

CARACTERIZACION PRELIMINAR DEL GRADIENTE DE ENFRIAMIENTO EN POBLACIONES DE ALGODÓN DE INTA SAENZ PEÑA EN UN CONTEXTO AMBIENTAL DE SECANO Y SISTEMA CONVENCIONAL

Spoljaric Mónica, Klein Lorena, Tcach Nydia, González Ariela, Bela Diego, Montenegro Alex y Tcach Mauricio. spoljaric.monica@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

El gradiente de enfriamiento en el dosel de las plantas es un fenómeno crucial para entender cómo las plantas regulan su temperatura en respuesta a las condiciones ambientales. Este gradiente se refiere a la variación de temperatura que se observa desde la parte superior hasta la inferior de la planta, siendo más cálido en la parte superior y más fresco en la inferior. En el dosel vegetal, este gradiente se forma debido a procesos como la transpiración y la radiación solar, donde las hojas superiores absorben más luz y pierden calor a través de la transpiración, creando así una diferencia térmica con las hojas inferiores. Este mecanismo es fundamental para el equilibrio térmico de la planta, ya que le permite regular su temperatura interna y optimizar procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la transpiración. Además, el gradiente de enfriamiento en el dosel influye en la distribución de nutrientes y agua dentro de la planta, impactando directamente en su crecimiento y desarrollo (Squeo & León, 2007; Pérez Leal, F., 2017).

Las condiciones ambientales juegan un rol importante en la formación del microclima interno o humedad circundante. Las precipitaciones afectan la temperatura del suelo y la disponibilidad de agua para las plantas, lo que a su vez modifica la transpiración y la temperatura en el dosel vegetal (Azcon & Talón, 2008; Orozco et al., 2012). Las precipitaciones son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas de algodón. El requerimiento de agua varía con las etapas fenológicas, en la primera etapa el requerimiento hídrico desde la siembra hasta la aparición del primer pimpollo es de 2,5 mm por día (0-35 días después de la siembra). A medida que el ciclo del cultivo avanza y aumentan las temperaturas, aumenta el consumo diario llegando a 10 mm por día o más (Arturi, 1984). En este sentido, el mayor consumo de agua se concentra entre los 35 y 90 días después de la siembra (dds), donde el crecimiento vegetativo y reproductivo es simultáneo, lo cual incrementa la competencia por los fotoasimilados. A partir del fin de floración efectiva las cápsulas en crecimiento tienen la prioridad en los asimilados sobre el resto de las fructificaciones. Por causa del déficit de asimilados van cayendo o derramando, siendo las cápsulas pequeñas (de no más diez días) las más sensibles al derrame y siguen en orden decreciente los pimpollos grandes, pequeños y por último las cápsulas grandes. Cuando comienza la maduración de las cápsulas disminuye el consumo diario de humedad (90-140 dds). Esta distribución se mantiene regularmente, sin embargo, los valores absolutos fluctúan según la localidad y condiciones climáticas.

Las temperaturas tienen una gran importancia en el crecimiento y desarrollo de las plantas de algodón. Para ello, se ha informado que la temperatura óptima (óptimo térmico) para el crecimiento y desarrollo del algodón es 28 ± 3 °C en un rango de 25 y 31 °C (Burke & Wanjura, 2010). Las temperaturas por debajo y encima de este rango pueden causar un crecimiento

reducido, una disminución de la tasa fotosintética y afectar la expansión de las hojas (Reddy et al., 1991).

En Arkansas, el algodón suele experimentar estrés por altas temperaturas, siendo más perjudicial durante el desarrollo reproductivo (Oosterhuis, 1997; Zeiher et al, 1995).

En la localidad de Sáenz Peña, Chaco-Argentina, se han registrado temperaturas superiores a las óptimas que causan una reducción significativa en el rendimiento debido a la disminución en la retención de puntos fructíferos y reducción en el tamaño de las cápsulas (Tcach & Paytas, 2020). Asimismo, el distanciamiento entre surcos muestra diferencias significativas cuando las temperaturas son elevadas. En los sistemas de surco estrecho (0,48 m) donde las plantas están más cerca una de otras, se genera un volumen de hojas creando un microclima del interior de la planta que atenúa las temperaturas extremas. En la siembra convencional (1,00 m) las altas temperaturas afectan el rendimiento y la temperatura elevada permanece alta porque el acercamiento no es tan estrecho y las hojas de los surcos no alcanzan a tocarse, por lo tanto, la incidencia de las temperaturas extremas llega al microclima de alrededor de la planta afectando significativamente el rendimiento. Los dos sistemas de siembra presentan diferente comportamiento en cuanto a la elevación de temperatura. (Tcach & Ibaló, 2019). Sin embargo, en años de mayor disponibilidad hídrica con algodones expuestos a altos valores térmicos los rendimientos entre los distanciamientos entre surcos son similares, es decir, la nubosidad y las lluvias mitigan el estrés térmico (Tcach & Paytas, 2020) y la disponibilidad de agua acumulada por las precipitaciones resulta ser un factor determinante.

El uso de genotipos con mayores adaptaciones específicas y generales a condiciones de poca disponibilidad de agua y a temperaturas altas siguen siendo una estrategia en los programas de mejora. Para conocer estas adaptaciones, es necesario conocer el comportamiento de la variación de las temperaturas de la planta o microclima interno. En términos del comportamiento de gradiente o patrón de enfriamiento del algodón, ha habido poca información en los últimos 50 años en la Argentina. En este sentido, el objetivo del trabajo fue caracterizar el patrón de variación de la temperatura interna de la planta, es decir el gradiente de enfriamiento en un contexto de ambientes productivos de secano bajo un sistema de siembra convencional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra dentro de la ecorregión Chaco Húmedo y presenta un régimen pluviométrico monzónico, con un gradiente de 750-1300 mm, con período seco invernal (Reporte final sobre las bases para una estrategia nacional de adaptación y mitigación de los efectos de la sequía en la República Argentina, 2020). El ensayo fue conducido en el campo en la EEA (Estación Experimental Agropecuaria), INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) Sáenz Peña, (26° 47' 27"; 60° 26' 29"; 90 ms.n.m), Chaco (Argentina) durante dos campañas agrícolas consecutivas (años 2017 y 2018).

Genotipos.

Se utilizaron 5 genotipos pertenecientes a la colección de algodón del Banco de Germoplasma y al programa de mejora de la EEA INTA Sáenz Peña. La selección se realizó en base a

caracteres fisiológico y morfo-agronómicos favorables ante condiciones de estrés hídrico (Tabla 1).

Tabla 1. Genotipos de algodón pertenecientes al banco de germoplasma de EEA Sáenz Peña.

10,	2° denominación	Tipo de cultivar*	Sitio de origen	Características
BGSP 463	Paymaster 145	Cv. obsoleto	E.E.U.U.	Morfología de hoja normal y pilosidad media. Ramas vegetativas abiertas de porte mediano y arquitectura cónica. Tallo de entrenudos cortos. Precoz.
BGSP 514	Siokra	Cv. obsoleto	Australia	Morfología de hoja okra y pilosidad baja. Tallo y rama de pilosidad baja. Porte mediano y arquitectura cónica.
BGSP 765	ZM-01632	Cv. Local	China	Morfología de hoja normal, tallo principal grueso de porte alto y duración del ciclo 142 días.
BGSP 803	SP 6635	Linea elite	Argentina	Morfología de hoja normal y follaje abierto. Porte mediano y arquitectura cilíndrica.
SP 48114	SP 48114	Cv. moderno	Argentina	Morfología de hoja normal y follaje abierto. Porte mediano y arquitectura cilíndrico.

