

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

**APLICACIÓN DE YESO AGRÍCOLA PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS EN EL
RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DEL MANGO**

Federal University of Paraná – UFPR X National Mango Board

(Informe Final)

Volnei Pauletti¹

Danilo Eduardo Rozane²

Curitiba Agosto 2025

¹ Professor Engº Agrº Dr. Departamento de Suelos e Ingeniería Agrícola, Federal University of Paraná, Curitiba – PR

² Professor Engº Agrº Dr. São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho”, Registro – SP

IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Título del proyecto de investigación: Aplicación de yeso agrícola para minimizar las pérdidas en el rendimiento y la calidad de los mangos

Período del Proyecto (Informe): 10/2022 a 08/2025

Investigador Principal y Colaboradores:

- Prof. Dr. Volnei Pauletti (UFPR) - Coordinador
- Prof. Dr. Danilo Eduardo Rozane (Unesp)
- Estudiante de doctorado Pedro Henrique Malucelli Mariotto (UFPR)

1 Introducción

El mango (*Mangifera indica* L.) se cultiva en entornos tropicales y subtropicales, y Brasil es reconocido como uno de los principales productores (KIST et al., 2023; TRIDGE, 2022). Estas regiones suelen presentar condiciones hídricas irregulares, lo que puede provocar pérdidas en la productividad y/o en la calidad del fruto.

En un sistema de cultivo (con o sin riego), el aumento del crecimiento radicular a mayores profundidades incrementa la cantidad de agua y nutrientes disponibles para la planta. Sin embargo, para que las raíces crezcan a mayor profundidad, no debe haber restricciones físicas (como la compactación) ni químicas. Entre los factores químicos, la presencia de aluminio (Al) en niveles tóxicos y el bajo contenido de calcio (Ca) son los dos principales factores limitantes en ambientes tropicales ácidos. El Al se neutraliza con la aplicación de correctores de acidez, generalmente carbonatos (piedra caliza), pero su acción se limita a las capas en las que se aplicó o incorporó, con una movilidad lenta en profundidad (60 a 80 cm). El Ca se suministra normalmente mediante la aplicación de correctores de acidez y tiene baja movilidad en el perfil del suelo. Además, en el caso específico del mango, existen numerosas dudas en Brasil sobre la saturación de bases adecuada para su cultivo, dadas las variaciones en las recomendaciones presentadas en la literatura nacional: desde el 80 % (Van Raij et al., 1997; NEPAR; 2019) hasta el 51 % (Correia et al., 2018).

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) facilita el movimiento rápido del Ca en el perfil del suelo (Pauletti et al., 2014; Sumner et al., 1986). Este efecto puede ser importante porque el Ca desempeña un papel en la división celular y la sedimentación de pectatos en las paredes celulares. Se absorbe casi exclusivamente en la región del capuchón radicular y no es móvil dentro de la planta (Hawkesford et al., 2012). Por lo tanto, su deficiencia en las capas más profundas del suelo, además de restringir su absorción, disminuye o limita el crecimiento de las raíces en estas capas, lo que hace que la planta sea más propensa a sufrir deficiencias en el suministro de agua y nutrientes debido a la exploración limitada del suelo. Además de suministrar y transportar Ca a mayores profundidades, el yeso reduce la acción tóxica del Al^{+3} en las plantas y proporciona el suministro de S, un hecho de gran interés para los cultivos en regiones con restricción hídrica. Históricamente, Ritchey et al. (1980) informaron que el yeso contribuyó a reducciones significativas en la saturación de aluminio hasta una profundidad de 1.2 m, donde el aluminio ocupaba originalmente el 74 % de los sitios de intercambio del suelo.

Los efectos positivos de la aplicación de yeso sobre la productividad se observan principalmente en años de déficit hídrico. Este aumento puede ser nulo u oscilar entre el 6 % y el 36 % en especies anuales (Tiecher et al., 2018; Pauletti et al., 2014; Caires, Joris, Churkca, 2011; Black, Cameron, 1984) y de hasta un 20 % en especies perennes (Moreira et al., 2001; Serrano et al., 2018).

Además, Assis et al. (2004) describen los efectos del desequilibrio de calcio en la calidad del mango, indicando que las bajas concentraciones de Ca y Mg y las elevadas relaciones K/Ca y N/Ca, tanto en la pulpa como en la cáscara, son indicativas de trastornos fisiológicos. La aparición de ciertos trastornos fisiológicos en los frutos del mango se ha relacionado con bajos niveles de Ca en la pulpa (Gunjate et al., 1979; Lima et al., 1997).

Sin embargo, Sampaio et al. (1999) informaron que las causas del colapso de la pulpa son bastante complejas y no se comprenden del todo. Se han realizado algunos intentos para aumentar la disponibilidad de calcio en los frutos y reducir los problemas de trastornos fisiológicos. Bissoli Junior (1992) aplicó cloruro de calcio ($40\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) a mangos «Tommy Atkins» durante los 60 días posteriores a la antesis y descubrió que este tratamiento aumentaba el contenido de calcio tanto en la pulpa como en la cáscara del fruto, lo que beneficiaba la conservación poscosecha. Sin embargo, el autor no mencionó este efecto sobre el colapso de la pulpa. De manera similar, Rabelo et al.

(1996) aplicaron cloruro de calcio (0.6 %) tres veces antes de la cosecha en mangos «Tommy Atkins», pero no observaron una reducción en los trastornos fisiológicos poscosecha. Los autores atribuyeron la falta de respuesta al nivel adecuado de calcio en el suelo. Sampaio et al. (1999) realizaron siete aplicaciones quincenales de CaCl_2 (0,6 o 1,2 %) en mangos «Tommy Atkins», cubriendo prácticamente toda la fase de fructificación de los mangos. Los autores concluyeron que, además de que las pulverizaciones previas a la cosecha no aumentaban el contenido de Ca en la pulpa, la incidencia de trastornos fisiológicos era similar en frutos con diferentes niveles de Ca en la pulpa. Se observaron resultados similares cuando había variación en la relación Ca/N. No obstante, los autores indican que se confirmó que las cosechas tardías aumentan la incidencia de trastornos fisiológicos en el mango.

La importancia de las relaciones N/Ca, K/Ca y K/Mg en la aparición de trastornos fisiológicos en los mangos también puede ponerse de manifiesto a través de la función fisiológica de estos elementos y la velocidad de su absorción y translocación dentro de las plantas. Según Hawkesford et al. (2012), el nitrógeno y el potasio son absorbidos y distribuidos de forma rápida y fácil en los tejidos y órganos vegetales tanto por el floema como por el xilema. Por el contrario, la absorción de Ca y Mg por parte de las plantas es mucho menos eficiente que la de K y N. Además, los vasos del floema, principal proveedor de nutrientes para los frutos, siempre presentan concentraciones muy bajas de Ca. Esto resalta la importancia y la necesidad de aumentar el suministro de Ca, especialmente a mayores profundidades del suelo. Además, como ya se ha comentado, el Ca no compite con los altos niveles de K requeridos para la fertilización del mango, que se aplican en la superficie y sin incorporación.

Tanto para la industria como para el consumo en fresco, existen importantes desafíos derivados de trastornos nutricionales que comprometen la calidad de la fruta. La degradación interna o colapso de la fruta, caracterizada por un desarrollo celular deficiente, el oscurecimiento de la pulpa y el ablandamiento, afecta significativamente la comercialización de la fruta (MA et al., 2022; ULLAH et al., 2024). La aparición de este trastorno se ha asociado particularmente con la deficiencia de calcio en la fruta, aunque esta relación sigue siendo compleja y aún no se comprende del todo (SHIVASHANKAR, 2014).

2 Objetivos

Determinar la influencia del yeso en la fertilidad del suelo y en la eficacia de la corrección de calcio y azufre en las capas profundas del suelo en zonas de cultivo de mango, así como sus consecuencias en el rendimiento y la calidad de la fruta.

3 Materiales y Métodos

Se llevaron a cabo tres experimentos de campo en zonas de cultivo de mango en los estados de São Paulo (fincas de São João y Garbin) y Pernambuco (finca de FrutiVita) (Tabla 1). El clima en estas regiones varía, siendo Nenê y Garbin de características tropicales, y Petrolina semiárida (ALVARES et al., 2013). Tanto la zona de Garbin como la de Petrolina son de regadío. Los estudios se realizaron con la variedad «Tommy Atkins» en las zonas de São Paulo y con la variedad «Kent» en Pernambuco, y las cosechas se producen normalmente a mediados de diciembre.

Tabla 1. Datos generales sobre la ubicación y el método de cultivo de los mangales en los que se llevaron a cabo los experimentos

Finca	Ciudad /Estado	Riego	Latitud	Longitud	Altitud	Implantación experimental
São João	Taquaritinga / SP	No	21°21'03.7"S	48°28'12.6"W	579m	28/10/2021
Garbin	Monte Alto / SP	Yes	21°14'56.6"S	48°33'17.4"W	735m	29/10/2021
FrutiVita	Petrolina / PE	Yes	09°19'05.4"S	40°38'44.0"W	376m	08/12/2021

Los huertos de la variedad Tommy Atkins se establecieron en la Fazenda São Sebastião, en Taquaritinga (São Paulo), en 2006, con una distancia entre hileras de 7.5 x 4.5 m, en condiciones de secano; en la Fazenda Garbin, en Monte Alto, São Paulo, en 1996, con una distancia entre hileras de 8.0 x 6.0 m, en condiciones de regadío; y la variedad Kent en la Fazenda FrutVita, en Petrolina, Pernambuco, en 1998, con una distancia entre hileras de 7.0 x 5.0 m, en condiciones de regadío.

Figura 1 – Imagen que muestra los municipios en los que se llevaron a cabo los experimentos en el estado de São Paulo, Brasil.

