

## Fisiología Vegetal



**D**urante la vigencia 2024 – 2025, la Disciplina de Fisiología Vegetal culminó la investigación FIS104005, orientada a la evaluación de un inhibidor de la síntesis de etileno en frutos de café. Los resultados obtenidos en este proyecto permitieron demostrar la acción de dicho inhibidor en diferentes estados de maduración. De manera paralela, se avanzó en la ejecución de los proyectos FIS104006 y FIS104007, dirigidos a consolidar el conocimiento en dos frentes estratégicos tanto para la disciplina de Fisiología Vegetal como para Mejoramiento Genético. El primero, enfocado en la clasificación de progenies mejoradas de café según el tiempo de maduración de los frutos, aportando criterios fisiológicos y agronómicos que generan conocimiento sobre este proceso de desarrollo. El segundo, orientado a la estandarización de metodologías analíticas para la identificación del 16-ortometil cafestol, constituye un aporte para garantizar la autenticidad del café colombiano en progenies avanzadas, provenientes de cruces interespecíficos entre *Coffea arabica* y *Coffea canephora*.

### **Clasificación de progenies mejoradas de *Coffea arabica* por tiempo de madurez de cosecha del fruto como parámetro para la constitución de variedades compuestas. FIS104006**

Con el objetivo de clasificar el ciclo de maduración del fruto de progenies de café con distintos tipos de hibridación (intra e interespecífica), se monitoreó el ciclo de maduración del fruto usando los grados días de crecimiento (GDD) en 12 progenies con hibridación intraespecífica (Intra.H.) y en 24 con hibridación interespecífica (Inter.H.), durante la cosecha principal y de mitaca (Tabla 17). Además, se evaluaron las variables tiempo cronológico de madurez del fruto (CTFR), radiación fotosintéticamente activa (PAR) y lluvia (R). El análisis de la información consistió en agrupar las progenies por GDD usando el método de k-means. Luego, las variables se evaluaron mediante un análisis de varianza multivariable semi-paramétrico con medidas repetidas para los clústeres de madurez como factor entre sujetos, mientras que, la cosecha fue definida como el factor dentro de sujetos.

Se detectaron tres clústeres de madurez. El clúster de madurez temprana (C1) agrupó las progenies con los menores GDD en la cosecha de mitaca y principal. En contraste, el clúster de madurez tardía (C3) mostró a las

progenies con los mayores GDD, tanto en la cosecha de mitaca como en la principal. El C2 exhibió el menor cambio entre mitaca y principal, indicativo de la estabilidad de estas progenies. En general, el desarrollo del fruto requirió mayor GDD en la cosecha secundaria (3.023 – 3.248 GDD) que en la principal (2.636 – 3.030 GDD) (Figura 31). El análisis de varianza multivariado mostró que el efecto de los clústeres de madurez también depende de su interacción con la cosecha (Tabla 18). El análisis descriptivo mostró que los valores de los clústeres de madurez (C1, C2, C3) para las variables GDD, CTFR y PAR disminuyeron en la cosecha principal con respecto a la cosecha secundaria, mientras que, en la variable R se observó lo contrario (Figura 32). Esto indica diferentes estrategias en el proceso de maduración de las progenies.

### **Identificación de 16-ortometil cafestol en líneas avanzadas provenientes de cruces interespecíficos de *Coffea arabica* x *Coffea canephora*. FIS104007**

En este proyecto se evalúa la presencia del compuesto 16-ortometil cafestol (16-OMC) en progenies avanzadas del programa de Mejoramiento Genético, con el propósito de establecerlo como una herramienta para el control y la garantía del origen 100% arábigo del café colombiano. Estas progenies, producto de cruzamientos con *C. canephora*, pueden contener trazas de 16-OMC, compuesto reconocido internacionalmente como indicador de fraude en mezclas de café robusta con café producido en Colombia. En el marco de la investigación se optimizó la técnica analítica para la determinación del 16-OMC,

**Tabla 17.** Progenies y número de tratamiento de las progenies, procedentes de los cruzamientos con hibridación intraespecífica de *Coffea arabica* (*Intra.H.*) y de la hibridación interespecífica entre *C. arabica* y *C. canephora* (*Inter.H.*). Generación filial (F).