*Tipo de cultivar: Cultivar (Cv) obsoleto o en desuso y moderno: hace referencia a la sustitución en el uso por el productor. Línea: se refiere al material desarrollado por los mejoradores que son conservados en los bancos de germoplasma por su valor real o potencial. Local: son variedades primitivas, tradicionales o criollas y que son producto de una selección por parte de los agricultores con gran adaptación a condiciones abióticas y bióticas.

Ambientes.

En esta investigación, los años y fechas de siembra fueron utilizados como ambientes dentro de una misma localidad. Ambiente 1 (2016/2017) y Ambiente 2 (2017/2018). En el Ambiente 1, la fecha de siembra fue el 20 de noviembre y en el Ambiente 2, el 18 de diciembre. Se sembraron en secano bajo un sistema convencional.

Diseño experimental: Bloques Completos al Azar (BCA).

Repeticiones, en 3 Bloques. Cada bloque conformado por 2 repeticiones por genotipos, es decir los genotipos fueron dispuestos al azar en micro-parcelas conformados por dos líneas de 8 m de largo y distanciamiento entre línea de 1 m. El espaciamiento entre plantas de 0,15 m con una densidad de siembra de 6,66 plantas. m⁻².

Unidad experimental.

Las mediciones se efectuaron en los líneas centrales, seleccionando un metro lineal como unidad experimental por genotipo en cada repetición y ambiente.

Instrumento de medición y registro de datos:

Los datos se registraron en primera flor hasta fin de floración efectiva, es decir a los 60 a 90 días después de siembra (dds) junto a las variables respuestas de temperatura de planta y radiación, como así también a la temperatura ambiental y precipitaciones acumuladas, utilizadas estas últimas como covariables.

Variabes respuesta.

1) Temperatura de planta (°C): Se midió en tres estratos de la planta: i) temperatura superior o del dosel de planta (Ts, °C); ii) temperatura media de planta o temperatura interna (Tm, °C) y iii) temperatura inferior de planta o temperatura cercana al suelo (Ti, °C). Se utilizó pistola Láser termómetro infrarrojo (LCD Digital-32 ~ 1250 grados).

2). Radiación del dosel. Se midió en dos estratos de la planta; i) radiación superior o dosel de planta (Rs) y ii) radiación inferior de planta o cercana al suelo (Ri). La medición se realizó con la barra de intercepción.

Los datos fueron registrados una vez por semana en los líneas centrales a las 13 horas sin nubosidad durante cinco semanas consecutivas como se describe a continuación.

Serie de Tiempo 5 (70 a 99 dds).

Los registros de Ts, Tm, Ti, Rs y Ri se midieron en los siguientes tiempos/semanas: Tiempo 1= 70 dds; Tiempo 2= 78 dds; Tiempo 3= 85 dds; Tiempo 4= 92 dds; Tiempo 5= 99 dds.

Covariables.

i) Temperatura ambiental (Tam, °C); se registró en el día de la medición de las variables respuesta. ii) Precipitaciones acumuladas (mm) en los 10 a 12 días previos a la medición de las variables respuestas de la siguiente manera: desde 60 hasta 69 dds; desde 67 hasta 76; desde 74 hasta 83; desde 82 hasta 91; desde 89 hasta 98 dds.

Finalmente, se colectaron los datos meteorológicos para las dos campañas agrícolas en una ventana de seis meses con el objetivo de caracterizar las condiciones meteorológicas en un contexto general. En el Ambiente 1 a partir de noviembre de 2016 hasta el 31 de abril de 2017 y para el Ambiente 2 a partir de diciembre de 2017 hasta mayo de 2018.

Para conocer la distribución de los parámetros de temperatura y precipitaciones durante el ciclo del cultivo se caracterizaron los ambientes para cada etapa fenológica (Etapa vegetativa= 0-35 dds; Etapa Reproductiva= 35-90 dds; Etapa de Madurez (90-140 dds). Por último, se caracterizó la etapa reproductiva, dividida en dos: a) Primer pimpollo hasta primera flor (35-60 dds) y b)

Primera flor hasta fin de flor efectiva (60-90 dds aproximadamente). Esta última es de interés para la evaluación. Los datos meteorológicos fueron suministrados por Estación Meteorológica de EEA INTA Sáenz Peña.

Análisis de datos: Se analizaron los datos meteorológicos para las dos campañas agrícolas (seis meses) y las etapas fenológicas (vegetativa, reproductiva y madurez). Los parámetros de temperaturas (Máxima, Mínima, Media, días que superan temperaturas a 35°C) y precipitaciones se realizaron con Hoja de Cálculo Microsoft Excel (Versión 2010).

Por último, se caracterizó el ambiente en la etapa reproductiva, dividida en dos: a) Primer pimpollo hasta primera flor (35-60 dds) y b) Primera flor hasta última flor efectiva (60-90 dds aproximadamente). Cabe aclarar que la segunda fase es la de interés para este estudio.

Etapas reproductiva (Primera flor hasta fin de flor efectiva).

Variables respuesta y covariables: se utilizó un enfoque de modelos mixtos posibilitando evaluar los efectos genotípicos y la interacción genotipo por ambiente de manera flexible. Las variaciones espaciales, temporales y las interacciones genético-ambiental pueden ser modeladas adecuadamente, y los datos incompletos se manejan fácilmente (Kelly et al., 2007). Las variaciones entre repeticiones y errores se presumen que son propias de cada ambiente de evaluación (So & Edwards, 2011). En ocasiones, el diseño experimental puede ser complejo y no ser suficiente para controlar la variación espacial dentro de cada ambiente de evaluación, por lo tanto, es importante corregir espacialmente las estimaciones de los efectos genotípicos (Casanoves et al., 2005; Ostengo & Cuenya, 2013 ; Rodríguez-Álvarez et al., 2016). Cuando los modelos estadísticos son muy complejos se pueden realizar los análisis en varias etapas. Este procedimiento, tiene la ventaja de permitir la heterogeneidad de varianzas entre ensayos, facilita el manejo de experimentos con diferentes estructuras de diseño y modelado, permite trabajar con datos correlacionados temporal y espacialmente (Damesa et al., 2017; Martínez, 2019; Piepho & Eckl, 2014).

En una primera etapa se obtuvieron las medias genotípicas ajustadas espacialmente para cada ambiente de evaluación (1 y 2) y cada tiempo de medición (70, 78, 85, 92, 99 dds) con el fin de simplificar el modelo estadístico y ajustar las tendencias globales y locales que existen naturalmente en el campo. Estas tendencias espaciales fueron ajustadas usando el módulo de modelos lineales mixtos de InfoStat/P 2020. El modelo para cada variable explicativa en cada tiempo y en cada ambiente evaluación, fue:

$$Y_{ijkm} = \mu + G_i + B_j + R_{(k)} + C_{(m)} + e_{ijkm}$$

Donde Y_{ijkm} son los valores fenotípicos de la variable respuesta, μ es la media general, G es el efecto fijo del i -ésimo genotipo y B es el efecto fijo de la j -ésima repetición. Las covariables R (filas) y C (columnas) son efectos aleatorios que representan las coordenadas espaciales de las parcelas en el campo.

En una segunda etapa, las medias genotípicas ajustadas se sometieron a un análisis conjunto considerando los factores ambientes (A) y tiempo (T). El modelo lineal mixto basado en estimaciones de máxima verosimilitud restringida (REML), se define mediante la ecuación:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + IGA_{ij} + T_{kij} + e_{ijk}$$

Donde Y_{ijk} son las medias ajustadas espacialmente en la etapa 1, μ es la media general y G es el efecto fijo del i -ésimo genotipo. El efecto A_j es el efecto fijo del j -ésimo ambiente y el IGA_{ij} es el efecto fijo de la interacción genotipo por ambiente para el i -ésimo genotipo en el j -ésimo ambiente. El efecto tiempo (T_{kij}) en el k -ésimo tiempo de medición para el i -ésimo genotipo en el j -ésimo ambiente y sus correspondientes interacciones con los efectos fijos (G y A) fueron considerados aleatorios. El efecto e_{ijk} corresponde al error experimental del modelo.