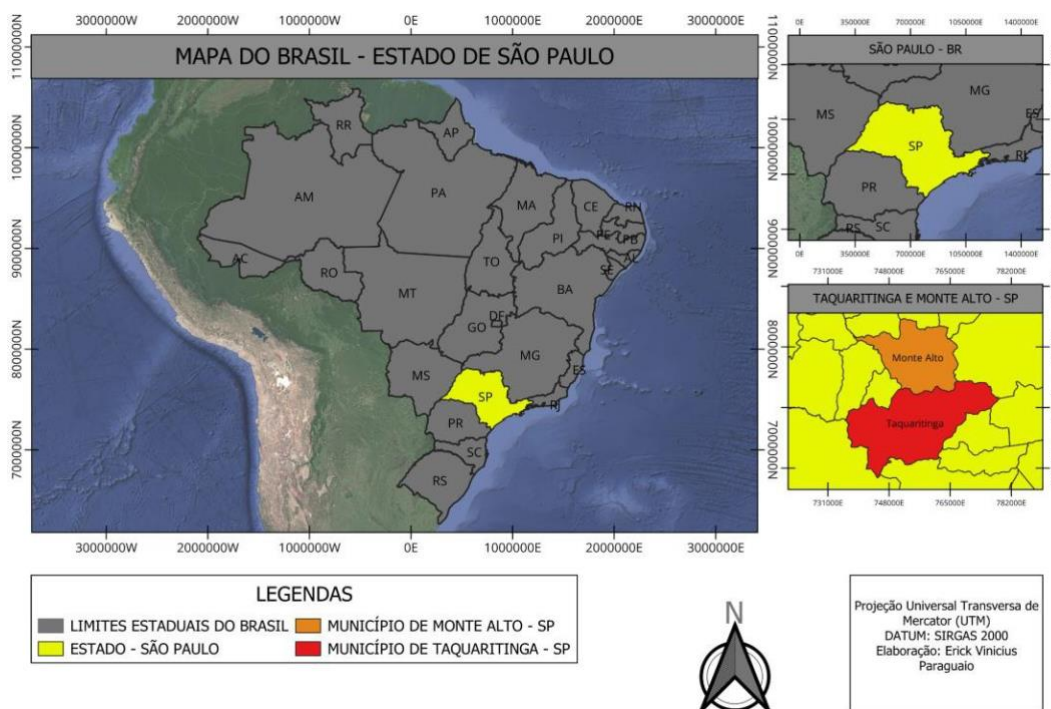
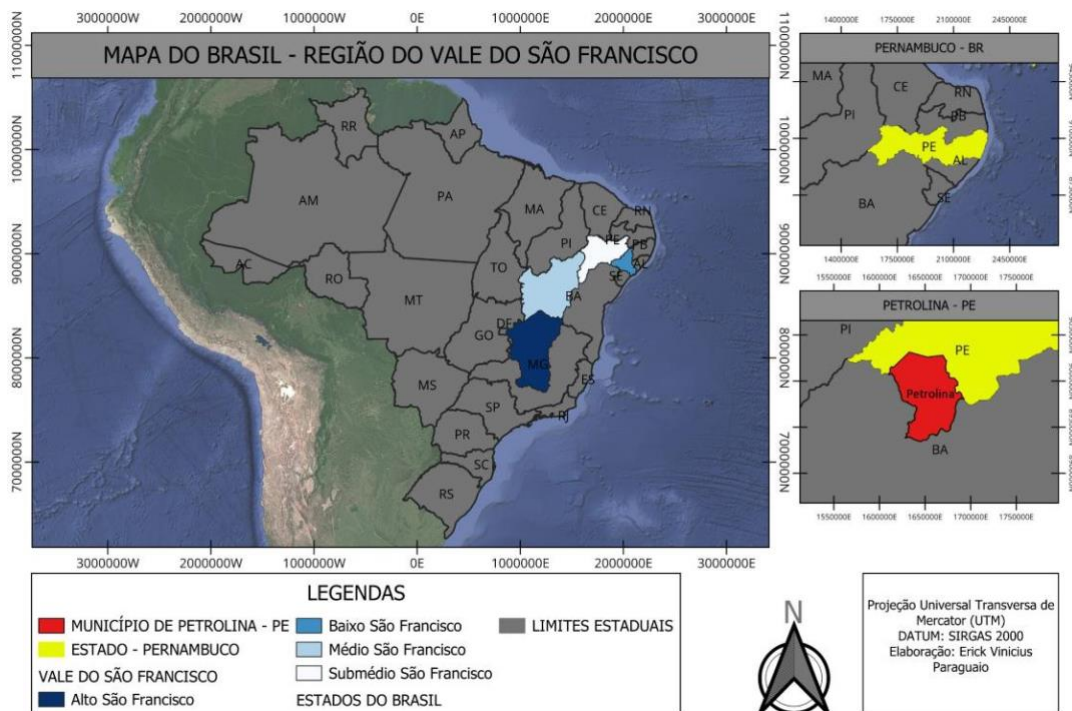


Figura 2 - Imagen que muestra el municipio donde se llevaron a cabo los experimentos en el estado de Pernambuco (Brasil).



- En todas las zonas, se lleva a cabo una poda mecánica de las plantas en cada cosecha para aumentar la entrada de luz y aire en la copa, mejorar la calidad de los frutos y facilitar la recolección. El método consiste en cortar las ramas secas, enfermas o que crecen hacia adentro, y podar las ramas excesivamente largas justo por debajo de un nudo o yema, dejando de 3 a 4 hojas para estimular un nuevo crecimiento distribuido.
- El diseño experimental de los ensayos de campo fue un diseño factorial, que combinaba dos dosis de caliza y cinco dosis de yeso aplicadas a la superficie del suelo (2x5). Las parcelas se dispusieron en cuatro bloques aleatorios en todos los lugares de estudio. Cada réplica consistía en cinco árboles adyacentes, seleccionándose los tres árboles centrales para la evaluación. Los tratamientos consistieron en la aplicación de diferentes dosis de cal y yeso al suelo, con el objetivo de aumentar la disponibilidad de Ca:
 - Caliza: dos dosis para elevar la saturación de bases (V %) en la capa de suelo de 0 a 20 cm al 51 % (CORREIA et al., 2018) o al 100 %; Yeso: cinco dosis (0 kg ha⁻¹ más cuatro dosis adicionales) calculadas para alcanzar cuatro niveles de saturación de Ca espaciados uniformemente en el suelo de 0.2 a 0.4 m, desde el valor de referencia hasta el 80 % (0 %, 20 %, 40 %, 60 % y 80 %). Dado que el % de Ca de referencia en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) variaba entre los sitios, las dosis de yeso fueron específicas para cada sitio. Para identificar la variabilidad química del suelo en el área experimental, también se recolectaron y analizaron muestras compuestas en cada bloque experimental (Tabla 3).
- A continuación se presenta un resumen de los tratamientos aplicados en cada zona (expresados en kg de masa seca por hectárea):
 - Petrolina (finca FrutiVita): cal 0.735 kg ha⁻¹; yeso 0.733, 1466, 2199, 2932 kg ha⁻¹;
 - Taquaritinga (finca São Sebastião): cal 0, 1200 kg ha⁻¹; yeso 0, 699, 1398, 2096, 2795 kg ha⁻¹;
 - Monte Alto (finca Garbin): cal 0, 2881 kg ha⁻¹; yeso 0, 956, 1911, 2867, 3823 kg ha⁻¹.

Las características de la piedra caliza y el yeso utilizados en cada zona eran, aproximadamente, las siguientes: piedra caliza: CaO 28 %, MgO 12 %, PRNT 62 %; y yeso: CaO 30 %, Ca 21 %, S 17 %.

Tabla 2 – Perfil químico del suelo antes del tratamiento en diferentes profundidades en huertos de mango de las zonas de Petrolina, Taquaritinga y Monte Alto.

Variable →	Profundidad	pH	O.M.	K	Ca	Mg	Al	H+Al	S.B.	C.E.C.	P	S-SO ₄	B	Cu	Fe	Mn	Zn	V	m	Ca	Mg
Área ↓	Unidad →	CaCl ₂	g dm ⁻³	mmolc dm ⁻³							mg dm ⁻³							%			
	cm																				
Petrolina	0-10	7.5	22.5	10.4	79.2	13.7	0.0	6.0	103.3	109.3	52.2	39.2	2.2	19.1	27.2	37.0	18.2	94.4	0.0	72.3	12.4
	10-20	7.6	12.5	9.2	38.3	5.2	0.0	9.4	52.6	62.0	32.6	19.5	1.1	14.2	23.4	23.3	14.0	84.5	0.0	61.0	8.2
	20-40	7.3	8.5	8.7	23.0	2.7	0.0	7.4	34.3	41.8	22.9	26.7	1.0	8.4	19.4	10.5	15.5	82.1	0.0	54.8	6.5
	40-60	7.4	8.1	6.5	21.6	3.2	0.0	11.4	31.2	42.7	23.4	26.1	1.0	5.3	26.3	15.3	14.9	73.1	0.0	50.5	7.4
	60-80	7.1	7.9	6.1	22.1	3.6	0.0	8.5	31.8	40.3	28.2	26.6	0.8	5.5	24.5	11.8	17.0	78.6	0.0	54.4	9.1
	80-100	7.3	8.1	5.7	22.7	3.6	0.0	11.6	32.0	43.6	27.0	7.2	0.9	6.0	28.4	13.3	18.7	73.1	0.0	51.8	8.3
Taquaritinga	0-10	6.4	15.2	3.9	35.1	6.2	0.0	10.8	45.2	56.0	52.6	5.4	0.6	31.1	14.8	27.3	5.2	80.2	0.0	62.2	10.8
	10-20	5.9	11.4	2.1	25.2	4.3	0.0	13.1	31.5	44.7	30.3	5.6	0.5	16.2	20.0	19.8	4.0	70.7	0.0	56.5	9.6
	20-40	5.9	9.9	1.1	28.4	5.0	0.0	14.0	34.5	48.4	20.3	17.9	0.5	9.2	28.0	17.8	6.7	70.9	0.0	58.4	10.2
	40-60	5.9	9.7	1.5	36.2	6.7	0.0	14.0	44.4	58.4	18.5	21.5	0.5	8.3	32.5	17.5	7.6	75.7	0.0	61.9	11.2
Monte Alto	0-10	6.1	21.4	3.7	62.8	17.1	0.0	9.5	83.6	93.1	57.9	3.5	0.4	5.7	27.5	14.8	3.5	89.8	0.0	67.5	18.3
	10-20	6.2	13.0	2.8	47.0	15.9	0.0	11.2	65.8	77.0	50.2	3.6	0.3	4.0	32.8	13.8	2.3	85.5	0.0	61.1	20.7
	20-40	5.4	8.9	3.1	54.7	16.9	0.0	16.3	74.6	90.9	30.1	2.7	0.3	1.2	35.8	11.5	1.5	82.0	0.0	60.1	18.5
	40-60	5.3	8.3	3.8	65.7	21.4	0.0	17.5	90.9	108.4	21.0	3.2	0.3	0.9	28.8	11.5	2.1	83.8	0.0	60.6	19.7

NOTA: O.M. = contenido de materia orgánica; S.B. = suma total de bases; C.E.C. = capacidad de intercambio catiónico; V = porcentaje de saturación de bases; m = porcentaje de saturación de ácidos (H+Al).