Progenie	Hibridación   Cruzamiento	F
	<i>Intra.H.</i>	
1	Etiopía x (Caturra x Híbrido de Timor)	F5
7	Híbrido de Timor x (Caturra x Híbrido de Timor)	F5
38	Caturra x Híbrido de Timor	F8
29	Caturra x Híbrido de Timor	F7
6	Caturra x Híbrido de Timor	F7
30	Caturra x Híbrido de Timor	F8
31	Caturra x Híbrido de Timor	F8
20	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i> )] x [Catuaí x (Caturra x Borbón)]	F5
25	[(Caturra x Híbrido de Timor) x (Caturra x Híbrido de Timor)] x [Catuaí x (Caturra x Borbón)]	F5
22	[Caturra x (Caturra x <i>C. canephora</i> )] x [Catuaí x (Caturra x Borbón)]	F5
21	[(Caturra x Híbrido de Timor) x (Caturra x Híbrido de Timor)] x (Sudán Rume x Catuaí)	F5
27	[(Caturra x Híbrido de Timor) x (Caturra x Híbrido de Timor)] x Etiopía	F5
	<i>Inter.H.</i>	
63	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
42	Caturra x [(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra]	F5
43	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F7
51	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F7
52	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F7
41	Caturra x [(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra]	F5
44	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F7
86	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
95	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
75	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
64	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
80	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
84	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
70	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
102	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
82	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
99	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
90	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5

Continúa...

...continuación.

Progenie	Hibridación   Cruzamiento	F
58	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
68	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
66	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
93	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F5
73	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6
54	(Caturra x <i>C. canephora</i> ) x Caturra	F6

