

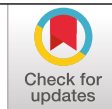


PRODUCCIÓN Y CALIDAD FÍSICA DEL CAFÉ EN RESPUESTA A FERTILIZANTES DE SÍNTESIS DE DIFERENTE TECNOLOGÍA

Hernán González Osorio *, Siavosh Sadeghian Khalajabadi *, Guido Hernán Franco **, Víctor Hugo Ramirez B.**

González-Osorio, H., Sadeghian, S., Franco, G. H., & Ramírez-Builes, V. H. (2025). Producción y calidad física del café en respuesta a fertilizantes de síntesis de diferente tecnología. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76106. <https://doi.org/10.38141/10778/76106>



La fertilización es una práctica clave para la producción y la calidad del café en Colombia. Para este propósito, el mercado local ofrece fertilizantes simples, fertilizantes en mezcla física (MF) y complejos granulados (CG) fabricados a partir de diferentes tecnologías. Con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes tipos de fertilizantes en la producción de café y la calidad del grano, en cuatro localidades de la zona cafetera colombiana se evaluaron siete tratamientos, consistentes en el suministro de macro y micro nutrientes en cafetales en edad productiva, a partir de las siguientes fuentes: 1). CG tradicional (CG1), 2). CG2 fabricado con tecnología diferente al CG1, 3). CG2 + MF (K+nitrato Ca y B), 4). CG2 + MF (nitrato Ca y B), 5). MF-NPKMgS (urea-DAP-KCl-Kieserita) + Zn + nitrato de Ca (sin B), 6). MF- NPKMgS+B, y, 7). MF basada en análisis de suelos (sin Ca, Zn, B) utilizando NPKMg. La producción anual y acumulada de café varió entre las localidades como consecuencia de la oferta ambiental de cada sitio, sin presentarse efecto diferencial de los tratamientos suministrados. La conversión café cereza/café pergamino seco, estuvo en promedios de referencia asociados con café de buena calidad y el factor de rendimiento en trilla, registró promedios inferiores al 89,5%. Se demostró que la fertilización del café en producción puede realizarse de manera efectiva, suministrando los nutrientes requeridos y las cantidades recomendadas, utilizando complejos granulados de diferente tecnología o su equivalente nutricional a partir de fertilizantes en mezcla física, manteniendo la producción y la calidad física del grano.

Palabras clave: Fertilizantes en mezcla física, complejos granulados, rendimiento en trilla, micronutrientes, análisis de suelos.

COFFEE YIELD AND QUALITY RESPONSE TO SYNTHETIC FERTILIZERS FROM DIFFERENT TECHNOLOGY

Fertilization is a key practice to achieve an adequate yield and quality of coffee in Colombia. For this purpose, the local trade offers simple, bulk blends (BF), and compound fertilizers (CF) made of different technologies. This study aimed to evaluate the effect of different types of fertilizers on the yield and physical quality of coffee beans. In four localities of Colombian coffee zone, seven treatments were evaluated, which consisted of supplying macro and micronutrients to coffee crops during its reproductive stage, applying the next sources of fertilizers: 1). CF of traditional use (CF1), 2). CF2 from different technology of CF1, 3). CF2 + BF (K+Ca-B nitrate), 4). CF2 + BF (Ca-B nitrate), 5). BF-NPKMgS (Urea-DAP-KCl-Kieserite) + Zn + Ca nitrate (without B), 6). BF-NPKMgS + B + Ca, and 7). BF based on Soil Analysis (Ca, Zn, B) using NPKMg. The treatments did not affect the annual and cumulative production of coffee. Variations on yield among localities were associated with environmental conditions. The ratio coffee cherry/dry coffee parchment had values of reference associated with good coffee quality, while the threshing performance factor was below 89.5% across all the treatments and localities evaluated. The results demonstrate the possibility of fertilizing effectively the coffee at the reproductive stage, applying the required nutrients and recommended doses, through compound fertilizer from different technologies or its nutritional equivalent using bulk blend, preserving the yield and the physical quality of coffee.

Keywords: Bulk blend fertilizers, compound fertilizer, threshing performance factor, micronutrients, soil analysis.

* Investigador Científico II y III, respectivamente. Disciplina Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-5716-2172> y <https://orcid.org/0000-0003-1266-0885>

** Yara, Crop Science. guido.franco@yara.com, victor.ramirez@yara.com



Durante la última década, el mundo viene enfrentando escasez de fertilizantes (FAO, 2022); predicciones establecen que la tasa de adquisición de materias primas para su fabricación tiende a incrementarse hasta el año 2050, con el objetivo de suplir la demanda requerida en cultivos de cereales y oleaginosas, principalmente (Chen et al. 2017; Alexandratos & Bruinsma, 2012). Este fenómeno ha dado como resultado una proyección de sobre abastecimiento a escala industrial, para satisfacer las potenciales necesidades del mercado, generando incertidumbre por escasez (Rolewicz et al., 2017; Wendling et al., 2013). Las anteriores circunstancias vienen, por lo general, acompañadas de coyunturas socioeconómicas, por cuenta de las variaciones en los precios del gas y del petróleo que, al ser materia prima para la fabricación y el transporte de los fertilizantes utilizados en la agricultura del mundo, finalmente impactan la rentabilidad de los productores (Morão, 2025; Wilson & Shakya, 2023; Williams, 2022). Un claro ejemplo de esto fue el alza de más del 355% en los precios de venta de fertilizantes de uso común en la caficultura colombiana como la urea, los fosfatos de amonio (MAP y DAP) y las fuentes de potasio como el KCl, registrados en sólo 18 meses como consecuencias de la cotización internacional del petróleo (Suárez, 2008) y los altos precios generados a raíz del conflicto político entre Rusia y Ucrania, que desencadenó en escasez de fertilizantes y especulación de precios en los mercados locales e internacionales durante los primeros meses posteriores a la pandemia por COVID-19 (Vos et al. 2025; Arndt et al., 2023).

A la anterior problemática, se suman las preocupaciones ambientales derivadas del uso de fuentes fertilizantes que generan alta polución (Hu & Smidhalter, 2024; Jacobst et al., 2017). Esto ejerce una permanente presión por la adopción de estrategias de fertilización

más efectivas (Prashan et al. 2025; Cai et al., 2025), en las que además se incluye el uso de análisis de suelos y la adquisición de fertilizantes de tecnología avanzada (Kumar et al., 2025), y de baja huella de carbono, que permitan al caficultor seleccionar un producto que contenga los nutrientes requeridos por el cultivo y que, aplicado en las cantidades adecuadas, garantice la productividad y la calidad del grano.

