factores ambientales sobre los procesos fisiológicos se ha hecho en ambientes controlados, donde se varía un solo factor ambiental. Sin embargo, es necesario hacer estudios en el campo, en donde los factores ambientales varían en el tiempo y el espacio.

Como en las estaciones meteorológicas se registra la temperatura en el interior de una garita y a una altura de 1.5 m sobre el suelo, al considerar que la temperatura del aire varía con la altura, que la temperatura del suelo es diferente a la del aire y que la temperatura de la planta cambia con su estructura morfológica, es fácil comprender que las temperaturas al abrigo no son representativas de las que tiene la planta. En este último aspecto, los estudios realizados en México son mínimos a pesar de su enorme importancia. Por esto, la presente investigación tiene como hipótesis central que las especies evaluadas no toleran las bajas temperaturas que acompañan a las heladas, y los objetivos fueron: 1) analizar las relaciones térmicas entre el cultivo y el ambiente físico, antes, durante y después de la incidencia de enfriamiento o helada, así como sus efectos sobre las plantas; 2) proponer medidas que reduzcan los efectos del enfriamiento o heladas sobre los cultivos

### REVISIÓN DE LITERATURA

Uno de los elementos climáticos más importantes para la vida de los seres vivos es la temperatura (T), debido a que sus variaciones determinan su distribución en el planeta (Ksenzhek y Volkov, 1998). Los niveles extremos de T influyen sobre el funcionamiento interno de un organismo y, por tanto, en su crecimiento y reproducción, al sufrir daños por alta temperatura, por frío o por congelamiento (Hale y Orcutt, 1987).

La T está relacionada con la energía que se intercambia entre los componentes de cualquier sistema. El análisis comparativo de las ganancias y pérdidas de energía de un cuerpo se le conoce como balance de energía; en el caso de los cultivos agrícolas el balance de energía es tratado por Kanemasu y Arkin (1974), Rosenberg *et al.* (1983) y Livera (1991), quienes consideran como flujos principales de energía a la radiación de onda corta (Roc) proveniente del sol con longitudes de onda ( $\lambda$ ) entre 0.15 y 3  $\mu\text{m}$  y la radiación de onda larga (Rol) con  $\lambda$  entre 3 y 80  $\mu\text{m}$  emitida por el suelo, plantas, nubes y componentes atmosféricos. El suelo refleja parte de la Roc que recibe del sol, otra parte la absorbe y transforma en calor, de tal manera que su radiación neta se utiliza en la evaporación del agua del suelo, para elevar la T del suelo y del aire, y para la emisión de Rol (Rosenberg *et al.*, 1983), dependiendo esta última de la T de la superficie.

Una fracción de la radiación térmica emitida por el suelo es absorbida por las plantas y el aire que las rodea, influyen-

do en las tasas de enfriamiento de todo el sistema. Las plantas reciben Roc del sol y Rol de los cuerpos que las rodean; de modo que la cantidad de energía incorporada a sus procesos biológicos depende de su capacidad de absorción, reflexión, transmisión y emisión de energía (Monteith, 1973). La forma en que se utiliza esta energía determina la temperatura del cultivo y de la hoja.

En el día, el aire en contacto con la hoja se calienta por conducción, expandiéndose y elevándose al reducir su densidad; el espacio es entonces ocupado por masas de aire más frío que sufre el mismo proceso, lo que resulta en un intercambio convectivo continuo que permite que la hoja pierda energía y se eviten daños por calentamiento. Este proceso se invierte en la noche debido a que la planta tiene, por lo general, una temperatura inferior a la del aire (Sutcliffe, 1979). El aire caliente, al estar en contacto con una hoja más fría, pierde energía y se enfría, mientras que la hoja gana energía y su T se incrementa; por enfriamiento, la densidad del aire aumenta, se hace más pesado, y se deposita sobre la superficie de la hoja. En ausencia de viento, la eficiencia de la transmisión de energía del aire a la planta es baja, y se reduce la temperatura foliar, cuyo efecto sobre la fisiología depende de la temperatura mínima que se alcance. Cuando hay corrientes de aire, se favorece el flujo continuo de energía de las capas de aire superiores de la atmósfera a la superficie de la hoja y se tiende al equilibrio térmico entre hoja y aire (Gates, 1965).

En la noche la radiación neta es negativa; es decir, la superficie pierde energía (Monteith, 1973). La energía almacenada durante el día en el interior del suelo, es transferida en la noche hacia su superficie en función del gradiente de T entre su interior y su superficie, de donde a su vez es transferida como calor sensible al aire si está más frío y como calor latente por evaporación de agua del suelo, sobre todo si existe viento con bajo contenido de humedad. Si el suelo se enfría más que el aire, ocurre un flujo de calor sensible del aire hacia el suelo, tomando el papel de única entrada de energía hacia éste durante la noche (Monteith, 1973).

Si durante un enfriamiento nocturno los niveles de radiación emitidos por suelo, planta y aire son perdidos en su totalidad hacia la atmósfera, pueden presentarse heladas (Rosenberg *et al.*, 1983), las cuales causan daños diferenciales entre especies de plantas, matando a las susceptibles, e incluso a las resistentes si el descenso de T rebasa sus límites de resistencia por la formación de hielo dentro de la planta. De hecho, la formación de hielo es prerequisite para causar el daño, por lo que evadir la formación de hielo es una manera de tolerar el frío (Levitt, 1980). En casos muy extremos de sensibilidad al frío se forma hielo intracelular, lo cual es letal para las plantas. Ahora bien, si la formación de hielo intracelular no ocurre y la T disminuye, sucede una deshidratación

del citoplasma, lo que aumenta la concentración de solutos, dando como resultado que la formación de hielo intracelular ocurra a temperaturas por abajo de 0 °C, fenómeno conocido como sobrefriamiento (Hale y Orcutt, 1987), que puede ocurrir entre -2 y -15 °C (Lyons *et al.*, 1979). Por otro lado, la formación de hielo intracelular también depende de la tasa de enfriamiento, pues a medida que ésta es mayor, la probabilidad de formación de hielo intracelular también lo es.