Tabla 3. Análisis químico de las muestras de suelo recogidas por parcela antes de la aplicación de los tratamientos en las tres áreas experimentales.

Finca	Municipio	Bloque	Profundidad cm	pH	C	P	S-SO ₄	K	Ca	Mg	H+Al	Al	V
					g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³				%		
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	1	0-10	5,2	14	77	6	4,1	65	19	10	0	90
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	1	0-20	6,1	9	58	3	3,8	55	17	11	0	88
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	1	10-20	6,2	7	71	3	3,4	50	17	11	0	86
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	1	20-40	5,2	5	28	3	3,8	58	19	14	0	85
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	1	40-60	5,3	5	17	3	3,8	65	23	18	0	84
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	2	0-10	6,3	12	71	3	3,4	61	17	9	0	90
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	2	0-20	5,9	10	47	3	2,7	55	16	14	0	84
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	2	10-20	6,2	8	49	2	2,2	45	17	11	0	85
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	2	20-40	5,3	6	34	2	2,9	54	17	18	0	80
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	2	40-60	5,3	5	19	2	2,9	60	20	18	0	82
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	3	0-10	6,4	12	39	2	4,3	68	18	10	0	90
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	3	0-20	6,1	8	34	3	3,1	58	16	11	0	88
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	3	10-20	6,1	8	33	3	3,2	51	16	13	0	85
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	3	20-40	5,3	5	41	3	2,7	58	17	16	0	83
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	3	40-60	5,3	5	18	4	4,0	75	23	20	0	84
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	4	0-10	6,5	13	44	3	3,1	57	14	8	0	90
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	4	0-20	6,1	7	43	12	2,9	51	15	12	0	85
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	4	10-20	6,3	7	47	6	2,5	42	13	9	0	86
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	4	20-40	5,6	5	18	3	3,1	50	14	16	0	81
Fz. Garbin	Monte Alto - SP	4	40-60	5,4	5	30	3	4,7	63	20	15	0	86
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	1	0-10	6,4	9	59	5	3,8	42	9	11	0	83
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	1	0-20	6,1	7	37	56	2,2	35	6	13	0	77
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	1	10-20	6,1	7	35	7	1,8	28	5	13	0	72
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	1	20-40	6,1	6	30	33	2,0	32	5	13	0	75
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	1	40-60	6,0	6	23	25	1,4	32	5	13	0	74
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	2	0-10	6,3	8	54	8	3,8	43	8	10	0	85
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	2	0-20	6,1	6	50	7	1,6	27	6	12	0	73
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	2	10-20	5,8	6	33	6	2,0	23	4	12	0	71
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	2	20-40	5,7	5	20	7	1,3	23	4	15	0	66
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	2	40-60	5,8	5	16	10	2,2	44	9	13	0	80
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	3	0-10	6,3	9	52	4	4,1	27	5	12	0	74
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	3	0-20	6,0	6	29	6	1,1	27	4	11	0	75
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	3	10-20	5,9	7	22	4	2,0	26	5	16	0	68
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	3	20-40	5,8	6	13	7	0,4	30	8	13	0	74
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	3	40-60	5,7	6	15	9	1,4	37	8	16	0	74
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	4	0-10	6,4	9	45	4	4,0	28	4	10	0	79
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	4	0-20	5,9	6	22	46	1,3	25	4	14	0	69
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	4	10-20	5,9	7	31	6	2,5	24	4	12	0	72
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	4	20-40	5,9	5	18	25	0,9	28	4	15	0	69
Fz. São Sebastião	Taquaritinga - SP	4	40-60	6,0	5	21	42	1,1	32	6	14	0	74
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	1	0-10	7,2	14	58	53	11,2	79	14	6	0	95
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	1	10-20	6,9	6	27	41	9,8	32	5	11	0	80
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	1	20-40	7,2	5	18	75	9,8	23	3	8	0	82
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	1	40-60	7,1	5	21	87	7,7	22	4	11	0	74
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	1	60-80	7,0	5	24	84	6,1	20	5	8	0	79
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	1	80-100	7,3	5	19	7	5,3	22	5	12	0	72
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	2	0-10	7,5	12	77	23	10,5	63	11	6	0	93
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	2	10-20	7,6	7	51	7	9,8	30	4	9	0	82
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	2	20-40	7,1	5	38	3	8,4	19	3	7	0	80
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	2	40-60	7,3	5	34	4	5,2	18	3	13	0	67
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	2	60-80	7,0	4	46	5	4,8	18	4	9	0	76
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	2	80-100	7,3	5	40	4	6,4	19	3	12	0	70
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	3	0-10	7,7	10	31	30	10,9	80	11	6	0	95
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	3	10-20	7,9	7	22	9	9,3	41	5	9	0	86
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	3	20-40	7,5	5	14	14	8,9	24	3	7	0	84
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	3	40-60	7,7	4	14	6	7,7	22	3	10	0	76
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	3	60-80	7,3	4	16	6	6,4	24	4	9	0	80
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	3	80-100	7,5	5	18	12	5,7	29	4	11	0	78
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	4	0-10	7,7	15	42	51	8,9	95	19	6	0	95
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	4	10-20	7,9	9	31	21	8,0	51	8	9	0	89
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	4	20-40	7,5	5	22	14	7,7	26	3	8	0	82
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	4	40-60	7,6	5	25	7	5,5	25	4	11	0	75
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	4	60-80	7,3	5	27	12	7,3	26	3	9	0	81
Fz. Fruti Vita	Petrolina-PE	4	80-100	7,2	5	32	5	5,2	22	4	12	0	72

3.1 Evaluaciones

- Análisis del suelo antes de la implementación, y después de la primera y la tercera cosecha: 0.0-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80, 0.80-1.00 m. Se recogieron ocho submuestras por parcela, se mezclaron, se separaron aproximadamente 300 g y se enviaron al laboratorio para su secado, molienda y análisis.
- Productividad: recolección y pesaje de todos los frutos de las tres plantas centrales de la parcela.
- - Número de frutos: recuento del número de frutos recolectados por parcela.
- Calidad del fruto: En las cosechas de 2023 y 2024, se evaluaron los aspectos cualitativos de los frutos. Para ello, en la segunda semana tras el inicio de la cosecha, se separaron al azar dos frutos por planta (ocho frutos por parcela) para el análisis de materia seca, sólidos solubles totales (SST) (°Brix), firmeza de la pulpa (Newtons), de acuerdo con la metodología descrita por el Instituto Adolfo Lutz (2008), así como de daños internos y vida de anaquel (Rodrigues, et al., 2008). En primer lugar, se determinó la firmeza de la pulpa de los frutos utilizando un texturómetro Brookfield CT3 con una punta de 2 mm, una penetración de 5 mm y una velocidad de penetración de 5 mm.s⁻¹. Posteriormente, se trituraron los frutos para analizar el contenido total de sólidos solubles, medido con un refractómetro modelo N-1E. Se determinó la materia seca en cuatro frutos de cada parcela, uno por planta útil, que se pesaron al momento de la cosecha y posteriormente se trituraron para secarlos hasta alcanzar un peso constante en un horno a 65 °C. La vida de anaquel se determinó almacenando los frutos a una temperatura de 10 a 12 °C hasta su maduración completa, momento en el que se determinó la incidencia de daños internos tales como colapso, pudrición del tallo y alteraciones fisiológicas.
- Análisis de hojas: En todas las cosechas, se recolectaron cuatro hojas con pecíolos de cada planta útil en la parcela durante la floración, una en cada punto cardinal, en la mitad del último brote vegetativo, en el tercio medio de la planta. Las muestras se colocaron en un horno de aire forzado a 45 °C para secarlas durante 72 horas hasta alcanzar una masa constante y luego se molieron. Para digerir el tejido vegetal, se colocó una muestra de 1 g en crisoles de porcelana y se calcinó a 500 °C durante 3 horas. Las cenizas resultantes se disolvieron en ácido clorhídrico con una concentración de 3 mol L⁻¹ y se calentaron durante 20 minutos en una placa calefactora a 70 °C. Tras la disolución, los extractos se filtraron utilizando papel de filtro de banda azul con un tamaño de poro de entre 5 y 8 micrómetros y, posteriormente, se diluyeron

hasta un volumen final de 100 mL utilizando agua de ósmosis inversa. La cuantificación de los elementos P, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn y Zn se realizó mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, Varian 720-ES), siguiendo las metodologías adaptadas de Martins y Reissmann (2007) para determinaciones químicas. El N se determinó mediante digestión con ácido sulfúrico y posterior extracción por vapor en un aparato Kjeldahl semimicro (Tedesco et al., 1995).

- Distribución del Ca en los tejidos del fruto: Se recolectaron muestras de frutos en el momento de la cosecha y se sometieron a condiciones controladas de maduración y almacenamiento. Las evaluaciones poscosecha incluyeron la valoración de la incidencia de colapso interno, como presente o ausente. Se determinaron las fracciones de Ca en la cáscara, la pulpa cercana a la cáscara y la pulpa cercana a la semilla, determinando el Ca soluble en etanol, agua, ácido acético, ácido clorhídrico y residuos.