Con base en las experiencias de investigación relacionadas con la respuesta del café a la fertilización, en Colombia se han desarrollado diferentes fórmulas fertilizantes conformes con la dinámica de la caficultura del país. A partir de los estudios realizados por Uribe y Mestre (1976), las recomendaciones para cafetales a plena exposición solar se centran en 240 kg ha-año⁻¹ de nitrógeno (N) y potasio (K₂O) y entre 40 y 80 kg ha-año⁻¹ de fósforo (P₂O₅). En los últimos años, los ajustes derivados de las investigaciones de Sadeghian (2022), sugieren por hectárea por año, hasta 300 kg de N, 260 kg de K₂O y alrededor de 50 kg de P₂O₅, de magnesio (MgO) y de azufre (S), dependiendo de la densidad de siembra y del nivel de sombrero. En el mismo sentido, en casos específicos de acidez y de fertilidad del suelo, se plantea la necesidad de incluir calcio (Ca), zinc (Zn) y boro (B) (Sadeghian & González-Osorio, 2012). Los nutrimentos y cantidades mencionadas, pueden ser aplicados a través de mezclas de fertilizantes simples (MF) o complejos granulados (CG), dado que ha sido demostrado que la producción y calidad física del grano alcanzadas a través de cualquiera de estas opciones es similar (Sadeghian & González-Osorio, 2022; Sadeghian et al., 2007).

No obstante, persiste el criterio de efectividad en la fertilización a favor de los CG, dado que las fuentes regularmente utilizadas en las MF, generan una combinación heterogénea e incompatibilidad física (Miserque

& Pirard, 2004), presentan dificultades en el almacenamiento (Gezerman, 2020; Wang et al., 2019; Albadarín et al., 2017) y desencadenan reacciones químicas que pueden ocasionar deterioro en el producto final (Saha et al., 2018; Rahmanian et al., 2015). Por el contrario, a través los CG se facilita, entre otros, la inclusión de nutrimentos que se requieren en baja concentración y la posibilidad de ofrecer formulaciones, cuyo balance iónico de elementos, se estima, es favorable para la fisiología, la producción y la calidad de diversos cultivos (Tawfeeq et al., 2017; Piwpuan et al., 2013; Witte, 2011).

Con base en el anterior planteamiento, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de fertilizantes en MF y fertilizantes CG en la producción y calidad del café.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en cuatro localidades de la zona cafetera colombiana contrastantes en clima y suelos (tablas 1 y 2).

Procedimiento. En tres de las cuatro localidades se instaló un germinador y un vivero o almácigo de café (*Coffea arabica*) Variedad

Tabla 1. Ubicación, características climáticas y de los suelos en las localidades objeto de estudio.

Depto.	Municipio	Finca	Suelos	Ubicación	Altitud	Temp.	Lluvia
			Material parental	Latitud/ longitud	m	°C	mm/ año
Quindío	Montenegro	El Agrado	Cenizas volcánicas	4°31'N / 75°48'W	1.275	21,9	2.066
Caldas	Chinchiná	Naranjal	Cenizas volcánicas	4°58'N / 75°39'W	1.381	20,6	2.711
Santander	Floridablanca	San Antonio	Roca sedimentaria	7°6'N / 73°4'W	1.539	19,7	1.480
Antioquia	Venecia	El Rosario	Roca ígnea	5°58'N / 75°42'W	1.635	20,5	2.571

Tabla 2. Características químicas de los suelos al inicio de la fase experimental.

Finca	pH	Materia orgánica	P	K	Ca	Mg
		%	mg kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹	
El Agrado	4,5	5,8	123	0,42	0,83	0,14
Naranjal	5,1	13,4	20	0,16	1,33	0,47
San Antonio	4,8	5,2	8	0,28	2,02	0,44
El Rosario	4,8	14,5	37	0,82	1,34	0,60

Métodos. pH: relación suelo:agua 1:1 (potenciométrico); Materia orgánica: Walkey & Black (colorimetría); fósforo (P): Bray II (azul de molibdato, colorimétrico); potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg): Acetato de amonio pH:7,0 (espectrofotometría de absorción atómica-EAA).

Castillo[®], siguiendo las recomendaciones de Cenicafé. Una vez el almácigo cumplió los seis meses, se condujo a un lote de aproximadamente 1.500 m², buscando un patrón de siembra mínimo de 6.000 plantas/ha. En El Agrado, la experimentación se llevó a cabo en un cafetal Variedad Castillo[®] sembrado a una densidad de 10.000 plantas/ha, con 18 meses de edad. Durante la fase de crecimiento vegetativo, todas las plantaciones recibieron la fertilización y/o correctivos de la acidez (aplicación de cal), de acuerdo con los resultados de los análisis de suelos y siguiendo las recomendaciones de Cenicafé (Sadeghian, 2022). Una vez los lotes cumplieron 18 meses, se aplicaron los tratamientos objetos de estudio.

Tratamientos. Se evaluaron siete tratamientos (Tabla 3), consistentes en fertilizar el café con macro y micronutrientes, a partir de las siguientes fuentes fertilizantes: 1). Un complejo granulado tradicional (CG1), 2). su equivalente nutricional con un complejo granulado de tecnología diferente (CG2), 3). CG2+KCl+nitratoCa y B (KNCaB), 4). CG2+KNCaB, 5). la mezcla física de Urea+DAP+KCl+Kieserita (NPKMg)+NCa+Zn (-B), 6). Mezcla física NPKMg+B, 7). fertilización basada en análisis de suelos (sin Ca, B ni Zn) utilizando NPKMg.

Teniendo en cuenta que los fertilizantes evaluados difieren en su concentración de N, P₂O₅, K₂O y MgO, las cantidades calculadas para el presente experimento, se fijaron tomando como base una dosis intermedia de nitrógeno equivalente a 240 kg ha-año⁻¹, por ser el elemento que siempre se incluye en los planes de fertilización para la fase de producción. Este cálculo permitió además suplir adecuadamente el café con otros nutrientes requeridos para la producción, en cantidades aproximadas a lo recomendado por Sadeghian & González-Osorio (2012), para una adecuada fertilización

cuando no se cuenta con los resultados del análisis de suelos.

La fertilización del tratamiento MF-según análisis de suelos, se hizo conforme a las actuales recomendaciones de Cenicafé y tuvo como base los resultados obtenidos mediante un muestreo de suelos, tomado antes de la primera aplicación de tratamientos. En adelante, con una frecuencia bianual, se tomaron muestras de suelos en las parcelas correspondientes a este tratamiento para efectuar los ajustes de fertilización y/o enmiendas correspondientes.

Todos y cada uno de los tratamientos se aplicaron fraccionados dos veces por año, el 50% entre febrero y marzo, y la cantidad restante entre agosto y septiembre.

