

## INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN LA SÍNTESIS DE CAFEÍNA EN GRANOS DE CAFÉ (*Coffea arabica*) Y SU RELACIÓN CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO

Gloria María Solares-Díaz<sup>1\*</sup>, Arturo Aguirre-Gómez<sup>1</sup>, María Elena Quintana-Sierra<sup>1</sup> y  
Reynoldez Vicente Barragan-Hidalgo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.

\*[gloria.solares@cuautitlan.unam.mx](mailto:gloria.solares@cuautitlan.unam.mx)

### Resumen

El café es un producto que México exporta a varios países del mundo. Más de tres millones de personas en el país se benefician de su cultivo, recolección, industrialización y comercialización. La calidad del café incluye propiedades químicas y organolépticas desde la perspectiva del consumidor. La cafeína probablemente es el factor químico más analizado y que con mayor frecuencia se utiliza para la discriminación de variedades de café verde. El propósito de este trabajo de investigación fue enfocado al estudio de la interacción genotipo x ambiente a partir de la acumulación de cafeína en grano de café en verde de tres variedades (Caturra, Catuai y Typica), dos fechas de corte y tres localidades que difieren en altitud: San Bartolo Tutotepec (1,100 msnm); San Bartolo Tutotepec (900 msnm), y; Huehuetla (450 msnm), pertenecientes a la zona Otomí-Tepehua del Estado de Hidalgo, México. Este análisis se realizó a través de la evaluación cromatográfica (Cromatografía Líquida de Alta Resolución-HPLC). Aunado a esto, se consideró a la vez el análisis conjunto de los parámetros de fertilidad N, P y K, tanto en suelos como en hojas y granos de café verde. Se estimaron las correlaciones entre las variables estudiadas. Las conclusiones relevantes del trabajo fueron: 1) Existe interacción genotipo-ambiente que determina la concentración de cafeína en granos en verde de las variedades Caturra, Catuai y Typica; 2) La interacción genotipo-ambiente es debida a la altitud; 3) Existe una relación inversamente proporcional entre la concentración

de cafeína en granos de café verde y la concentración de potasio en grano en las variedades Caturra y Catuaí asociada con la altitud, no así en la variedad Typica.

**Palabras clave:** cafeína, interacción genotipo x ambiente, HPLC

## Introducción

México es el onceavo productor de café a nivel mundial. Este producto se exporta a Estados Unidos de América, Bélgica, Canadá, Reino Unido y a otros países (SADER, 2022). La importancia de este producto como bebida se atribuye a sus efectos estimulantes y cualidades organolépticas. La calidad del café como bebida se refiere a sus características sensoriales que incluyen el aroma (bouquet), acidez, cuerpo y sabor (SAGARPA, 2002), relacionadas con la ubicación geográfica, condiciones climáticas y ambientales, el genotipo y las prácticas culturales durante el cultivo. La caracterización comercial de las variedades se realiza a partir de la determinación de ácidos clorogénicos y/o con cafeína (Bicchi *et al.*, 1995). La creencia de que la cafeína produce efectos adversos a la salud se ha incrementado la venta de café descafeinado, a pesar de que el proceso de eliminación de cafeína es caro. Existen especies que producen baja concentración de cafeína, pero la calidad de la bebida es de baja aceptación, por lo que se ha propuesto realizar mejoramiento genético para reducir la cantidad de cafeína. Sin embargo, al ser un carácter de tipo cuantitativo, o sea, determinado por muchos pares de genes e influenciados grandemente por el ambiente (Márquez, 1992). El mismo autor indica que un carácter cuantitativo podrá expresarse como una función del valor genotípico y el valor ecológico o ambiental, de tal manera que el genotipo tiende a cambiar el ambiente, pues al crecer y desarrollarse actúa sobre aquel modificándolo; esta modificación actúa entonces en otra forma sobre el genotipo y lo hace cambiar también, generando de esta manera una interacción entre el genotipo y el ambiente en el que se desarrolla, conocida como interacción genotipo-ambiente o interacción genético ambiental (GxE).