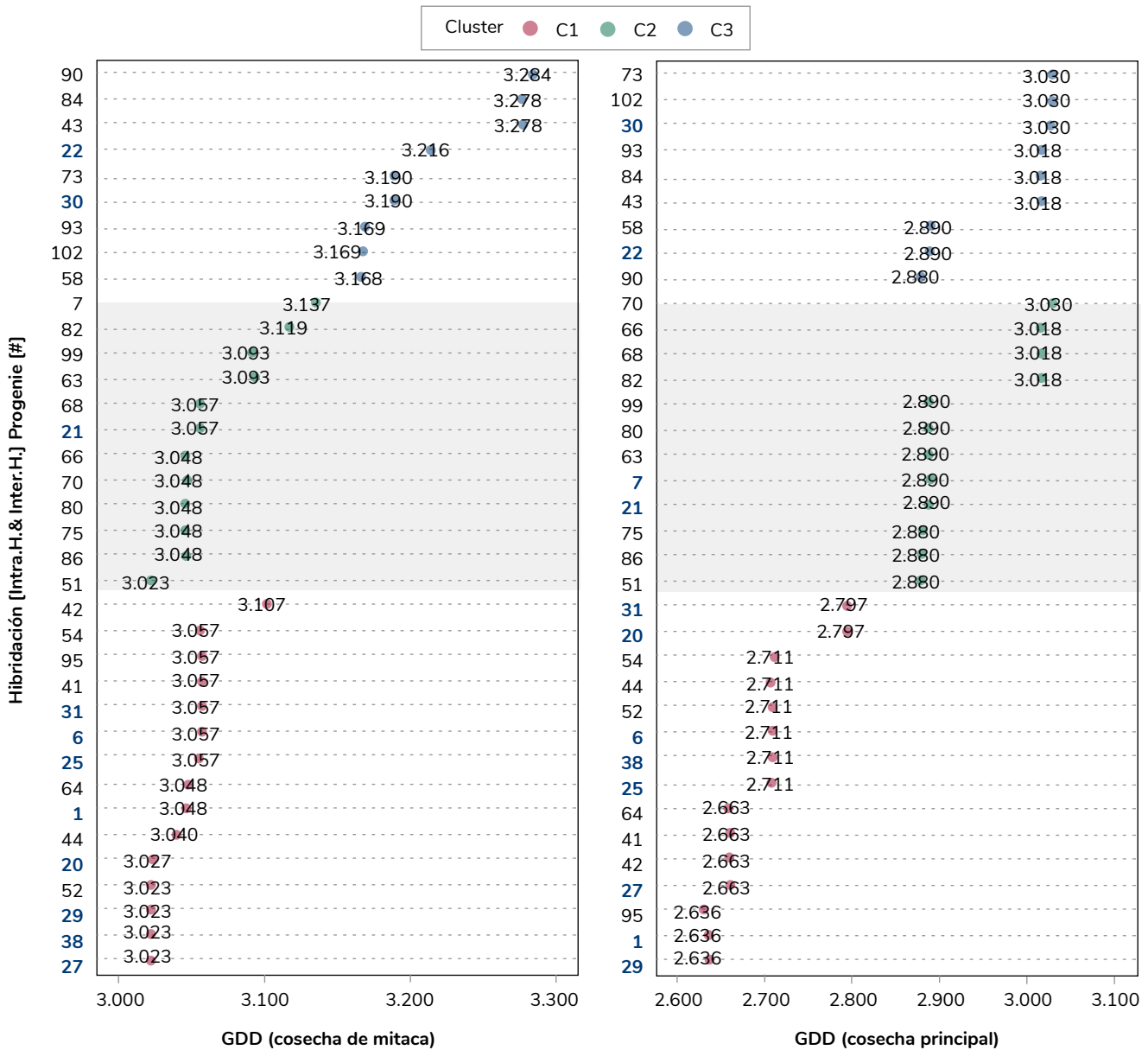


Figura 31. Puntos de la dispersión de los grados-día de crecimiento acumulado (GDD) por número de la progenie procedente de hibridación intraespecífica de *C. arabica* (Intra.H.) o de hibridación interespecífica de *C. arabica* con *C. canephora* (Inter.H.) y su correspondiente clúster de madurez temprana (C1), madurez intermedia (C2) y madurez tardía (C3) en la cosecha de "mitaca" (a.) y la principal (b.).

**Tabla 18.** Análisis semi-paramétrico multivariable tipo-ANOVA modificado en medidas repetidas con la estimación del p-valor usando la aproximación de Bootstrap Paramétrico (PBS) para el conjunto de variables grados-día de crecimiento acumulado (GDD), tiempo cronológico de madurez del fruto (CTFR), radiación fotosintéticamente activa (PAR), lluvia (R) en progenies de café. El factor entre sujetos fue el clúster de madurez, mientras que, el factor dentro de sujetos fue la cosecha.

Factor	Prueba estadística	PBS p-valor
Clúster	941,11	<0,001
Cosecha	1.023,537	<0,001
Clúster x Cosecha	309,309	<0,001

logrando su separación cromatográfica y la construcción de la curva de calibración (Figura 33), elaborada con 13 estándares en un rango de 25 ppb a 3.000 ppb. Con esta calibración se estableció un límite de detección de 50 ppb, lo que asegura sensibilidad y precisión en la cuantificación del compuesto.

Con estos parámetros fue posible identificar el compuesto en mezclas de *C. arabica* con *C. canephora* superiores al 1%, obteniendo además una correlación lineal confiable en la cuantificación del 16-OMC (Figura 34). Esta información servirá de base, en articulación con la Disciplina de Calidad, para el diseño de un modelo predictivo en el equipo NIRS, que posteriormente será