3.2 Análisis Estadístico

Los resultados obtenidos se tabularon y se sometieron a pruebas de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homocedasticidad mediante la prueba de O'Neill-Matthews. Cuando fue necesario, se utilizó el método de Kruskal-Wallis para verificar los datos no paramétricos. Posteriormente, se realizó la prueba de varianza (ANOVA) en el software R, interfaz RStudio, versión 4.3.0; 9.2.191.153, paquetes estándar de la versión (R CORE TEAM, 2023; RSTUDIO TEAM, 2023).

4 Resultados

4.1 Efectos en la planta

El rendimiento de la fruta varió entre cosechas en los experimentos realizados en el estado de São Paulo (Taquaritinga y Monte Alto), pero no en Petrolina (Pernambuco). Sin embargo, los niveles de nutrientes en las hojas variaron entre los años de evaluación en todos los sitios. La aplicación de piedra caliza tuvo un efecto solo en los niveles foliares de Zn en Petrolina, en los niveles de N en Taquaritinga y en los niveles de Ca y B en Monte Alto. El yeso por sí solo tuvo un efecto solo en los niveles foliares de S en Monte Alto. Se observaron efectos de interacción entre los dos productos (piedra caliza y yeso) para los niveles de Mg en Petrolina y Taquaritinga, y para los niveles de Mn en Petrolina (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen del análisis ANOVA (valor p) para las variables «Rendimiento (Prod)» y «contenido de nutrientes en las hojas», en función del tiempo (años), la aplicación de caliza (CaCO₃) y yeso (CaSO₄) en los experimentos realizados en Petrolina, Taquaritinga y Monte Alto.

Factor	G.L.	Petrolina																								
		Prod	p	N	p	P	p	K	p	Ca	P	Mg	p	S	p	B	p	Cu	p	Fe	p	Mn	p	Zn	p	
T (Tiempo)	2	0,16	0,85	9,41	0,00	42,95	0,00	94,75	0,00	192,77	0,00	33,71	0,00	78,10	0,00	471,52	0,00	169,65	0,00	15,47	0,00	85,39	0,00	141,30	0,00	
CaCO ₃	1	0,49	0,49	0,00	0,99	1,03	0,31	0,28	0,60	0,57	0,45	2,03	0,16	0,21	0,65	1,29	0,26	3,48	0,07	0,02	0,90	0,00	0,96	9,76	0,00	
CaSO ₄	4	3,02	0,02	0,59	0,67	1,21	0,31	0,39	0,81	1,12	0,35	0,98	0,42	0,85	0,50	0,11	0,98	1,29	0,28	1,88	0,12	0,06	0,99	1,46	0,22	
T*CaCO ₃	2	2,47	0,09	0,71	0,49	0,14	0,87	0,27	0,76	0,84	0,43	0,08	0,92	0,35	0,70	1,36	0,26	0,42	0,66	1,46	0,24	0,14	0,87	0,56	0,57	
T*CaSO ₄	8	0,21	0,99	0,44	0,89	0,27	0,98	0,80	0,60	0,57	0,80	0,76	0,64	1,45	0,19	0,20	0,99	0,71	0,68	0,78	0,62	0,27	0,98	0,57	0,80	
CaCO ₃ *CaSO ₄	4	0,71	0,59	0,62	0,65	0,20	0,94	0,58	0,68	1,49	0,21	4,04	0,00	0,22	0,93	0,89	0,47	0,98	0,42	1,76	0,14	2,65	0,04	1,05	0,39	
T*CaCO ₃ *CaSO ₄	8	1,09	0,38	0,38	0,93	0,24	0,98	0,93	0,50	1,13	0,35	0,30	0,96	1,30	0,25	0,85	0,56	0,47	0,88	0,16	1,00	0,19	0,99	0,54	0,83	
Taquaritinga																										
T (Tiempo)	2	1587,90	0,00	8,81	0,00	8,63	0,00	4,77	0,01	1,29	0,28	7,40	0,00	20,64	0,00	10,19	0,00	45,12	0,00	8,25	0,00	7,72	0,00	75,02	0,00	
CaCO ₃	1	0,03	0,86	5,12	0,03	0,01	0,91	0,15	0,70	1,76	0,19	0,26	0,61	0,16	0,69	0,91	0,34	0,02	0,89	0,00	0,94	0,07	0,79	0,12	0,73	
CaSO ₄	4	0,59	0,67	1,61	0,18	0,66	0,62	1,08	0,37	1,36	0,26	0,35	0,84	0,53	0,71	1,03	0,40	0,68	0,61	0,64	0,63	1,25	0,29	1,06	0,38	
T*CaCO ₃	2	0,11	0,90	0,91	0,41	1,39	0,26	0,41	0,66	0,77	0,47	0,03	0,97	0,03	0,98	0,10	0,90	0,06	0,94	0,04	0,96	1,61	0,21	0,03	0,97	
T*CaSO ₄	8	0,31	0,96	0,35	0,94	0,65	0,74	1,15	0,34	0,93	0,50	1,11	0,36	0,51	0,85	1,73	0,10	0,83	0,58	0,78	0,62	0,79	0,61	1,04	0,41	
CaCO ₃ *CaSO ₄	4	2,22	0,07	2,21	0,07	2,13	0,08	1,20	0,32	0,68	0,61	3,49	0,01	1,14	0,34	0,11	0,98	0,38	0,82	1,41	0,24	0,69	0,60	1,31	0,27	
T*CaCO ₃ *CaSO ₄	8	0,49	0,86	1,08	0,39	0,53	0,83	1,00	0,44	1,82	0,08	1,77	0,09	1,32	0,24	0,98	0,46	1,30	0,25	0,93	0,50	1,26	0,27	0,93	0,49	
Monte Alto																										
T (Tiempo)	2	47,97	0,00	6,25	0,00	28,36	0,00	3,40	0,04	31,32	0,00	21,01	0,00	96,42	0,00	108,68	0,00	31,66	0,00	89,35	0,00	5,84	0,00	26,53	0,00	
CaCO ₃	1	0,01	0,93	0,67	0,42	0,04	0,84	0,32	0,58	7,84	0,01	0,42	0,52	0,18	0,67	6,34	0,01	1,69	0,20	1,06	0,31	2,00	0,16	2,70	0,10	
CaSO ₄	4	1,11	0,36	0,31	0,87	2,10	0,09	0,52	0,72	0,76	0,55	0,83	0,51	3,00	0,02	0,74	0,57	0,34	0,85	0,50	0,73	1,30	0,28	1,04	0,39	
T*CaCO ₃	2	0,43	0,65	0,78	0,46	0,60	0,55	0,32	0,72	0,94	0,39	0,15	0,86	1,84	0,16	1,81	0,17	0,87	0,42	1,64	0,20	0,42	0,66	0,93	0,40	
T*CaSO ₄	8	1,75	0,10	0,82	0,59	1,39	0,21	0,95	0,48	0,99	0,45	0,66	0,72	0,76	0,63	0,20	0,99	0,36	0,94	1,29	0,26	0,21	0,99	0,68	0,71	
CaCO ₃ *CaSO ₄	4	1,70	0,16	0,61	0,66	1,42	0,23	1,86	0,12	0,84	0,50	1,07	0,38	1,03	0,40	0,30	0,87	0,96	0,43	0,38	0,82	2,31	0,06	0,86	0,49	
T*CaCO ₃ *CaSO ₄	8	0,78	0,62	0,71	0,68	0,45	0,89	1,31	0,25	1,77	0,09	1,46	0,18	0,60	0,78	0,36	0,94	1,25	0,28	0,42	0,91	0,29	0,97	1,17	0,33	

G.L. = grados de libertad; Tiempo = años de cosecha 2022, 2023 y 2024. Las variables resaltadas en rojo indican una diferencia significativa ($p > 0.05$).

Los efectos significativos de la aplicación de piedra caliza y/o yeso, o de la interacción entre estos factores, se muestran en las figuras 4, 5 y 6, indicando el punto medio y el intervalo de confianza para cada una de las ubicaciones evaluadas.

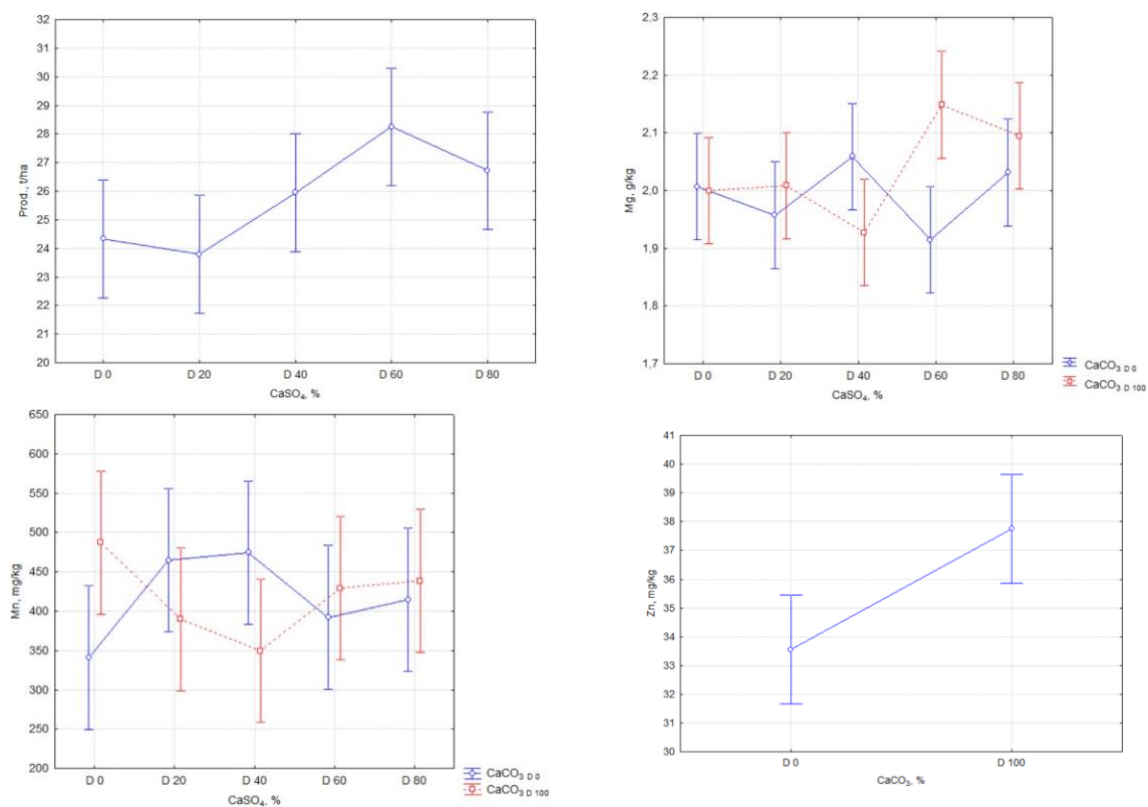


Figura 4. Variación en el rendimiento (rendimiento) de los frutos de mango en función de las dosis de yeso; contenido foliar de Mg y Mn en función de las dosis de yeso, con o sin aplicación de caliza; y contenido foliar de Zn en función de la aplicación de caliza, en el experimento realizado en un huerto de mangos en Petrolina (PE).

