

RESPUESTA DEL CAFÉ A LA APLICACIÓN DE SILICIO Y LOMBRINAZA DURANTE LA ETAPA DE ALMÁCIGO

Alveiro Salamanca Jiménez*; Siavosh Sadeghian Khalajabadi*

SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN KH., S. Respuesta del café a la aplicación de silicio y lombrinaza durante la etapa de almácigo. Revista Cenicafé 66 (2): 88-109. 2015

El silicio (Si) no es considerado elemento esencial para la mayoría de las plantas, pero tiene algunos efectos benéficos en muchos cultivos. Para seis unidades cartográficas de suelos de la zona cafetera colombiana, contrastantes en el contenido de Si disponible, se evaluó el efecto de su aplicación en almácigos de café (*Coffea arabica* L.). Para cada suelo se tuvieron 22 tratamientos resultantes de la combinación de dos niveles de lombrinaza (con y sin), cada uno con dos fuentes comerciales de Si, cinco dosis (0,21; 0,42; 0,84; 1,68 y 3,36 g/planta de Si), y un testigo. Por cada tratamiento se sembraron 15 plántulas de café variedad Colombia y se distribuyeron bajo un diseño completamente aleatorio en arreglo factorial. Después de 6 meses se determinó la rigidez estructural de los tallos, el peso de la biomasa seca de raíces y de parte aérea de las plantas, la relación raíces:parte aérea, además de los niveles de Si, fósforo (P) y CIC en el suelo. Para la mayoría de los suelos, la utilización de lombrinaza tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento del café durante la etapa de almácigo. La aplicación de las dosis más altas de Si, a partir de la fuente comercial rica en fósforo, aumentó el vigor de las plantas solo cuando las plantas crecieron en suelo sin lombrinaza. El efecto de las dosis y fuentes de este elemento fue asociado más con la aplicación de P en dicha fuente que con la utilización misma de Si, pues la fuente comercial con mayor contenido de Si no tuvo efectos considerables sobre el crecimiento del café en ninguno de los suelos.

Palabras clave: Abono orgánico, crecimiento, nutrición, zona cafetera.

COFFEE RESPONSE TO SILICON AND EARTHWORM MANURE APPLICATION DURING SEEDLING

The Silicon (Si) is not considered an essential element for most of plants, but some positive effects have been reported for many crops. The effect of Si application on coffee seedlings (*Coffea arabica* L.) was evaluated using soils from six cartographic units of the Colombian coffee region, contrasting in its available Si content. For each soil unit, 22 treatments resulting of combining two levels of earthworm manure (with and without), each one with two Si fertilizers, five doses (0.21, 0.42, 0.84, 1.68 and 3.36 g of Si per plant), and one control were evaluated. Each treatment consisted of 15 Colombia variety coffee seedlings distributed in a Completely Randomized Factorial Design. After six months, stem structural rigidity, dry weight of roots and aerial part of plants, root to shoot ratio, as well as soil levels of Si, phosphorus (P) and cationic exchange capacity were evaluated. A positive effect of earthworm manure on coffee seedling growth was registered for most of soils. Only when plants grew up without manure, the application of the highest doses of Si from the fertilizer with higher P content increased plant growth. Then, the effect of Si doses and sources was associated more with the P application in such fertilizer than the use of Si since the fertilizer richer in Si did not affect considerably coffee growth in any of the studied soils.

Keywords: Organic manure, growth, nutrition, coffee region.

* Investigador Científico I e Investigador Científico II, respectivamente. Disciplina de Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El silicio (Si) es uno de los elementos de mayor abundancia en la naturaleza y su contenido en el suelo alcanza entre 23% y 35%. Las mayores fuentes de Si son los silicatos primarios, secundarios y el cuarzo (SiO_2), que es el mineral más común en los suelos y comprende del 90% al 95% de las fracciones de arena y limo. Las arenas poco meteorizadas pueden contener más del 40% de este elemento, mientras que suelos tropicales muy meteorizados contienen solo el 9% (17).

El Si es adsorbido en las superficies de los óxidos de Fe y Al, pero también es lavado en suelos altamente meteorizados. En la solución del suelo existe como ácido silícico (H_4SiO_4 ó $\text{Si}(\text{OH})_4$), forma en la cual las plantas lo absorben (19); su contenido varía entre 3 y 37 mg.kg^{-1} (17) y es controlado por la reacción de adsorción dependiente del pH. Según Matichenkov (28), la fracción soluble contribuye a restaurar la fertilidad de suelos degradados, neutraliza la toxicidad por Al^{3+} , hidrocarburos y metales pesados, reduce la lixiviación de N, P y K en áreas cultivadas y promueve la transformación de contaminantes activos en formas inertes.

El Si estimula el crecimiento de algunas plantas, por lo que ha sido considerado como “casi esencial” (10), o incluso esencial para un grupo de ellas (15). Su contenido puede variar entre 0,1% y 10% del peso seco y aún estar presente en cantidades mayores a los macronutrientes (13). El arroz (*Oriza sativa*) y la cola de caballo (*Equisetum arvense*), por ejemplo, contienen hasta 16% de este elemento (35).

En las plantas, el Si se acumula como polímero hidratado amorfo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en las paredes de las células epidérmicas, o en las paredes primaria y secundaria de otras células de raíces, tallos, hojas e inflorescencias

(19), su transporte a través de la raíz es mediado por un transportador específico y por difusión pasiva (29). Ma *et al.* (25) al comparar arroz silvestre y un mutante que no absorbe Si, encontraron que la acumulación en el xilema es el paso más importante para almacenar una alta cantidad de Si en los tallos y que dicho proceso es controlado por un gen mapeado en el cromosoma 2 del arroz. Ma y Yamaji (24) describen en detalle los dos tipos de transportadores (Lsi1 y Lsi2) identificados molecularmente en la membrana plasmática de diferentes especies, entre ellas de café robusta, y que están involucrados en la absorción y distribución del Si en los tejidos. A partir de estos hallazgos en plantas acumuladoras y no acumuladoras, los mismos autores sugieren que factores como el nivel de expresión, la localización celular y la polaridad de Lsi1 y Lsi2 son también importantes para la acumulación de Si.

Diferentes autores como Epstein (13, 14), Matichenkov (28), Ma y Yamaji (23, 24) y Havlin *et al.* (17) describen los siguientes efectos benéficos del Si en los cultivos: incrementa la producción; tiende a mantener las hojas erectas que aumentan la interceptación de luz y con ello la fotosíntesis; favorece la resistencia a plagas y enfermedades; mejora la tolerancia a niveles altos de Fe, Mg, radiación y a condiciones de estrés hídrico, bajas y altas temperaturas, exceso de aluminio y salinidad; favorece el desarrollo de raíces de las plantas y aumenta su masa radical; promueve la formación de nódulos en leguminosas; e influye sobre la actividad enzimática y la composición mineral.

Varios autores también reportan efectos de este elemento sobre el desarrollo del café en las diferentes etapas del cultivo y la relevancia que puede tener en el manejo fitosanitario de ciertas plagas y enfermedades. En almácigos de café de las variedades

Catuai y Mondo novo, sembrados en una mezcla de estiércol bovino y material de subsuelo en relación 4:1, Pozza *et al.* (30) mencionan que la aplicación de 1 g de CaSiO_3 por kilogramo de sustrato, redujo el número de hojas infectadas y de lesiones causadas por mancha de hierro (*Cercospora coffeicola* L.). En un estudio similar con diferentes dosis de ácido silícico en café Catuai rojo, Botelho *et al.* (5) registraron una reducción del área de progreso bajo la curva del número de lesiones con el aumento de las dosis, pero no hubo un efecto significativo de éstas sobre la incidencia y severidad de la enfermedad. Para los dos estudios, la presencia de Si en el tejido foliar fue confirmada mediante técnicas de microscopía de barrido electrónico y microanálisis de rayos X.

Santos *et al.* (36) al evaluar la aplicación de cuatro dosis de SiO_2 (0; 0,32; 0,63 y 1,26 g.kg⁻¹ de sustrato) a partir de silicatos de calcio y sodio, sobre la incidencia y severidad de mancha de hierro en almácigos de café, aseguran que el contenido de lignina en las plantas aumentó hasta una dosis de 0,52 g.kg⁻¹ de SiO_2 (tendencia cuadrática), y que al incrementar las dosis se redujo linealmente el número de plantas enfermas en un 10,8%, al tiempo que con la mayor dosis ocurrió la menor área bajo la curva de progreso del número de plantas enfermas. Según Martinati *et al.* (26, 27) al aumentar la concentración de silicato de K en plantas de café disminuyó linealmente hasta en un 66% el número de lesiones causadas por roya (*Hemileia vastratix*), indicando que éstas son razones suficientes para sugerir el uso del Si como una alternativa ecológica para el manejo de enfermedades en café.

Para las condiciones de suelo y clima de la zona cafetera colombiana, se cita el estudio de Caicedo y Chavarriaga (6) con

suelo de la unidad Chinchiná, en el cual la respuesta (crecimiento) de los almácigos a una aplicación de 3, 6 y 9 g de Si fue mayor cuando estas dosis se combinaron con 3 g de DAP por planta. De igual manera, casas comerciales que distribuyen fertilizantes ricos en Si refieren algunas observaciones en diferentes especies incluyendo café, pero en general, la información experimental con Si en los cultivos es limitada. Por ello, con el presente experimento se buscó generar conocimientos acerca de la respuesta del café en la etapa del almácigo a la aplicación de este elemento, para diferentes suelos de la zona cafetera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de almácigo, entre marzo de 2005 y febrero de 2006, en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, ubicado en el municipio de Manizales - Caldas, a 5° 0' de latitud Norte, 75° 36' longitud Oeste y 1.310 m de altitud. Para el año 2005 se registraron las siguientes condiciones climáticas: precipitación anual 3.107 mm, temperatura media 21,5°C, humedad relativa 82% y brillo solar 1.715 h.