En la aclimatación al frío, se desarrollan procesos fisiológicos y bioquímicos inducidos por baja T, lo que implica un ajuste en el metabolismo y en la función celular (Neven *et al.*, 1992). En la raíz de *Phaseolus vulgaris* L. se encontró inhibición en la absorción del agua durante el inicio del tratamiento de frío, fenómeno no observado en plantas aclimatadas a 3 °C (Pardosi *et al.*, 1992). En chilacayote (*Cucurbita ficifolia* Bouché), especie que se cultiva a T baja en el otoño, no ha sido estudiada la capacidad de absorción de agua y nutrientes en estas condiciones, pero se ha observado que cuando se pasa de una T óptima a una fría (de 20 °C a 6 °C) las plantas se marchitan; sin embargo, cuando las plantas son aclimatadas de 20 °C a 6 °C con caída de T a tasas de 2 °C por hora, no ocurre el marchitamiento de las hojas (Ju *et al.*, 1998).

La tolerancia a frío en maíz se define como la aptitud de las plantas para germinar, emerger y crecer adecuadamente en suelos fríos y húmedos de la primavera temprana (Hoard y Crosbie, 1986; Gardner *et al.*, 1987). Con selección recurrente de maíces con capacidad para germinar a 7.2 °C de manera constante, se han logrado aumentos en el rendimiento de 8.8 y 9.9 % por ciclo (McConnel y Gardner, 1979). En México se ha hecho mejoramiento genético de maíz para tolerancia a heladas, dentro del esquema de "siembras retrasadas", donde se han explotado características de evasión o escape, como en el cv. Cafime que resultó sobresaliente en algunas regiones agrícolas del país por ser más precoz que los cultivares locales criollos (Palacios, 1985).

Carrillo *et al.* (1994) registraron la T de las hojas de maíz, haba, girasol (*Helianthus annuus* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.), durante una helada de -5 °C en el aire y encontraron que las hojas tuvieron una T de 0.5 a 2 °C menos que el aire circundante y que la T de las hojas de maíz y trigo fueron mayores que las de girasol y haba en 1 y 2 °C. En plantas de maíz afectadas por una helada con T del aire de -0.2 °C en la garita, Pérez (1990) encontró menores daños por helada en poblaciones de 60 000 plantas por ha que a 40 000, lo que atribuyó a la mayor cantidad de follaje que interceptó y absorbió la radiación térmica emitida por el suelo y otras plantas. En 1994 por atraso de las lluvias, el 23 de mayo se sembró maíz y frijol en asociación, y fueron afectados por una helada a los 126 días, que causó la muerte del maíz

y daños ligeros en el frijol protegido por la cubierta vegetal del primero (Barrales, 1997).

En Chapingo se encontró en haba que el número de tallos dañados por la helada (-7 °C al abrigo) fue menor con menor cantidad de agua en el suelo (Barrales y Aguilar, 1986); mientras que sin riego hubo 31 tallos dañados, a 75% de humedad aprovechable se registraron 151 tallos muertos. López y Barrales (1995) también registraron mayor daño y menor rendimiento en plantas de haba con mayor humedad edáfica; las plantas con menor daño se hicieron más tardías por la reparación del daño y produjeron más grano al tener más tallos secundarios, que fue su mecanismo de recuperación. Se ha observado que las plantas de haba con muchas hojas sufren menor daño por efecto de las heladas, aunque esto depende del nivel de congelamiento y del tiempo de exposición; además, las plantas de hábito de crecimiento indeterminado toleran más los daños por frío que los de hábito determinado (Bond *et al.*, 1986).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se condujo en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, localizado a 19° 21' LN, 98° 53' LO y a una altitud de 2250 msnm. El clima es C(w)(w)b(i')g, el más seco de los templados subhúmedos con lluvias en verano, con verano fresco y largo (b) con una oscilación térmica media mensual entre 5 y 7°C (i) y con el mes más caliente antes del solsticio de verano. Las heladas ocurren entre septiembre y marzo, con una mayor frecuencia en enero y febrero.

Se evaluó un grupo de seis cultivares de maíz y tres de haba en cinco fechas de siembra (FS). Los maíces fueron los híbridos H-28, H-30 y H-32, y los cultivares CP-V20, Zacatecas 58 SMS15 y Zacatecas 58 original; los cultivares de haba fueron el criollo Cochineria Amarilla Original (CAOr), una selección de ésta por su rendimiento en invierno (CA-Sel), y una criolla de Juchitepec (CrJuch), Estado de México. Las cinco fechas de siembra fueron 14 de junio, 2 y 24 de julio y 12 y 31 de agosto de 1991. La edad de las plantas se consideró a partir de las fechas de emergencia, las que fueron para el maíz el 21 de junio (FS1), el 12 de julio (FS2), el 4 de agosto (FS3), el 20 de agosto (FS4) y el 8 de septiembre (FS5); para haba fueron el 24 de junio, el 15 de julio, el 6 y 23 de agosto y el 12 de septiembre.

La combinación de nueve cultivares y cinco FS dio lugar a una serie de experimentos separados por fechas, evaluados en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada cultivar se sembró en parcelas de 4 surcos de 5 m de largo y 80 cm de separación. De haba se establecieron 18 matas por surco a 27 cm de separación (92 000 plantas por hectárea) y en maíz 13 matas a 40 cm

(65 000 plantas por hectárea). Se fertilizó con la fórmula 40N-40P-00K en haba y 80-40-00 en maíz, aplicando en este último la mitad del nitrógeno en la siembra y el resto 30 días después de la emergencia. Se regó cada vez que la humedad en el suelo llegaba a 60 % de humedad aprovechable.