Parcela y diseño experimental. Las parcelas experimentales fueron asignadas a los tratamientos, bajo el diseño experimental bloques completos al azar con siete repeticiones, donde el factor de bloque correspondió al gradiente de fertilidad.

Variables evaluadas. Para cada localidad, tratamiento y parcela experimental se evaluó la producción anual de café cereza y el acumulado de la producción (variables de respuesta). Dichas evaluaciones se realizaron durante cuatro años en El Agrado y Naranjal, cinco años en El Rosario y tres años en San Antonio. Adicionalmente, en el segundo año del experimento de cada localidad, durante el pico de recolección de la cosecha principal, se tomaron muestras de café cereza, para evaluar la calidad física del grano (variable complementaria), de acuerdo con los protocolos de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC, sf). Para tal fin, 5,0 kg de café cereza fueron recolectados por cada parcela experimental, se removió el pericarpio de los frutos y el café resultante se lavó y secó hasta una humedad del 11% (café pergamino seco-

Tabla 3. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Fuentes y dosis de nutrientes																		
	17-6-18-2	19-4-19-3	CaNO ₃ y B	urea	KCl	DAP	Kieserita	B-kelato	Zn-kelato	CaNO ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S	CaO	B	Zn	
							(25MgO-20S)	(21B)	(9Zn)	(26CaO)									
	(kg ha-año ⁻¹)																		
CG1	1.412										240	85	254	28	28	0	2,8	1,4	
CG2		1.263									240	51	240	38	22	0	1,3	1,2	
CG2 + MF (KNCaB)		900	460		115						240	36	240	27	16	120	2,3	1,0	
CG2 + KNCaB*		900	460								240	36	171	27	16	120	2,3	1,0	
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)				336	400	87		120		16	453	240	40	240	30	25	120	0	1,4
MF(NPKMgS)+B				488	400	87		120		11,2	16	240	40	240	30	25	0	2,3	1,4
MF según A. Suelos (-Ca, -B, -Zn)							Análisis de suelos**				230-300	0-50	130-285	30-50	25-40	0	0	0	

*Tratamiento comercial; **Rangos de nutrientes aplicados según el análisis de suelos de cada localidad basados en las actuales recomendaciones (Sadeghian, 2022).

cps). A continuación, en una muestra de 250 g de cps, se evaluó el factor de rendimiento en trilla (FRT), luego de remover el pergamino del café en una máquina trilladora. La masa resultante (café almendra, sin pergamino) se tamizó durante cinco minutos sobre malla 14 y se cuantificó el porcentaje de café retenido (café supremo).

Análisis estadístico. Para cada sitio y tratamiento se estimaron los promedios y el error estándar para las variables de respuesta y las variables complementarias. Posteriormente, se efectuó un análisis de varianza (anava) de acuerdo con el diseño experimental propuesto

y la prueba de Tukey al 5%, para seleccionar aquellos con mayor valor promedio, en caso de que el anava indicara efecto de los tratamientos. Todos los resultados se analizaron utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.4® (2016 by SAS Institute Inc. Cary NC, USA).

RESULTADOS

En general, la producción de café cereza en todos los tratamientos evaluados, varió tratándose de una u otra localidad, como consecuencia de la edad de la plantación y de la oferta ambiental de cada sitio (Tabla 4). El análisis por localidad se detalla a continuación.

Tabla 4. Cuadrado medio del error y valor p del análisis de varianza de la producción anual y acumulada de café cereza en las localidades objeto de estudio.

Localidad	Producción	CME*	p-valor
El Agrado	Año 1	33564	0,931
	Año 2	29479	0,731
	Año 3	58913	0,184
	Año 4	38219	0,196
	Acumulada	44266	0,401
Naranjal	Año 1	13097	0,915
	Año 2	59692	0,169
	Año 3	41615	0,190
	Año 4	70533	0,016
	Acumulada	50857	0,117
San Antonio	Año 1	11450	0,169
	Año 2	42214	0,040
	Año 3	41993	0,876
	Acumulada	47528	0,450
El Rosario	Año 1	10206	0,293
	Año 2	52034	0,313
	Año 3	10854	0,134
	Año 4	45615	0,643
	Año 5	32360	0,234
	Acumulada	87992	0,241

*CME: cuadrado medio del error. Indica la variabilidad dentro de los tratamientos que pertenecen a su misma condición experimental.

El Agrado y Naranjal. En El Agrado no se detectaron diferencias entre los tratamientos en la producción de café cereza durante los años de evaluación (Tabla 5), ni en el acumulado de la producción de tres años de cosecha (Figura 1a). En Naranjal tampoco hubo efecto de los tratamientos durante los tres primeros años, no obstante, en el último año de evaluación se observó que la producción alcanzada con CG2 + MF (KNCaB), fue 25% inferior a la registrada con CG1 (Tabla 6). Dado que la tendencia registrada no se mantuvo durante tres años de evaluación previos, y que la certeza con la cual se estaría tomando la decisión de aceptar las diferencias (potencia de la prueba < 22%) que muestra la prueba Tukey al 5%, este resultado no debería considerarse confiable para efectuar una diferencia clara entre estos tratamientos (Tabla 4). En consecuencia, el efecto diferencial de los tratamientos tampoco se reflejó en el acumulado de los cuatro años de producción (Figura 1b).

San Antonio y El Rosario. Para el primer y último año de evaluación, la producción de café en San Antonio fue similar tratándose de una u otra fuente fertilizante. Sólo para el segundo período, el tratamiento portador de la recomendación de fertilización según el análisis de suelos (MF según A. suelos -Ca -B -Zn) presentó la más baja producción, respecto al tratamiento CG2 (Tabla 7). Al igual que para Naranjal, la certeza de la prueba, al ser del 59% (potencia de la prueba) generó un alto grado de incertidumbre para aceptar dicha diferencia. El efecto mencionado anteriormente, tampoco se vio reflejado en el acumulado de tres años de producción (Figura 1c).

Para El Rosario, las producciones anuales (Tabla 8) y acumuladas (Figura 1d), no se afectaron significativamente por efecto de los tratamientos evaluados.

Tabla 5. Producción anual promedio de café cereza en respuesta a los tratamientos aplicados en El Agrado.