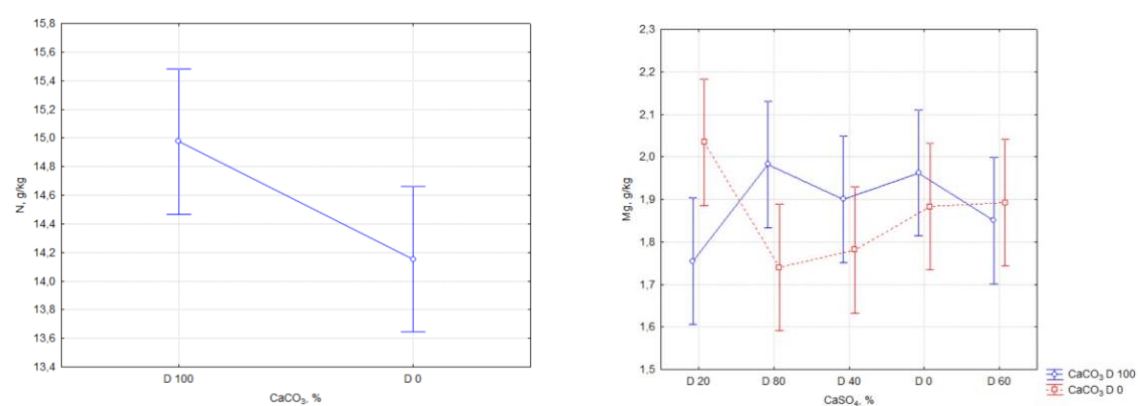


Figura 5. Variación del contenido de nitrógeno foliar en función de la dosis de caliza aplicada y del contenido de magnesio en función de las dosis de yeso, con o sin aplicación de caliza, en un experimento realizado en un huerto de mangos en Taquaritinga (SP).

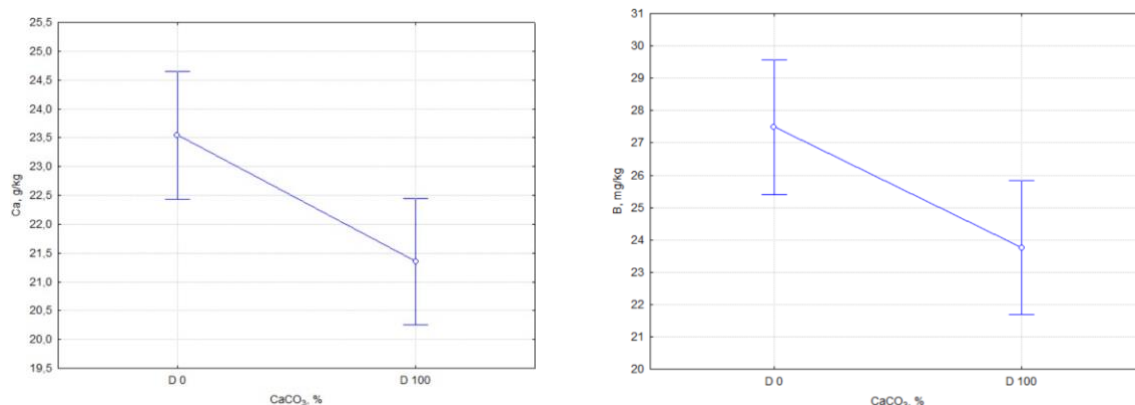


Figura 6. Variación del contenido foliar de Ca y B en plantas de mango, en función de la dosis de piedra caliza aplicada en el experimento realizado en un huerto de mangos en Monte Alto (SP).

En Petrolina, la aplicación de dosis más altas de yeso (Figura 4) dio lugar a mayores rendimientos de mango, un efecto que no se observó con la aplicación de caliza. El rendimiento aumentó de 24 a 28 toneladas por hectárea, lo que representa un incremento de aproximadamente el 16 %. Este efecto de los tratamientos, tanto con la aplicación de caliza como de yeso, no se observó en Taquaritinga y Monte Alto (Tabla 4).

La aplicación de piedra caliza en Petrolina fue importante para mantener y aumentar los niveles foliares de Mg con tasas más altas de yeso (Figura 4). Normalmente, se esperaría que el aumento del pH del suelo debido a la aplicación de piedra caliza disminuyera la absorción de Mn y Zn, pero en este experimento se observó lo contrario. Este aumento en los niveles foliares de Zn debido a la aplicación de piedra caliza es contrario a lo observado por Natale et al. (2007), quienes evaluaron las tasas de cal en árboles de guayaba. Es posible que la fertirrigación utilizada en la zona esté proporcionando cantidades suficientes de estos nutrientes, compensando el alto pH del suelo. Dado que el suelo local ya tenía un pH alcalino al inicio del experimento (Tabla 2), la competencia por los sitios de adsorción o los cambios en las condiciones de oxidación/reducción en el suelo también podrían estar interfiriendo en la mayor absorción de Mn y Zn con la aplicación de caliza.

Al igual que en Petrolina, la aplicación de cal fue importante para aumentar los niveles de Mg en las hojas de mango cuando se aplicó yeso en el experimento de Taquaritinga (Figura 5). Este efecto observado en ambos lugares es de esperarse, considerando que el Ca y el Mg compiten por los sitios de absorción en las células radiculares (Pauletti y Monte Serrat, 2025). La única fuente de Mg aplicada en los experimentos fue la cal, la cual, al añadir este nutriente al suelo, mitigó los efectos del aumento de la cantidad de Ca aplicada con el yeso. El encalado también aumentó los

niveles de N en las hojas en Taquaritinga (Figura 5).

Los diversos beneficios del encalado del suelo, como el aumento de la actividad biológica y la mineralización de la materia orgánica, pueden haber sido la causa de este incremento.

En Monte Alto, los niveles de Ca y B (Figura 6) disminuyeron con el encalado. Este resultado fue inesperado, teniendo en cuenta que la piedra caliza es una fuente de Ca y que el aumento del pH puede incrementar la disponibilidad de B para su absorción por las plantas.

4.2 Efectos en el suelo

Los análisis químicos revelaron que los mayores efectos de la aplicación de cal y yeso se observaron en el experimento de Petrolina, donde se detectó una interacción entre la cal y el yeso en el pH y en los niveles de Ca y Mg intercambiables del suelo. En Taquaritinga, solo se comprobó un efecto aislado de la cal y el yeso sobre el contenido de Mg, mientras que en Monte Alto se observó un efecto significativo de la cal sobre el pH y del yeso sobre el contenido de Mg en el suelo (Tabla 5).

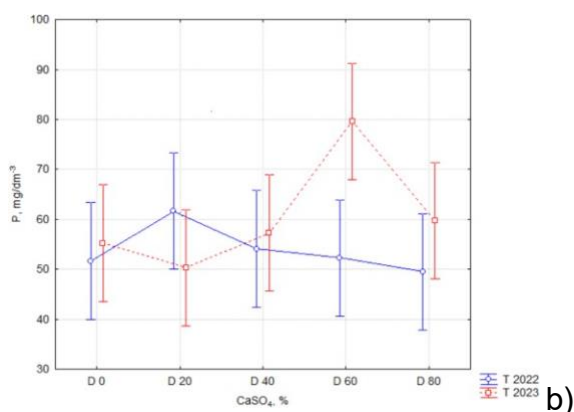
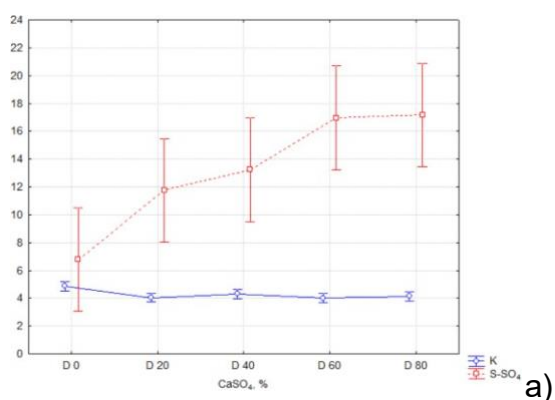
Tabla 5. Resumen del análisis ANOVA (valor de p) de los atributos químicos del suelo en el estrato de 0 a 20 cm, en función del tiempo (años), la aplicación de caliza (CaCO_3) y yeso (CaSO_4) en los experimentos de Petrolina, Taquaritinga y Monte Alto.