Las temperaturas máxima y mínima del aire al abrigo ( $T_{\text{abrigo}}$ ) y a la intemperie ( $T_{\text{intemperie}}$ ) se registraban cada vez que se pronosticaba una helada. La primera se registró con un termistor TP10 dentro de la garita y la segunda con una sonda (Modelo ES-110, Omnidata International, Inc) colocada al exterior durante la noche, misma que también registró la humedad relativa (HR). Se registró la radiación neta ( $R_n$ ) con un radiómetro neto (modelo 3035 de Weather Measure, West Sacramento, CA. EEUU), con respuesta espectral entre 0.3 y 60  $\mu\text{m}$ , colocado a 1.5 m sobre el suelo. Los instrumentos fueron conectados varias noches a una estación micrometeorológica automatizada (Easy Logger, Omnidata International, Inc.). En este trabajo se presentan los registros correspondientes a los días 21-22 de septiembre, 8-9, 10-11 de noviembre de 1991 y 5-6 de febrero de 1992. La temperatura de la hoja ( $T_h$ ) y del aire ( $T_a$ ) que la rodea durante la incidencia de enfriamiento o helada, se registraron con un teletermómetro (modelo 112C, Everest Interscience Inc, Tustin C.A. USA) en tres plantas por parcela. En maíz la  $T_h$  se registró en la última hoja ligulada hasta antes de la floración, después de la cual se registró en la hoja del jilote; en haba el registro se hizo siempre en la última hoja expuesta en el tallo principal. La temperatura de la superficie del suelo ( $T_s$ ) y del aire a 5 cm de altura se midió con el teletermómetro y el sensor de la bayoneta, colocándola a 5 cm sobre el suelo. Apuntando el teletermómetro hacia la atmósfera se determinó su temperatura ( $T_{\text{atmósfera}}$ ), con la finalidad de conocer la diferencia de temperaturas que existía entre el suelo y la "atmósfera". Durante las heladas del 5 y 6 de febrero con el teletermómetro se hicieron registros de  $T_h$  del estrato superior (ES) e inferior (EI) de las plantas de haba, en intervalos de 15 minutos, iniciándolos desde antes de la salida del sol, para observar diferencias en el calentamiento.

Se hicieron análisis de varianza para cada registro de temperaturas, considerando como factores de variación a las diferentes interacciones entre cultivares y FS. Se utilizó el análisis gráfico para incorporar diferentes variables al mismo tiempo y facilitar la interpretación de la información.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los análisis de varianza de cada registro no se detectaron diferencias estadísticas entre cultivares para las variables térmicas registradas en las plantas, aunque entre los re-

gistros hubo evidentes diferencias en los efectos de las bajas temperaturas sobre las plantas, mismos que se describen a continuación.

En la Figura 1a se muestra la variación de  $T_{\text{abrigo}}$  y  $T_{\text{intemperie}}$  en la noche del 21 al 22 de septiembre, cuando se presentó un fenómeno de enfriamiento. La  $T_{\text{intemperie}}$  tuvo una caída de 2.8 °C en una hora hasta llegar a 10.4 °C y luego subió a 12 °C que se mantuvo hasta las 4 a.m., lo que fue favorecido por un aumento en la humedad relativa (HR) a 90 %. Alrededor de las 5:15 a.m bajó la  $T_{\text{intemperie}}$  y es posible que tal reducción sea consecuencia de una ausencia momentánea de nubes, lo que facilitó la pérdida libre de calor del suelo hacia la atmósfera, aunque los niveles de  $T_{\text{abrigo}}$  y  $T_{\text{intemperie}}$  se mantuvieron arriba de 10 °C. Este nivel reduce al siguiente día, la asimilación de  $\text{CO}_2$  en plantas susceptibles al frío, como reacción a la acumulación de almidón en los cloroplastos durante la noche, lo que impide la fijación de  $\text{CO}_2$  al día siguiente (Blum, 1988).

Con los registros de  $T_h$  de maíz H-28, de  $T_s$  y de  $T_a$  a 5 cm y a la altura de la hoja (115 cm) en la cual se registró  $T_h$ , no se tuvieron variaciones como las que se logran con  $T_{\text{abrigo}}$  y  $T_{\text{intemperie}}$ . En la Figura 1a se observa que las  $T_h$  son superiores a los niveles de  $T_a$  del aire que las rodea, y ambas menores que  $T_s$ . Los valores de  $T_{\text{abrigo}}$  y  $T_{\text{intemperie}}$  fueron inferiores a  $T_h$ , lo que se explica, en parte por las condiciones microclimáticas del lugar donde se registraron, en suelo cubierto con pasto, donde ocurre una mayor pérdida de energía del suelo y del aire hacia la atmósfera, mientras que  $T_h$ ,  $T_s$  y  $T_a$  que la rodea se registraron en el cultivo de maíz, donde la cubierta vegetal es una barrera que absorbe la energía emitida por el suelo y las propias plantas vecinas.

En la  $T_{\text{atmósfera}}$  de la noche, se tuvieron valores bajo cero. En el primer registro (19:55 h) su valor fue de -12.8 °C, mientras que  $T_s$  fue de 16.8 °C; entre estos dos extremos hubo un gradiente descendente de temperaturas, pues la  $T_h$  y  $T_a$  a 5 cm sobre el suelo fue de 13.8 °C, la  $T_a$  que rodea la hoja de 13.7 °C,  $T_{\text{abrigo}}$  de 13.6 °C y de 13.2 °C  $T_{\text{intemperie}}$ . Este gradiente define el flujo de energía del suelo y las hojas hacia la atmósfera, cuya intensidad es modificada por la presencia de vapor de agua. En este registro se tuvo una diferencia  $T_{\text{atmósfera}}-T_s$  de 29.6 °C, gradiente térmico importante para definir la magnitud de la pérdida de energía del suelo hacia la atmósfera. A las 4:00 h se registró -18.8 °C en  $T_{\text{atmósfera}}$  que coincide con el aumento en la pérdida de  $R_n$  (Figura 1a), asociado con una caída en  $T_{\text{abrigo}}$  y  $T_{\text{intemperie}}$ . La  $T_s$  es ligeramente más baja en las plantas más pequeñas (FS5), debido a la menor cubierta vegetal de la planta, que facilita una mayor pérdida de energía del suelo hacia la atmósfera.