Tratamiento	Producción café cereza kg/parcela											
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE	Año 4	EE				
CG1	26,74	a	6,15	58,58	a	2,73	47,90	a	1,87	34,32	a	1,34
CG2	25,11	a	2,42	54,44	a	2,66	51,21	a	3,97	40,44	a	2,25
CG2 + MF (KNCaB)	25,84	a	2,62	60,24	a	1,78	53,67	a	1,82	37,54	a	2,87
CG2 + KNCaB*	36,59	a	2,63	56,96	a	1,82	52,13	a	2,24	41,64	a	2,62
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	27,38	a	3,45	55,08	a	1,78	49,46	a	3,67	38,43	a	1,44
MF(NPKMgS)+B	32,44	a	3,41	57,52	a	3,16	50,81	a	2,10	38,48	a	2,18
MF según análisis de suelos (-Ca, -B, -Zn)	25,82	a	4,34	55,65	a	4,09	44,94	a	3,08	37,54	a	2,22

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%

Tabla 6. Producción anual promedio de café cereza, en respuesta a los tratamientos aplicados en la Estación Experimental Naranjal.

Tratamiento	Producción café cereza kg/parcela											
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE	Año 4	EE				
CG1	33,96	a	2,17	58,77	a	1,55	45,41	a	2,49	37,11	ab	1,63
CG2	30,99	a	2,51	53,31	a	1,68	41,19	a	1,44	32,70	ab	1,30
CG2 + MF (KNCaB)	33,35	a	1,91	55,29	a	1,53	44,69	a	1,88	27,75	b	1,85
CG2 + KNCaB*	32,99	a	1,86	55,03	a	3,72	41,81	a	1,62	29,89	ab	2,22
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	35,23	a	2,96	59,17	a	0,97	47,42	a	2,40	35,11	ab	2,41
MF(NPKMgS)+B	32,34	a	2,91	52,42	a	3,18	40,91	a	2,15	32,00	ab	1,37
MF según análisis Suelos (-Ca, -B, -Zn)	32,15	a	3,25	51,83	a	2,80	42,90	a	1,93	30,65	ab	1,36

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%.

Tabla 7. Producción anual promedio de café cereza, en respuesta a los tratamientos aplicados en la parcela experimental de San Antonio.

Tratamiento	Producción promedio café cereza kg/parcela								
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE			
CG1	4,06	a	0,83	55,98	ab	5,60	35,56	a	3,04
CG2	6,93	a	1,56	61,18	a	3,60	33,06	a	2,15
CG2 + MF (KNCaB)	3,34	a	1,12	43,01	ab	5,63	36,49	a	3,25
CG2 + KNCaB*	4,32	a	1,28	50,51	ab	5,18	39,48	a	6,69
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	4,48	a	0,76	47,81	ab	7,76	32,60	a	6,91
MF(NPKMgS)+B	4,00	a	0,82	49,40	ab	6,08	36,67	a	4,16
MF según análisis Suelos (-Ca, -B, -Zn)	6,08	a	0,96	37,77	b	6,59	33,61	a	6,03

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%.

Tabla 8. Producción anual promedio de café cereza, en respuesta a los tratamientos en El Rosario.

Tratamiento	Producción café cereza kg/parcela														
	Año 1	*EE	Año 2	EE	Año 3	EE	Año 4	EE	Año 5	EE					
CG1	51,89	a	3,86	31,24	a	2,36	53,28	a	3,61	51,34	a	1,77	18,39	a	1,76
CG2	62,52	a	5,37	37,54	a	3,45	64,59	a	4,24	59,77	a	3,18	15,36	a	1,62
CG2 + MF (KNCaB)	56,60	a	3,63	37,09	a	3,09	56,88	a	4,57	55,53	a	4,97	18,92	a	2,13
CG2 + KNCaB*	58,56	a	4,88	38,68	a	3,89	64,08	a	2,61	56,28	a	3,30	18,81	a	1,59
MF(NPKMgS)+NCa+Zn (-B)	58,52	a	4,94	36,36	a	3,18	59,02	a	3,11	55,77	a	1,22	13,72	a	1,33
MF(NPKMgS)+B	54,18	a	3,62	35,69	a	3,67	59,37	a	3,50	56,58	a	2,06	14,83	a	1,79
MF según análisis Suelos (-Ca, -B, -Zn)	52,46	a	5,42	32,50	a	2,44	58,93	a	4,48	57,62	a	3,95	17,90	a	2,08

*EE: error estándar. Letras no comunes indican diferencia entre tratamientos según prueba Tukey 5%.

Calidad física del grano. La relación café cereza (cc)/café pergamino seco (cps), para los diferentes tratamientos y localidades evaluadas presentó valores entre 4,7 y 5,3 en El Agrado, de 5,8 y 6,4 en Naranjal, de 4,8

a 5,1 en San Antonio y alrededor de 4,8 para El Rosario (Figura 2). Con relación al factor de rendimiento en trilla (FRT), se registraron valores promedios entre 87,8 y 89,5 en las diferentes localidades y tratamientos (Figura 3).