En el cultivo de café, se han realizado investigaciones para detectar interacción genotipo- ambiente, como el de Beksisa *et al.* (2018), quienes observaron diferencias significativas en el rendimiento de un ambiente a otro, indicando la presencia de

interacción genotipo x ambiente, trabajo realizado en Etiopía. Por otro lado, Mendonça *et al.* (2016), quienes detectaron interacción genotipo x ambiente en la calidad de la bebida de café, en donde la altitud, y el genotipo del material cultivado son factores para este efecto; este trabajo se llevó a cabo en Minas Gerais, Brasil.

Poca investigación se realiza en México sobre café en cuanto a su desarrollo y calidad en relación con el ambiente, de ahí que este trabajo tenga como propósito el detectar posible interacción genotipo x ambiente en la concentración de cafeína en grano, considerando para ello el análisis conjunto de variables del suelo, foliares y de grano.

### **Objetivo**

Detectar interacción genotipo-ambiente en las variedades de café Caturra, Typica y Catuai en seis ambientes que difieren principalmente en altitud, cultivadas en la región Otomí-Tepehua del Estado de Hidalgo, por medio del análisis químico y la determinación y cuantificación de cafeína en grano de café en verde. Asimismo, determinar los parámetros de fertilidad N, P y K en suelo, hojas y grano en verde de café para investigar posibles relaciones con la concentración de cafeína en grano en verde.

### **Materiales y métodos**

La toma de muestras para esta investigación se realizó en la Región Otomí-Tepehua del Estado de Hidalgo. Dicha región presenta climas semicálidos húmedos con lluvias todo el año, templados húmedos con lluvias todo el año, templados húmedos con abundantes lluvias en verano y cálidos subhúmedos con lluvias en verano. La región se subdivide a la vez en tres zonas: Zona alta, San Bartolo Tutotepec, 1,100 msnm; Zona media, San Bartolo Tutotepec, 900 msnm, y; Zona baja: Huehuetla, 450 msnm. Se aplicó el diseño en bloques al azar con dos repeticiones en las parcelas muestreadas; asimismo, se aplicaron los análisis de varianza de bloques al azar en varias localidades y análisis de varianza en subparcelas como observaciones repetidas (análisis anual), este último para concentración de cafeína. Se estimaron

correlaciones entre todas las características consideradas en los análisis de suelo, foliar y de grano.

Se realizaron muestreos en dos fechas diferentes en las mismas localidades y parcelas, por lo cual se consideran seis ambientes diferentes. El primer muestreo se realizó en diciembre del 2000 y el segundo el 2 de febrero 2001 en todas las localidades, parcelas y árboles de las variedades tomadas para este estudio. Las variedades consideradas fueron: Typica, Caturra y Catuaí. La variedad Typica fue introducida a México en el año de 1790, la variedad Caturra en 1952 y la variedad Catuaí en 1980.

Se tomaron muestras foliares, de suelo y de grano; ambos muestreos se realizaron en los mismos árboles. El suelo se tomó de los árboles muestreados. Para determinar la fertilidad del suelo, se analizaron N, P, K disponibles. Las muestras se tomaron a dos profundidades; zona I-suelo de 0-20 cm de profundidad y zona II-suelo de 20-40 cm de profundidad de acuerdo con las indicaciones de Domínguez (1999).

La determinación de fósforo disponible fue por el método de Bray (Houba *et al.*, 1986). Para la determinación de nitrógeno y potasio se siguió la misma metodología que en el caso del análisis foliar. En el análisis foliar se determinó el contenido de N, P, K en las variedades de café Typica, Caturra y Catuaí. De un cafeto se tomaron dos ramas seleccionadas del tercio medio, recolectando 4 hojas por cafeto. A continuación, se lavaron con agua y se colocaron en bolsas con los datos correspondientes. Las hojas se secaron a 60°C por 8 horas (Domínguez, 1999). La determinación de fósforo fue por colorimetría, la de potasio por flama y la de nitrógeno por colorimetría, de acuerdo con la metodología propuesta por Houba *et al.* (1989). La clasificación de la cantidad de nutrientes se realizó de acuerdo con el DOF (2000, 2002).

En el caso del grano, se determinó N, P, K y cafeína en grano verde por los métodos mencionados en el análisis foliar. Para la determinación de cafeína en grano en verde, se aplicó el método sugerido para Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) (Casal *et al.*, 2000), con modificaciones de las fases (acetonitrilo:agua, 40:60, tasa de flujo de 1.5 ml min<sup>-1</sup>).