Se contemplaron las correlaciones temporales entre los tiempos dentro de cada ambiente a través del modelado de la matriz de covarianza para el término aleatorio T_{kij} . La modelación de la matriz de varianza y covarianza del residual se realizó probando distintas estructuras (independiente-IND, simetría compuesta-CS, sin estructura-UN y autoregresiva de orden 1-AR1). La elección del modelo para el residual se realizó en base al criterio de información de Akaike (AIC) que considera al modelo de menor valor de AIC como el que mejor representa la naturaleza de los datos (Molenberghs & Verbeke, 2000). Además, se consideró el supuesto de normalidad de los residuales mediante gráfico de QQ-plot para cada modelo. Los modelos se ajustaron utilizando el módulo de modelos lineales mixtos de InfoStat/P 2020 para todas las variables.

En una tercera etapa, una vez elegido el modelo con el mejor ajuste para las correlaciones temporales, se incorporaron las covariables mm y Ta para la comparación de medias de los efectos fijos significativos.

A partir de las significancias de la interacción (IGA) en las variables respuestas y las covariables se construyó un perfil de gradiente de enfriamiento para un sistema convencional en secano.

RESULTADOS

Se describe en la Tabla 2 el contexto general de las condiciones meteorológicas en las dos campañas agrícolas teniendo en cuenta una ventana de evaluación de seis meses. En el Ambiente 1, las precipitaciones fueron mayores (+181 mm) que el Ambiente 2.

Con relación a los parámetros de temperatura máxima y mínima, el Ambiente 2 presentó mayor temperatura máxima promedio (+0,88°C) y mayor en la temperatura mínima (+0,16°C) versus al Ambiente 1. La temperatura media en el Ambiente 2, fue levemente superior (+0,44 °C) que en el Ambiente 1.

El Ambiente 2, analizado en un periodo de 6 meses y comparado con la media de precipitaciones de la serie histórica (1924/2014) se caracterizó por ser un ambiente atípico principalmente por las grandes precipitaciones en el mes de enero (Figura 1 b). Además,

presentó un mayor número de días (+10 días) con temperatura superiores a 35 °C en relación con el Ambiente 1 (Figura 2).

Tabla 2. Resumen de datos meteorológicos en los ambientes 1 y 2 en una ventana de seis meses.

	Ambiente 1	Ambiente 2
Temperatura Media Máxima (°C)	30,69	31,57
Temperatura Media (°C)	24,49	24,90
Temperatura Media Mínima (°C)	18,79	18,95
Temperatura Máxima >35 °C (días)	40	50
Precipitaciones (lluvias, mm)	816	635

Los datos de temperatura y precipitaciones fueron calculados para el Ambiente 1: desde el 1 de noviembre de 2016 a 30 de abril de 2017; Ambiente 2: desde el 1 de diciembre de 2017 hasta el 31 de mayo de 2018.

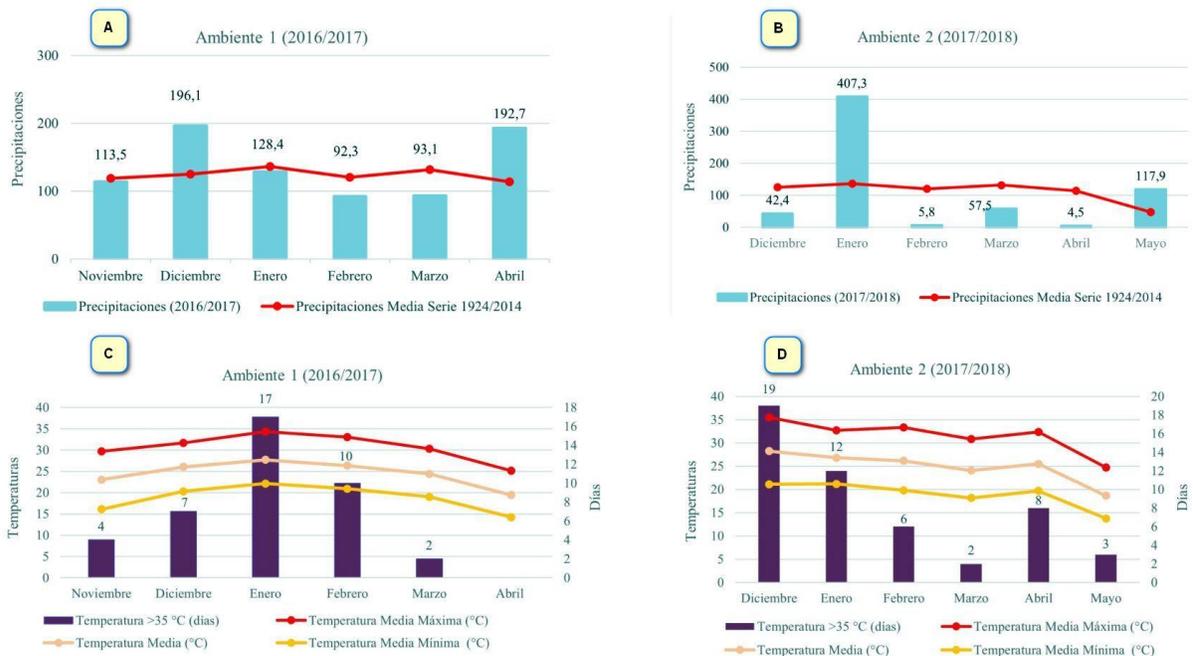


Figura 1: Distribución de las precipitaciones mensuales en el Ambiente 1 (A) y Ambiente 2 (B) relacionadas con las precipitaciones medias de la seria histórica (1924/2014) en una ventana de seis meses. Distribución de las temperaturas (Máxima, Media y Mínima) y el número de días mayor a 35°C durante una ventana de seis meses en el Ambiente 1 (C) y Ambiente 2 (D).

En la Tabla 3 y Figura 2 se observa la distribución de los parámetros meteorológicos de temperatura y precipitaciones durante el ciclo del cultivo en los ambientes (1 y 2) en cada etapa fenológica. Las condiciones de crecimiento observadas en 2016/2017 (Ambiente 1) fueron favorables a la producción del algodón con relación a las precipitaciones y su distribución, debido a que estuvieron acorde a los requerimientos hídricos de cada etapa fenológica. La temperatura media fue templada y las temperaturas máximas promedio del aire (31,91°C) siguieron siendo aceptables para el crecimiento y desarrollo del algodón, con 38 días de estrés por altas temperaturas en los que la temperatura del aire superó los 35 °C, que fueron compensadas por las precipitaciones abundantes. La mayor presencia de los días de calor se presentó en la etapa reproductiva (Tabla 3, Figura 2-C). En contraste, la campaña 2017/2018 presentó precipitaciones similares que la campaña anterior, sin embargo, la distribución fue diferente. Las mayores precipitaciones se concentraron y coincidieron con la etapa temprana del cultivo (vegetativa) y de menor consumo de agua por parte de las plantas (Figura 2-B). La temperatura fue más cálida (temperatura máxima promedio del aire = 33,39°C) y la mayoría de los días de estrés por alta temperatura se presentaron en la etapa vegetativa.

Tabla 3. Resumen de la distribución de las temperaturas (Máxima, Media y Mínima), número de días mayor a 35°C y precipitaciones durante las etapas fenológicas del algodón en los dos ambientes.