G.L. Petrolina																			
Factor		pH	p	M.O.	p	P	p	K	p	Ca	p	Mg	p	H+Al	p	V	p	S-SO ₄	p
T (Tiempo)	2	60,19	0,00	42,32	0,00	3,20	0,08	148,15	0,00	1043,72	0,00	91,41	0,00	37,48	0,00	790,70	0,00	12,97	0,00
CaCO ₃	1	2,45	0,12	3,93	0,05	1,18	0,28	0,00	0,96	0,60	0,44	0,03	0,87	3,15	0,08	3,15	0,08	0,01	0,91
CaSO ₄	4	0,30	0,88	2,09	0,09	1,48	0,22	4,64	0,00	0,73	0,57	3,47	0,01	0,66	0,62	1,27	0,29	5,30	0,00
T*CaCO ₃	2	0,00	0,95	0,17	0,69	0,45	0,50	0,01	0,91	0,26	0,61	0,01	0,92	0,17	0,68	0,76	0,39	2,83	0,10
T*CaSO ₄	8	0,31	0,87	1,73	0,16	2,89	0,03	0,35	0,85	1,60	0,19	0,49	0,74	1,26	0,30	2,09	0,09	1,71	0,16
CaCO ₃ *CaSO ₄	4	4,03	0,01	1,64	0,18	2,01	0,10	0,89	0,47	3,67	0,01	3,68	0,01	2,22	0,08	1,63	0,18	0,73	0,57
T*CaCO ₃ *CaSO ₄	8	2,65	0,04	1,94	0,12	2,07	0,10	0,27	0,89	4,73	0,00	3,79	0,01	2,75	0,04	2,92	0,03	1,33	0,27
Taquaritinga																			
T (Tiempo)	2	5,96	0,02	11,03	0,00	0,50	0,48	18,80	0,00	2,22	0,14	3,00	0,09	57,18	0,00	7,12	0,01	187,43	0,00
CaCO ₃	1	12,33	0,00	0,02	0,88	0,76	0,39	1,36	0,25	1,06	0,31	4,82	0,03	8,92	0,00	4,81	0,03	0,13	0,72
CaSO ₄	4	0,23	0,92	0,25	0,91	0,25	0,91	0,88	0,48	0,82	0,52	6,59	0,00	0,54	0,71	1,28	0,29	2,31	0,07
T*CaCO ₃	2	1,88	0,18	1,57	0,22	0,18	0,68	0,73	0,40	1,10	0,30	1,35	0,25	0,01	0,93	0,04	0,84	0,58	0,45
T*CaSO ₄	8	0,86	0,49	0,86	0,49	0,19	0,94	0,93	0,45	0,99	0,42	0,89	0,48	0,13	0,97	0,67	0,62	1,87	0,13
CaCO ₃ *CaSO ₄	4	2,64	0,04	1,86	0,13	0,99	0,42	0,64	0,64	0,85	0,50	0,13	0,97	2,31	0,07	0,94	0,45	0,56	0,69
T*CaCO ₃ *CaSO ₄	8	1,29	0,29	0,40	0,81	0,50	0,73	1,11	0,36	1,05	0,39	0,49	0,74	0,47	0,76	0,34	0,85	0,15	0,96
Monte Alto																			
T (Tiempo)	2	1868,94	0,00	578,65	0,00	9,68	0,00	9,28	0,00	631,94	0,00	228,07	0,00	1,61	0,21	3908,55	0,00	2,86	0,10
CaCO ₃	1	5,26	0,03	0,22	0,64	1,19	0,28	1,08	0,30	0,18	0,67	0,35	0,56	12,42	0,00	2,40	0,13	0,69	0,41
CaSO ₄	4	0,33	0,86	1,78	0,14	0,86	0,49	0,53	0,72	0,44	0,78	4,06	0,01	0,95	0,44	0,02	1,00	2,18	0,08
T*CaCO ₃	2	0,89	0,35	0,07	0,79	1,05	0,31	0,30	0,59	0,17	0,68	3,93	0,05	0,98	0,33	1,04	0,31	0,54	0,47
T*CaSO ₄	8	1,69	0,16	0,36	0,84	0,46	0,77	0,61	0,66	0,53	0,71	1,64	0,18	2,06	0,10	0,59	0,67	0,78	0,54
CaCO ₃ *CaSO ₄	4	0,78	0,54	2,98	0,03	0,73	0,58	0,87	0,49	0,95	0,44	0,52	0,72	0,78	0,54	1,20	0,32	0,85	0,50
T*CaCO ₃ *CaSO ₄	8	0,64	0,63	1,26	0,29	1,31	0,28	0,65	0,63	1,37	0,25	1,91	0,12	1,18	0,33	2,75	0,04	1,81	0,14

G.L. = grados de libertad; Tiempo = Años de recolección de muestras de suelo. Las variables resaltadas en rojo indican una diferencia significativa ($p > 0.05$).

Las variables con efectos significativos derivadas de los tratamientos aplicados en Petrolina se muestran en la Figura 7. Se observó una disminución del contenido de K intercambiable y un aumento del contenido de S-SO₄ en la capa superficial de 0-20 cm a medida que aumentaba la dosis de yeso (Figura 7a). Este efecto era de esperarse, especialmente en lo que respecta al azufre, ya que el yeso es una fuente de este nutriente. La pequeña disminución del K intercambiable en la capa superficial con la aplicación de yeso puede reflejar la lixiviación de este nutriente por su desplazamiento de los sitios de intercambio de los coloides a la solución del suelo en función del aumento de Ca, o incluso, aunque menos probable, por la formación de un par iónico entre K y SO₄⁻, lo que facilita su movimiento en el perfil.

También se observó un aumento del P del suelo (Figura 7b) al aumentar la dosis de yeso, especialmente en el segundo año (2023) evaluado. Dado que el yeso aplicado se deriva de la producción de ácido fosfórico, puede contener entre 0.8 y 1.2 % de P, lo que justifica el resultado observado en este estudio. En las variables relacionadas con los elementos básicos del suelo Ca (Figura 7d) y Mg (Figura 7e), la saturación de bases (V%) (Figura 7g) y la acidez (pH – Figura 7c, H+Al – Figura 7f), se observa un efecto más consistente de la aplicación de yeso en el primer año de muestreo. De manera similar al contenido de K, se observa una tendencia a la disminución del contenido de Ca y Mg intercambiables en el suelo, especialmente este último, al aumentar las dosis de yeso. Aunque el yeso es una fuente de Ca, dado que este análisis químico se limita a la capa superficial, es posible que este nutriente se haya lixiviado a capas más profundas debido a la presencia de SO₄⁻. Esta explicación se aplica bien al Mg, ya que el yeso no es una fuente de este nutriente, y la presencia del anión SO₄⁻ favorece su lixiviación. Este efecto sobre los niveles de Ca y Mg se refleja en los resultados obtenidos para la saturación de bases (V%), que tiende a disminuir significativamente al aumentar las dosis de yeso.



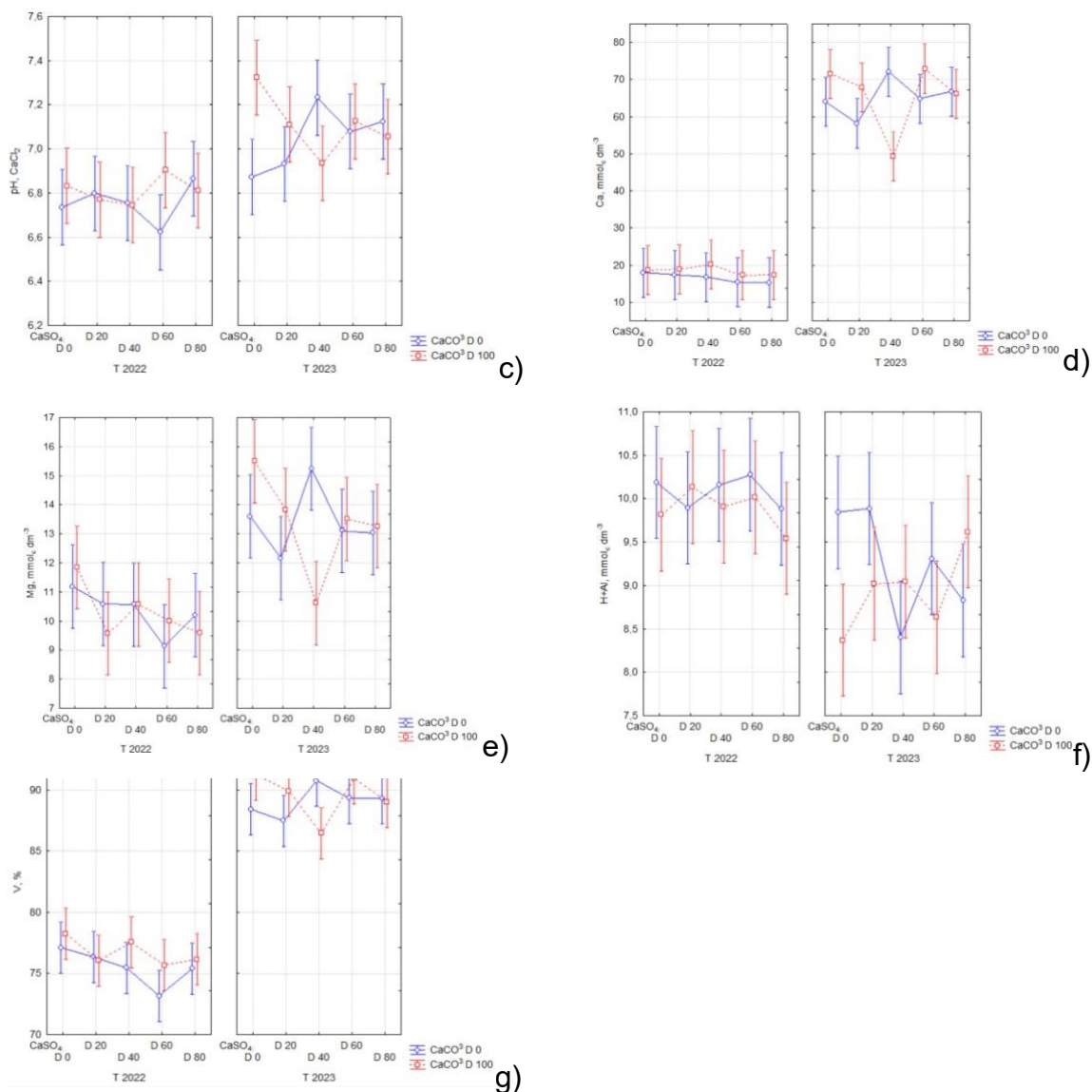


Figura 7. Desglose del ANOVA en función de la significación entre variables para el área experimental de Petrolina (PE).

En el experimento de Taquaritinga, el efecto del encalado en el aumento del pH es evidente (Figura 8a), lo que conlleva una disminución de la acidez potencial – H+Al (Figura 8d) y un aumento del contenido de Mg intercambiable (Figura 8c) y de la saturación de bases – V% (Figura 8e). El efecto de la aplicación de yeso consistió básicamente en disminuir el contenido de Mg intercambiable en la superficie del suelo (0-20 cm) (Figura 8b), como consecuencia de la lixiviación de este elemento mediante la formación de un par iónico con SO₄⁻.