La estimación de interacción genotipo-ambiente en la característica promedio de cafeína de los genotipos evaluados, así como la obtención de parámetros de estabilidad se analizaron aplicando el modelo de Eberhart y Russell (1966) con las definiciones realizadas por Carballo y Márquez (1970).

## Resultados

### *Análisis de Suelos*

En general, la cantidad de N disponible es muy baja en los suelos de la zona alta a ambas profundidades (de 0.00 a 4.93 mmol kg<sup>-1</sup>) y para las tres variedades estudiadas; para la zona media la concentración de N disponible es muy alta (de 4.30 a 9.30 mmol kg<sup>-1</sup>), sin embargo, la concentración en zona media para la variedad Caturra fue de 32.94 mmol kg<sup>-1</sup>. En la zona baja la concentración de N disponible es muy alta (5.38 a 6.16 mmol kg<sup>-1</sup>), en especial en el suelo de la variedad Typica a ambas profundidades (20.68 y 15.04 mmol kg<sup>-1</sup>) y excepto en la variedad Caturra a 0-20 cm (1.84 mmol kg<sup>-1</sup>), la cual se considera como concentración media y en la variedad Catuaí a 20-40 cm (0.00 mmol kg<sup>-1</sup>) muy baja (DOF, 2000, 2002).

Las mayores concentraciones de K disponible se presentaron en la zona media para la variedad Typica considerándose alta a ambas profundidades (7.51 y 8.47 mmol kg<sup>-1</sup>, de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, respectivamente). Para la variedad Caturra en las dos profundidades (5.58 y 3.42 mmol kg<sup>-1</sup>, de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, respectivamente), zona media y baja, así como para Catuaí zona media a la profundidad de 0-20 cm (4.62 mmol kg<sup>-1</sup>) la concentración es media. Bajas concentraciones se encuentran en las 3 zonas en la variedad Catuaí a la profundidad de 20 a 40 cm (1.25 y 1.49 mmol kg<sup>-1</sup>, zona alta media y baja, respectivamente). Asimismo, para Typica y Catuaí a la profundidad de 0-20 cm se considera baja (2.94 y 2.21 mmol kg<sup>-1</sup>) y muy baja para Typica a 20-40 cm (1.97 mmol kg<sup>-1</sup>). Como en el caso de N disponible, la zona alta tuvo menor concentración de K disponible; la variedad Caturra presenta baja concentración a ambas profundidades (2.94 y 2.69, de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, respectivamente), así como la variedad Typica de 0-

20 cm ( $2.21 \text{ mmol kg}^{-1}$ ), mientras que para la misma variedad de 20-40 cm ( $1.73 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) (DOF, 2000, 2002).

El P disponible muestra concentración alta en la zona media para la variedad Typica a ambas profundidades ( $5.88$  y  $4.69$   $2.21 \text{ mmol kg}^{-1}$  de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm, respectivamente); para la variedad Caturra misma zona, la concentración a 0-20 cm ( $0.59 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) es media y de 20-40 cm baja ( $0.16 \text{ mmol kg}^{-1}$ ); para la variedad Catuaí es baja a ambas profundidades ( $0.34$  y  $0.09 \text{ mmol kg}^{-1}$ , respectivamente) (DOF, 2000, 2002).