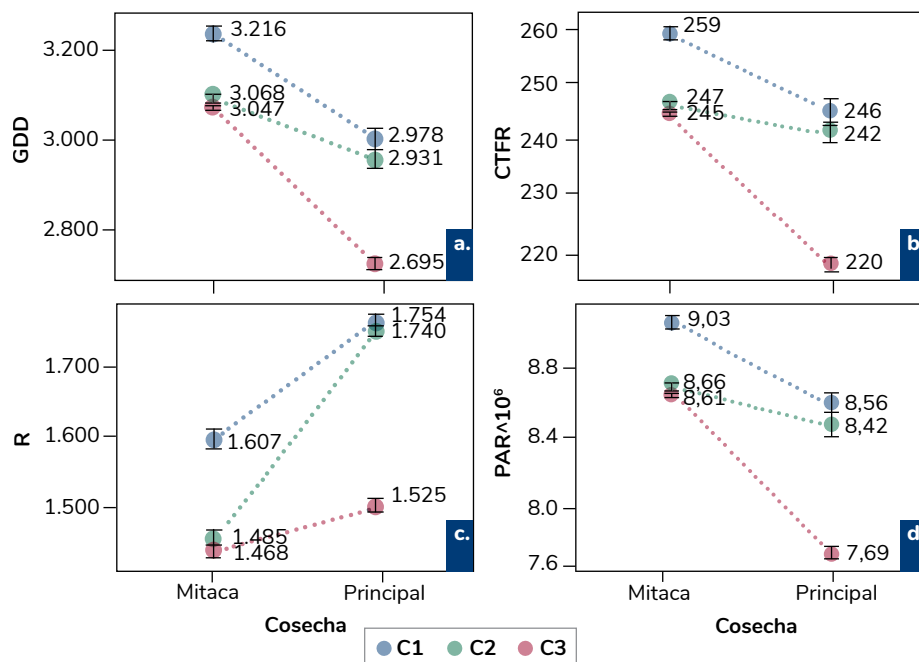
implementado por Almacafé en los diferentes puertos de Colombia.

Por otra parte, se ha identificado que el 86% de las progenies avanzadas de *C. arabica* x *C. canephora* evaluadas en el programa de Mejoramiento Genético presentan niveles importantes de este compuesto (>40 mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 35). Mientras que los compuestos químicos estudiados por la técnica NIRS son similares a los identificados en las variedades actuales (Tabla 19).

### Determinación de la inhibición de emisión de etileno en frutos de café con dos productos comerciales. FIS104005

Mediante la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) se identificó la emisión de etileno en los cuatro estados de maduración del fruto de café (verde, pintón, maduro y sobremaduro). Los resultados mostraron que los frutos verdes presentan la menor emisión de etileno (1,1 µL kg<sup>-1</sup>), mientras que los frutos maduros registran la mayor emisión (2,2 µL kg<sup>-1</sup>). Por su parte, los frutos pintones y sobremaduros exhibieron valores similares, con emisiones de aproximadamente 1,5 µL kg<sup>-1</sup>. (Figura 36).

Una vez caracterizado el comportamiento de la emisión de etileno en los diferentes estados de maduración del fruto de café, se analizó la emisión de etileno mediante la aplicación del inhibidor de etileno ácido salicílico (AS) a 1 mM directamente sobre los frutos en el árbol, incluidos los cuatro estados de maduración (verde, pintón, maduro y sobremaduro), recolectándose muestras a la hora, y a los uno, cuatro, ocho y 12 días posteriores a la aplicación. Los resultados evidenciaron una reducción promedio en la producción de etileno entre el 10% y el 15%. La menor inhibición se observó en frutos verdes y sobremaduros (10%), seguida por los frutos pintones (12%) y finalmente los frutos maduros, presentaron la mayor inhibición de la producción de etileno (13%) (Figura 37).



**Figura 32.** Medias y error estándar para las variables de grados-día de crecimiento acumulado (GDD), tiempo cronológico de madurez del fruto (CTFR: días después de floración), lluvia (R: mm) y radiación fotosintéticamente activa (PAR: mol m<sup>-2</sup>) para los clústeres de madurez temprana (C1), madurez intermedia (C2) y madurez tardía (C3) registradas durante la cosecha de mitaca y la cosecha principal para progenies de café.