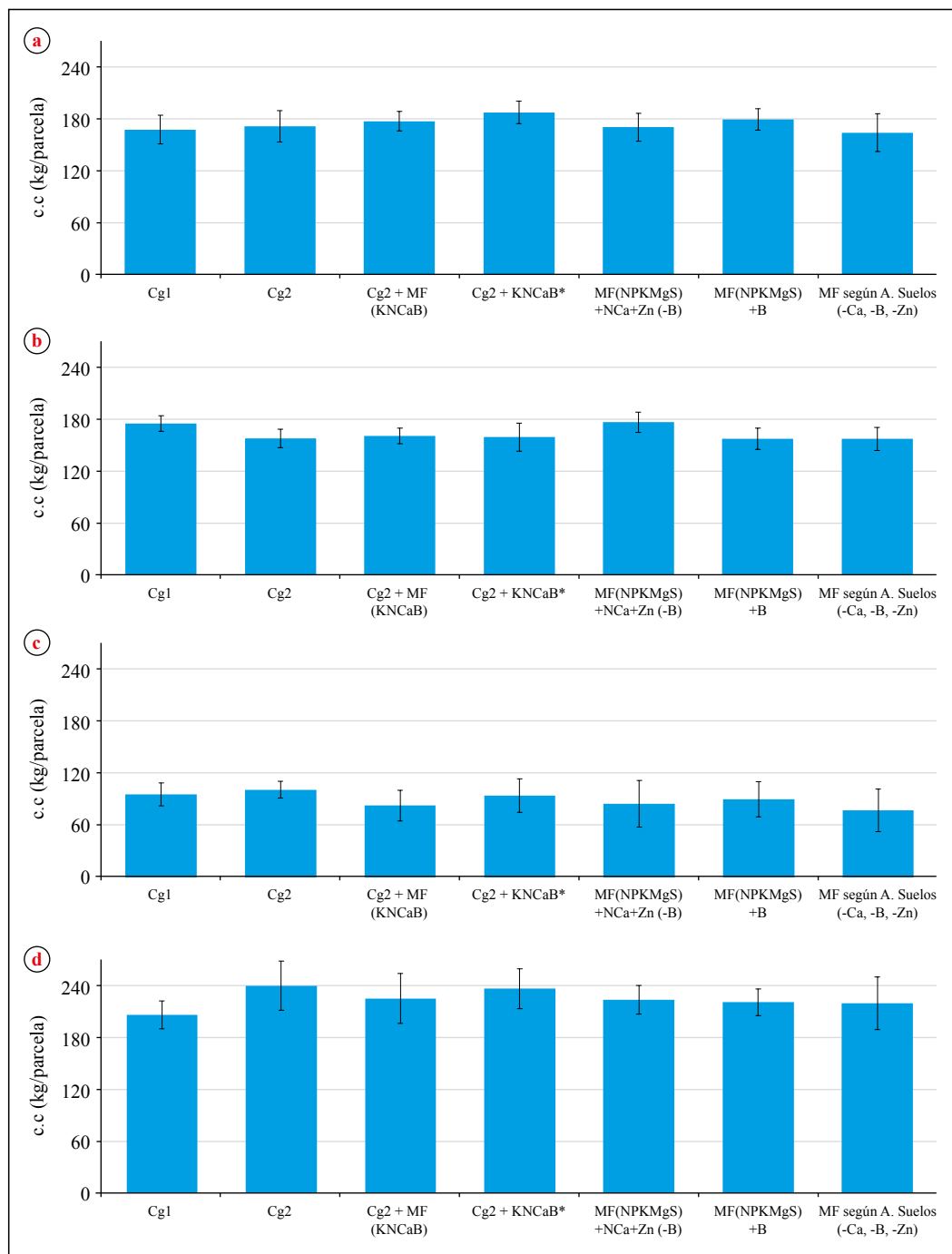


Figura 1. Acumulado de producción de café cereza por efecto de los tratamientos en El Agrado (a), Naranjal (b), San Antonio (c) y El Rosario (d). Barras indican error de estimación al 5%.

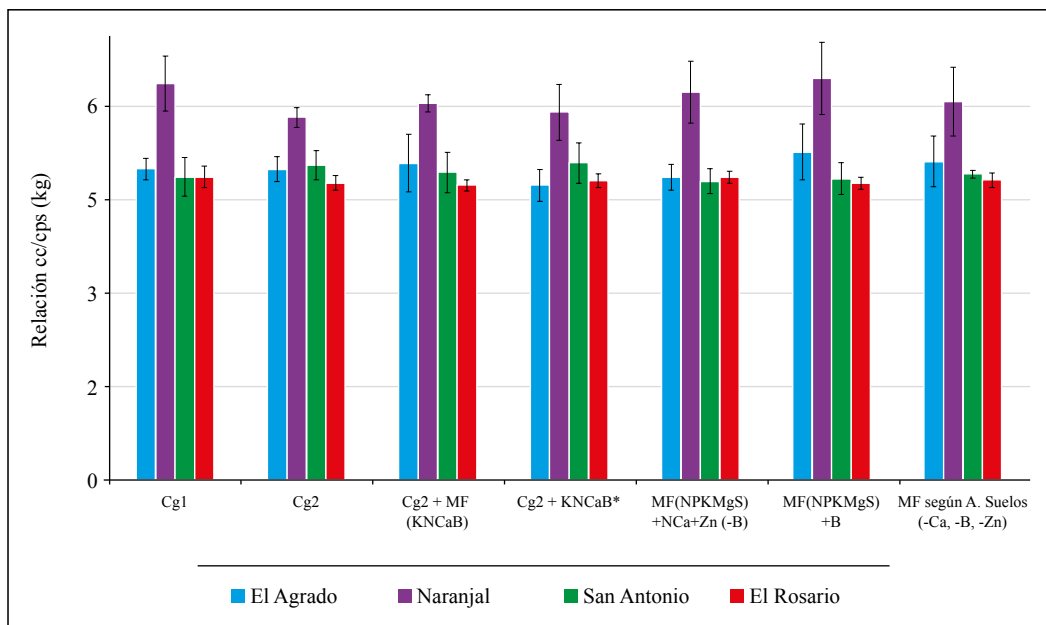


Figura 2. Relación cc/cps en respuesta a los diferentes tratamientos evaluados por localidad objeto de estudio. Barras representan intervalos de confianza al 95%.

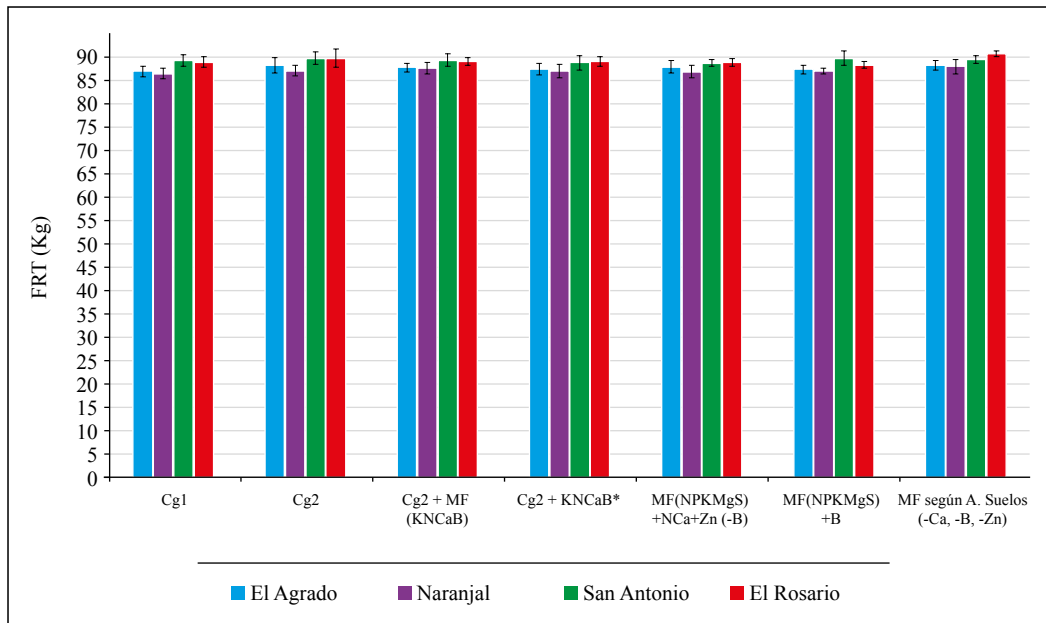


Figura 3. Factor de rendimiento en trilla (FRT) por localidad y tratamiento. Barras representan intervalos de confianza al 95%.