#### *Análisis foliar*

La variedad que presentó una mayor concentración de nitrógeno foliar fue Caturra, ya que el promedio obtenido de las tres zonas en esta variedad fue de  $1,244.8 \text{ mmol kg}^{-1}$ , mientras que el promedio de concentración en Typica fue de  $1,083.6 \text{ mmol kg}^{-1}$  y  $960.3 \text{ mmol kg}^{-1}$  en la variedad Catuaí. Por zona, las diferencias son mínimas; la zona baja muestra un promedio de concentración de  $1,165.8 \text{ mmol kg}^{-1}$ ,  $1,135.2 \text{ mmol kg}^{-1}$  la zona alta y  $987.7 \text{ mmol kg}^{-1}$  la zona media. El análisis de varianza correspondiente no indicó diferencias significativas entre las variedades y bloques (datos no mostrados). En la concentración de Potasio en hoja, al igual que en el caso de nitrógeno, el mayor promedio por variedad corresponde a Caturra con  $411.7 \text{ mmol kg}^{-1}$ , seguida por Typica con  $395.0 \text{ mmol kg}^{-1}$  y finalmente Catuaí con  $343.5 \text{ mmol kg}^{-1}$ . Por zona, se presenta un mayor promedio de concentración foliar en la zona media  $475.2 \text{ mmol kg}^{-1}$ , en la zona baja  $397.9 \text{ mmol kg}^{-1}$  y en la zona alta  $277.0 \text{ mmol kg}^{-1}$ , alrededor de la mitad de lo que se determinó en la zona alta. El análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre variedades y bloques (datos no mostrados). En el caso del fósforo en hoja, las concentraciones promedio por variedad y por zona tuvieron diferencias mínimas; por variedad, la mayor concentración promedio es en Caturra con  $135.5 \text{ mmol kg}^{-1}$ , la variedad Catuaí con  $129.8 \text{ mmol kg}^{-1}$  y en la variedad Typica  $107.8 \text{ mmol kg}^{-1}$ . Por zona, el promedio de concentración mayor se presentó en la zona media con  $128.2 \text{ mmol kg}^{-1}$ , en la zona baja  $125.5 \text{ mmol kg}^{-1}$  y en la zona alta, con el menor promedio de concentración,  $119.4 \text{ mmol kg}^{-1}$ . El análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre tratamientos y

bloques (datos no mostrados). En general, se puede decir que la variedad más exigente en N, P y K fue Caturra, ya que ésta presenta la mayor concentración en promedio de dichos elementos, en segundo término, Typica y finalmente Catuái.

### *Análisis de grano*

El promedio en la concentración de N para las diferentes variedades en los seis ambientes no fue significativo en el análisis de varianza (datos no presentados), esto es, que la concentración de N es similar en los tres genotipos de prueba para los seis ambientes. La concentración de K muestra diferencias significativas entre variedades en el Ambiente 1, de tal manera que las medias son diferentes. Para este caso, las variedades con media más alta fueron Catuái ( $397.4 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) y Typica ( $391.8 \text{ mmol kg}^{-1}$ ), similares estadísticamente, mientras que la variedad Caturra con una media menor ( $347.6 \text{ mmol kg}^{-1}$ ), es diferente significativamente. Asimismo, en el Ambiente 4 se presentan diferencias entre variedades; en este caso, la variedad Typica presenta el promedio más alto ( $383.2 \text{ mmol kg}^{-1}$ ), diferente significativamente a Catuái ( $338.2 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) y Caturra ( $329.2 \text{ mmol kg}^{-1}$ ), éstas últimos iguales estadísticamente. Para fósforo, el análisis de varianza muestra una diferencia entre las tres variedades para el Ambiente 3 en el cual la mayor concentración de P está presente en la variedad Typica ( $59.1 \text{ mmol kg}^{-1}$ ), diferente significativamente a las variedades Catuái ( $47.5 \text{ mmol kg}^{-1}$ ) y Caturra ( $46.4 \text{ mmol kg}^{-1}$ ), cuyos promedios son iguales estadísticamente. El análisis de varianza para localidades no muestra diferencias significativas entre variedades, se puede decir que hay consistencia en la concentración de P en grano entre las variedades de un ambiente a otro.

### *Cafeína*

La determinación de cafeína, como ya se mencionó, se realizó por HPLC. La cuantificación de cafeína se realizó al comparar las áreas de los picos con un estándar de cafeína a concentración conocida. El análisis de varianza de bloques al azar para varias localidades indica que no hay diferencias entre variedades para la característica concentración de cafeína en grano verde. Sin embargo, la interacción Localidad x Variedad es altamente significativa ( $F_c = 5.77$ ;  $F_t(0.05) = 2.76$ ;  $F_t(0.01)$

= 4.30), de tal manera que hay variaciones reales en la respuesta de concentración de cafeína en grano verde de localidad a localidad).

Observando los Ambientes desde el punto de vista de zonas, la zona alta corresponde a los Ambientes 1 y 4, zona media a los Ambientes 2 y 5 y zona baja a los Ambientes 3 y 6, hay una tendencia en las variedades Caturra y Catuaí de disminución en la concentración de cafeína en grano verde en el orden: zona alta > zona media > zona baja, esto es, Ambientes 1 y 4 > Ambientes 2 y 5 > Ambientes 3 y 6, en ambos cortes. En cambio, para la variedad Typica, el orden de mayor a menor concentración es zona media > zona baja > zona alta, esto es, Ambientes 2 y 5 > Ambientes 3 y 6 > Ambientes 1 y 4, en ambos cortes, sin embargo, las diferencias no son tan marcadas (Tabla 1).