Los suelos utilizados corresponden a seis unidades cartográficas de la zona cafetera, contrastantes en sus propiedades físicas y químicas (Tabla 1). Por cada unidad, el suelo se recolectó en los primeros 15 cm del perfil de un lote aledaño a un cafetal y que no había sido fertilizado en los últimos 10 años.

Como abono orgánico se usó lombrinaza obtenida a partir de la transformación de pulpa de café por lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y por volteos continuos posteriores durante 2 meses, en el beneficiadero de Cenicafé. Dicha lombrinaza presentó una

humedad de 58,8%, pH ligeramente alcalino (7,4), 60,2% de cenizas y las siguientes concentraciones de nutrientes en base seca: 3,0% de N, 0,3% de P, 3,2% de K, 1,8% de Ca, 0,4% de Mg, 10.801 mg.kg⁻¹ de Fe, 272 mg.kg⁻¹ de Mn, 82 mg.kg⁻¹ de Zn, 67 mg.kg⁻¹ de Cu y 60 mg.kg⁻¹ de B.

Por cada unidad de suelo se evaluaron 22 tratamientos, resultantes de la combinación de dos niveles de lombrinaza (con y sin), dos fuentes de Si (FC1, FC2), cinco dosis de Si (0,21 0,42 0,84 1,68 y 3,36 g.planta⁻¹) incorporadas en el sustrato antes del trasplante y un testigo sin aplicación del elemento para cada nivel de lombrinaza. Para los tratamientos con abono orgánico se utilizó la proporción recomendada por Cenicafé: tres partes de suelo por una de abono (v/v) (3:1) y como fuentes de Si se usaron dos fertilizantes granulados con la siguiente composición química:

- Fuente comercial 1 (FC1): 90% de SiO₂ y 3% de K₂O.
- Fuente comercial 2 (FC2): 75% de SiO₂, 7% de P₂O₅ y 3% de S, enriquecido con zeolita (mineral con alta CIC).

Por cada tratamiento, se llenaron 15 bolsas plásticas de 17 x 23 cm y en cada bolsa se trasplantó una plántula de café variedad Colombia. Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial (2 x 2 x 5 + 1) y alrededor de las 330 bolsas efectivas, por unidad de suelo, se incluyeron plántulas de café como bordes.

El almácigo fue instalado bajo una cobertura de malla polisombra y recibió el manejo agronómico recomendado por Arcila (1), para esta etapa fenológica del cultivo, concerniente a control de arvenses y manejo

fitosanitario. Al cabo de 6 meses, al finalizar la etapa de almácigo, se registró la siguiente información:

Como variables de respuesta se midieron el peso de la biomasa seca de raíces y de parte aérea, para las 15 plantas de todos los tratamientos.

Adicionalmente y para un número más reducido de repeticiones, debido a la complejidad y costo de las mediciones, se registró:

Para tres de las 15 repeticiones de los tratamientos correspondientes a las dosis 0 (Testigos), 1,38 y 3,36 g.planta⁻¹ con las dos fuentes, se evaluó en los sustratos el contenido de Si, el contenido de P en las hojas y para una mezcla compuesta del sustrato de dichas repeticiones se midió el nivel de P. El Si se determinó por el método colorimétrico, ajustado en el laboratorio de Cenicafé a partir de las metodologías descritas por Cenipalma (9), Hallmarck *et al.* (16), Korndörfer *et al.* (20) y Wang *et al.* (40). En tres repeticiones de estas dosis, para cuatro unidades de suelo, se midieron los cambios en la CIC ocasionados por los contenidos de zeolita en la fuente FC2, ya que según Curi *et al.* (12), este mineral incrementa la CIC en el suelo y favorece sus propiedades físicas y químicas, al igual que la remoción de metales pesados contaminantes. Los niveles de CIC y P fueron medidos con base en las metodologías descritas por Carrillo (7) y Carrillo *et al.* (8).

De igual manera, con el fin de corroborar si el Si absorbido podía ofrecer mayor resistencia en el tallo y a la vez, tener implicaciones prácticas para evitar plantas defectuosas cuando su transporte no es el más indicado, para las 15 plantas de los tratamientos correspondientes a las dosis 0

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los suelos.

Propiedad	Chinchiná	200	Montenegro	San Simón	Suroeste	Timbío
Propiedades físicas						
Densidad aparente, g.cm ⁻³	0,78	1,02	0,80	1,30	0,73	0,52
Densidad real, g.cm ⁻³	2,35	2,63	2,45	2,64	2,23	2,01
Macroporos, %	21,32	17,32	24,54	18,65	18,43	31,87
Mesoporos, %	17,32	6,43	13,3	13,34	16,32	13,68
Microporos, %	28,02	37,55	29,5	18,73	32,47	28,42
Arenas, %	49,08	14,26	54,33	53,97	30,82	50,94
Limos, %	31,69	22,37	26,64	16,73	31,46	24,87
Arcillas, %	18,93	61,67	18,47	30,33	37,72	24,59
Resistencia a la penetración, kg.cm ⁻²	1,19	3,89	1,69	2,22	SD	1,00
Propiedades químicas						
pH	5,0	5,1	5,4	5,0	4,1	5,0
MO, %	8,3	6,1	7,9	4,3	9,5	20,7
N, %	0,35	0,27	0,33	0,2	0,39	0,69
K, cmol _c .kg ⁻¹	0,15	0,18	0,68	0,09	0,33	0,55
Ca, cmol _c .kg ⁻¹	0,9	1,7	6,1	3,6	0,8	6,3
Mg, cmol _c .kg ⁻¹	0,3	0,8	1,1	1,2	0,5	2,7
Na, cmol _c .kg ⁻¹	0,030	0,021	0,018	0,049	0,016	0,014
Al, cmol _c .kg ⁻¹	0,4	0,4	0,1	0,3	10	0,5
CIC, cmol _c .kg ⁻¹	21	14	20	11	24	35
P, mg.kg ⁻¹	2	2	12	3	3	2
Fe, mg.kg ⁻¹	123	161	124	265	233	260
Mn, mg.kg ⁻¹	13	42	31	18	26	35
Zn, mg.kg ⁻¹	4	0	8	1	2	7
Cu, mg.kg ⁻¹	8	5	1	1	3	4
B, mg.kg ⁻¹	0,2	0,29	0,41	0,07	0,27	0,3
S, mg.kg ⁻¹	6,2	2,9	5,2	4,5	0,3	2,1
Si, mg.kg ⁻¹	106,6	21,6	73,7	22,3	42,9	129,5

(Testigos), 1,38 y 3,36 g/planta se evaluó la rigidez estructural de los tallos en la máquina INSTRON 5569. Se trata de una propiedad mecánica que integra el módulo de elasticidad o de Young y el momento de inercia, y que permite conocer la capacidad de cualquier material para doblarse o deformarse después de aplicarle cierta carga o presión (3, 18).

El procedimiento para evaluar dicha propiedad consistió en cortar un trozo

de tallo de 8 cm de longitud, medidos a partir de la base de cada planta, luego de medir su diámetro y someterlo a una carga concentrada en su centro (ensayo de flexión en 3 puntos) a una velocidad de deformación de 5 mm.min⁻¹. Se asumió un comportamiento elástico y se registró la carga aplicada para deformar el trozo hasta 3 mm, segundo a segundo, durante 37 segundos. La rigidez estructural-EI (donde E representa el módulo de Young e I el

momento de inercia de la viga) se obtuvo para cada intervalo de tiempo mediante la Ecuación <1>.

$$EI = PL^3/48y <1>$$

Donde:

P: Fuerza aplicada hasta lograr la deformación y, N

L: Longitud de la viga (trozo), m

y: Deformación en el centro del trozo, m

Por cada unidad de suelo y tratamiento se estimaron los promedios de las variables relacionadas con la planta y el suelo (Si y CIC). Con dichas variables, se realizó un análisis de varianza al 5% por unidad de suelo bajo el modelo de análisis para el diseño experimental propuesto y se evaluó el efecto de las tres fuentes de variación (nivel de lombrinaza, fertilizante, dosis de Si) tanto a nivel individual como en interacción. Para los casos en que dicho análisis mostró efecto de las dosis de Si, éstas se compararon con el testigo sin aplicación de Si mediante la prueba de Dunnett.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los valores de los cuadrados medios para cada una de las fuentes de variación con sus respectivas interacciones, para aquellas variables donde hubo efectos significativos al 1% y al 5%. En general, solo se registró efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi para las variables relacionadas con la biomasa y la rigidez del tallo en la unidad Chinchiná, para el Si edáfico en San Simón y para la relación Raíz: Parte aérea en Timbío. Para las unidades y variables restantes, en su mayoría se resalta el efecto de la utilización de la lombrinaza y del tipo de fertilizante.

Peso de la biomasa seca de raíces

La mayor diferencia encontrada en casi todas las combinaciones suelo:lombrinaza estuvo asociada a la presencia del material orgánico en el sustrato, la cual aumentó significativamente la biomasa seca de raíces en los cinco suelos diferentes a la unidad Chinchiná (Figura 1).

Solo en la unidad Chinchiná se registró un efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi (P=0,0014) sobre esta variable, y los mayores promedios del peso de raíces se registraron al utilizar lombrinaza en combinación con las dosis altas de la FC2. Al comparar los promedios entre las diferentes dosis de la FC2 con el testigo (Prueba de Dunnett al 5%), los mayores valores correspondieron a los obtenidos con 0,84 y 3,36 g de Si por bolsa en el suelo de la unidad Chinchiná. En ausencia de lombrinaza, el peso de raíces para la dosis de 0,42 g de Si a partir de la FC2, fue mayor que en el testigo.

En la unidad 200 el análisis de varianza indicó un efecto de las interacciones Lombrinaza*DosisSi (P=0,0255) y Fertilizante*DosisSi (P=0,0055), pero ninguna de las dosis de Si a partir de la FC2 fue diferente del testigo. Sin lombrinaza, la dosis de 3,36 g de Si por planta con la FC2, sobresalió frente al testigo según prueba Dunnett al 5%.