Etapas	Ambiente	Temperatura Media Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Media Mínima (°C)	Temperatura Máxima >35 °C (días)	Precipitaciones (mm)
Vegetativa (0-35 días)	1	30,95	25,09	19,10	5	136,7
	2	34,01	27,47	20,85	19	306,1
Reproductiva (35-90 días)	1	33,51	27,06	21,51	26	264,8
	2	32,82	26,12	20,42	8	166,1
Madurez (90-140 días)	1	31,30	24,91	19,95	7	151,5
	2	33,34	21,2	18,46	-	44,6
Promedio	1	31,92	25,68	20,18	38	552,3
	2	33,39	24,93	19,91	27	516,8

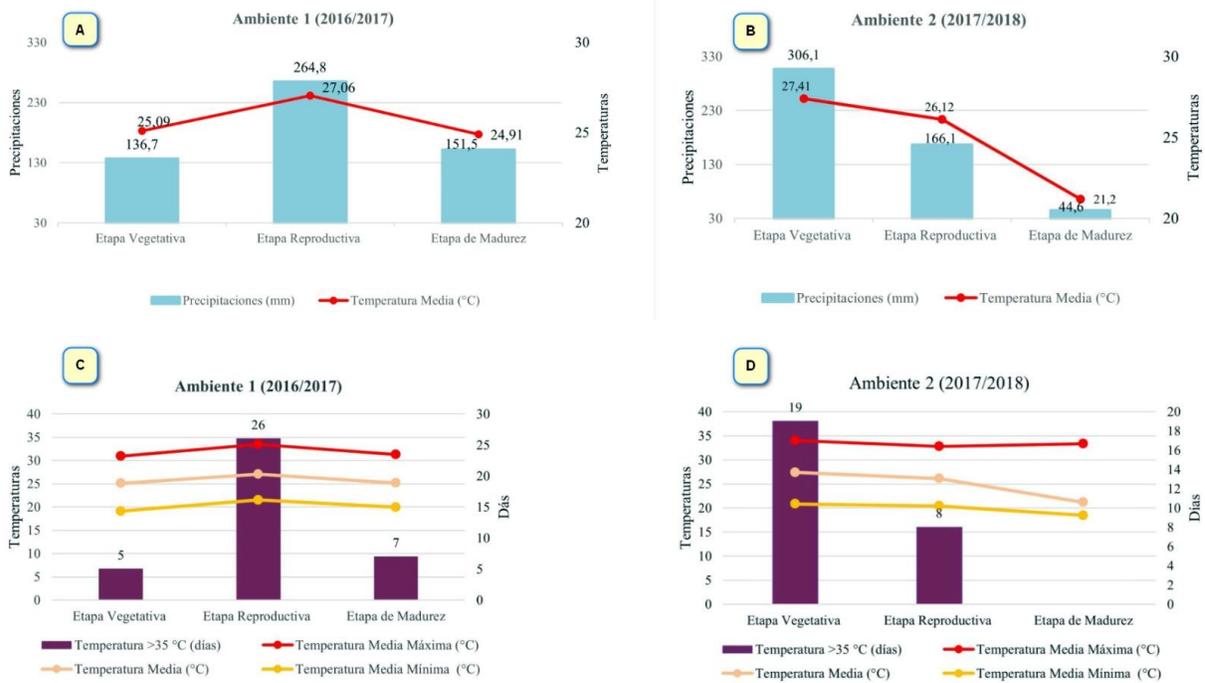


Figura 2: Distribución de las precipitaciones y temperaturas medias durante las etapas fenológicas del algodón en el ambiente 1 (A) y Ambiente 2 (B). La distribución de las temperaturas medias, máximas, mínimas y número de días con mayor temperatura a 35°C se representan en C para el Ambiente 1 y D para Ambiente 2.

Por último, se caracterizó la etapa reproductiva, dividida en dos subetapas: a) Primer pimpollo hasta primera flor (35-60 dds) y b) Primera flor hasta fin de floración efectiva (60-90 dds aproximadamente). El Ambiente 1, se caracterizó por ser más caluroso y de mayores precipitaciones en las dos subetapas en relación con el Ambiente 2 (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de la distribución de las temperaturas (Máxima, Media y Mínima), número de días mayor a 35°C y precipitaciones durante la etapa reproductiva del algodón en los dos ambientes.

Etapa reproductiva	Ambientes	Temperatura		Temperatura	Temperatura	Precipitaciones (mm)
		Media Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Media Mínima (°C)	Máxima >35 °C (días)	
Primer pimpollo hasta primera flor	1	34	28,27	23,36	14	144,30
	2	32,79	26,77	21,6	5	115,1
Diferencias	1-2	1,21	1,5	1,76	9	29,2
*Primera flor hasta fin de flor efectiva	1	33,33	26,41	20,54	15	121,2
	2	31,79	24,95	19,04	3	61,3
Diferencias	1-2	1,54	1,46	1,5	12	59,9

* Subetapa donde se realizaron los registros de las variables respuesta (temperatura y radiación de planta) y las covariables (temperatura ambiental y precipitaciones acumuladas). Cabe aclarar que fueron incluidos en esta subetapa 8 días de la etapa de madurez.

Covariables y variables respuesta.

Covariables: En la Figura 3 se muestran las condiciones ambientales en la serie de tiempo representadas por las covariables. Es decir, las temperaturas ambientales que se registraron en el día de la medición de las variables respuesta y las precipitaciones acumuladas de los 10 a 12 días previos a la medición.

A continuación, se describe la disponibilidad de agua y la temperatura en la que se desarrollaron las plantas para cada Tiempo/semanas de registro (Semanas=tiempos 1, 2, 3, 4, y 5) en el ambiente 1 y 2.

Tiempo/semana 1: las plantas que crecieron en el Ambiente 1 estuvieron expuestas durante los 10 a 12 días previos a la medición de las variables respuestas en condiciones de mayor disponibilidad de agua en el suelo por presentar mayores precipitaciones (+62,2 mm), respecto a las plantas que crecieron en el Ambiente 2. La temperatura ambiental del Ambiente 1 fue mayor (+6,4°C) que las registradas en el Ambiente 2.

Tiempo/semana 2: la disponibilidad de agua en el Ambiente 1 fue mayor (+13,2 mm) en relación con el Ambiente 2; la temperatura ambiental en el Ambiente 1 fue mayor (+7,1°C) que en el Ambiente 2.

Tiempo/semana 3: en el Ambiente 1 la disponibilidad de agua fue mayor (+26,2 mm) que en el Ambiente 2. En cuanto a la temperatura, también en el Ambiente 1 presento mayor temperatura (+8,6 °C) respecto al Ambiente 2.

Tiempo/semana 4: en la cuarta semana de registro el Ambiente 2 se recupera de la disponibilidad de agua presentando mayor valor (+23,9 mm) que el Ambiente 1. La temperatura ambiental fue más baja en el Ambiente 2 (-7,9 °C) con respecto al Ambiente 1.

Tiempo/semana 5: la disponibilidad de agua en el Ambiente 1 fue mayor (+4 mm) que en el Ambiente 2. Sin embargo, la mayor diferencia se registró en la temperatura ambiental, siendo el Ambiente 1 el que presentó un registro mayor (+14 °C) que el Ambiente 2.

En resumen, cada período de medición se diferenció en las condiciones de precipitaciones y temperatura ambiental. Es decir, el Ambiente 1 presentó mayor disponibilidad de agua de lluvia y de temperatura ambiental. El Ambiente 2 se caracterizó por exhibir restricciones en temperaturas más bajas y disponibilidad de agua de lluvia menor para el crecimiento y desarrollo del algodón.