**Tabla 1. Concentración promedio de cafeína en tres variedades de café verde ( $\text{g kg}^{-1}$ ) y promedio por ambientes (en forma descendente).**

Variedad	Corte 1 Ambiente	Promedio	Corte 2 Ambiente	Promedio
Caturra	1	9.83	4	10.02
	2	8.30	5	9.68
	3	7.89	6	8.77
Typica	2	9.98	5	10.10
	3	9.63	6	9.66
	1	9.04	4	8.62
Catuaí	1	10.99	4	8.91
	2	9.34	5	7.77
	3	8.26	6	7.11

*Interacción Genotipo-Ambiente en Café a través del Contenido de Cafeína*

En la Tabla 2 se presenta el análisis de varianza de los parámetros de estabilidad de variedades propuesto por Eberhart y Russell (1966) para concentración de cafeína en verde. El análisis muestra que no hay diferencias significativas en variedades y desviaciones de regresión, sin embargo, existe una diferencia altamente significativa en Variedades x Ambientes indicando que la concentración de cafeína es diferente al comparar ésta en los ambientes analizados y la variedad.

**Tabla 2. Análisis de Varianza de concentración de cafeína en café verde (g kg<sup>-1</sup>).**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fc	Significancia
Total	17	19.47			
Variedades	2	2.45	1.23	2.84	NS
Variedades x Ambientes	10	17.02	1.13		
Ambientes (lineal)	1	5.58	5.58		
Variedades x Ambientes (lineal)	2	6.25	3.12	7.24	**
Desviación regresión conjunta	12	5.18	0.43		
Desviación Var. 1	4	2.13	0.53	1.35	NS
Desviación Var. 2	4	1.14	0.28	0.72	NS
Desviación Var. 3	4	1.90	0.48	1.20	NS
Error Conjunto	12	4.75	0.40		

\*\* F(0.05) = 3.88; F(0.01)= 6.93

Los valores de parámetros de estabilidad obtenidos para las variedades Caturra, Typica y Catuaí en seis ambientes se presentan en la Tabla 3. Las medias de

concentración de cafeína de las tres variedades son iguales, muestran diferencias, pero con una probabilidad del 90%. En cuanto a los parámetros de estabilidad, el coeficiente de regresión para las variedades Typica y Catuaí fueron diferentes entre sí ( $F_c = 7.24$ ;  $F_t (0.05) = 3.89$ ,  $F_t (0.01) = 5.10$ , altamente significativo), además, únicamente el coeficiente de regresión obtenido para la variedad Caturra fue igual a uno ( $\beta_1 = 1$ ), mientras que para la variedad Typica fue menor de uno ( $\beta_2 < 1$ ) y mayor de uno ( $\beta_3 > 1$ ) para la variedad Catuaí. Las desviaciones de regresión fueron cercanas a cero para las tres variedades ( $\delta_{2di} = 0$ ) (Tabla 3).

**Tabla 3. Promedio de cafeína y situación de tres variedades de café evaluadas en seis ambientes en función de parámetros de estabilidad (Carballo y Márquez, 1970).**

Variedad	Coefficiente de regresión ( $\beta_i$ )	Desviaciones de la regresión ( $\delta_{2di}$ )	Descripción
Variedad 1: Caturra (9.08 g kg <sup>-1</sup> )	$\beta_1 = 1$ (0.97)	$\delta_{2d1} = 0$ (0.34)	Buena respuesta en todos los ambientes
Variedad 2: Typica (9.53 g kg <sup>-1</sup> )	$\beta_2 < 1$ (-0.28)	$\delta_{2d1} = 0$ (0.09)	Respuesta mejor en ambientes desfavorables y consistente
Variedad 3: Catuaí (8.63 g kg <sup>-1</sup> )	$\beta_3 > 1$ (2.30)	$\delta_{2d1} = 0$ (0.28)	Respuesta mejor en buenos ambientes y consistente

Se presentaron coeficientes de correlación significativos entre diferentes variables, sin embargo, la correlación entre potasio y cafeína es sobresaliente. La concentración de K en grano y la concentración de cafeína, para los ambientes 1, 2 y 3 fue  $r = -0.64$ , significativo, y para los ambientes 4, 5 y 6,  $r = -0.12$ , aunque no significativo, la tendencia existe. Sin considerar a la variedad Typica, únicamente las variedades

Caturra y Catuaí, el coeficiente de correlación para la concentración de cafeína y de K en grano es de  $r = -0.54$ , significativa.