Para los suelos de las unidades Montenegro y San Simón se registró efecto de los niveles de lombrinaza (P<0,0001) pero no hubo efecto de los fertilizantes ni de las dosis de Si sobre el peso seco de raíces.

En el suelo de la unidad Suroeste hubo efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante así como de la dosis de 0,84 g de Si con

Tabla 2. Valores de los cuadrados medios (CM) y niveles de significancia (al 1%** y al 5%*) para todas las variables estudiadas por unidad de suelo.

Fuente de variación	Biomasa raíces	Biomasa aérea	RRPA	Rigidez tallo	Silicio suelo	Fósforo foliar	CIC suelo
Unidad Chinchiná							
Lombrinaza	2,90 **	83,62 **	0,238 **	1,4E-4 ns	3664 **	0,103 **	197,5 **
Fertilizante	3,58 **	47,52 **	0,011 ns	1,2E-3 **	8,44 ns	7,7E-3 ns	
Lomb*Fert	0,10 ns	11,78 **	0,038 **	3,4E-5 ns	153,7 ns	0,019 ns	
DosisSi	0,67 **	6,63 **	0,018 **	3,2E-4 **	22,48 ns	9,3E-4 ns	53,43 **
Lomb*DosisSi	0,70 **	7,48 **	0,011 *	1,9E-4 *	3,20 ns	5,0E-4 ns	20,18 *
Fert*DosisSi	1,20 **	8,03 **	0,026 **	3,0E-4 **	40,39 ns	1,2E-3 ns	
Lomb*Fert*DosisSi	0,61 **	8,78 **	0,031 **	4,4E-4 **	0,17 ns	2,0E-4 ns	
Unidad 200							
Lombrinaza	62,58 **	1422 **	0,099 **	0,016 **		0,059 **	265,0 **
Fertilizante	2,05 **	55,84 **	0,021 **	2,1E-3 **		1,7E-5 ns	
Lomb*Fert	2,0E-3 ns	0,30 ns	7,4E-3 ns	7,7E-5 ns		7,4E-3 ns	
DosisSi	1,01 **	11,40 *	0,031 **	5,3E-4 ns		1,5E-4 ns	2,41 ns
Lomb*DosisSi	0,64 *	4,55 ns	3,6E-3 ns	7,4E-5 ns		4,8E-3 ns	1,48 ns
Fert*DosisSi	0,84 **	10,98 *	6,6E-3 ns	1,0E-4 ns		8,2E-4 ns	
Lomb*Fert*DosisSi	0,52 ns	7,11 ns	1,7E-3 ns	8,6E-6 ns		8,2E-4 ns	
Unidad Montenegro							
Lombrinaza	26,18 **	774,2 **	1,476 **	5,2E-3 **		0,042 **	
Fertilizante	0,82 ns	1,19 ns	2,9E-3 ns	1,6E-4 ns		2,0E-3 ns	
Lomb*Fert	9,3E-3 ns	5,31 ns	0,061 ns	5,7E-4 *		2,7E-4 ns	
DosisSi	0,18 ns	1,84 ns	0,061 *	1,7E-6 ns		1,5E-4 ns	
Lomb*DosisSi	0,18 ns	2,61 ns	0,017 ns	9,0E-5 ns		0,000 ns	
Fert*DosisSi	0,35 ns	1,78 ns	0,020 ns	1,5E-4 ns		3,3E-3 ns	
Lomb*Fert*DosisSi	0,72 *	2,47 ns	0,014 ns	1,2E-4 ns		2,8E-3 ns	
Unidad San Simón							
Lombrinaza	5,79 **	554,0 **	1,380 **	2,9E-3 **	456,6 **		209,8 **
Fertilizante	0,09 ns	1,10 ns	7,9E-3 ns	1,7E-4 ns	104,5 **		
Lomb*Fert	0,27 ns	0,25 ns	0,039 **	2,7E-5 ns	207,4 **		
DosisSi	0,31 ns	4,60 ns	0,034 **	2,5E-4 ns	79,08 **		5,28 ns
Lomb*DosisSi	0,19 ns	4,35 ns	0,015 *	1,3E-5 ns	30,75 ns		6,63 ns
Fert*DosisSi	0,56 ns	2,72 ns	0,015 **	5,0E-6 ns	26,75 ns		
Lomb*Fert*DosisSi	0,13 ns	0,61 ns	9,6E-3 ns	2,0E-4 ns	57,51 *		
Unidad Suroeste							
Lombrinaza	92,79 **	2107 **	0,388 **	0,03 **	132,5 *		
Fertilizante	0,68 ns	20,06 ns	0,053 **	2,4E-3 *	19,78 ns		
Lomb*Fert	5,65 **	47,18 **	7,4E-3 ns	3,8E-4 ns	6,98 ns		
DosisSi	0,86 ns	4,93 ns	0,040 **	1,6E-5 ns	150,4 ns		
Lomb*DosisSi	0,57 ns	4,20 ns	2,4E-3 ns	2,7E-5 ns	0,28 *		
Fert*DosisSi	0,38 ns	6,92 ns	3,2E-3 ns	9,1E-4 ns	50,17 ns		
Lomb*Fert*DosisSi	0,03 ns	1,43 ns	4,1E-3 ns	2,2E-4 ns	144,4 *		

Continúa...

...continuación

Fuente de variación	Biomasa raíces	Biomasa aérea	RRPA	Rigidez tallo	Silicio suelo	Fósforo foliar	CIC suelo
Unidad Timbío							
Lombrinaza	68,31 **	1764 **	0,243 **	0,018 **			
Fertilizante	3,63 **	45,91 **	2,0E-3 ns	2,6E-3 **			
Lomb*Fert	0,03 ns	2,60 ns	0,014 **	1,3E-5 ns			
DosisSi	0,80 *	6,97 ns	0,045 **	2,1E-5 ns			
Lomb*DosisSi	0,78 *	5,71 ns	2,4E-3 ns	3,8E-7 ns			
Fert*DosisSi	0,49 ns	8,82 ns	5,4E-3 *	4,9E-5 ns			
Lomb*Fert*DosisSi	0,34 ns	10,35 ns	6,5E-3 *	1,3E-4 ns			

RRPA= Relación Raíces: Parte aérea; CIC= Capacidad de intercambio catiónico; ns= no significativo; Casillas en blanco indican no estimación del valor de CM o ausencia de significancia del modelo según el análisis de varianza al 5%.

la FC1; las tres dosis más altas de la FC2 (0,84; 1,68 y 3,36 g/planta) exhibieron los mayores promedios en esta variable respecto a los testigos.

Para la unidad Timbío se encontraron diferencias entre los niveles de lombrinaza ($P<0,0001$) y entre los fertilizantes ($P=0,0004$), sobresaliendo la presencia de material orgánico y la FC2.

Dado que en la mayoría de los casos, las dosis de la FC1 no incrementaron significativamente el crecimiento de raíces de las plantas de café durante la etapa de almácigo, los anteriores resultados se relacionaron más con el contenido de fósforo en la fuente FC2 que con el contenido mismo de Si y en cierta medida coinciden con los resultados de Caicedo y Chavarriaga (6) quienes indican un efecto de la fuente FC1 sobre el peso de raíces de café variedad Colombia, pero solo cuando se combinó con 3 g de DAP por planta. No obstante, en otro estudio Ribeiro *et al.* (32), señalan que plantas de café variedad Catuai durante la etapa de almácigo tratadas con una dosis alta de Si, equivalente a 6 Mg.ha⁻¹ de silicato de calcio, exhibieron menor acumulación de materia seca en las raíces, equivalente a una reducción del

50% del crecimiento radicular diario, pero sin comprometer la disponibilidad hídrica o nutricional de la parte aérea.

Peso de la biomasa seca de partes aéreas

Al igual que para el crecimiento de raíces, en la unidad Chinchiná se registró efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi ($P<0,0001$) y no se observaron diferencias entre los dos niveles de lombrinaza, mientras que en los cinco suelos restantes, el promedio de esta variable fue mayor con la utilización del abono orgánico (Figura 2).

En la unidad Chinchiná los mayores promedios de peso de la parte aérea frente al testigo (Dunnett, 5%) se registraron en presencia de lombrinaza con la aplicación de 3,36 y 0,84 g de Si por planta, a partir de la FC2. Sin Lombrinaza, la dosis 0,84 g de Si por planta a partir de la FC1 en Chinchiná, exhibió un mayor promedio comparada con el testigo.