La Tabla 20 muestra la reducción de etileno obtenida con el inhibidor AS en el rango de tiempo evaluado. A los cuatro días de la aplicación de AS se presentaron los mayores porcentajes

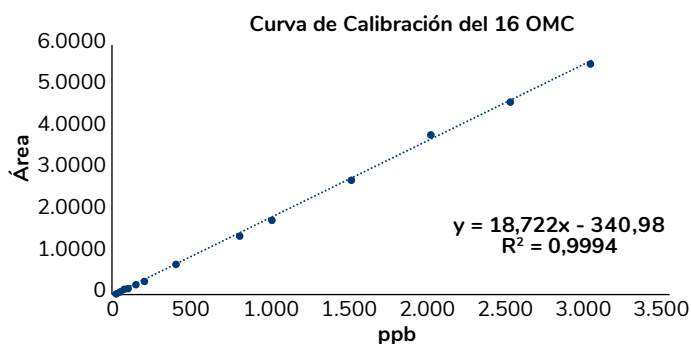


Figura 33. Curva de calibración del 16-ortometil cafestol.

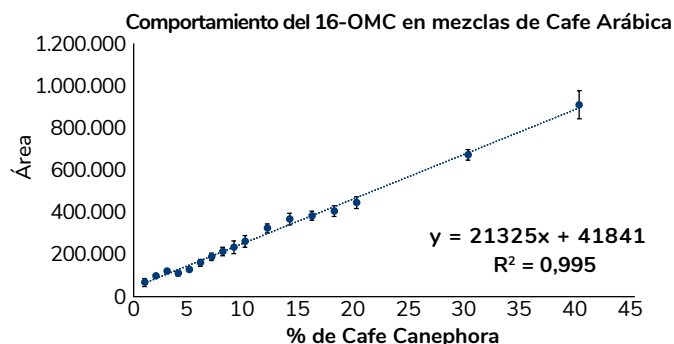


Figura 34. Comportamiento del 16-OMC en mezclas de mezclas de C. arabica con C. canephora.

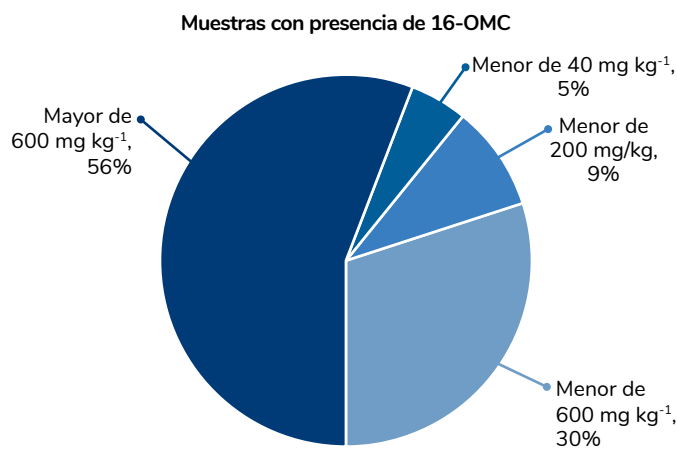


Figura 35. Identificación del 16-OMC en las líneas avanzadas.

Tabla 19. Porcentaje de compuestos químicos identificados por la técnica NIRS.

Muestras analizadas	Lípidos (%)	CQAT (%)	Sacarosa (%)	Cafeína (%)	Trigonelina (%)	Linoleico (%)	Palmítico (%)	Esteárico (%)	Oleico (%)	Ariquídico (%)
Máximo	12,9	6,1	9,3	1,5	1,1	44,8	39,9	9,9	14,5	3,2
Mínimo	7,6	4,8	6,6	0,7	0,6	37,1	35,2	5,8	8,3	0,8
Promedio	11,0	5,3	7,8	1,1	0,8	40,4	37,3	7,8	11,8	2,0
Referencia analítica	10,4	5,1	7,9	1,1	0,8	40,7	38,4	8,4	11,4	2,1

de reducción de la producción de etileno para los cuatro estados de maduración de los frutos de café probados, en el estado maduro con un porcentaje de inhibición de 15%, seguido por los estados verde y sobremaduro de 13% y, finalmente, el estado pintón con 12%. Estos resultados guardan coherencia con la actividad natural de emisión de etileno, en la cual los frutos maduros presentan los valores más altos en comparación con los pintones, sobremaduros y verdes.