DISCUSIÓN

Los resultados permiten establecer que el café responde al suministro de los nutrientes recomendados y en las cantidades adecuadas, independientemente del tipo de fertilizante que se utilice para tal fin. Esta situación puede asociarse en primera instancia, al hecho de que los fertilizantes portadores de P, K y Mg que fueron utilizados en los diferentes tratamientos, tienen en común las mismas materias primas. De esta forma, la roca fosfórica es tratada con ácido para generar P soluble de los CG y el DAP o MAP de las MF (Belboom et al., 2019). La fuente original de K para ambos tipos de fertilizantes proviene de yacimientos naturales de KCl o K₂SO₄ (Shirale et al., 2019), mientras que la kieserita y el óxido de Mg son fuentes básicas de S y Mg en los CG, en las MF la fuente de estos dos nutrientes son regularmente sulfatos de magnesio o kieserita. Estos resultados muestran que los nutrientes contenidos en los CG y las MF una vez suministrados al suelo, estarían sujetos a una dinámica similar de adsorción, inmovilización, fijación o lixiviación.

En los CG, el N se formula manteniendo igual proporción de amonio (NH₄⁺) y de nitrato (NO₃⁻), condición que se deriva de su proceso de fabricación, en la cual las materias primas reaccionan con HNO₃ o H₂SO₄ dependiendo de la industria o la tecnología de fabricación (Hussain, 2012). Cuando la reacción se cataliza con HNO₃, se obtiene además KNO₃ libre de Cl⁻ (Han et al., 2017), mientras que, en presencia de H₂SO₄, queda un remanente de sulfato de Ca y otros minerales como un subproducto, el cual, por lo general, se excluye del proceso. Para generar nitrato de Ca, la roca caliza se pone a reaccionar con HNO₃, dando como resultado un fertilizante altamente soluble sin el poder neutralizador de pH de su fuente original de la caliza, materia prima original (IFS, 2024).

Tomando en consideración los anteriores aspectos, puede esperarse mayor efectividad agronómica al suministrar los nutrientes a través de los CG, dado que las formas de N aprovechables por las raíces de las plantas estarían disponibles en el corto plazo. Es decir, habría una inmediata disponibilidad de NO₃⁻ y NH₄⁺ por las raíces.

Respecto a las MF, cuyo portador de N es la urea, es evidente que esta fuente requiere de transformaciones bioquímicas adicionales una vez ingresa al suelo. A partir de estas reacciones, una parte del nutriente (NH₄⁺) queda inmediatamente disponible para las raíces del café y, a la par, una proporción significativa que puede representar entre el 20% y el 30% del N aplicado, se volatiliza (González-Osorio et al., 2015; González-Osorio & Sadeghian, 2012). Este último fenómeno en particular, sumado al hecho de que el N constituye el nutrimento más limitante en la producción de café en Colombia (Sadeghian, 2010), han conducido a establecer en el ámbito técnico y comercial, que la urea y los fertilizantes que la contienen, son menos efectivos.

Trabajos de investigación relacionados con la volatilización de N a partir del suministro de urea en cultivos de café de la zona cafetera colombiana, concluyen que es posible disminuir significativamente las citadas pérdidas, si la aplicación de esta fuente se realiza en condiciones adecuadas de humedad del suelo, procurando que los gránulos queden separados entre sí (González-Osorio et al. 2015, González-Osorio & Sadeghian, 2012), tal como se realizó en el presente estudio. Es bien sabido que los CG al ser portadores de N-NO₃ y N-NH₄, no presentan susceptibilidad a la volatilización de N en los suelos de la zona cafetera colombiana, sin embargo, se ha demostrado en condiciones de laboratorio que la lixiviación de N derivada de la

utilización de fuentes como el sulfato y nitrato de amonio, en muchos casos, puede superar la magnitud de pérdidas respecto a la urea (Gonzalez-Osorio y Sadeghian, 2012).

Con base en lo anterior, la similitud en producción hallada a partir de los CG y MF objetos de estudio, puede asociarse con las diferentes rutas de transformación a las que se somete el N en el suelo, independientemente de la fuente suministrada, las cuales varían en el tiempo y el espacio por cuenta de diferentes condiciones de tipo edáfico, de clima y de manejo. Estas circunstancias, pueden dar sustento al por qué el uso de tecnologías tendientes a disminuir la lixiviación, la volatilización o a controlar la liberación gradual del nutriente hacia la solución del suelo, pueden ser promisorias desde el punto de vista teórico o condiciones controladas, pero en muchos escenarios agrícolas del mundo y de Colombia, no han arrojado resultados satisfactorios (Chen et al. 2017; Lominadze & Nakashidze, 2016; González-Osorio, 2012).

Desde el punto de vista de la fisiología vegetal, se ha establecido como norma general, que un balance en la nutrición entre NO_3^- - NH_4^+ favorece el desempeño fisiológico de las plantas (Carr et al. 2020, Lominadze & Nakashidze, 2016; Ramirez et al. 2024), pero poco se conoce acerca del efecto que puede tener en el café la absorción de urea como fuente de N, tal como se registra en otras especies (Fujii & Hayakawa, 2022, Witte, 2011). Por otro lado, específicamente hablando del K, mientras que en Brasil, Santos et al. (2023) reportan afectación de la calidad de la bebida del café por efecto del cloro que se suministra a través del KCl (Santos et al. 2023), González et al. (2023) en condiciones de la zona cafetera colombiana, demostraron que la fertilización potásica en el café puede hacerse con fuentes

a base de cloruro (KCl) o sulfato (sulfato de potasio), sin afectar negativamente la producción, la calidad física del grano ni la calidad de la bebida.

Con relación al S, el suministro entre 16 y 40 kg ha-año⁻¹, fueron suficientes para cubrir los requerimientos del cultivo, de allí que no se hubiera presentado efecto diferencial a las dosis aplicadas. Dicha respuesta puede asociarse con el aporte adicional del nutriente a partir de la materia orgánica del suelo, la cual se ha demostrado, constituye la principal fuente natural de este nutriente para el café, en los suelos de la zona cafetera colombiana (González et al., 2003).

Respecto al Ca, Sadeghian (2022), sostiene que es el tercer elemento de mayor concentración en las plantas de café y es un constitutivo de las estructuras vegetativas. En consecuencia, es factible que a través del ciclaje permanente de hojas y ramas que se presenta en los sistemas de producción cafeteros, retorne al suelo el Ca requerido por el cultivo. Sin embargo, no se descarta que en condiciones de clima y de suelos diferentes a los del presente estudio, haya respuesta tanto al Ca, como al B y/o al Zn, particularmente cuando las prácticas de manejo de la fertilidad del suelo omitan su aplicación durante largos períodos de tiempo. Sobre el tema en particular, Ramírez-Builes et al. (2024), registran respuesta en producción y otras variables fisiológicas del café al suministro de Ca y B aplicados en un suelo con niveles de pH y contenidos de materia orgánica de 4,4% y 3,8%, respectivamente.