Para el suelo de la unidad 200 hubo un efecto de la utilización de Lombrinaza ($P<0,0001$) y de la interacción Fertilizante*DosisSi ($P=0,0144$) sobresaliendo aquellos tratamientos con abono orgánico y la FC2. Sin Lombrinaza, igualmente las dosis 1,68 y 3,36 g de Si con

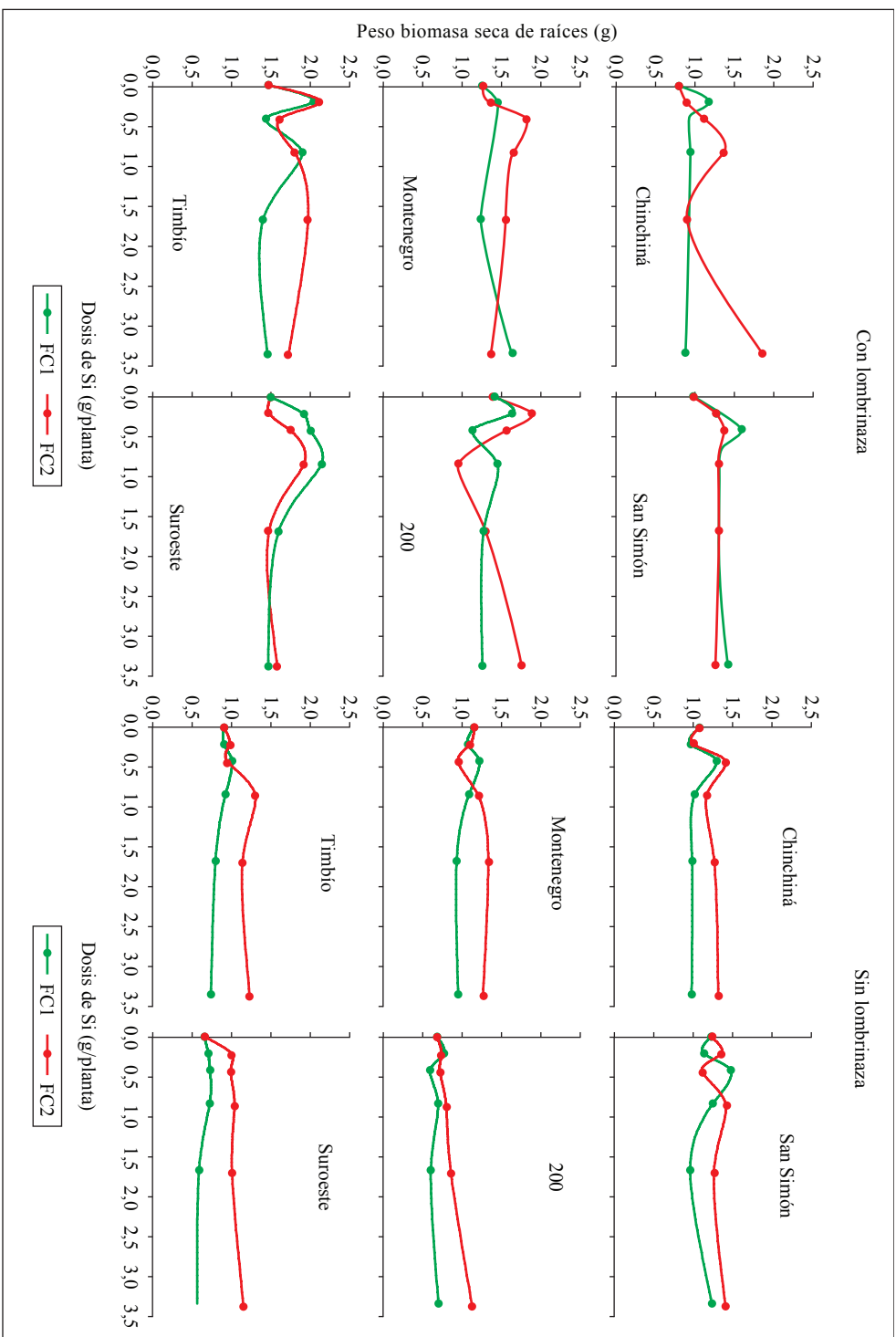


Figura 1. Peso de la biomasa seca de raíces en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y Si (FC= Fuente comercial de Si).

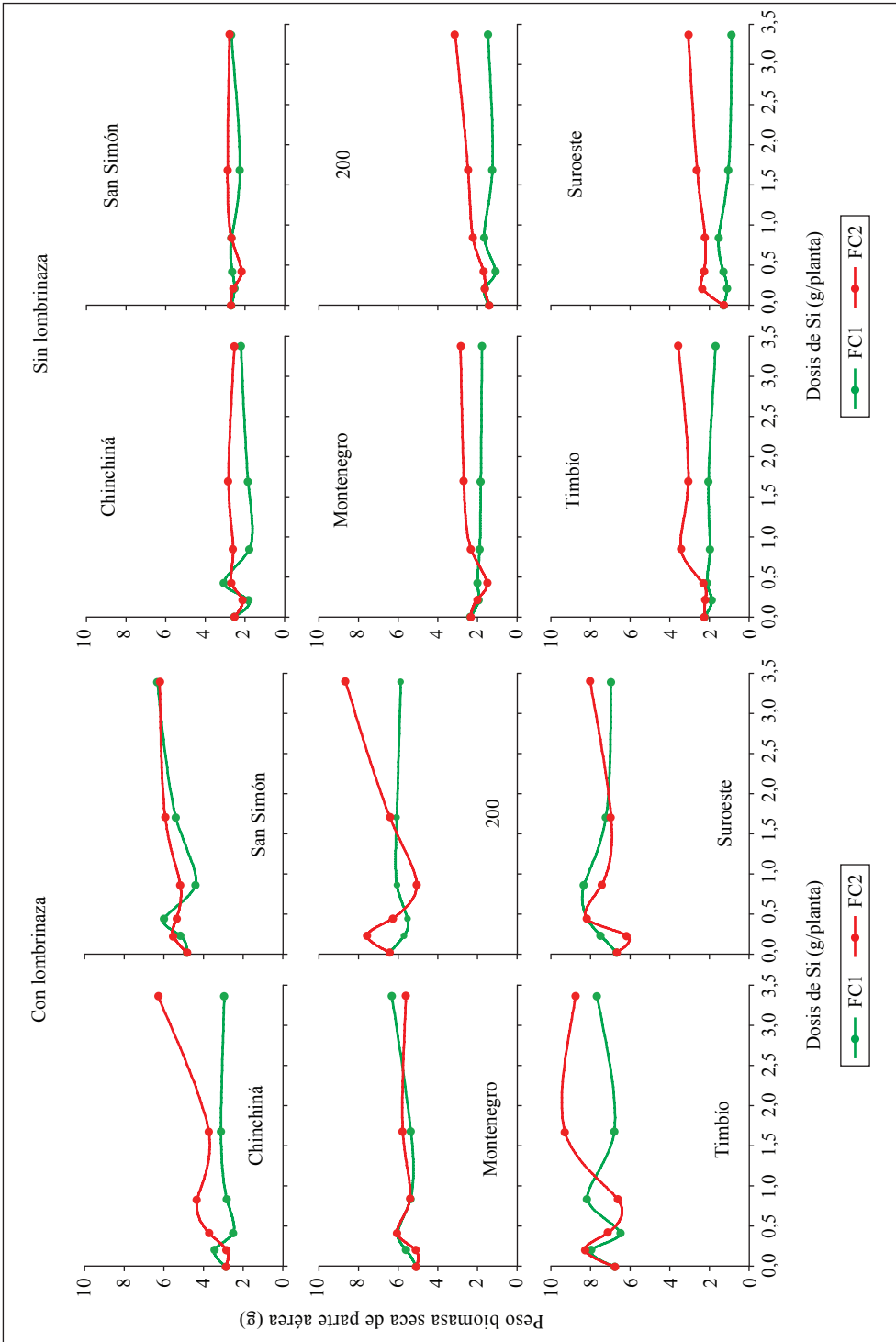


Figura 2. Peso de la biomasa seca de partes aéreas en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

la FC2 incrementaron el peso de la parte aérea frente al testigo.

En las unidades Montenegro y San Simón hubo efecto solo de los niveles de lombrinaza ($P<0,0001$) a favor de la aplicación de este abono orgánico, pero no de las fuentes ni las dosis de Si.

En la unidad Suroeste la interacción Lombrinaza*Fertilizante ($P=0,0064$) afectó la biomasa de la parte aérea, sobresaliendo la aplicación de abono orgánico y en su ausencia, la utilización de las dosis 1,68 y 3,36 g de Si a partir de la FC2.

Para la unidad Timbío se registró un efecto de los niveles de Lombrinaza ($P<0,0001$) a favor de la utilización de abono orgánico y también un efecto de los Fertilizantes ($P=0,0010$) a favor de la FC2. No obstante, en ausencia de lombrinaza las dosis de 0,84 y 3,36 g fueron las que presentaron los mayores promedios de esta variable, comparados con el testigo sin aplicación de Si.

Similar a lo observado para las raíces en presencia de abono orgánico con la fuente FC1, no hubo efectos sobre la biomasa seca de la parte aérea de los almácigos en alguno de los suelos. Caicedo y Chavarriaga (6) también encontraron los mayores pesos de la parte aérea al incorporar 6 g de Si y 3 g de DAP al momento de la siembra. Aunque los mismos autores aseguran un efecto combinado de estos dos elementos, los resultados del presente estudio no permiten realizar la misma afirmación y corroboran el efecto positivo del fósforo sobre el vigor de las plantas. En otro estudio en Brasil, Ribeiro *et al.* (32) reportan que aunque la masa radicular disminuyó con altas dosis de Si, no hubo efecto sobre la biomasa aérea de las plantas ni sobre su asimilación

de CO_2 y la conductancia estomática. El mismo estudio menciona también que la aplicación de silicato de calcio no afectó significativamente el diámetro del tallo, la altura de las plantas, el área foliar ni el peso total de la biomasa seca de las plantas.

Relación raíces: parte aérea

Con excepción de la unidad 200, en todos los suelos la relación raíces:parte aérea de las plantas fue mucho mayor sin lombrinaza en las bolsas del almácigo que cuando las plantas crecieron con abono orgánico (Figura 3). La interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi afectó significativamente esta variable en Chinchiná ($P<0,0001$) y Timbío ($P=0,0145$) sobresaliendo las dosis de 0,42, 0,84 y 0,21 g de Si con la FC1 y de 0,42 y 3,36 g de Si a partir de la FC2 en Chinchiná, así como las dosis de 0,84, 0,21 y 0,42 g de Si a partir de la FC1 y 0,84 g de Si con la FC2 en Timbío.

Así mismo, se registró un efecto de la interacción Fertilizante*DosisSi en las unidades 200 ($P=0,0326$) y San Simón ($P=0,0093$), pero solo en esta última sobresalieron las dosis de 0,42 g de Si con la FC1 y 0,84 g de Si a partir de la FC2 en ausencia de lombrinaza, lo cual a su vez explica el efecto de la interacción Lombrinaza*DosisSi encontrado en la unidad San Simón ($P=0,0101$).

Respecto al efecto único de los niveles de lombrinaza, éste fue registrado en los suelos de las unidades 200 ($P<0,0001$), Montenegro ($P<0,0001$) y Suroeste ($P<0,0001$) sin aplicación de material orgánico.