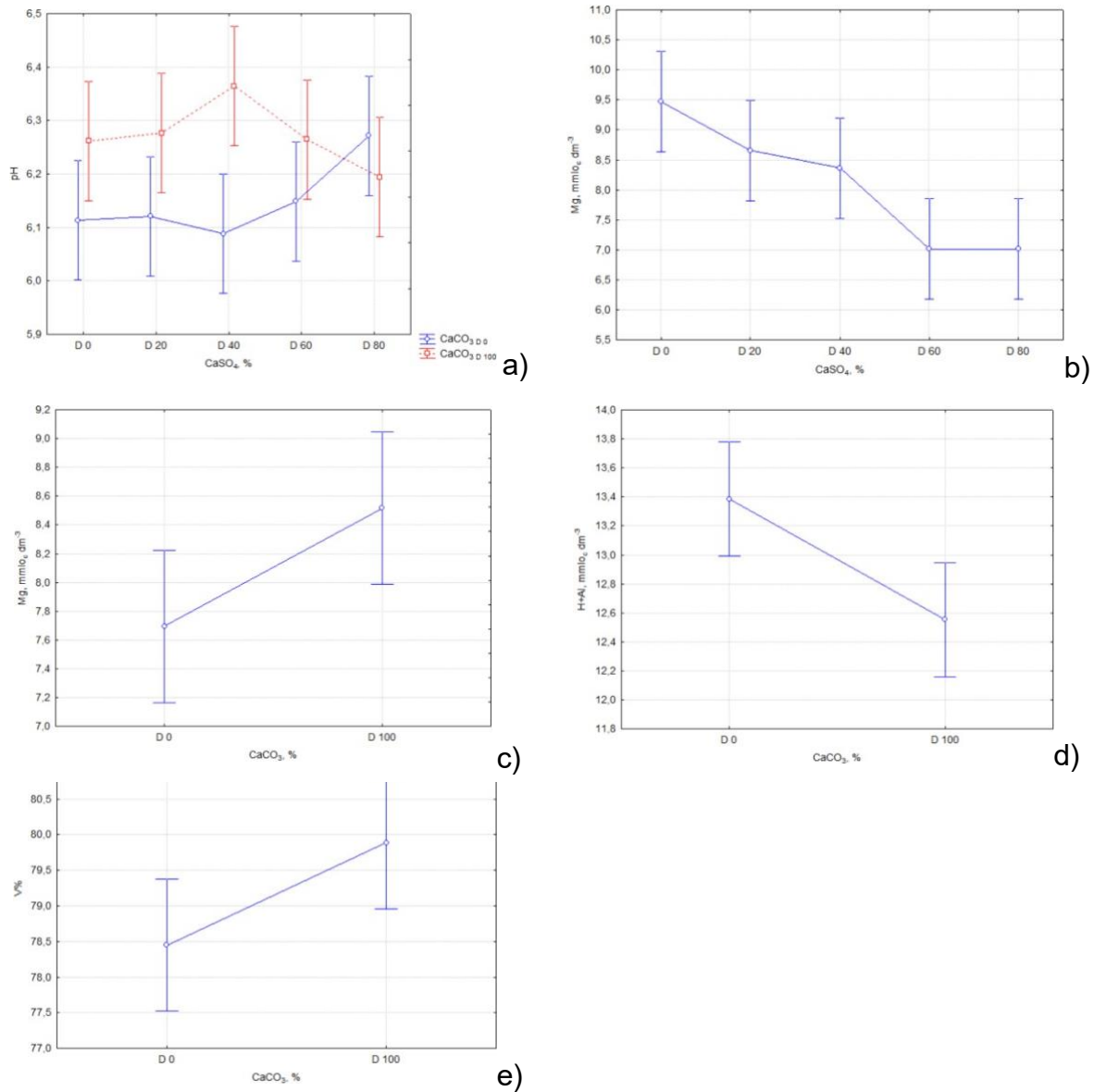


Figura 8. Desglose del ANOVA en función de la significación entre variables para el área experimental de Taquaritinga (SP).

En el experimento de Monte Alto, se observaron efectos menores de los tratamientos sobre los parámetros químicos del suelo en la capa de 0 a 20 cm de profundidad. Básicamente, el encalado aumentó el pH (Figura 9a) y disminuyó la acidez potencial (H+Al) (Figura 9b), mientras que la aplicación de yeso redujo la presencia de Mg intercambiable (Figura 9c).

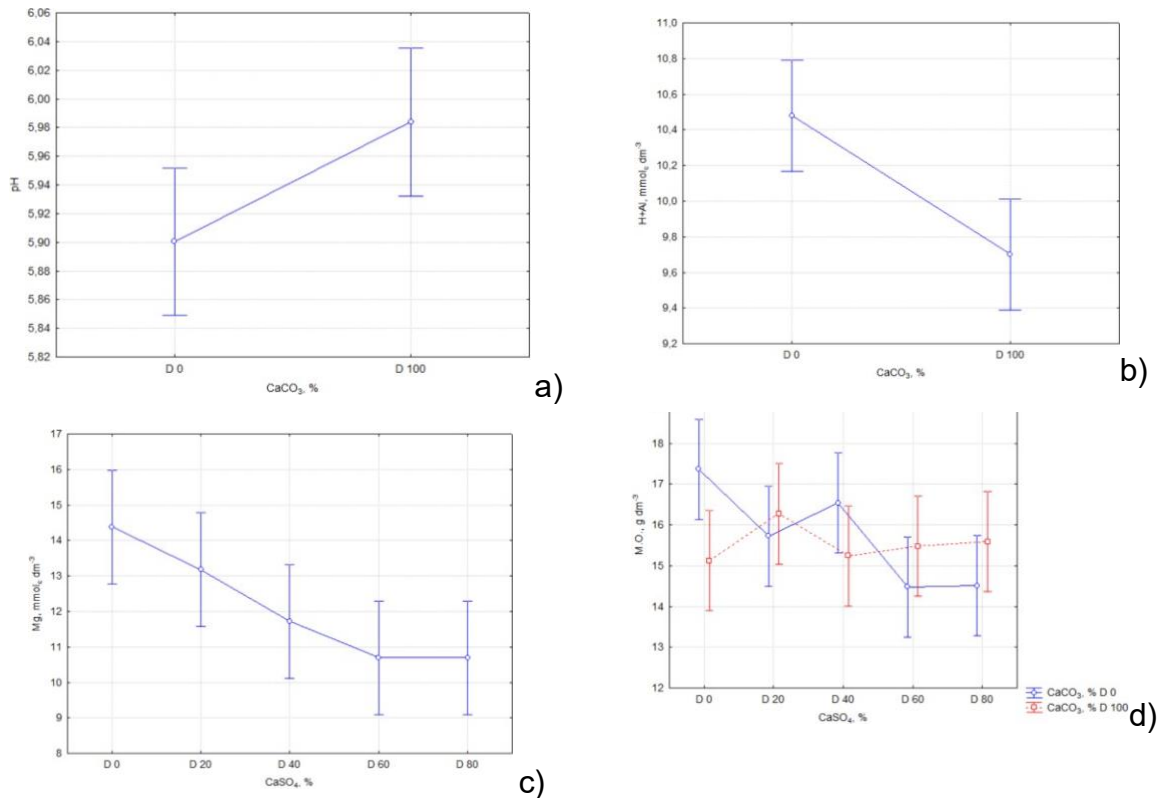


Figura 9. Desglose del ANOVA en función de la significación entre variables para el área experimental de Monte Alto (SP).

Los cambios provocados por el encalado y la aplicación de yeso pueden verificarse comparando el análisis inicial de las zonas con el aumento de las dosis del agente corrector. En general, se observó un aumento significativo del pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} y V%, así como una reducción significativa de H^+ y Al.

Vale la pena recordar que la aplicación de cal se realizó de manera superficial en huertos establecidos y ya maduros, y que los cambios en los atributos químicos del suelo analizados en este trabajo, en la capa de correlación e indicación de fertilización (0-20 cm), pueden explicarse de diversas maneras, a pesar de la conocida baja solubilidad y el movimiento restringido de la cal en el perfil del suelo (Gonzales-Érico et al., 1979). Existen otros factores que pueden explicar el desplazamiento de partículas de caliza a lo largo del perfil del suelo en estos experimentos, modificando los parámetros químicos en esta capa. Cabe destacar la contribución de factores físicos, como los canales dejados por la descomposición de las raíces (Pearson et al., 1962), debido a la actividad de la macro y microfauna. Según Harter y Naidu (1995) y Aoyama (1996), otra explicación sería la formación de pares entre bases altamente solubles (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y ácidos orgánicos (RO^- y RCOO^-) de bajo peso molecular, lo que permitiría el transporte de estos pares a capas subsuperficiales. Esta reacción es

explicada por Miyazawa et al. (1996) mediante la formación de ligandos orgánicos, que se complejan con el Ca del suelo, formando complejos CaL0 o CaL-. Además de estos compuestos, pueden formarse otros, como $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, según Oliveira y Pavan (1996), y también, cuando se produce fertilización con nitrógeno, puede ocurrir la formación de sales solubles, como el nitrato de calcio, que se filtran a través del movimiento descendente del agua en el perfil del suelo (Blevins et al., 1997). Sin embargo, es razonable suponer que la suma de las contribuciones de todos los procesos es más importante que cada uno de ellos individualmente.

4.3 Morfología celular y mapeo microanalítico del calcio en frutos de la zona de Taquaritinga

Los resultados preliminares proporcionaron información sobre la estructura celular de los mangos y la microlocalización del Ca. El mapeo microanalítico mediante SEM-EDS reveló diferencias significativas en la distribución del Ca entre los tejidos de la cáscara y la pulpa, así como entre los frutos de control y los tratados ([Tabla 6](#)).

Tabla 6 - Resumen del análisis semicuantitativo SEM-EDS de las fracciones de cáscara, pulpa interna y pulpa externa de la fruta en la zona de Taquaritinga. Resultados en porcentaje (%).