Con relación al suministro de los micronutrientes boro B (principalmente) y cinc Zn, no se registraron incrementos en la producción ni en la calidad física del grano como respuesta a su aplicación, en ninguno de los años ni las localidades evaluadas.

Evidencia de ello es que las producciones e indicadores de calidad del café en los tratamientos portadores de estos elementos, no fueron estadísticamente diferentes respecto al tratamiento MF según análisis de suelos, donde no se incluyeron como alternativa de fertilización. Los resultados pueden asociarse con los niveles de materia orgánica de los lotes experimentales (entre 5,2% y 14,5%), la cual constituye una fuente importante de estos microelementos (Dhaliwal et al. 2019).

Finalmente, en términos de calidad física del café, los resultados de conversión cc/cps se ubicaron en el rango de valores promedios de referencia asociados con café de buena calidad para la zona cafetera de Colombia (Osorio-Pérez et al. 2023). El registro superior de factor de conversión para todos los tratamientos realizados en Naranjal, deja en evidencia la expresión de un fenómeno diferente a la fertilización. Aun así, en todas las localidades se produjo café objeto de bonificación comercial, como consecuencia del FRT alcanzado en todos y cada uno de los tratamientos (FRT < 89,5).

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados de esta investigación, la respuesta del café a la fertilización es igual tratándose de alternativas basadas en complejos granulados o mezcla física de fertilizantes. Esto brinda a los caficultores del país la posibilidad de que utilicen la fuente fertilizante de su preferencia según la oferta del mercado.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con recursos del Centro Nacional de Investigaciones de Café y Yara Colombia (Crossref Funder ID 100019597), proyecto SUE0534.

Contribuciones de los Autores: Conceptualización, metodología, desarrollo experimental, curación de datos, análisis de resultados, redacción y edición: H.G.O.; Conceptualización, análisis y metodología: S.S.; Redacción- revisión y edición: V.H.R.B. y G.H.F. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Albadarin, A. B., Lewis, T. D., & Walker, G. M. (2017). Granulated polyhalite fertilizer caking propensity. *Powder Technology*, 308, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.004>
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/1308edd5-1ee1-43e8-a811-f71fe73014ff>
- Arndt, C., Diao, X., Dorosh, P., Pauw, K., & Thurlow, J. (2023). The Ukraine war and rising commodity prices: Implications for developing countries. *Global Food Security*, 36, 100680. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100680>
- Belboom, S., Szöcs, C., & Léonard, A. (2015). Environmental impacts of phosphoric acid production using di-hemihydrate process: A Belgian case study. *Journal of Cleaner Production*, 108, 978–986. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.141>
- Cai, S., Zhao, X., & Yan, X. (2025). Towards precise nitrogen fertilizer management for sustainable agriculture. *Earth Critical Zone*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.ecz.2025.100026>
- Carr, N. F., Boaretto, R. M., & Mattos, D. (2020). Coffee seedlings growth under varied NO₃⁻:NH₄⁺ ratio: Consequences for nitrogen metabolism, amino acids profile, and regulation of plasma membrane H⁺-ATPase. *Plant Physiology and Biochemistry*, 154, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.042>
- Chen, J., Cao, F., Xiong, H., Huang, M., Zou, Y., & Xiong, Y. (2017). Effects of single basal application of coated

- compound fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in double-cropped rice. *The Crop Journal*, 5(3), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.01.002>
- Dhaliwal, S. S., Naresh, R. K., Mandal, A., Singh, R., & Dhaliwal, M. K. (2019). Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 1–2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). (sf). Aprende a vender su café. Federación Nacional de Cafeteros. <https://federaciondecafeteros.org/wp/servicios-al-caficultor/aprenda-a-vender-su-cafe/>
- Fujii, K., & Hayakawa, C. (2022). Urea uptake by spruce tree roots in permafrost-affected soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 169, 108647. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108647>
- Gezerman, A. O. (2020). A novel industrial-scale strategy to prevent degradation and caking of ammonium nitrate. *Heliyon*, 6(3), e03628. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03628>
- González-Osorio, H., & Sadeghian, S. (2012). Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. *Revista Cenicafé*, 63(1), 132–143. <http://hdl.handle.net/10778/518>
- González, H., Sadeghian, S., Medina, R., & Castro, A. (2015). Alternativas para disminuir la volatilización de nitrógeno producida por la fertilización con urea. *Revista Cenicafé*, 66(1), 7–16. <http://hdl.handle.net/10778/604>
- González-Osorio, H., Sadeghian, S., Medina, R., & Furia, L. (2023). Response of Granulated Polyhalite on Yield and Quality of Coffee (*Coffea arabica*). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(11), 1525–1536. <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2171051>
- González-Osorio, H., Sadeghian, S., & Mejía, B. (2003). Caracterización del azufre en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 54(3), 226–233. <http://hdl.handle.net/10778/267>
- Han, X., Yan, X., Wang, X., Ran, J., Wu, C., & Zhang, X. (2018). Preparation of chloride-free potash fertilizers by electro dialysis metathesis. *Separation and Purification Technology*, 191, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.022>
- Hu, Y., & Schmidhalter, U. (2024). Annual consumption and types of synthetic nitrogen fertilizers: Ammonia emission indicators for mitigation strategies in the European Union. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100365. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100365>
- Hussain, I. (2012). The Operating experience of Nitrophosphate Plant. *Procedia Engineering*, 46, 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.462>
- IFS. International fertilizer society (2025). Construction of a calcium nitrate plant in the Czech Republic. <https://fertiliser-society.org/store/construction-of-a-calcium-nitrate-plant-in-the-czech-republic/>. Consultado Julio 2025.
- Jacobs, B., Cordell, D., Chin, J., & Rowe, H. (2017). Towards phosphorus sustainability in North America: A model for transformational change. *Environmental Science & Policy*, 77, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.009>
- Kumar, S., Sharma, Y., Khandelwal, V., Rawat, K., & Patil, A. (2025). Applications of nanotechnology in fertilizers: A review study. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 10, 100247. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100247>
- Lominadze, S., & Nakashidze, N. (2016). The influence of nitrogen fertilizers on nitrate accumulation in leaves of orange Washington Navel. *Annals of Agrarian Science*, 14(3), 233–236. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.07.008>
- Miserque, O., & Pirard, E. (2004). Segregation of the bulk blend fertilizers. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 74(1), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.017>
- Morão, H. (2025). The economic consequences of fertilizer supply shocks. *Food Policy*, 133, 102835. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2025.102835>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: FAO promueve el manejo sostenible de la fertilidad de los suelos para hacer frente a la escasez de fertilizantes. <https://www.fao.org/colombia/noticias/detail-events/en/c/1603182/>
- Osorio Pérez, V., Matallana Pérez, L. G., Fernández Alduenda, M. R., Álvarez Barreto, C. I., Gallego Agudelo, C. P., & Montoya Restrepo, E. C. (2023). Chemical Composition and Sensory Quality of Coffee Fruits at Different Stages of Maturity. *Agronomy*, 13(2), 341. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020341>
- Piwpuan, N., Zhai, X., & Brix, H. (2013). Nitrogen nutrition of *Cyperus laevigatus* and *Phormium tenax*: Effects of ammonium versus nitrate on growth, nitrate reductase