La ausencia de lombrinaza permitió diferenciar mejor el efecto de cada suelo sobre la distribución de asimilados en las

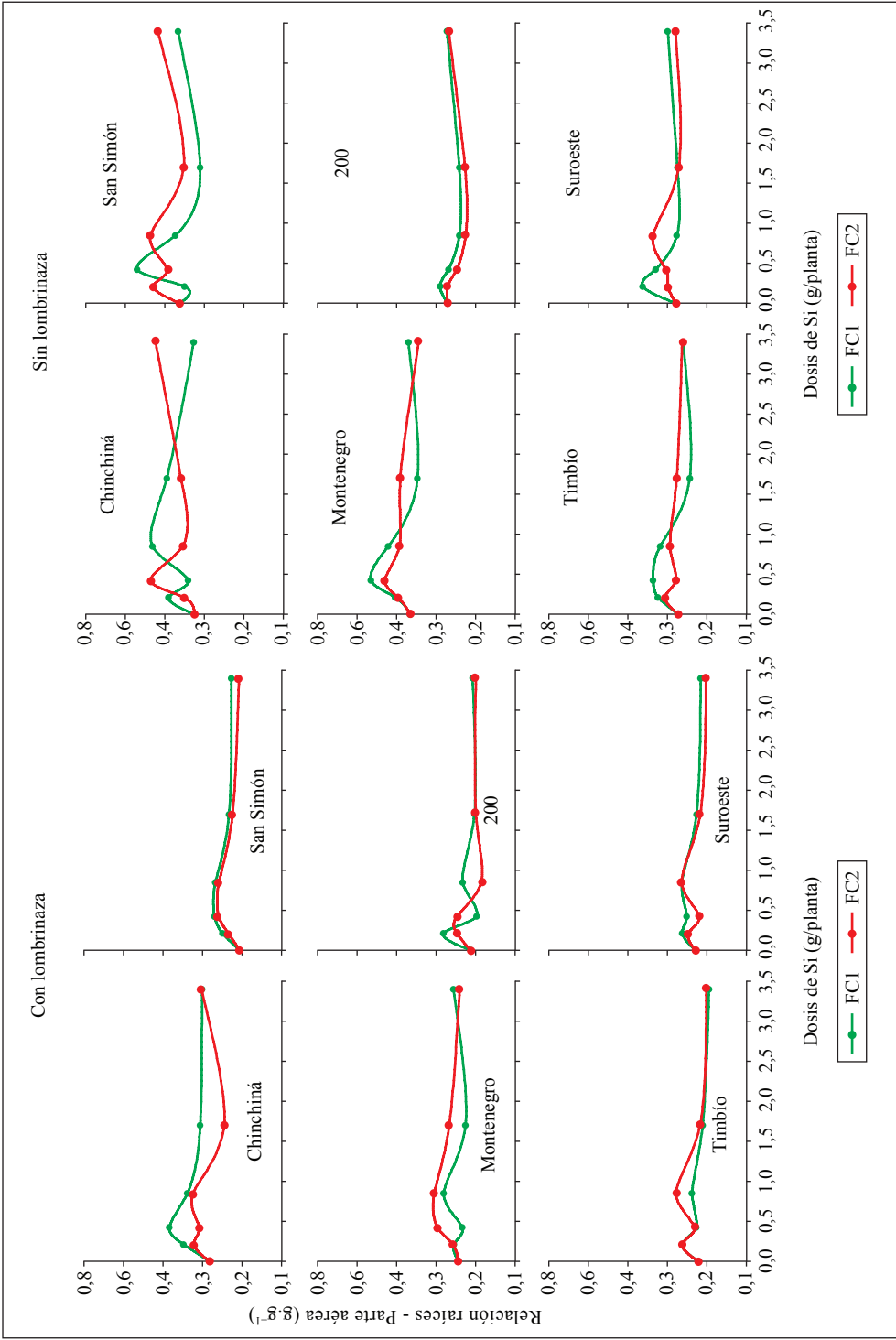


Figura 3. Relación raíces:parte aérea en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

plantas, pues los mayores valores se registraron en los suelos de las unidades Chinchiná, San Simón, Montenegro y no se encontró alguna diferencia significativa entre los dos fertilizantes ni entre las dosis de cada fuente por unidad de suelo. En cambio, cuando se adicionó el abono orgánico la distribución de asimilados en las plantas fue similar tanto entre fuentes y dosis de Si como entre los suelos evaluados, lo cual refleja una capacidad intrínseca de las plantas de café para emitir una cierta proporción de raíces y de parte aérea en respuesta a las condiciones del sustrato. Lo anterior también resalta la importancia del uso de lombrinaza en la fertilidad del sustrato ya que su ausencia obliga a las plantas a producir más raíces en busca de nutrientes, afectando negativamente la acumulación de biomasa aérea.

Al respecto, Ribeiro *et al.* (32) reportan que la aplicación de silicato de calcio aumentó la proporción de raíces y a su vez disminuyó la relación raíces:parte aérea; no obstante, dado que los resultados de este estudio mostraron efecto de las Dosis de Si, pero en interacción con el tipo de fertilizante o el nivel de lombrinaza en solo dos de los suelos, no es posible concluir acerca del efecto del Si en la distribución de asimilados, contrario a lo que se reporta para otros nutrientes como el N, el cual reduce la proporción de raíces y aumenta la proporción de partes aéreas.

Rigidez estructural del tallo

Esta propiedad fue favorecida en todas las unidades de suelo por la aplicación de lombrinaza (Figura 4) y su comportamiento siguió un patrón similar al observado para el diámetro del tallo (datos no mostrados), debido a que se deriva directamente de éste. A mayor diámetro mayor fue la rigidez estructural.

Como en las variables relacionadas con la biomasa de la planta, la rigidez del tallo también fue afectada en la unidad Chinchiná por la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi ($P<0,0001$) a favor de la utilización de lombrinaza y la dosis más alta de Si como FC2 (3,36 g/planta), cuya combinación dio lugar a la mayor rigidez estructural del tallo, comparada con el testigo sin aplicación del elemento (Dunnett, 5%).

En las unidades 200, Suroeste y Timbío, hubo efecto de los niveles de lombrinaza ($P<0,0001$; $P<0,0001$; $P<0,0001$) y de las fuentes de Si ($P=0,0002$; $P=0,0113$; $P<0,0001$) a favor de la utilización de este abono orgánico y la FC2. En las unidades 200 y Suroeste, la dosis alta de la FC2 (3,36 g/planta), aumentó la rigidez estructural de los tallos en comparación con la dosis cero de cada suelo (Dunnett, 5%), mientras que en la unidad Montenegro se registró un efecto de la interacción Lombrinaza*Fertilizante ($P=0,0185$) en la cual sobresalió la FC2 frente a la FC1, solo cuando no se aplicó lombrinaza.

Similar a lo reportado para las otras variables, en ninguno de los suelos se encontró efecto de la FC1.

Según Ma y Yamaji (23, 24) la mayoría de los efectos benéficos del Si en las plantas se atribuyen a su disposición en forma de SiO_2 en las paredes celulares de raíces, tallos, hojas y cáscaras, la cual a su vez funciona como una barrera física que aumenta la resistencia y la rigidez de dichos tejidos e impide mecánicamente la entrada o el daño causado por hongos e insectos. No obstante, dado posiblemente a que el café es considerado una planta no acumuladora de Si, el efecto de su aplicación sobre la rigidez estructural del tallo no fue evidente.

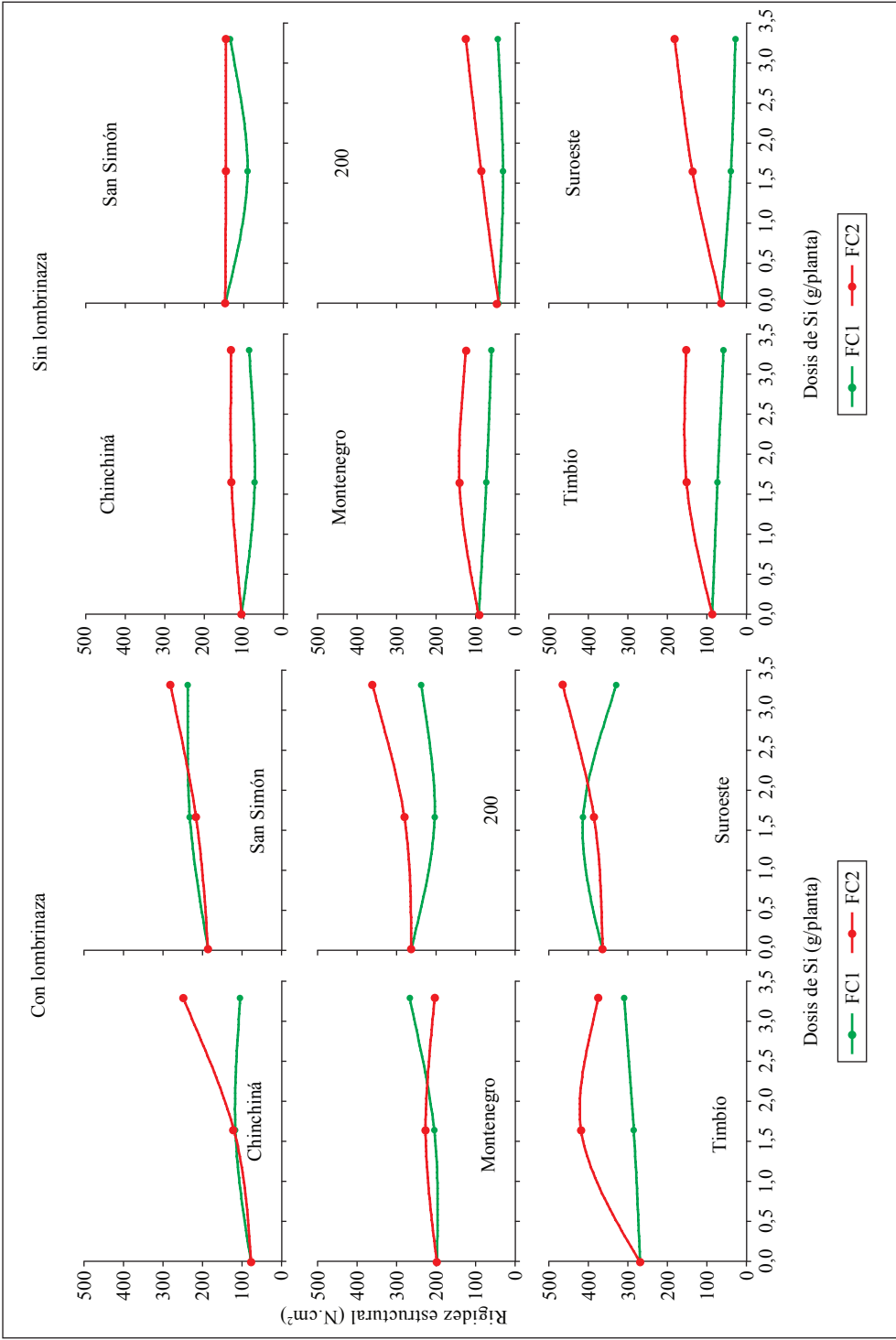


Figura 4. Rigidez estructural del tallo en plantas de café sembradas en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