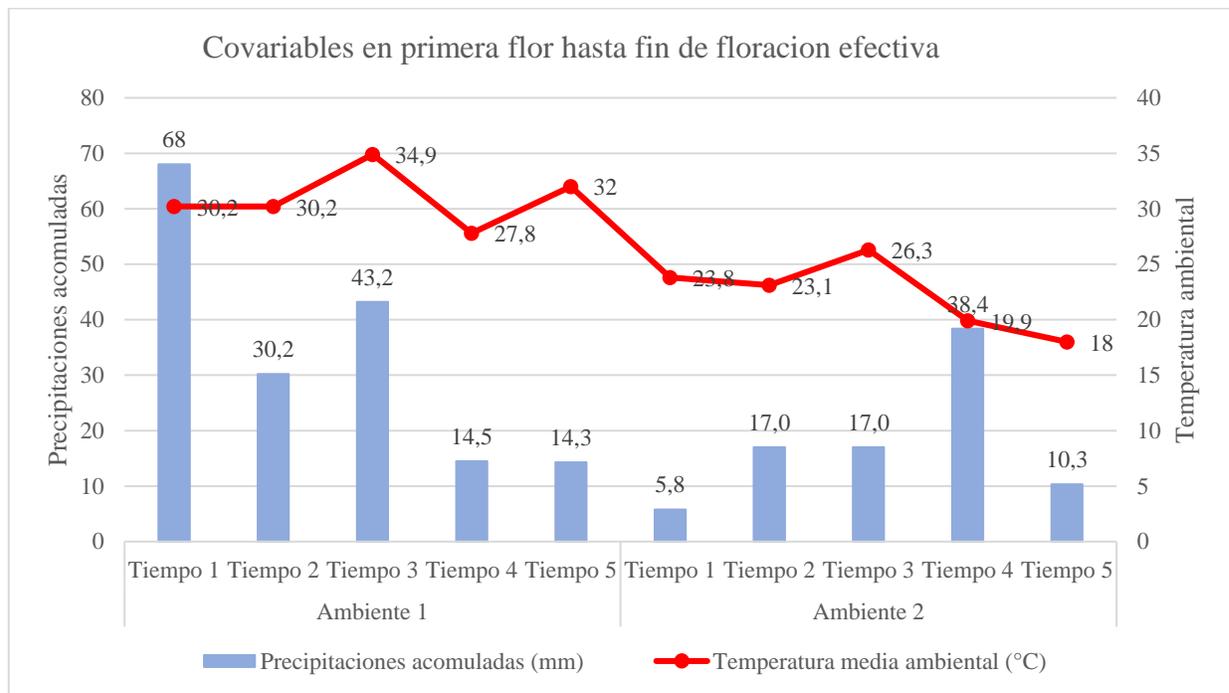


Figura 3. Condiciones meteorológicas en la serie de tiempo de medición para los Ambientes 1 y 2 en las covariables (precipitaciones acumuladas 10 a 12 días previo a la medición de las variables respuesta y la representación mediante una línea la temperatura ambiental del día de medición).

Seguidamente, se presentan los resultados de las variables respuesta y covariables para los dos ambientes.

La Tabla 5 resume las significancias de las variables respuesta de Ts, Tm, Ti y Rs en Genotipo (G), Ambiente (A) y para la interacción Genotipo x Ambiente (IGA). Los datos de la radiación inferior no se tuvieron en cuenta en el presente informe debido a la naturaleza de los datos. Los mismos presentaron una gran variabilidad y fueron descartados por su poca confiabilidad.

El Modelo Lineal Mixto (MLM) que mejor ajusto a los datos de Ts (°C) fue el que contempló una correlación espacial de tipo autorregresiva de orden 1 (AR1). En la prueba secuencial presento diferencias significativas en IGA (p-valor <0,0001) y sin diferencias en G y A.

El MLM que mejor ajusto a los datos de Tm (°C) fue el que contempló una correlación espacial de tipo sin estructura (UN) y las pruebas se correspondieron con diferencias significativas en A, G e IGA (p-valor= <0,0001).

El MLM que mejor ajusto a los datos de Ti (°C) fue el que contempló una correlación espacial de tipo sin estructura (UN). Solo presentó diferencias significativas a nivel genético. Los genotipos modernos presentan Ti más elevadas, seguidas de los obsoletos normales; las Ti más baja se observaron en el genotipo de hoja Okra (Datos no mostrados).

En Rs ($\mu\text{moles. m.}^{-2} \text{s}^{-1}$) ningún modelo de los probados pudo representar adecuadamente la naturaleza de los datos. Los residuales no se ajustan a una distribución normal. Se utilizo el módulo de Modelos Lineales y Generalizados Mixtos (MLGM) dónde es posible asignar el tipo de distribución para los residuales y su función de enlace apropiada. De acuerdo con la naturaleza de los datos se optó por una distribución de tipo Gamma y se probaron tres funciones de enlace para evaluar el AIC y elegir la que representara mejor la naturaleza de los datos registrados para la variable Rs ($\mu\text{moles. m.}^{-2}\text{s}^{-1}$). El MLGM que mejor ajusto a los datos para esta variable fue el que contempló una distribución de los residuales de tipo Gamma y función de enlace “inverse”. Para los datos analizados bajo las condiciones de estudio fue posible detectar diferencias significativas de IGA, como así también para A. No presento diferencias significativas en G.

La significancia de la IGA muestra un cambio relativo en el comportamiento de las variables respuesta en los genotipos en función de los ambientes. Es decir, indica la contribución relativa de los genes en la expresión del carácter cuantitativo de temperatura de la planta en el estrato superior, en el estrato medio, y la radiación de la planta en la porción superior entre ambientes.

Tabla 5: Significancia de las Pruebas de hipótesis secuenciales de los efectos fijos.

Variable/Fuente de Variación	G	A	IGA
Ts (°C)	0,9573 ^{ns}	0,2483 ^{ns}	0,0158*
Tm (°C)	0,0001**	0,0403*	0,0001**
Ti (°C)	0,0001**	0,6102 ^{ns}	0,4547 ^{ns}
Rs ($\mu\text{moles. m.}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0,3215 ^{ns}	0,0001**	0,0007**

Prueba de significancia: no significativo (ns); significativo $p < 0,05^*$; Altamente significativo $p < 0,001^{**}$.

Una vez comprobado la significancia de la IGA en las variables Ts, Tm y Rs se incorporaron las covariables de precipitaciones acumuladas (mm) y temperatura ambiental (Ta, °C) como efectos fijos en las pruebas secuenciales (Tabla 6). Se consideran que las covariables

contribuyen a diferenciar los ambientes de evaluación y por consecuencia a la IGA. En el caso de la T_i ($^{\circ}\text{C}$) las covariables mm y Ta no fueron incorporadas al análisis por no presentar en el análisis anterior significancias en la IGA.

Para T_s ($^{\circ}\text{C}$), se observó diferencias significativas en la IGA y en las covariables. Estos resultados indican que los cambios en el comportamiento relativo de la T_s ($^{\circ}\text{C}$) en los genotipos a través de los ambientes está influenciada por las precipitaciones acumuladas (mm) durante los 10 a 12 días previos a la medición y a la T_a ($^{\circ}\text{C}$) registrada en la fecha de medición.

En la variable T_m ($^{\circ}\text{C}$), al incorporar las covariables mm y T_a ($^{\circ}\text{C}$) como efectos fijos, se observó diferencias significativas en las covariables y la IGA ($p\text{-valor} < 0,0001$), mostrando influencia de las precipitaciones y la temperatura ambiental en la formación de la T_m ($^{\circ}\text{C}$).

En el caso de la R_s ($\mu\text{moles. m.}^{-2}\text{s}^{-1}$) la covariable Ta fue significativa, caso contrario para las precipitaciones acumuladas (mm). Estos resultados indican que la temperatura ambiental y la radiación están relacionadas.