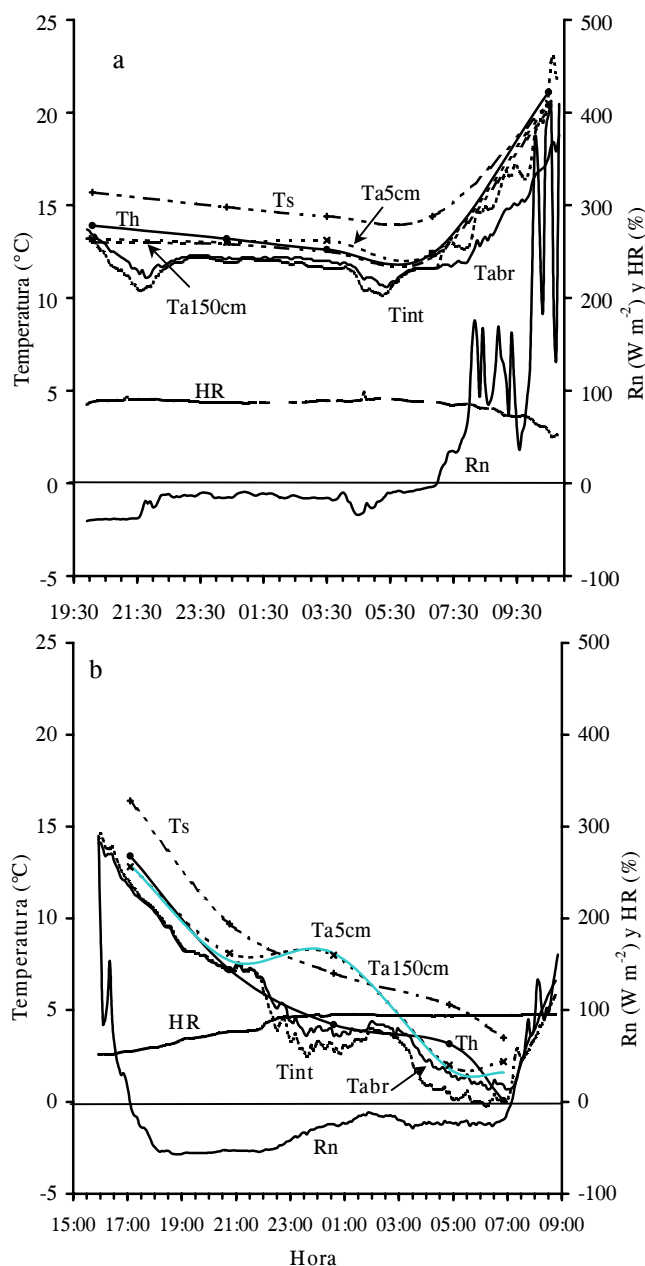


Figura 1. Temperatura del suelo ( $T_s$ ), de la hoja ( $T_h$ ), del aire ( $T_a$ ), al abrigo ( $T_{abr}$ ), a la intemperie ( $T_{int}$ ), radiación neta ( $R_n$ ) y humedad relativa ( $HR$ ) registrados en maíz H-28 en: a) el 21-22 de septiembre a los 72 días de edad y b) el 8-9 de noviembre a los 120 días de edad. Chapingo, Texcoco, Estado de México, 1991.

En haba CAOr de 69 días de edad (FS2), también la  $T_{intemperie}$  fue inferior a  $T_h$  y  $T_a$  que las rodea. Este fenómeno fue más notorio en plantas de haba que en las de maíz. Se observó en los dos primeros registros que  $T_h$  es ligeramente superior que la  $T_a$  que le rodea, fenómeno sólo encontrado en las dos primeras FS. La  $T_h$  en haba fue mayor que en maíz en los tres primeros registros aunque por lo general fueron menores, lo que coincide con lo señalado por Carrillo *et al.* (1994), quienes encontraron que la  $T_h$  de girasol y haba es-

tuvieron 2 °C abajo de las del maíz y trigo durante una helada, atribuyendo esto a que son plantas de hoja angosta.

La primera helada ocurrió entre el 8 y 9 de noviembre (Figura 1b). Al principio la  $R_n$  fue similar a la del 21-22 de septiembre, de  $-50 \text{ W m}^{-2}$ . Durante este registro el tiempo atmosférico fue de calma y despejado lo que favoreció que  $T_a$  siguiera descendiendo hasta  $-0.1 \text{ °C}$  a las 6:16 h del 9 de noviembre. A partir de las 21:50 h del día 8, ocurrió una caída brusca en  $T_a$  que aumentó la diferencia entre  $T_{abrigo}$  y  $T_{intemperie}$ , que se estabilizó alrededor de las 23:40 h; ello favoreció una  $HR$  superior a 90 % con una humedad absoluta (HA) de  $5.5 \text{ g m}^{-3}$ , lo que redujo la tasa de pérdida de energía del suelo. De las 23:00 h. a las 2:00 a.m. se tuvieron valores de  $T_{intemperie}$  en torno a  $4 \text{ °C}$ , con una  $HR$  cercana a 96 % con HA de  $5.5 \text{ g m}^{-3}$  y  $T_{atmósfera}$  de  $-31.6 \text{ °C}$  y sin presencia de nubes. Al parecer, lo único que detuvo la continua caída en la  $R_n$  y  $T_a$ , es la presencia de una alta  $HR$  pues el vapor de agua es una barrera que reduce la tasa de pérdida de radiación del suelo.

La  $T_h$  entre las 0:15 y 0:27 h (Figura 1b) fue de  $4.2 \text{ °C}$  en maíz de la FS2 y FS3, de  $3.7 \text{ °C}$  en plantas de la FS5 y de  $2.4 \text{ °C}$  en plantas de FS4, que corresponden a pérdidas de energía de 315.8, 313.5 y  $307 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente. Por otro lado,  $T_a$  es uno de los factores importantes que influyen sobre los niveles de temperatura de las plantas y, por tanto, la interfase hoja-aire dependerá la intensidad de pérdida de energía de la hoja. Además, dado que normalmente la  $T_a$  es ligeramente superior a  $T_h$ , parte de la energía liberada por el aire es absorbida por las hojas debido a las diferencias de temperatura entre ambos componentes. Alrededor de las 3:00 a.m.,  $T_a$  sufrió una caída brusca hasta  $-0.1 \text{ °C}$  a las 6:15 a.m. en  $T_{intemperie}$ . Desde las 3:56 hasta las 7:06 a.m. se registraron temperaturas entre 1 y  $-0.2 \text{ °C}$ ; es decir, 3 horas con 11 minutos, tiempo suficiente para causar daños parciales por helada en las hojas de los maíces de la FS5, y muerte de hojas superiores en plantas de FS3 y FS4. En maíz de la FS1 y FS2 no hubo daño alguno, lo que se atribuye al escape (Levitt, 1980) pues terminaron su ciclo biológico antes de la helada.