## Discusión

Los nutrientes determinados en esta investigación, N, P y K disponibles en suelo muestran diferencias en cuanto a concentración de acuerdo con la variedad, la zona e incluso el bloque, aun cuando para las tres variedades en cada ambiente se tomaron de la misma parcela. Las diferencias dentro de la misma parcela fueron establecidas durante el muestreo. En la zona alta, la pendiente se considera 'regular', además de que son suelos pedregosos. En la zona media, la pendiente es pronunciada y los suelos con alta pedregosidad. La pendiente de la zona baja es muy pronunciada y la pedregosidad cambia de baja a muy pedregosa.

Malavolta *et al.* (2002), al realizar el análisis de ramas, flores y hojas en dos variedades de café, Mundo Novo y Catuaí Amarelo, no encontraron diferencias significativas entre variedades para N, P y K en hojas, al igual que en este estudio. Sin embargo, la concentración promedio de los tres elementos difiere considerablemente en relación con la concentración determinada en las tres variedades y zonas del Estado de Hidalgo. Mientras que, la concentración de N promedio de ambas variedades fue de  $29.01 \text{ g kg}^{-1}$  en Brasil, para Caturra, Typica y Catuaí en Hidalgo estuvo entre  $11.85$  a  $18.80 \text{ g kg}^{-1}$ , una diferencia de  $8$  a  $10 \text{ g kg}^{-1}$  menos. Para fósforo, la concentración promedio fue de  $1.31 \text{ g kg}^{-1}$  en Mundo Novo y Catuaí Amarelo, en cambio en las tres zonas y variedades para el presente estudio fue de  $2.70$  a  $4.74 \text{ g kg}^{-1}$ , de dos a tres veces más. En cuanto a K,  $26.7 \text{ g kg}^{-1}$  fue la concentración promedio en Brasil, mientras que en Hidalgo la concentración fue de entre  $6$  a  $16 \text{ g kg}^{-1}$  (entre  $10.37$  a  $20.46 \text{ g kg}^{-1}$ ) para las tres variedades y zonas. Estas diferencias se consideran debidas a tres factores: a) El análisis realizado por Malavolta *et al.* (2002) se llevó a cabo durante la antesis, mientras que en esta investigación las hojas se tomaron durante la fase de madurez del fruto; b) La densidad de plantación en Brasil es de  $4,000$  a  $5,000$  plantas por hectárea, densidad propia de cultivo a pleno sol (no se especifica), mientras que en Hidalgo es de  $1,350$

a 2,500 plantas por hectárea y creciendo bajo sombra, y; c) A pesar de que no se indica fertilización alguna en las parcelas experimentales brasileñas, es muy probable que tuvieran los requerimientos especificados para ello, mientras que las parcelas de la zona Otomí-Tepehua no se fertilizaron en al menos dos años. De cualquier forma, el mismo autor indica que puede haber diferencias significativas en el contenido de nutrientes entre cultivares debido a variación genética, intensidad de la demanda de brotes florales, flores durante antesis e interacción entre los nutrientes y labores culturales.

En relación con la correlación significativa encontrada entre K en grano y concentración de cafeína ( $r = -0.54$ ), indica que, a mayor concentración de K en grano, menor concentración de cafeína en las variedades Caturra y Catuaí, mientras que la variedad Typica no muestra esta variación. Resultados similares a los de Gremigni *et al.* (2001), en (*Lupinus angustifoliis*) al analizar alcaloides en semillas, en donde en ciertas variedades sí se presentan concentraciones inversamente proporcionales (Potasio y alcaloides) y en otra variedad, considerada “amarga” no hay esta respuesta.