Tabla 6: Significancia de las Pruebas de hipótesis secuenciales de los efectos fijos.

Variable/Fuente de Variación	mm	Ta	IGA
T_s ($^{\circ}\text{C}$)	0,0028**	0,0128*	0,0347*
T_m ($^{\circ}\text{C}$)	0,0001**	0,0001**	0,0001**
R_s ($\mu\text{moles. m.}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0,9999 ^{ns}	0,0028**	0,0001**

Prueba de significancia: no significativo (ns); significativo $p < 0,05$ *; Altamente significativo $p < 0,001$ **.

A continuación, se presentan los gráficos de las interacciones para las variables respuesta (T_s , T_m y R_s):

En la Figura 4 se expresan los cambios en el comportamiento relativos de T_s ($^{\circ}\text{C}$) de los genotipos a través de ambiente. Estas diferencias de temperaturas están influenciadas por las precipitaciones acumuladas y la temperatura ambiental, siendo mayores los valores en el Ambiente 1 y menores en el Ambiente 2. Los genotipos en el Ambiente 2 se comportan de igual manera y en el Ambiente 1, SP 48814 se diferencia de los demás genotipos.

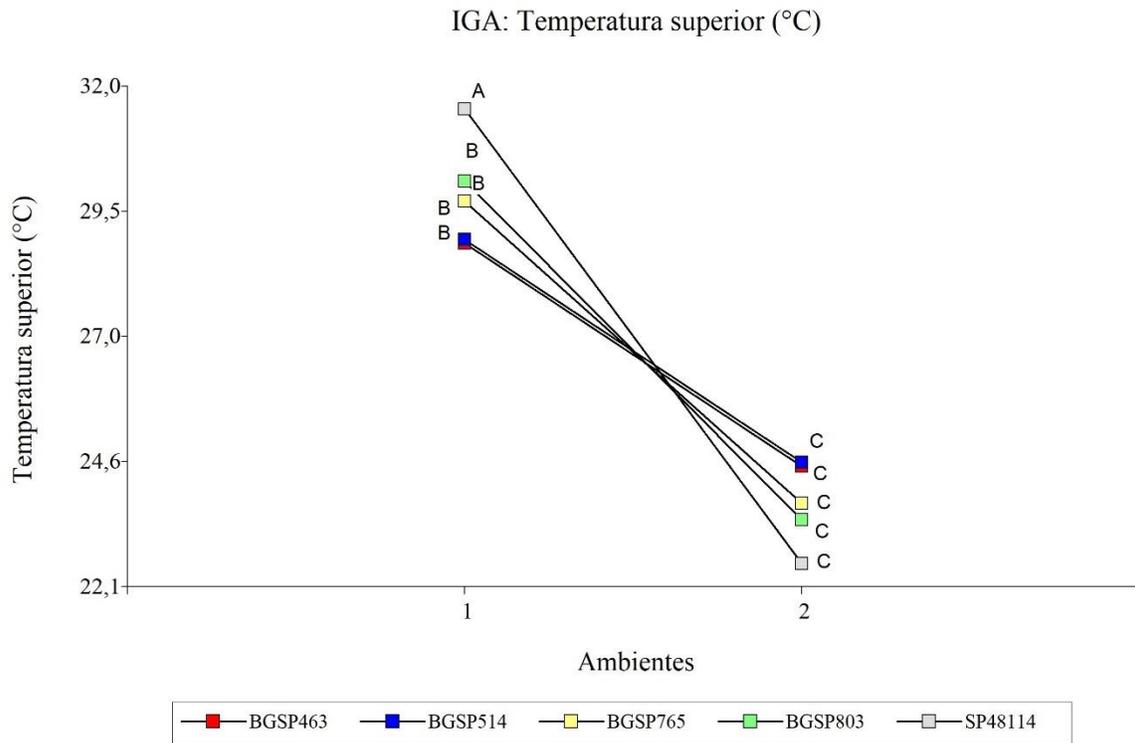


Figura 4. Interacción en la temperatura superior. Letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

En la Figura 5 se presentan los valores medios de la T_m (°C) para la IGA. Los mayores valores de T_m (°C) en la IGA se expresan en el Ambiente 2 y son menores en el Ambiente 1. Las precipitaciones acumuladas en los 10 a 12 días previos de la medición y la temperatura ambiental influenciaron en discriminar a la T_m (°C) por ambiente. En el Ambiente 1 los genotipos presentan en mismo comportamiento, caso contrario sucede en el Ambiente 2.

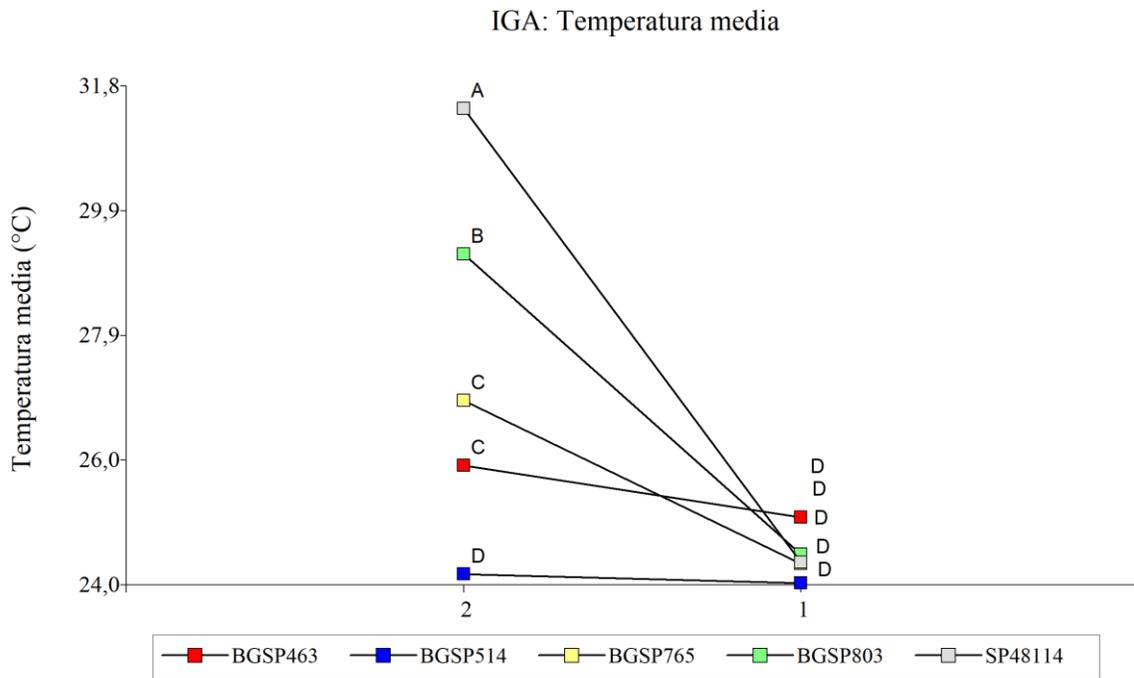


Figura 5. Interacción en la temperatura media. Letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

En la Figura 6 se muestra gráficamente la IGA para R_s ($\mu\text{moles. m}^{-2}\text{s}^{-1}$). En condiciones de altas temperaturas existe mayor interceptación de luz y la variabilidad fenotípica es mayor, sin embargo, en ambientes con temperaturas normales a bajas la radiación captada es menor y los genotipos se comporta de manera similar. Estos cambios de la radiación superior están influenciados por la temperatura ambiental y no por las precipitaciones acumuladas en este estudio. Los mayores valores en la interceptación de luz se presentaron en el ambiente 1 y los menores en el Ambiente 2.