En  $T_{abrigo}$  nunca se detectaron niveles bajo cero, pues el más bajo fue de  $0.7 \text{ °C}$ , valor menor al de  $T_a$  a 5 y 150 cm en torno a la planta, evidenciando que  $T_{abrigo}$  difiere con  $T_{intemperie}$  y, desde luego, con  $T_a$  que rodea a las plantas, que es el que tiene mayor influencia sobre su temperatura (Hale y Orcutt, 1987), por lo que es importante tener claro dónde se registra  $T_a$ . La  $T_{atmósfera}$  durante la noche fue de  $-33 \text{ °C}$  a las 20:35 h, de  $-31.6 \text{ °C}$  a las 00:15 a.m., de  $-31.2 \text{ °C}$  a las 4:26 a.m. y de  $-31.8 \text{ °C}$  a las 7:00 a.m., dando un rango de  $1.8 \text{ °C}$ . La  $T_{atmósfera}$  podría ser un indicador de la incidencia

de una helada, pues a mayor gradiente de  $T$  suelo-atmósfera, habrá mayor tasa de pérdida de energía en el suelo.

El comportamiento de la  $T_h$  se considera normal, tomando en cuenta que su valor es más bajo que la del aire durante la noche (Sutcliffe, 1979) con excepción del registro realizado alrededor de las 4 a.m. en el maíz H-28, cuando la  $T_h$  fue superior ( $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a la  $T_a$  que le rodea ( $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), fenómeno que pudiera ser debido a un movimiento convectivo que trajo aire más frío a los estratos atmosféricos cercanos o próximos al suelo. En dos registros posteriores, la  $T_h$  fue inferior a  $T_a$  a 5 cm y a 1.5 m de altura, y se produjo una gran diferencia a las 00:20 a.m., hora en que se observaron valores de  $T_h$  superiores a  $T_s$  en aproximadamente  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Posibles explicaciones de porqué  $T_h$  fue superior a  $T_a$  en el registro de las 4:30 a.m., serían que el aire redujo su temperatura de manera más rápida que la  $T_h$ , o que la posición y la orientación de la hoja donde se registró fue diferente. En el último registro (6:30 a.m.) la  $T_h$  mínima registrada en las plantas de H-28 de la FS1, fue de  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valor que tiende a aproximarse a los valores de  $T_{\text{abrigo}}$  y  $T_{\text{intemperie}}$  en ese momento. Los valores mínimos de la  $T_h$  de maíz H-28 tuvieron un valor de  $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la FS5. Esto ocurrió para la  $T_h$  de la FS5 de los maíces H-32, CPV20 y Zac 58 Or. En H-30 y Zac 58-SMS15 no se tuvieron valores negativos, pero sí cercanos a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es notable que cuando ocurre el valor más bajo, las diferencias  $T_h$ - $T_a$  son pequeñas, respecto a las diferencias registradas en otros momentos.

En plantas de haba de la FS2 las  $T_h$  fueron un poco superiores a  $T_a$  a 5 y 117 cm sobre el suelo, con diferencias menores a  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , difiriendo con el hecho de que la temperatura nocturna de las plantas normalmente son inferiores a los niveles de  $T_a$  que le rodea (Sutcliffe, 1979), debido quizá a mayor cubierta vegetal o por una posición horizontal de la hoja donde se registró  $T_h$ . En la FS2, la  $T_h$  fue de  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, en plantas de menor edad y con menor tamaño se encontraron valores negativos. En plantas de 78 DDE con 65 cm de altura, la  $T_h$  más baja fue de  $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en plantas de la FS5 con 58 DDE y una altura de 40 cm, fue de  $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por lo anterior pareciera que la altura de la planta es un factor que influye sobre la  $T_h$  en haba. Sin embargo, en este comportamiento está confundido el tiempo de registros de datos, pues mientras que en plantas de FS2 se hicieron alrededor de las 6:40 a.m., los de FS5 se hicieron a las 7:15 h; es decir, 35 minutos después (Figura 1b).

Con esta helada considerada "ligera", los maíces sufrieron daños en la parte media de las hojas, parte horizontal que está expuesta a la pérdida libre de energía hacia la atmósfera. En las partes de las hojas con posición inclinada y vertical como en las hojas sin lígula, no hubo daño visible debido a que la pérdida de energía es menor y con influencia del tallo.

Los daños causados en haba no fueron visibles, con excepción de la muerte de flores que ocurrió en menos de una hora, acelerada por la incidencia de la radiación solar directa que provoca un aumento brusco de la temperatura del aire. En un trabajo sobre la formación de hielo por temperaturas bajo cero en *Forsythia*, Ashworth (1990) encontró formación de hielo principalmente en la base del botón floral, que causó su muerte prematura, comparada con tejidos de anteras aisladas que se enfriaron a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  antes de que el hielo se formara.

La helada entre el 10 y 11 de noviembre (Figura 2a), provocó mayores daños en el maíz de la FS5. La  $T_{\text{intemperie}}$  bajó hasta  $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 7:00 a.m., registrando  $T$  entre  $1$  y  $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 3 horas con 56 minutos, tiempo prolongado que aumenta los daños en plantas susceptibles (Lyons *et al.*, 1979). La  $T_{\text{atmósfera}}$  fue de  $-41.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 7:00 a.m., con lo que hubo un gradiente  $T_{\text{atmósfera}}-T_a$  a 1.5 m, de  $-41.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mayor que el de la helada anterior. Este fenómeno es típico de las heladas por radiación, en las que la pérdida de energía ocurre por un acentuado gradiente de temperatura, siendo más baja en la atmósfera, cuyos valores estuvieron entre  $-28.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 20:32 horas y de  $-41.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 7:00 a.m.

Durante esta helada, nuevamente  $T_s$  fue mayor que  $T_a$  y  $T_h$ , que de acuerdo con la definición de helada de Rosenberg *et al.* (1983) ésta no se presentó, por registrarse niveles de  $T_s$  positivos. Sin embargo, hubo valores de  $T_h$  negativos y los daños sobre las plantas fueron evidentes, para lo que sin duda contribuyó el largo periodo de exposición a la temperatura baja.