Contenido de Si en el suelo

En la mayoría de los suelos no se modificaron los contenidos de Si con la utilización de lombrinaza con respecto al suelo sin abono orgánico, con excepción de las unidades Chinchiná, San Simón y Suroeste, en las cuales se disminuyó el contenido de Si en el suelo en alguna de las combinaciones abono orgánico fertilizante (Figura 5).

Se registró un efecto negativo de la utilización de Lombrinaza en el suelo de la unidad Chinchiná ($P < 0,0001$), así como un efecto significativo de la interacción Lombrinaza*Fertilizante*DosisSi en las unidades San Simón ($P < 0,0142$) y Suroeste ($P = 0,0274$). Particularmente, en San Simón con lombrinaza, la aplicación de 1,68 g de Si por planta con los dos fertilizantes y de 3,36 g/planta en forma de la FC1, exhibieron menores promedios en los contenidos de Si que el testigo, mientras que en la unidad Suroeste sin lombrinaza se disminuyó el contenido de Si en el suelo con la aplicación de 3,36 g de Si por planta en forma de la FC1 con relación al testigo donde no se aplicó el elemento (Prueba Dunnett 5%).

En las unidades restantes, no hubo efecto de la lombrinaza ni de las fuentes y dosis de Si evaluadas sobre el contenido de este elemento en el sustrato al finalizar la etapa del almácigo.

Respecto al efecto negativo de la aplicación del Si sobre su contenido en el suelo, mencionado para estas tres unidades sin ser contraproducente para el crecimiento de las plantas, Savant *et al.* (38) aseguran que las diversas respuestas encontradas a partir de las aplicaciones de Si están relacionadas con los distintos factores y procesos involucrados en la cinética de su disolución en el suelo. Es posible que haya ocurrido polimerización

de este elemento, la cual según Berthelsen y Korndörfer (4) ocurre cuando se aumentan las concentraciones de Si y se incrementa el pH en el suelo, en presencia de hidróxidos de hierro y aluminio.

La poca respuesta del crecimiento de las plantas y del contenido de Si en el suelo a partir de los fertilizantes evaluados puede asociarse en parte a que los niveles iniciales de este elemento en las unidades estudiadas pueden considerarse altos (Tabla 1) si se comparan con suelos de otras regiones del mundo, con condiciones climáticas diferentes. De acuerdo con Korndörfer *et al.* (20) un contenido de 19 mg.L^{-1} es considerado como el nivel crítico de Si soluble en el suelo por debajo del cual se espera una respuesta productiva del arroz a los fertilizantes silicatados; cultivo que según Rains *et al.* (31) es el que acumula en mayor cantidad este elemento. Korndörfer *et al.* (20) también afirman que cuando los niveles de Si en el suelo son bajos ($< 6 \text{ mg.L}^{-1}$), medios ($6\text{-}24 \text{ mg.L}^{-1}$) o altos ($> 24 \text{ mg.L}^{-1}$), las cantidades de silicato de calcio necesarias para corregir las deficiencias de Si en el suelo y obtener una producción óptima de arroz son de 1.500, 1.120 y 0 kg.ha^{-1} , respectivamente.

En el café, aunque se ha comprobado su absorción en algunas variedades mediante microscopía de barrido electrónico y microanálisis de rayos X (5, 30) según los criterios descritos por Ma y Takahashi (22), los bajos contenidos foliares de Si en comparación con sus contenidos de Ca, lo catalogan como una planta poco o no acumuladora. Según Reis *et al.* (2007), citado por Botelho *et al.* (5), los contenidos de Si en la hojas de café varían entre 0,2 y 0,3 %, mientras que Caicedo y Chavarriaga (6) reportan niveles entre 0,1 y 0,5. Una estimación del contenido foliar de Si en este estudio registró valores entre 0,05% y 0,45%

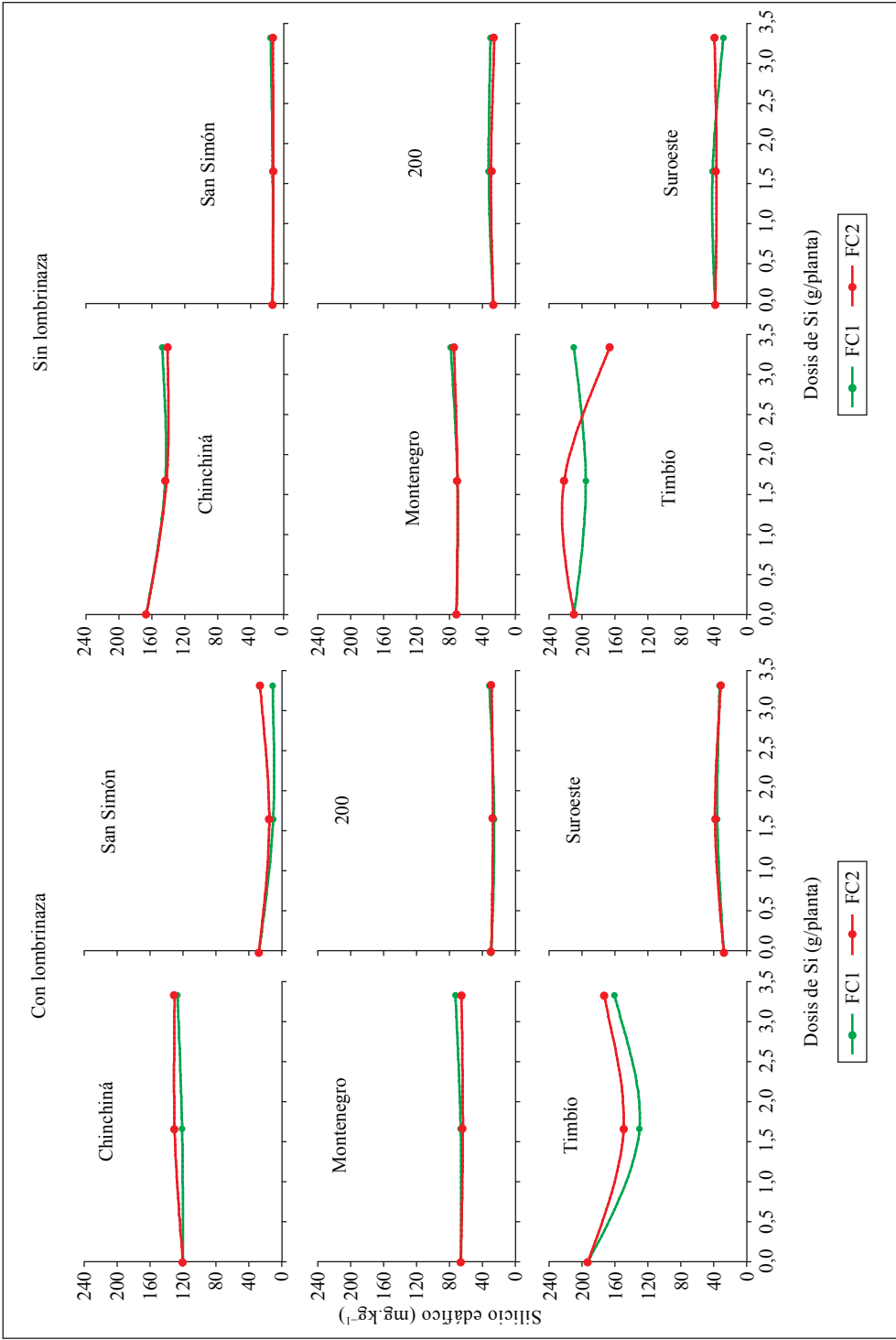


Figura 5. Contenido de Si en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

pero dada la alta variabilidad de los datos y su baja correspondencia con las dosis de Si aplicadas no permitió hacer afirmación alguna respecto al efecto de la aplicación de este elemento sobre su absorción en el café en etapa de almácigo.

Como lo indican Ma y Yamaji (24) es necesario avanzar en la caracterización molecular y fisiológica de los transportadores de Si en diferentes especies, no solo para elucidar los mecanismos de acumulación de este elemento sino también para entender su verdadero papel en el reino vegetal, ya que una expresión apropiada de las proteínas transportadoras de Si en cultivos con una absorción ineficiente podría incrementar la acumulación de Si y, por consiguiente, aumentar la resistencia a múltiples tipos de estrés, para los cuales múltiples estudios ya han discutido los efectos benéficos de este elemento en varios cultivos de importancia económica.