- activity and N uptake kinetics. *Aquatic Botany*, 106, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.01.002>
- Rahmanian, N., Naderi, S., Supuk, E., Abbas, R., & Hassanpour, A. (2015). Urea Finishing Process: Prilling Versus Granulation. *Procedia Engineering*, 102, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.122>
- Ramírez-Builes, V. H., Küsters, J., Thiele, E., & Leal-Varon, L. A. (2024). Boron Nutrition in Coffee Improves Drought Stress Resistance and, Together with Calcium, Improves Long-Term Productivity and Seed Composition. *Agronomy*, 14(3), 474. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030474>
- Ramírez-Builes, V. H., Küsters, J., Thiele, E., & Lopez-Ruiz, J. C. (2024). Physiological and Agronomical Response of Coffee to Different Nitrogen Forms with and without Water Stress. *Plants*, 13(10), 1387. <https://doi.org/10.3390/plants13101387>
- Rodrigo, P. M., Varco, J. J., Arwenyo, B., Paganucci, M. G., Abeyasinghe, H. P., Hartley, J. A., Davis, A. C., Navarathna, C. M., Thirumalai, R. V. K. G., Zhang, X., Pittman, C. U., & Mlsna, T. E. (2025). Douglas fir biochar enriched with plant nutrients as a controlled release fertilizer. *Soil Advances*, 3, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.soiland.2025.100052>
- Rolewicz, M., Rusek, P., & Borowik, K. (2018). Obtaining of granular fertilizers based on ashes from combustion of waste residues and ground bones using phosphorous solubilization by bacteria *Bacillus megaterium*. *Journal of Environmental Management*, 216, 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.004>
- Sadeghian, S. (2010). Fertilización: Una práctica que determina la producción de los cafetales. *Avances Técnicos Cenicafé*, 391, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0391>
- Sadeghian, S. (2022). *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>
- Sadeghian, S., Hernández, E., & González, H. (2007a). Mezcla de fertilizantes en la finca, una buena opción para el caficultor. *Avances Técnicos Cenicafé*, 362, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0362>
- Sadeghian, S., & González, H. (2012). Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción. *Avances Técnicos Cenicafé*, 424, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0424>
- Sadeghian, S., & González-Osorio, H. (2022). Fertilizantes nitrogenados. Implicaciones agronómicas para el cultivo del café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 544, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0544>
- Saha, B. K., Rose, M. T., Wong, V. N. L., Cavagnaro, T. R., & Patti, A. F. (2019). A slow release brown coal-urea fertiliser reduced gaseous N loss from soil and increased silver beet yield and N uptake. *Science of The Total Environment*, 649, 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.145>
- Santos, C., Malta, M. R., Gonçalves, M. G. M., Borém, F. M., Pozza, A. A. A., Martínez, H. E. P., De Souza, T. L., Chagas, W. F. T., De Melo, M. E. A., Oliveira, D. P., Lima, A. D. C., De Abreu, L. B., Reis, T. H. P., De Souza, T. R., Builes, V. R., & Guelfi, D. (2023). Chloride Applied via Fertilizer Affects Plant Nutrition and Coffee Quality. *Plants*, 12(4), 885. <https://doi.org/10.3390/plants12040885>
- Santos, C., Malta, M. R., Gonçalves, M. G. M., Borém, F. M., Pozza, A. A. A., Martínez, H. E. P., De Souza, T. L., Chagas, W. F. T., De Melo, M. E. A., Oliveira, D. P., Lima, A. D. C., De Abreu, L. B., Reis, T. H. P., De Souza, T. R., Builes, V. R., & Guelfi, D. (2023). Chloride Applied via Fertilizer Affects Plant Nutrition and Coffee Quality. *Plants*, 12(4), 885. <https://doi.org/10.3390/plants12040885>
- Shirale, A. O., Meena, B. P., Gurav, P. P., Srivastava, S., Biswas, A. K., Thakur, J. K., Somasundaram, J., Patra, A. K., & Rao, A. S. (2019). Prospects and challenges in utilization of indigenous rocks and minerals as source of potassium in farming. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), 2682–2701. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659353>
- Suárez, C. (2008, julio 15-18). Mercado mundial de fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio. *Memorias. I Integración nacional sobre nutrición y fertilización de café*, San Andrés, Colombia.
- Tawfeeq, A., Culham, A., Davis, F., & Reeves, M. (2016). Does fertilizer type and method of application cause significant differences in essential oil yield and composition in rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.)? *Industrial Crops and Products*, 88, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.026>
- Uribe, A. & Mestre, A. (1976). Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Revista Cenicafé*, 27(4), 158–173. <http://hdl.handle.net/10778/4273>
- Vos, R., Glauber, J., Hebebrand, C., & Rice, B. (2025). Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability. *Food Policy*, 133, 102790. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102790>

- Wang, L. S., Wang, R. J., Lu, C. P., Wang, J., & Huang, W. (2019). Rapid determination of moisture content in compound fertilizer using visible and near infrared spectroscopy combined with chemometrics. *Infrared Physics & Technology*, *102*, 103045. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103045>
- Wendling, L. A., Blomberg, P., Sarlin, T., Priha, O., & Arnold, M. (2013). Phosphorus sorption and recovery using mineral-based materials: Sorption mechanisms and potential phytoavailability. *Applied Geochemistry*, *37*, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.07.016>
- Williams, G. (2022, enero 26). Phosphate Outlook 2022: Geopolitics to be a Key Market Mover. *Phosphate Investing*. <https://investingnews.com/phosphate-outlook-2022/>
- Wilson, W. W., & Shakya, S. (2023). Quantifying impacts of competition and demand on the risk for fertilizer plant locations. *Journal of Commodity Markets*, *30*, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2023.100326>
- Witte, C.-P. (2011). Urea metabolism in plants. *Plant Science*, *180*(3), 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.11.010>