La  $T_a$  en torno a las hojas nunca fue negativa, aunque sí cercana a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, la  $T_h$  fue  $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 7 h, que no coincide con el valor más bajo de  $T_{\text{intemperie}}$  de  $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que hace suponer que en algún periodo la  $T_h$  fue menor. Por este fenómeno murieron todas las hojas del maíz que no habían mostrado daño por la helada anterior, aunque el tallo de las plantas de FS5 permaneció verde por 15 días más. Las plantas del maíz de FS3 y FS4 murieron 6 días después de la helada, mientras que las áreas verdes de los tallos protegidos por las vainas de las hojas fueron los últimos tejidos en morir. Estos resultados muestran que el efecto de la helada depende de la etapa fenológica del cultivo en que ésta incida (Lyons *et al.*, 1979); el hecho de no haber matado a la planta de haba, pone de manifiesto la tolerancia diferencial al frío entre especies, coincidiendo con Carrillo *et al.* (1994). Estas evidencias plantean la necesidad de definir el concepto de helada en cada especie en relación con los daños que pueden sufrir.

En haba, especie tolerante a las heladas, la  $T_h$  más baja en CAOr de FS5 fue de  $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  a 45 cm de altura y 60 días

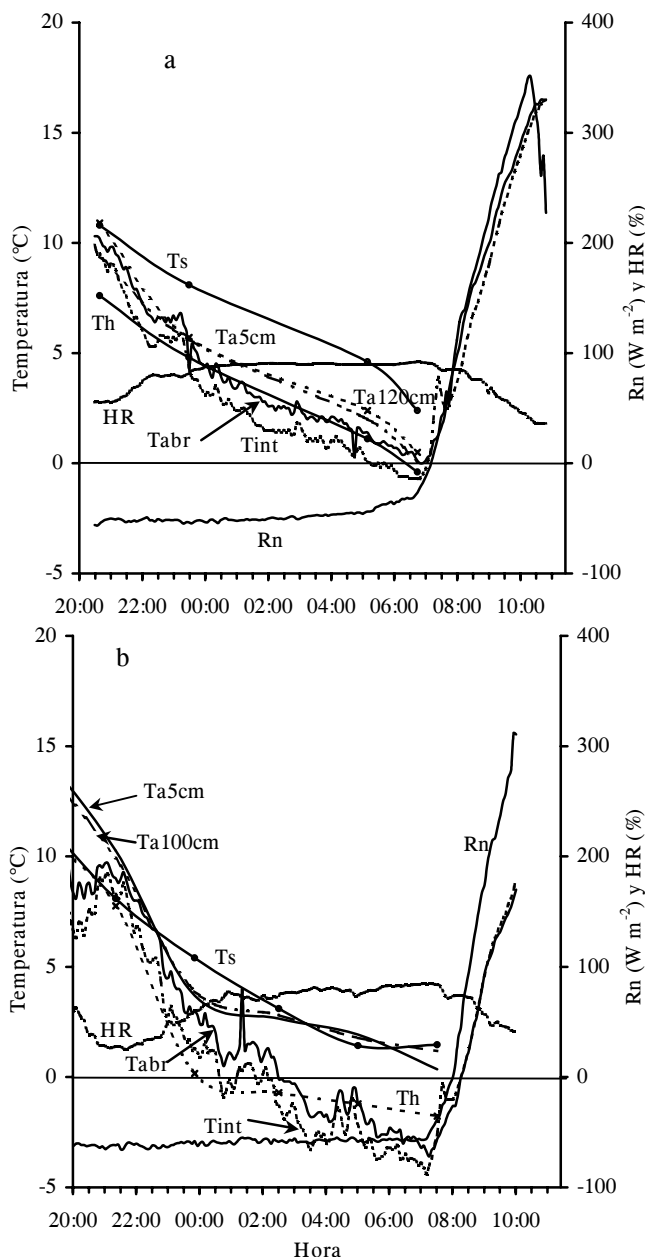


Figura 2. Temperatura del suelo ( $T_s$ ), de la hoja ( $T_h$ ) y del aire ( $T_a$ ), al abrigo ( $T_{abr}$ ), a la intemperie ( $T_{int}$ ), radiación neta ( $R_n$ ) y humedad relativa ( $HR$ ) en: a) el 10-11 de noviembre de 1991 en maíz H-28 de 122 días de edad y b) el 5-6 de febrero de 1992 en haba CA Original de 151 días de edad. Chapingo, Texcoco, Estado de México.

de edad. En plantas de la FS2 de 119 días de edad, la  $T_h$  más baja fue de  $0.2\text{ }^\circ\text{C}$  a 120 cm del suelo. En plantas de haba de la FS5 su follaje no cubría totalmente el suelo y ahí se registraron los valores más bajos de  $T_h$ , lo que pone de manifiesto la importancia de la cobertura foliar sobre el suelo para reducir las tasas de pérdida de energía de éste hacia la atmósfera, como se encontró en los trabajos de Pérez (1990) y Barrales (1997) en maíz. Las diferencias  $T_h$ - $T_a$  en haba son pequeñas, comparadas con las del maíz; sin embargo, los

valores de  $T_h$  se encontraron siempre por debajo de  $T_a$  que las rodea, atribuible en parte a la mayor emisividad de las hojas (Rosenberg *et al.*, 1983).