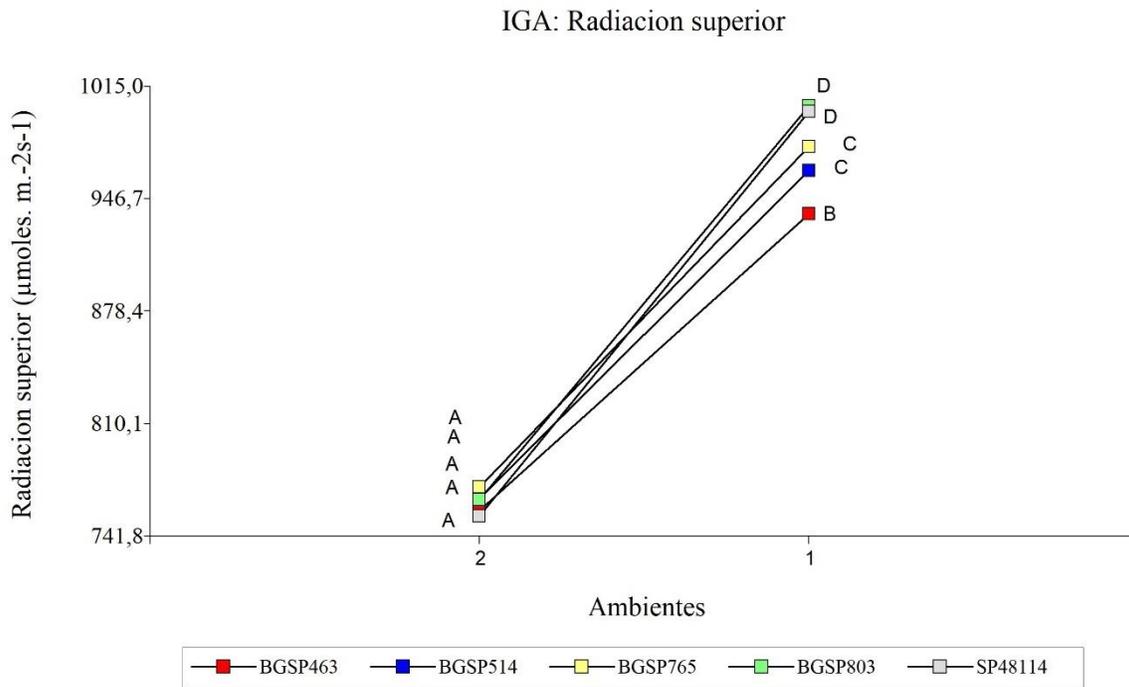


Figura 6. Interacción en la radiación superior. Letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

A partir de los resultados del análisis de la IGA y la representación gráfica se construyó un gradiente de enfriamiento en primera flor hasta fin de floración efectiva en un contexto productivo de secano y sistema convencional. Se tuvo en cuenta la temperatura superior, temperatura media y radiación superior. La temperatura inferior al no presentar significancia en la interacción no fue incluida en el modelo.

En la Figura 7 se observa el modelo general de enfriamiento propuesto para los genotipos estudiados y ambientes con ofertas hídricas y temperaturas diferentes. La campaña 2016/2017 (Ambiente 1) se caracterizó por un ambiente más caluroso y húmedo (+48%). En contraste, la campaña 2017/2018 (Ambiente 2) se caracterizó por un ambiente con temperatura y precipitaciones inferiores.

La variación de temperatura en el Ambiente 1 se encuentra definida por temperatura y radiación más elevada desde la parte superior de la planta y más fresco en la parte media. En el Ambiente 2, esta variación de temperatura es inversa, es decir, más fresco en la parte superior y más cálido en la porción media, contando con menor radiación superior.

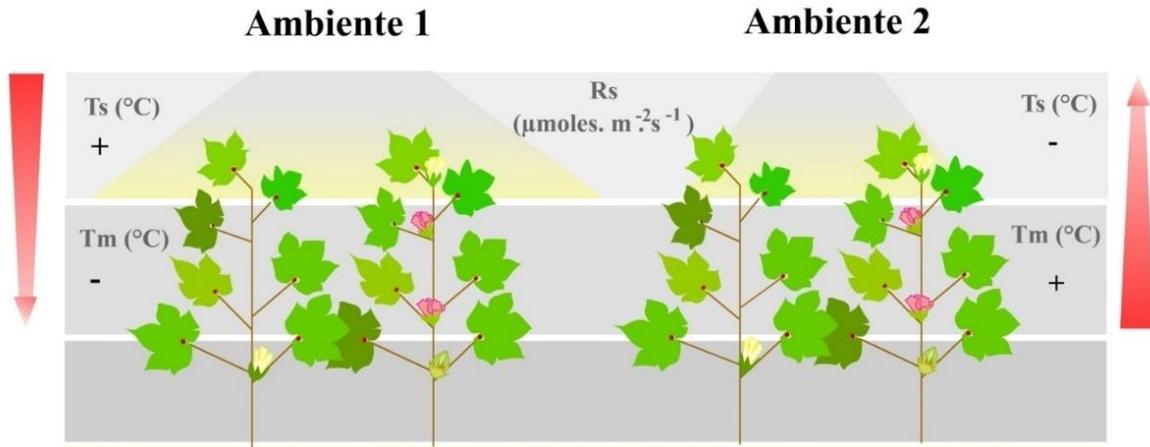


Figura 7: Modelo general de enfriamiento en primera flor hasta flor efectiva en un contexto productivo de secano y sistema convencional.

En la Figura 8 se observa un modelo específico de enfriamiento para genotipos de hoja okra con el objetivo de graficar el comportamiento de plantas con arquitectura diferente a los genotipos de hojas normales. La variación de temperatura presentada por BGSP514 en el Ambiente 1 es igual para los genotipos de hojas normales, sin embargo esta variación de temperatura no se observa en el ambiente 2, es decir no se genera el gradiente de enfriamiento debido a la ausencia de variación entre las temperaturas del estrato superior y estrato medio.

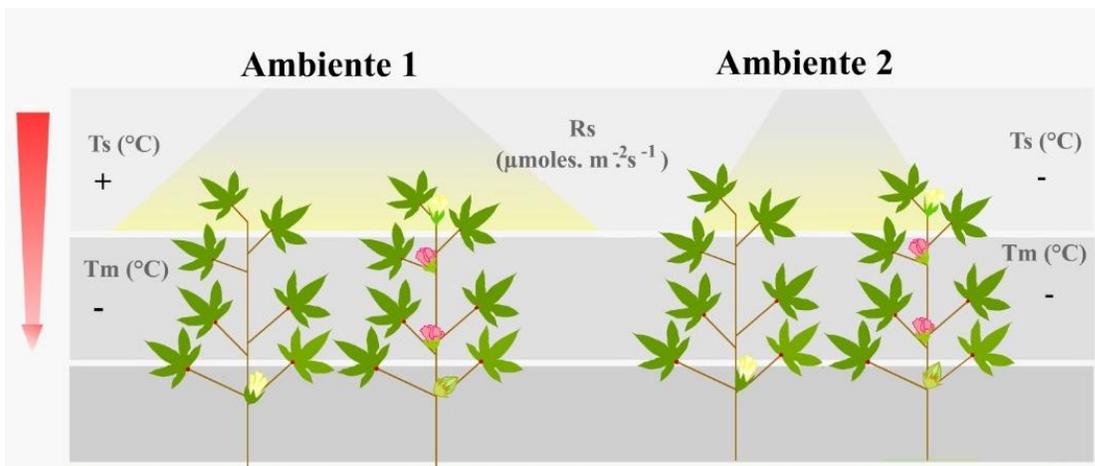


Figura 8: Modelo específico de gradiente de enfriamiento en primera flor hasta flor efectiva en un contexto productivo de secano y sistema convencional.