De este modo, el uso del AS como inhibidor de la emisión de etileno plantea la necesidad de establecer prácticas de precosecha en las que el producto se aplique inmediatamente antes de que los frutos alcancen la madurez, con el fin de maximizar su efecto y prolongar la permanencia de los frutos maduros en el árbol. Además, se recomienda considerar re-aplicaciones del producto, dado que el efecto inhibitor disminuye progresivamente después del cuarto día de aplicado.

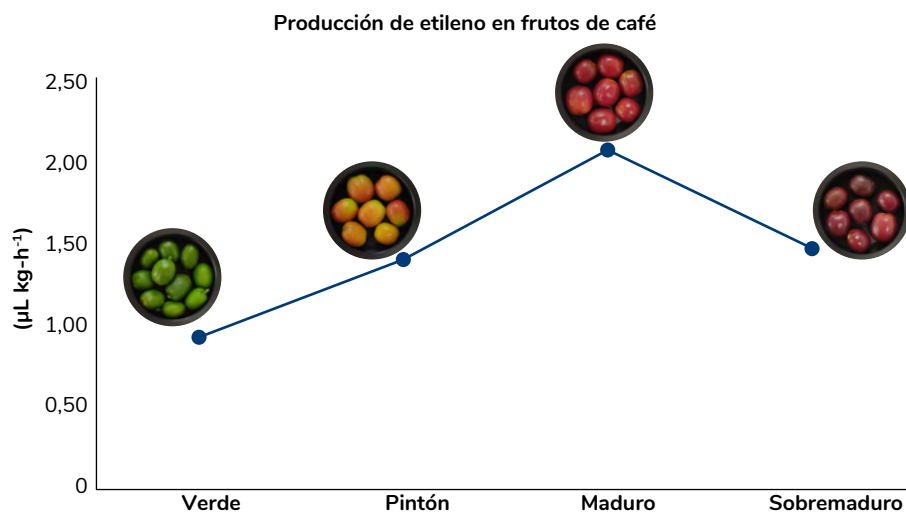


Figura 36. Comportamiento de la emisión de etileno en frutos de variedad Castillo®.

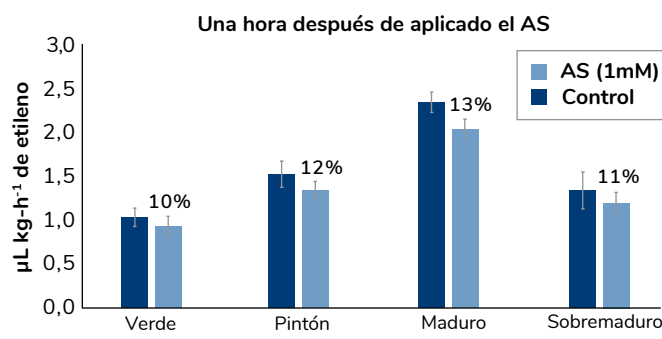


Figura 37. Efecto del inhibidor ácido salicílico 1 mM en la emisión de etileno en frutos de café.

Tabla 20. Porcentaje de reducción de etileno con el inhibidor AS (1 mM) respecto al testigo, en los diferentes estados de maduración y su permanencia en el tiempo.

Estado de maduración	Tiempo después de la aplicación de los tratamientos				
	1 hora	1 día	4 días	8 días	12 días
Verde	10%	13%	13%	10%	7%
Pintón	12%	12%	12%	10%	6%
Maduro	13%	13%	15%	12%	9%
Sobremaduro	11%	12%	13%	10%	9%