En la madrugada del 5 de febrero de 1992 ocurrió la primera de dos heladas consecutivas, que dañaron las plantas de haba. En esta helada (Figura 3a) los daños se localizaron en el estrato superior (ES) que está expuesto a la atmósfera, donde ocurre una mayor pérdida de energía nocturna. Después de las 8 h, la  $T_h$  del estrato inferior (EI), donde no se manifestaron daños letales en las hojas, a pesar de haberse registrado valores negativos, se incrementó a un ritmo lento, hasta tener valores positivos a las 8:50 h. Sin embargo, en las hojas del ES expuestas a la radiación solar directa después de la salida del sol, las  $T_h$  se incrementaron rápidamente a partir de las 8:00 de la mañana. Estos cambios bruscos en  $T_h$  causan mayores daños letales, debido a que los desbalances fisiológicos causados no se restablecen, lo que provoca un daño irreversible (Sutcliffe, 1979). Por otro lado, los daños por frío también se intensifican con la presencia de luz (Mäenpää *et al.*, 1988), que llega en menor cantidad a los estratos foliares inferiores por la sombra de las hojas y tallos de la parte superior que resultaron dañados. Durante este fenómeno, a pesar de registrarse  $T_h$  de  $-2\text{ }^\circ\text{C}$  en CAOr, la  $T_s$  nunca alcanzó el nivel de  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . En CASel se tuvieron los valores más bajos de  $T_s$ , hasta de  $0.9\text{ }^\circ\text{C}$  a las 8:30 a.m., así como también los valores más bajos de  $T_h$  con  $-3.7\text{ }^\circ\text{C}$  a las 7:30 a.m. en el estrato inferior, debido posiblemente a una menor cubierta vegetal.

En la noche entre el 5 y el 6 de febrero ocurrió otra helada que mató a toda la planta de haba. Si la primera helada provocó la muerte de hojas y parte de los tallos del ES, al quedar este estrato destruido, el frío de la siguiente helada llegó hasta el EI de las plantas, lo que causó la destrucción total. Como consecuencia de la helada anterior, la destrucción del follaje superior favoreció la pérdida de energía del suelo y del EI de las plantas de haba hacia la atmósfera alcanzando temperaturas más bajas (Figura 3b).

Durante este fenómeno la  $R_n$  desde las 18:41 h del 5 de febrero hasta las 7:00 h del día siguiente se mantuvo en torno a  $-70\text{ W m}^{-2}$  (Figura 2b) y la  $T_{atmósfera}$  estuvo entre  $-38.1\text{ }^\circ\text{C}$  a las 18:40 h y  $-47.3\text{ }^\circ\text{C}$  a las 8:40 h del 6 de febrero, permaneciendo en  $-46.1\text{ }^\circ\text{C}$  inclusive hasta las 9:50 h, lo que define un mayor gradiente entre la atmósfera y el suelo. A la media noche, la caída de  $T$  fue muy brusca y llegó cerca de  $0\text{ }^\circ\text{C}$  en  $T_{intemperie}$ , caída que coincide con los valores de  $HR$  menores (75 %). A partir de las 00:41 h los valores de  $T_a$  fueron negativos hasta llegar a  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  a las 7:11 h. Después de las 8:16 h los valores de  $T_a$  son positivos, lo que da un tiempo de exposición de 7.5 h con  $T_a$  bajo cero.

La  $T_h$  de las 23:50 h del 5 de febrero fue de  $0.1^\circ\text{C}$  y  $-1.7^\circ\text{C}$  a las 7:40 h del siguiente día, valores parecidos a los de  $T_{\text{abrigo}}$  y  $T_{\text{intemperie}}$ . Estos valores de  $T_h$  no fueron los más bajos, debido a que durante la caída más fuerte de  $T$  no se registró esta variable, como puede observarse en la Figura 2b entre las 5 y 7 de la mañana. La  $T_h$  de plantas de haba CASel, llegó a tener valores de  $-6.9^\circ\text{C}$  a las 9 de la mañana, fenómeno que no se registró en plantas de CAOr ni en CrJuch, debido posiblemente a la ubicación de la hoja en la cual se registró.

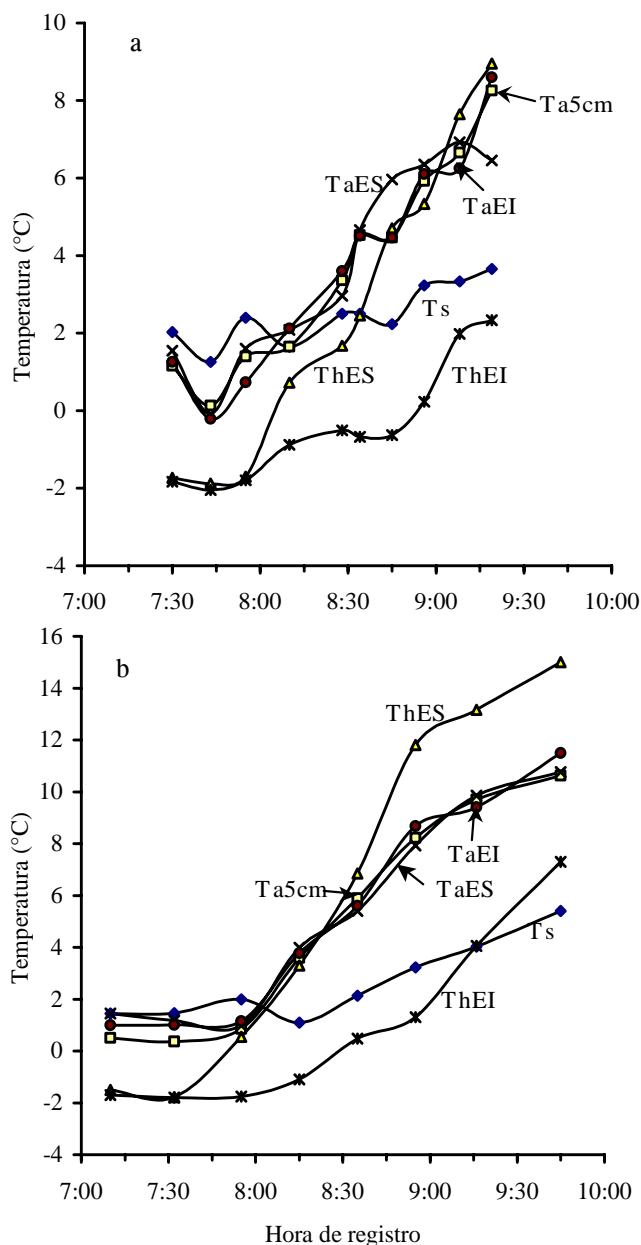


Figura 3. Temperatura del suelo ( $T_s$ ), de la hoja ( $T_h$ ) y del aire ( $T_a$ ) en los estratos foliares superior (ES) e inferior (EI) de haba CA Original, registrados en: a) la mañana del 5 de febrero, y b) la mañana del 6 de febrero de 1992, en Chapingo, Texcoco Estado de México.