En cuanto a los parámetros de estabilidad, el coeficiente de regresión para las variedades Typica y Catuaí fueron diferentes ( $F_c = 7.24$ ;  $F_t(0.05) = 3.89$ ,  $F_t(0.01) = 5.10$ , altamente significativo), además, únicamente el coeficiente de regresión obtenido para la variedad Caturra fue igual a uno ( $\beta_1 = 1$ ), mientras que para la variedad Typica fue menor de uno ( $\beta_2 < 1$ ) y mayor de uno ( $\beta_3 > 1$ ) para la variedad Catuaí, esta diferencia indica interacción genotipo x ambiente, esto es, que la concentración de cafeína cambia en función del ambiente. Dicha interacción es debida a la altitud y probablemente se encuentra asociada con temperatura, dado que: Waldhauser y Baumann (1996) detectaron que el equilibrio constante del complejo clorogenato de potasio-cafeína es dependiente de la temperatura; durante el proceso de tostado la temperatura está relacionada con el aumento en la concentración de cafeína (Casal *et al.*, 1998), lo que hace suponer un rompimiento del complejo mencionado; la diferencia en temperatura debida a la altitud es un descenso de cerca de 1.66 °C por cada 305 m de aumento en altitud (Wilsie, 1966),

lo que equivale, en las localidades estudiadas a una diferencia de 2.45°C de zona baja a zona media, 1.09 °C de zona media a zona alta, en la temperatura media. La interacción genotipo ambiente en café también fue detectada para calidad de café por Mendonca *et al.* (2016) debida a factores ambientales como altitud y diversidad genética en 10 cultivares en Brasil.

## Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en las variables evaluadas para el análisis de suelo, foliar y de grano en café verde en tres variedades, para la región de estudio Otomí-Tepehua del Estado de Hidalgo, zonas: alta, media y baja, y considerando los objetivos planteados en un inicio, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Existe interacción genotipo-ambiente que determina la concentración de cafeína en semillas en verde de las variedades Caturra, Typica y Catuaí. La interacción genotipo-ambiente es debida a la altitud, probablemente asociada con la temperatura.
4. Hay interacción Localidad x Variedad, de tal manera que existen variaciones en la respuesta de concentración de cafeína en grano verde de localidad a localidad.
5. Existe una asociación inversamente proporcional entre la concentración de cafeína en semillas en café verde y la concentración de potasio en grano, asociada con altitud y temperatura, para las variedades Caturra y Catuaí, no así para la variedad Typica.
6. Las variedades Caturra y Catuaí muestran menor concentración de cafeína en la zona baja, aumentando ésta en la zona media y presentando la mayor concentración en la zona alta.
7. La variedad Typica presenta constancia en el promedio de la concentración de cafeína en las tres zonas (seis ambientes).
8. Debido a que la variedad Typica se considera el tipo 'silvestre' en la región, muestra mayor adaptación este genotipo a los ambientes de prueba, de ahí su buena respuesta en los ambientes desfavorables y su constancia en concentración de cafeína.

En general, en la región Otomí-Tepehua la respuesta de las variedades en cuanto a concentración de cafeína en café verde es diferente con relación a las zonas alta, media y baja.

### Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Mexicano del Café, Delegación Hidalgo por su apoyo para la realización de esta investigación.

Agradecemos a la Doctora Raquel López Arellano de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM por su apoyo para la realización de las pruebas de HPLC.

### Referencias

Beksisa, L., Alamerew, S. Ayano, A., Daba, G. (2018). Genotype x environment interaction and yield stability of Arabica coffee (*Coffea Arabica* L.) genotypes. *African Journal of Agricultural Research*, 13(4): 210-219.

Bicchi, C.P., A.E. Binello, M.M. Legovich, G.M. Pellegrino, Van, A.C. (1993). Characterization of roasted coffees by S-HSGC and HPLC-UV and principal component analysis. *J. Agric. Food Chem*, 41: 2324-2328.

Carballo, C.A., Márquez, S.F. (1970). Comparación de variedades de maíz del bajío y la mesa central por su rendimiento y estabilidad. *Agrociencia*, 5(1): 129-146.

Casal, S., Oliveira, M.B., Ferreira, M.A. (1998). Development of an HPLC/diode-array detector method for simultaneous determination of trigonelline, nicotinic acid, and caffeine in coffee. *J. Liq. Chrom. & Rel. Technol.*, 21(20): 3187-3195.

Casal, S., Oliveira, M.B., Ferreira, M.A. (2000). HPLC/diode-array Applied to the thermal degradation of trigonelline, nicotinic acid, and caffeine in coffee. *Food Chemistry*, 68: 481-485.