Contenido de P en el suelo

Para esta variable se resalta la utilización del material orgánico, la cual incrementó los niveles de P en las diferentes mezclas suelos-lombrinaza (Figura 6), con un menor aumento registrado en los suelos derivados de cenizas volcánicas, relacionado con su alto poder para fijar este elemento, y que según Salamanca y Sadeghian (34) en las unidades Montenegro y Chinchiná alcanza valores de fijación de P de 51% y 81%, respectivamente.

Con relación al efecto de las fuentes de Si, en la mayoría de combinaciones suelo-lombrinaza el P edáfico incrementó solo con la aplicación del fertilizante FC2 y los mayores niveles del elemento se registraron con la dosis más alta de esta fuente (3,36 g/planta).

Se puede afirmar que la aplicación del Si no afectó la disponibilidad del P en el suelo para las plantas, ya que con la fuente FC1, más rica en Si (90% SiO₂), no se afectó el contenido de P en el suelo y su poca variación solo estuvo asociada con el aporte del fertilizante FC2 (7% de P₂O₅). Similar a este resultado, Ma y Takahashi (21) citan que la aplicación de Silicato de sodio y carbonato de sodio no afectaron el contenido foliar de P en plantas de arroz ni disminuyeron su adsorción en el suelo bajo dos condiciones de anegamiento.

A pesar de que estudios citados por Savant *et al.* (37) mencionan varios efectos del Si sobre la disponibilidad del P como una menor adsorción de este último en algunos suelos, Ma y Takahashi (21) afirman que no se debe descartar el efecto positivo sobre el pH del suelo, que causan algunas fuentes de Si como los silicatos de Ca y Na, lo cual tiende a aumentar la solubilidad del P. Al respecto, algunos datos de pH, medidos para una muestra compuesta de cada tratamiento, tampoco permitieron evidenciar el efecto de los fertilizantes y dosis de Si sobre esta variable, pero sí de la aplicación de lombrinaza, la cual disminuyó la acidez del suelo entre media unidad en los suelos de las unidades 200 y San Simón y hasta en una unidad en Suroeste. No obstante, la lombrinaza no afectó el pH de los suelos de las unidades Chinchiná, Montenegro y Timbío, asociado posiblemente con su capacidad buffer derivada de sus contenidos de materia orgánica y ceniza volcánica, lo cual determinó posiblemente también la magnitud de la respuesta de las plantas a la aplicación de silicio.

Por otra parte, Correa *et al.* (11) encontraron un efecto positivo de la aplicación combinada de P y Si sobre la producción del arroz en dos localidades de Colombia y

que la respuesta al superfosfato triple fue mayor cuando se aplicó la mayor cantidad de Si (500 kg.ha⁻¹); según Takahashi (39), el Si reduce la fijación del ácido fosfórico y promueve su utilización dentro de las plantas. Sin embargo, en el presente estudio tampoco se encontró algún efecto de las dosis de los fertilizantes sobre el contenido foliar de P, ya que éstos mostraron únicamente efecto del nivel de lombrinaza en los suelos de las unidades Chinchiná (P<0,0001), 200 (P=0,0003) y Montenegro (P<0,0001) a favor de la utilización de lombrinaza, pero no de los fertilizantes o dosis de Si (Tabla 2).

Como se indicó, las respuestas del café en términos de crecimiento en el presente estudio obtenidas con la dosis alta del fertilizante FC2, confirman lo reportado por Ávila *et al.* (2), que cuando se incluye pulpa descompuesta en los almácigos también puede presentarse una respuesta positiva del café a la aplicación de P.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El efecto de las dosis media y alta de la FC2 sobre el comportamiento de la CIC en los sustratos del almácigo, para cuatro de los seis suelos estudiados, se presenta en la Figura 7. A pesar de que la magnitud del incremento no fue igual para todos los suelos, se corrobora que además del aporte de elementos que hace la lombrinaza, su utilización en los almácigos permite incrementar también el valor de la CIC en los sustratos; efecto más notable en las unidades Chinchiná, 200 y San Simón que en el suelo de Timbío. No obstante, el incremento en la CIC también puede relacionarse con el método utilizado en el laboratorio, el cual generalmente sobrestima el valor de esta propiedad en suelos con carga variable, como los de la zona cafetera, debido a que la CIC

exhibe una alta dependencia con respecto al contenido de carbono orgánico (33).

En la unidad Chinchiná se registró un efecto de la interacción Lombrinaza*DosisSi (P=0,0276) donde sobresalieron los dos niveles de lombrinaza en combinación con la aplicación de 1,68 g de Si por planta con la FC2 frente a los testigos (Prueba Dunnett 5%). Así mismo, se encontró efecto solo del nivel de Lombrinaza en los suelos de las unidades 200 (P<0,0001) y San Simón (P<0,0001), y en este último, al aplicar lombrinaza se incrementaron los valores de CIC para todas las dosis evaluadas, sobresaliendo también ligeramente la dosis de 3,36 g de Si por planta. Se confirma así, un posible efecto del contenido de zeolita en la FC2 sobre la CIC del suelo dependiendo del tipo de suelo y el uso o no de lombrinaza.

Los anteriores resultados permitirán orientar nuevas investigaciones para seguir avanzando en el entendimiento del papel del silicio en la nutrición del café en la zona cafetera colombiana y corroborar los efectos benéficos reportados en otros países y en otras etapas de este cultivo.

Puede concluirse que:

Dado que no se encontraron efectos considerables del fertilizante con mayor contenido de Si (FC1) sobre las variables biológicas evaluadas, puede afirmarse que la aplicación de Si en suelos con características similares a las unidades evaluadas en el presente estudio no mejora el crecimiento del café durante la etapa de almácigo. Sin embargo, cuando las plantas crecieron en suelo sin lombrinaza, la aplicación de las dosis más altas de Si, a partir de la fuente comercial rica en P, sí aumentó el vigor de las plantas, por lo que el efecto de las dosis

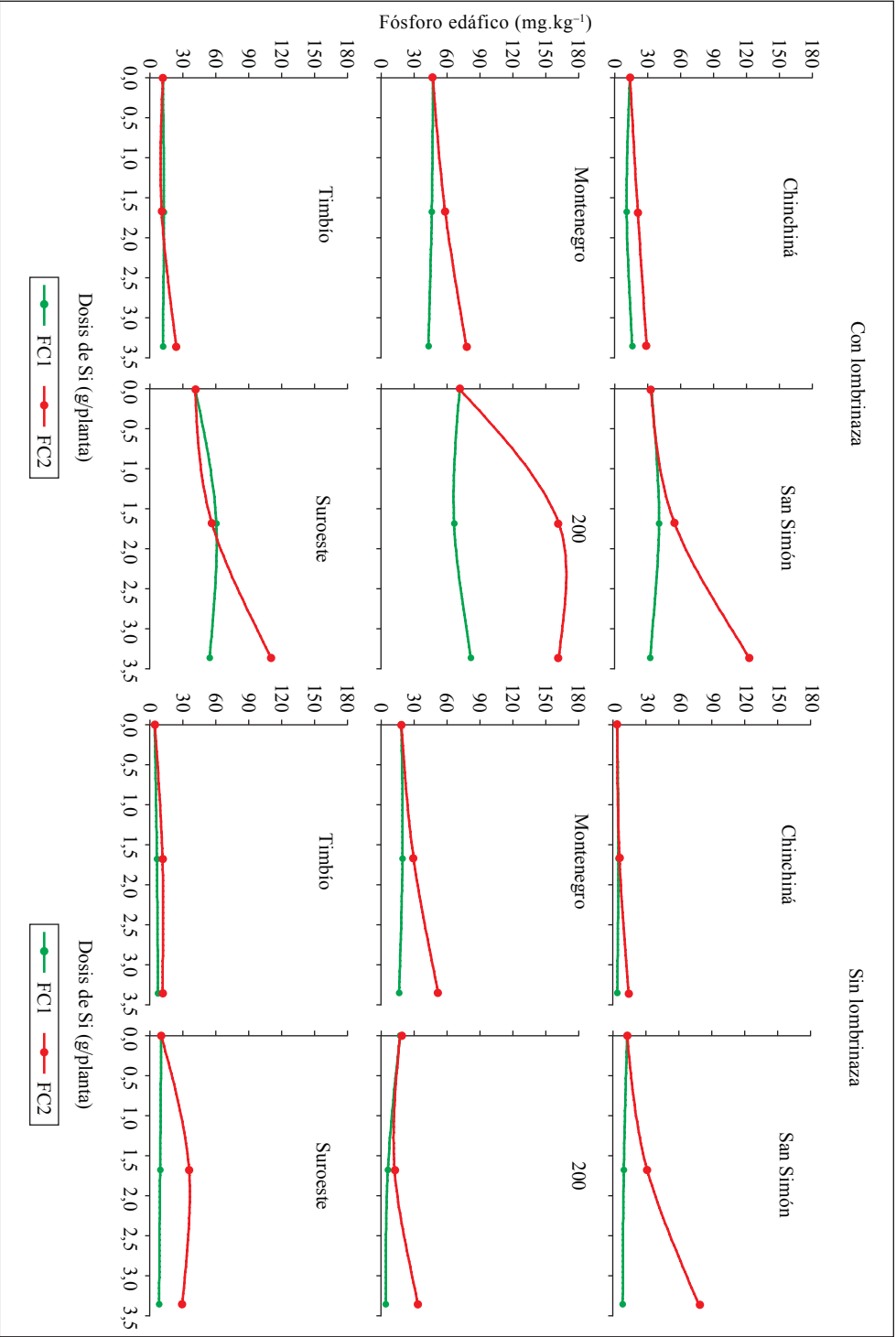


Figura 6. Contenido de P en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y de Si (FC= Fuente comercial de Si).