CONCLUSIÓN

El modelo de gradiente de enfriamiento en primera flor hasta floración efectiva está dado por la variación de los valores relativos de temperatura superior, temperaturas medias y radiación superior, resultante de la interacción genotipo ambiente.

La temperatura ambiental y las precipitaciones acumuladas influyen en la contribución de la expresión de la temperatura superior y temperatura media de manera diferencial a través de los diferentes ambientes. En la radiación superior, la temperatura ambiental tiene un efecto en la formación de valores relativos de la radiación y las precipitaciones acumuladas no afectan estos valores.

El modelo general de enfriamiento en genotipos modernos y obsoletos para ambientes distintos, generan un patrón de enfriamiento diferencial. Cuando las precipitaciones y temperaturas son adecuadas a los requerimientos de la fase fenológica reproductiva, el enfriamiento se genera desde el estrato medio hacia el estrato superior, en cambio con precipitaciones restrictivas y temperaturas normales a baja el estrato medio toma valores más altos con relación al estrato superior, en consecuencia, el gradiente de enfriamiento se invierte en estos ambientes.

Los genotipos de hojas okra, siguen el mismo patrón de enfriamiento que los genotipos de hojas normales cuando se exponen a condiciones ambientales sin restricciones en precipitaciones y temperatura ambiental, en cambio en ambientes con precipitaciones acumuladas restrictivas y temperaturas por debajo del óptimo térmico, los genotipos de hoja okra difieren su comportamiento, es decir no hay variación en las temperaturas de los estratos, por lo cual no se genera el gradiente.

Los genotipos modernos (SP 48114 y BGSP 803) de hojas normales presentan una temperatura inferior de la planta más elevada, seguidos por los genotipos obsoletos de hojas normales (BGSP 463 y BGSP 765) y por último el genotipo obsoleto de hoja okra (BGSP 514). Es decir, los genotipos de hojas okra presentan las temperaturas inferiores más bajas.

Si bien estas conclusiones son de carácter preliminar, contribuyen a entender el enfriamiento diferencial de las plantas de algodón a través de los ambientes agrícolas para un contexto productivo de secano en un sistema de siembra convencional desde la aparición de la primera flor hasta el fin de flor efectiva. En resumen, las plantas generan patrones distintos de enfriamiento para ambientes distintos. En ambientes con altas precipitaciones y temperaturas siguen un mismo patrón de enfriamiento más allá del fenotipo de la planta, caso contrario sucede en ambientes con restricciones donde se expresan patrones de enfriamiento relacionados con el fenotipo.

Como perspectiva de trabajo, se pretende realizar estudios de campo en ambientes semi controlados midiendo en las distintas fases fenológicas del cultivo y teniendo en cuenta como los diferentes patrones de enfriamiento influyen en los rendimientos.

Agradecimientos: Al Proyecto Nacional de Algodón, por el aporte financiero realizado para la concreción de los ensayos. A la Ing. Agr. (Mg) Emilce Martínez, de la EEA Pergamino por la realización del análisis estadístico. A la Ing. Agr (Mg) Julieta Rojas por su aporte en el diseño y realización de las gráficas “patrones de gradiente de enfriamiento”. Al comunicador de la EEA Sáenz Peña, Claudio Vallejos, por su colaboración en la edición y diseño de imágenes. Por último, agradecer y destacar el trabajo realizado por el personal de apoyo y técnico del grupo de Mejoramiento Genético y Calidad de Fibra de la EEA Sáenz Peña; Luis Ayala, Walter Jaquienchuk, Adrian Guazo, Carlos Guazo y Juan Guazo, quienes posibilitaron el seguimiento minucioso del ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arturi M.J. (1984). El Algodón. Mejoramiento Genético y Técnicas de su cultivo 1º ed. Editorial hemisferio sur S.A. pp. 31-39.
- Azcon, J., & Talón, M. (2008). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*.
- Burke, J.J., and D.E. Wanjura. 2010. Plant responses to temperature extremes. In: J.M. Stewart et al., editors, *Physiology of cotton*. Springer Science & Business Media, New York, NY.
- Casanoves, F., Macchiavelli, R., & Balzarini, M. (2005). Error Variation in Multienvironment Peanut Trials: Within-Trial Spatial Correlation and Between-Trial Heterogeneity. *Crop Science*, 45(5), 1927-1933. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0547>
- Damesa, T. M., Möhring, J., Worku, M., & Piepho, H. (2017). One Step at a Time: Stage-Wise Analysis of a Series of Experiments. *Agronomy Journal*, 109(3), 845-857. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.07.0395>.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat version 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Kelly, A. M., Smith, A. B., Eccleston, J. A., & Cullis, B. R. (2007). The Accuracy of Varietal Selection Using Factor Analytic Models for Multi-Environment Plant Breeding Trials. *Crop Science*, 47(3), 1063-1070. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.08.0540>
- Lee, J. V. (2012). Análisis del índice grado día y del índice de estrés hídrico en el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero e hidroponía. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/223/1/Jairo%20Vazquez%20Lee%20maestria.pdf>
- Martinez, E. S. (2019). *RESPUESTA A LA SELECCIÓN EN FESTUCA ALTA PARA SUELO SALINO-SÓDICO* [FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO]. <https://rehip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/58c55167-e08f-43af-aeee-8d86b86d0a0b/content>
- Molenberghs, G., & Verbeke, G. (2000). *Linear Mixed Models for Longitudinal Data*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0300-6>

- Orozco, A. J., Ayala, C. C., & Tatis, H. A. (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n1.2012.803>
- Ostengo, S., & Cuenya, M. I. (2013.). *Modelos mixtos en el análisis de ensayos comparativos de rendimiento multiambientales de una especie perenne*.
- Perez Leal, F. (2017). Fisiología Vegetal-I, II, III y IV.
- Piepho, H.-P., & Eckl, T. (2014). Analysis of series of variety trials with perennial crops. *Grass and Forage Science*, 69(3), 431-440. <https://doi.org/10.1111/gfs.12054>.
- Reporte final sobre las bases para una estrategia nacional de adaptación y mitigación de los efectos de la sequía en la República Argentina, 2020. Reporte final sobre las bases para una estrategia nacional de adaptación y mitigación de los efectos de la sequía en la República Argentina. Agosto 2020. Documento elaborado por la Dirección Nacional de Planificación y Ordenamiento Ambiental del Territorio, Secretaría de Política Ambiental en Recursos Naturales, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Rodríguez-Álvarez, M. X., Boer, M. P., van Eeuwijk, F. A., & Eilers, P. H. C. (2016). *Spatial Models for Field Trials* (Versión 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1607.08255>
- Squeo F. A., & León M. F. (2007). Capítulo III Transpiración. Fisiología Vegetal (F.A. Squeo & L. Cardemil, eds.) Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile (2007) 3: 67-84 <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Transpiracion.pdf>.
- So, Y., & Edwards, J. (2011). Predictive Ability Assessment of Linear Mixed Models in Multienvironment Trials in Corn. *Crop Science*, 51(2), 542-552. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.06.0338>
- Tcach N., & Paytas M. (2020). Incidencia de altas temperaturas durante el reproductivo sobre el rendimiento de algodón (*Gossypium hirsutum*) cultivado en diferentes distanciamientos entre surcos. *RIA 46* (1): 56-65 (abril de 2020) <http://ria.inta.gov.ar/trabajos/incidencia-de-altas-temperaturas-durante-el-reproductivo-sobre-el-rendimiento-de-algodon> <http://hdl.handle.net/20.500.12123/7289>
- Tcach, N., & Ibaló, S. 2019. Algodón en surcos estrechos. En: <https://repositorio.inta.gov.ar/handle/20.500.12123/5618>