## CONCLUSIONES

Entre los genotipos de maíz no hubo diferencias en la tolerancia al frío, pues el follaje murió con heladas ligeras, aunque el tallo murió sólo por heladas más intensas. El maíz mostró menor nivel de tolerancia al frío que el haba, por lo que se ubica entre las especies poco tolerantes. Con temperaturas foliares de  $-0.4$  y  $-0.7^\circ\text{C}$  ocurrió la muerte total del maíz, mientras que el haba toleró bien estos niveles en sus estructuras vegetativas, afectándola solamente en sus estructuras florales.

Las plantas de haba en etapa de floración y periodo de crecimiento vegetativo fueron tolerantes a temperaturas del aire de  $3.1^\circ\text{C}$ , por un periodo breve de exposición. Pero sufrieron daños letales con temperaturas de  $-5^\circ\text{C}$  y con 3.5 h con temperaturas bajo cero, aunque las hojas y frutos del estrato foliar inferior sufrieron menos daños por la protección que le proporciona el estrato foliar superior.

Es necesario redefinir el concepto de helada para el caso de producción de cultivos, debido a que las temperaturas al abrigo no representan a la temperatura foliar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ashworth E N (1990) The formation and distribution of ice within *For-sythia* flower buds. *Plant Physiol.* 92(3):718-725.
- Barrales D J S, M A Aguilar Medorio (1986) Estudio agronómico sobre el crecimiento y la capacidad de tolerancia a los daños por helada en haba (*Vicia faba* L.) con relación al contenido de humedad edáfica en Chapingo, Mex. *Rev. Chapingo* 50-51:10-16.
- Barrales D J S (1997) La asociación maíz-frijol como alternativa para agricultura con problemas de heladas. *Agronomía Mesoamericana* 8(2):121-126.
- Blum A (1988). *Plant Breeding for Stress Environments*. CRC Press Inc. Florida. USA. 223 p.
- Bond D A, S J Brown, G J Jellis, M Pope, J A Hall, M H E Clarke (1986) *Field Beans. Winter and spring bean programmes seed quality*. Ann. Rep. Plant Breeding Inst. Cambridge.
- Carrillo S J A, M Livera Muñoz, J Ortiz Cereceres, L E Mendoza Onofre (1994). Relaciones térmicas en hojas de cuatro cultivares durante las heladas invernales en Montecillo, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 16(2):113-133.
- Gardner Ch O, M A Thomas-Compton, T L Gocken, K D Eichelberger (1987) Selection for cold and freeze tolerance in corn: evaluations of original and selected population. *Ann. Corn & Sorghum Res. Conf.* 42:126-140.
- Gates D M (1965) Heat transfer in plants. *Scientific Amer.* 213(6):9 p.
- Hale G M, D M Orcutt (1987) *The Physiology of Plants under Stress*. A Wiley-Interscience Publications. USA. 206 p.
- Hoard KG, T M Crosbie (1986) Effects of recurrent selection for cold tolerance on genotype-environment interactions for cold tolerance and agronomic traits in two maize populations. *Crop Sci.* 26:238-242.
- Ju A S, H I Yang, Ch Ch Gap, H Ch Baik (1998) Root acclimation to chilling root temperature in figleaf gourd plants: the role of root plasma membrane  $H^+ATP$  ase. *In: Cucurbitaceae '98*.



- Evaluation and Enhancement of Cucurbit Germplasm. McCreight, J.D. (ed.). Pacific Grove California. USA. pp: 264-270.
- Kanemasu E T, G F Arkin** (1974) Radiant energy and light environment of crops. *Agric. Meteorol.* 14:211-225.
- Ksenzhek O S, A G Volkov** (1998) *Plant Energetics*. Academic Press. USA. 389 p.
- Levitt J** (1980) *Responses of Plant to Environmental Stresses*. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press. USA. 497 p.
- Livera M M** (1991) Retos y perspectivas del fitomejoramiento: algunos aspectos del ambiente físico en relación a la producción y productividad de los cultivos. *Rev. Fitotec. Mex.* 14(1):23-39.
- López H E, J S Barrales Domínguez** (1995) Interacción de frío con humedad edáfica en haba (*Vicia faba* L.). *Rev. Chapingo Serie Horticultura* 4: 105-108.
- Lyons J M, J K Raison, P L Steponkus** (1979) An overview in low temperature stress in crop plants. *In: The Plant Membrane in Responses to Low Temperature*. Lyons, J.M., D. Graham, and J.K. Raison (eds.). Academic Press. New York. USA. pp: 1-24.
- Mäenpää P E, Aro S Somersalo, E Tyystjärvi** (1988) Rearrangement of the chloroplast thylakoid at chilling temperature in the light. *Plant Physiol.* 87:762-766.
- McConnell R L, C O Gardner** (1979) Inheritance of general cold tolerance traits in corn. *Crop Sci.* 19:847-852.
- Monteith J L** (1973) *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold (Publishers) Ltd. Great Britain. 241 p.
- Neven L G, D W Haskell, Ch L Guy, N Denslow, P A Klein, L G Green, A Silverman** (1992) Association of 70-kilodalton heat-shock cognate proteins with acclimation to cold. *Plant Physiol.* 99:1362-1369.
- Palacios de la R G** (1985) Mejoramiento del maíz en México. *Rev. Chapingo* 47-49:9-43.
- Pardosi A, P Vernieri, F Tognoni** (1992) Involvement of abscisic acid in regulating water status in *Phaseolus vulgaris* L. during chilling. *Plant Physiol.* 100:1243-1250.
- Pérez V R** (1990). Productividad del maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de temporal atrasado y heladas tempranas en Chapingo, Mex. Tesis Profesional en Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Mex. 113 p.
- Rosenberg N J, B L Blad, S B Verma** (1983) *Microclimate, the Biological Environment*. 2a Ed. John Wiley & Sons. USA. 495 p.
- Sutcliffe J** (1979) *Plantas y Temperatura*. Trad. por R. Margalef. Ediciones Omega. España. 63 p.