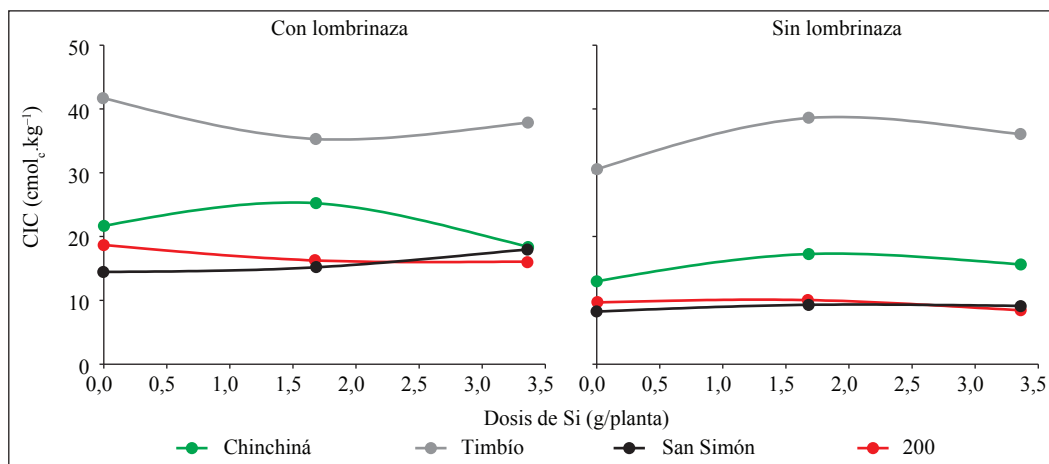


Figura 7. CIC en suelos con diferentes niveles de lombrinaza y Si.

y fuentes de este elemento fue asociado más con la aplicación de P en dicha fuente, que con la utilización misma de Si.

Este estudio permitió corroborar que la utilización de lombrinaza bien descompuesta en las bolsas de almácigo y en algunos casos la adición de P, pueden ser suficientes para obtener almácigos vigorosos y llevar al campo plantas de café de buena calidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todas las personas que contribuyeron para la realización de este experimento especialmente a: Santiago Ramírez y Mauricio Castillo de la empresa C.I. Agromil Ltda. por el apoyo financiero; los coordinadores de las Estaciones Experimentales, Juan Carlos García, Celso Arboleda (QEPD), Carlos Rodrigo Solarte, Jhon Wilson Mejía y los Extensionistas Luis Ever Rodríguez y Jairo Ramírez, por su ayuda en la recolección de los suelos, y al personal de la Cooperativa Acción Plus (antes Coopservin), que colaboró en la elaboración del almácigo y lavado de raíces.

LITERATURA CITADA

1. ARCILA P., J. Establecimiento y administración del cafetal. p. 87-99. En: ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2007.
2. ÁVILAR, W.E.; SADEGHIAN K., S.; SÁNCHEZ A., P.M.; CASTRO F., H.E. Producción de almácigos de café en el departamento de Santander con diferentes fuentes de materia orgánica y de fósforo. Avances Técnicos Cenicafé 356:1-12. 2007.
3. BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R., JR. Mecánica de materiales. Bogotá : McGraw Hill, 1993. 738 p.
4. BERTHELSEN, S.; KORNDÖRFER, G.H. Methods for silicon analysis in soil, plant and fertilizers. [En línea]. Amsterdam : Siliforce, 2003. <http://www.siliforce.com/pdf/7c/Suzanne%20-%20Methods%20For%20Si%20Analysis%20Plont%20Soil%20Fert%2003.pdf>. Consultado en junio de 2015.
5. BOTELHO, D.M.S.; POZZA, E.A.; ALVES, E.; BOTELHO, C.E.; POZZA, A.A.A.; RIBEIRO JÚNIOR, P.M.; DE SOUZA, P.E. Efeito do silício na intensidade da cercosporiose e na nutrição mineral de mudas de cafeeiro. Arquivos do instituto biológico 78(1):23-29. 2011.
6. CAICEDO M., L.M.; CHAVARRIAGA M., W. Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. Agronomía 15(1):27-37. 2007.

7. CARRILLO, I.F. Manual de laboratorio de análisis de suelos. Chinchiná : Cenicafé, 1985. 111 p.
8. CARRILLO, I.F.; MEJÍA M., B.; FRANCO, H.F. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná : Cenicafé, 1994. 52 p.
9. CENIPALMA. Método para la determinación de Si disponible en el suelo. Bogotá : Cenipalma, (s.f.). 4 p.
10. CHEN, J.; CALDWELL, R.; ROBINSON, C.; STEINKAMP, R. Silicon: The estranged medium element: Bulletin 341. Florida : University of Florida : Environmental horticulture department : Florida cooperative extension service : Institute of food and agricultural sciences, 2000. 5 p.
11. CORREA, F.J.; DATNOFF, L.E.; OKAD, K.; FRIESEN, D.K.; SANZ, J.I.; SNYDER, G.H. Effects of fertilization on disease development and yields of rice in Colombia. En: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds) Silicon in agriculture. Amsterdam : Elsevier science, p. 313-322. 2001.
12. CURI, A.; GRANDA, W.J.V.; LIMA, H.M.; SOUZA, W.T. Las zeolitas y su aplicación en la descomposición de efluentes mineros. Información tecnológica 17(6):111-118. 2006.
13. EPSTEIN, E. Silicon. Annual review of plant physiology and Plant molecular biology 50:641-664. 1999.
14. EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. En: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds) Silicon in agriculture. Amsterdam : Elsevier science, p. 1-15. 2001.
15. EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. 2 ed. Sunderland : Sinaur associates, 2004. 400 p.
16. HALLMARK, C.T.; WILDING, L.P.; SMECK, N.E. Silicon. En: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Eds) Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Madison : ASA : SSSA, p. 263-273. 1982.
17. HAVLIN, J.; TISDALE, S.; NELSON, W.; BEATON, J. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. New Jersey : Prentice Hall, 2014. 258 p.
18. JACKSON, J.H.; WIRTZ, H.G. Estática y resistencia de materiales. México : McGraw Hill, 1984. 392 p.
19. KAUFMAN, P.; DAYANANDAN, P.; FRANKLIN, C. Structure and function of silica bodies on the epidermal system of grass shoots. Annals of botany 55(4):487-507. 1985.
20. KORNDÖRFER, G.H.; SNYDER, G.H.; ULLOA, M.; POWELL, G.; DATNOFF, L.E. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. Journal of plant nutrition 24(7):1071-1084. 2001.
21. MA, J.F.; TAKAHASHI, E. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. Plant and soil 133(2):151-155. 1991.
22. MA, J.F.; TAKAHASHI, E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Amsterdam : Elsevier, 2002. 281 p.
23. MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends in plant science 11(8):392-397. 2006.
24. MA, J.F.; YAMAJI, N. A cooperated system of silicon transport in plants. Trends in plant science 20(7):435-442. 2015.
25. MA, J.F.; MITANI, N.; NAGAO, S.; KONISHI, S.; TAMAI, K.; IWASHITA, T.; YANO, M. Characterization of the silicon uptake and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. Plant physiology 136(2):3284-3289. 2004.
26. MARTINATI, J.C.; HARAKAVA, R.; GUZZO, S.D.; TSAI, S.M. The potential use of a silicon source as a component of an ecological management of coffee plants. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café. Paris : ASIC, p. 1112-1115. 2006.
27. MARTINATI, J.C.; HARAKAVA, R.; GUZZO, S.D.; TSAI, S.M. The potential use of a silicon source as a component of an ecological management of coffee plants. Journal of phytopathology 156(7/8):458-463. 2008.
28. MATICHENKOV, V. Silicon in food agriculture and environment. [En línea]. Pushchino : Institute of basic biological problems russian academy of sciences, 2004. Disponible en internet: [Http://sifertilizer.com/2/silicon.htm](http://sifertilizer.com/2/silicon.htm). Consultado en Noviembre de 2004.
29. MITANI, N.; MA, J.F. Uptake system of silicon in different plant species. Journal of experimental botany 56(414):1255-1261. 2005.
30. POZZA, A.; ALVES, E.; POZZA, E.; CARVALHO, J. DE; MONTANARI, M.; GUIMARÃES, P.; SANTOS, D. Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. Fitopatologia brasileira 29(2):185-188. 2004.

31. RAINS, D.W.; EPSTEIN, E.; ZASOSKI, R.J.; ASLAM, M. Active silicon uptake by wheat. *Plant and soil* 280(1):223-228. 2006.
32. RIBEIRO, R.V.; SILVA, L. DA; RAMOS, R.A.; ANDRADE, C.A. DE; ZAMBROSI, F.C.B.; PEREIRA, S.P. O alto teor de silício no solo inibe o crescimento radicular de cafeeiros sem afetar as trocas gasosas foliares. *Revista brasileira de ciência do solo* 35(3):939-948. 2011.
33. SADEGHIAN K., S.; ZAPATA H., R.D. Propiedades relacionadas con la adsorción de cationes intercambiáveis en algunos suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* 63(2):79-89. 2012.
34. SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN K., S. Almacigos de café con distintas proporciones de lombrinaza en suelos con diferente contenido de materia orgánica. *Cenicafé* 59(2):91-102. 2008.
35. SALISBURY, F.; ROSS, C. *Fisiología vegetal*. México : Iberoamericana, 1994. 759 p.
36. SANTOS B., D.M.; POZZA, E.A.; POZZA, A.A.A.; CARVALHO, J.G.; BOTELHO, C.E.; SOUZA, P.E. Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. *Fitopatologia brasileira* 30(6):582-588. 2005.
37. SAVANT, N.K.; SNYDER, G.H.; DATNOFF, L.E. Silicon management and sustainable rice production. *Agronomy journal* 58:151-199. 1997.
38. SAVANT, N.K.; KORNDÖRFER, G.H.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. Silicon nutrition and sugarcane production: A review. *Journal of plant nutrition* 22(12):1853-1903. 1999.
39. TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. En: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; HIRATA, H. (Eds) *Science of the rice plant: Physiology*. Tokyo : Food and agriculture policy research center, p. 420-433. 1995.
40. WANG, J.J.; DODLA, S.K.; HENDERSON, R.E. Soil silicon extraction with seven selected extractants in relation to colorimetric and IPC determination. *Soil science* 169:861-870. 2004.