Diario Oficial de la Federación. (2000). *Tomo DLXV, No. 12*. Estados Unidos Mexicanos.

Diario Oficial de la Federación. (2002). *Segunda Sección*. Estados Unidos Mexicanos.

Domínguez, M.B. (1999). Metodología para muestreo foliar y de suelos. En: Caficultura en México. Diplomado Continuo. Noveno Evento. UACH. Programa de Investigación y Desarrollo en Regiones Cafetaleras. Centro Regional Universitario Oriente. 20 sep.- 9 oct. Veracruz, México.

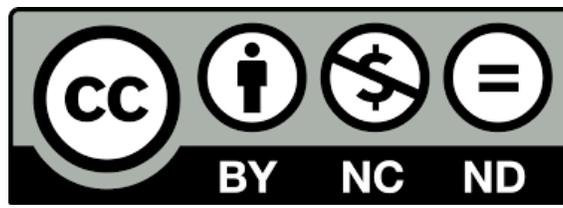
- Eberhart, S.A., Russell, W.A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6: 36-40
- Gremigni, P., Wong, M.T.F., Edwards, N.K., Harris, D., Hamblin, J. (2001). Potassium nutrition effects on seed alkaloid concentrations, yield and mineral content of lupins (*Lupinus angustifoliis*). *Plant and Soil*, 234: 131-142
- Houba, J., Van der Lee, J., Novozamsky, I., Wallinga, I. (1986). *Soil and Plant Analysis*. Part 5. Soil Analysis Procedures. Wageningen Agricultural University. Department of Soil Science and Plant Nutrition. The Netherlands. 56 p.
- Malavolta, E., Favarin, J.L., Malavolta, M., Cabral, C.P., Heinrichs, R., Silveira, J.S.M. (2002). Nutrients repartition in the coffee branches, leaves and flowers. *Pesq. Agropec. Bras*, 37(7): 1017-1022
- Márquez S.F. (1992). *Genotecnia Vegetal. Métodos, Teoría, Resultados*. Tomo I. A.G.T. Editor, S.A. México.
- Mendonça, C.A., Costa, R.J., Teruel, R.T., Dominghetti, F.A., Machado, R.R., Guimarães, M.A.N., Rodrigues, C.G. (2016). Relationship between the sensory attributes and the quality of coffee in different environments. *African Journal of Agricultural Research*, 11(38): 3607-3614.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca). (2002). Café de México: hacia los mercados de calidad. *Claridades Agropecuarias*, (103): 3-39.
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2022). *De viaje por el mundo: café mexicano*. En: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/de-viaje-por-el-mundo-cafe-mexicano?idiom=es>.
- Waldhauser, S.S.M., Baumann, T.W. (1996). Compartmentation of caffeine and related purine alkaloids depends exclusively on the physical chemistry of their vacuolar complex formation with chlorogenic acids. *Phytochemistry*, 42(4): 985-996.
- Wilsie, C.P. (1966). *Cultivos: Aclimatación y Distribución*. Ed. Acribia. España.



D. R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Excepto donde se indique lo contrario esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución No comercial, No derivada, 4.0 Internacional (CC BY NC ND 4.0 INTERNACIONAL). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

Fecha de asignación de la licencia 2024-10-28, para un uso diferente consultar al responsable jurídico del repositorio por medio del correo electrónico [unidadjuridicafesc@cuautitlan.unam.mx](mailto:unidadjuridicafesc@cuautitlan.unam.mx)



#### ENTIDAD EDITORA

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

Av. Universidad 3000, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

#### FORMA SUGERIDA DE CITAR:

Solares-Díaz, G. M., Aguirre-Gómez, A., Quintana-Sierra, M. A., y Barragan-Hidalgo, R. V. (2024). **INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN LA SÍNTESIS DE CAFEÍNA EN GRANOS DE CAFÉ (*Coffea arabica*) Y SU RELACIÓN CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO.**

MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍA (CONATEC), Año 7, No. 7, septiembre 2024 - agosto 2025. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.

[https://tecnicosacademicos.cuautitlan.unam.mx/CongresoTA/memorias2024/Mem2024\\_Paper03.html](https://tecnicosacademicos.cuautitlan.unam.mx/CongresoTA/memorias2024/Mem2024_Paper03.html)