	C	O	Na	P	Ca	Si	Mg	S	Al	Br	Fe	Cu	Total
Cáscara	64.39	30.16	2.39	0.70	0.46	1.28	0.06	0.16	0.04	0.03	0.26	0.08	100.00
Pulpa interna	54.84	38.18	3.52	2.57	0.16	0.50	0.00	0.17	0.05	0.00	0.00	0.00	100.00
Pulpa externa	58.03	39.43	1.33	0.65	0.12	0.20	0.03	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

El calcio se encontró principalmente en las paredes celulares, observándose concentraciones más elevadas en la cáscara que en la pulpa. Los tratamientos que incluyeron la aplicación de cal y yeso dieron lugar a un aumento del Ca ligado a las paredes celulares en los tejidos del fruto, lo que sugiere una mayor absorción e incorporación del Ca en los componentes estructurales. Estas observaciones ponen de relieve el papel fundamental que desempeña el Ca en el mantenimiento de la integridad y la estructura celular, lo cual tiene una relevancia directa para la calidad del fruto y su susceptibilidad a trastornos como el colapso interno.

4.3.1 Relación entre la aplicación de caliza y yeso y los parámetros de calidad poscosecha y la incidencia de colapso interno en los frutos

En Petrolina, la mayoría de las variables de calidad de la fruta evaluadas — entre ellas, la materia seca, los sólidos solubles, la textura y la incidencia de colapso interno— no se vieron influidas de manera significativa por los tratamientos (Tabla 7). De entre los parámetros medidos, solo la acidez titulable mostró un efecto estadísticamente significativo, que se observó únicamente 21 días después del almacenamiento.

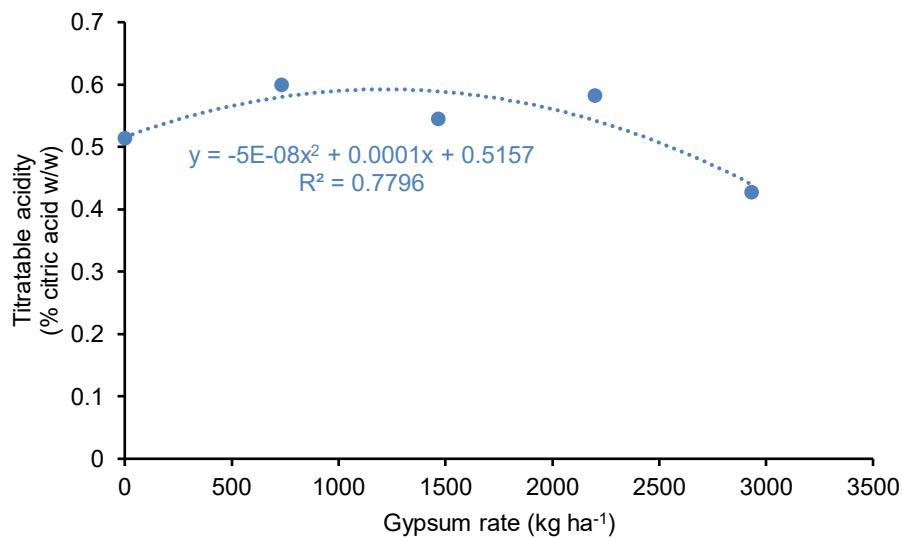
Esta falta de respuesta general se atribuye al alto contenido basal de calcio y a los altos niveles de saturación de bases presentes en esta área experimental antes de la implementación (Tabla 2). Por ejemplo, el análisis del suelo previo al tratamiento mostró una saturación de bases (V%) de hasta el 94.4% en la capa de 0 a 10 cm. En consecuencia, los aumentos marginales de calcio proporcionados por los tratamientos con piedra caliza y yeso fueron insuficientes para inducir cambios significativos en las variables de respuesta. Está bien establecido que el estado nutricional de la planta, y específicamente los niveles de calcio, se correlaciona fuertemente con la incidencia de colapso interno (Ma et al., 2022). Por lo tanto, es probable que la alta fertilidad inicial del sitio de Petrolina haya satisfecho los requisitos de la planta independientemente de las aplicaciones suplementarias.

Tabla 7 – Resumen del análisis de varianza para la masa fresca y seca de la fruta, el contenido de sólidos solubles (oBrix), la acidez titulable, la relación azúcar-ácido, la textura y la incidencia de colapso interno en mango sometido a la aplicación de yeso y cal, evaluados en el momento de la cosecha y tras 21 días de almacenamiento, en las zonas de Petrolina, Taquaritinga y Monte Alto.

Área	Factor	Variable de respuesta												
		Masa seca media de la fruta (%)	Prom de la masa de fruta fresca (g)	Prom °Brix (desp cosech h.)	°Brix avg. (des p alm a c.)	Prom de Acidez1 . (desp cosech)	Prom de Acidez1 . (desp cosech)	Ratio (desp cosech h)	Ratio (des p alm a c.)	Textura (desp cosech a. - N)	Textura (desp almac. - N)	Colapso (desp cosech. - %)	Colapso (desp almac. - %)	Colapso (total - %)
Petro-lina	Caliza	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.096	n.s.	n.s.	0.060	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Yeso	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	L x G	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.059	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Taquari-tinga	Caliza	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Yeso	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	L x G	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
Monte Alto	Caliza	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Yeso	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	L x G	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

NOTA: 1 = Acidez titulable. Resultados expresados en % de ácido cítrico p/p; n.s. = no significativo ($p > 0,10$); se muestra el valor ($0.10 \geq p > 0,05$); $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), $p \leq 0,001$ (***) ; prom. = promedio; cosech. = cosecha; almac. = almacenamiento.

Figura 10 - Acidez titulable (% de ácido cítrico p/p) tras 21 días de almacenamiento en la zona de Petrolina: regresión para las dosis de yeso.



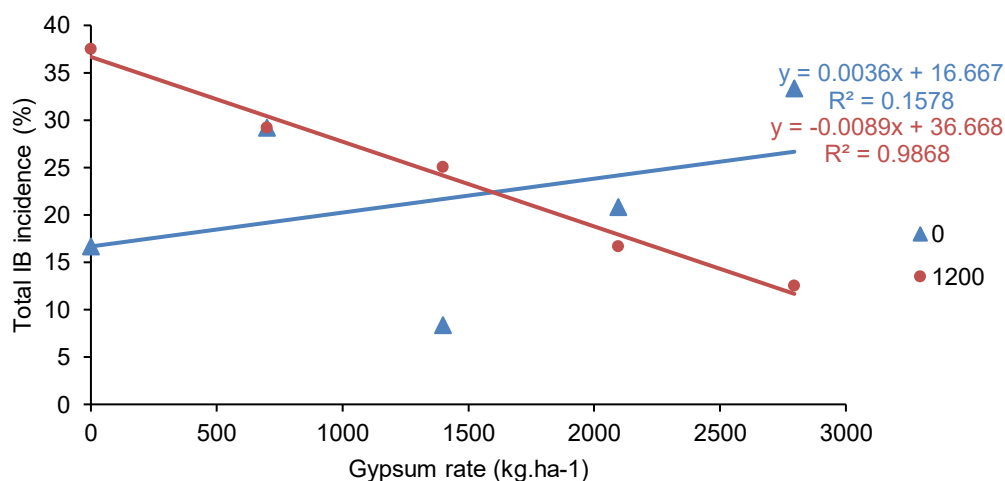
En cuanto a los niveles de acidez, los datos observados resultaron algo inesperados y se desviaron de lo descrito en la bibliografía existente. El análisis de regresión indicó una tendencia a la reducción, leve pero significativa ($p < 0,05$, Tabla 7), de la acidez titulable a los 21 días de almacenamiento a medida que se aplicaba una mayor cantidad de yeso (Figura 10). En general, se espera una relación inversa entre la disponibilidad de Ca y la tasa de pérdida de acidez (Bitange et al., 2023; Seibert, Bender, 2024). El aumento de la concentración de Ca en el tejido del fruto suele ralentizar la disminución natural de los ácidos orgánicos durante el proceso de maduración. En consecuencia, el mango tratado con calcio suele mantener una mayor acidez titulable en el momento de la cosecha y a lo largo de todo el período de vida de anaquel en comparación con los controles no tratados (Bitange et al., 2023).

Durante la maduración, los ácidos orgánicos (cítrico, málico) se metabolizan como sustratos para la respiración celular. La aplicación de Ca mitiga este agotamiento al reducir la actividad de las enzimas de maduración (enzimas málicas y piruvato descarboxilasa) (Gao et al., 2019). Además, el Ca también se une a la pectina en la lámina media para formar pectatos de Ca, que estabilizan las paredes celulares y reducen la tasa de respiración general, lo que contribuye a la preservación del perfil ácido de la fruta (Seibert, Bender, 2024).

En Taquaritinga, sin embargo, los resultados fueron diferentes. La aplicación de caliza y yeso al suelo afectó significativamente la acidez poscosecha y, lo que es más importante, redujo la incidencia total de colapso (Tabla 7).

En esta zona, tanto la cal como el yeso, ya sea aplicados por separado o en combinación, dieron lugar a un aumento de la masa seca del fruto y afectaron a la acidez en el momento de la cosecha. Estos aportes de calcio redujeron significativamente la incidencia total de colapso interno. La aplicación combinada de piedra caliza y yeso resultó especialmente eficaz para mitigar este trastorno, lo que sugiere un efecto sinérgico derivado de una mayor disponibilidad de calcio procedente de ambas fuentes (Figura 11).

Figura 11 - Incidencia total de colapsos internos (en %) en la zona de Monte Alto: regresión para la interacción entre las proporciones de cal y yeso.



Esta reducción del colapso interno pone de manifiesto la relación directa que existe entre una mayor ingesta de calcio y la mejora de la estabilidad fisiológica y la calidad de la fruta.

Por el contrario, los ensayos de campo realizados en la zona de Monte Alto no mostraron efectos estadísticamente significativos de los tratamientos sobre los parámetros de calidad del fruto ni sobre la incidencia de colapso interno. Esta falta de respuesta, a pesar de los tratamientos similares, puede atribuirse a varios factores inherentes a las condiciones edafoclimáticas de Monte Alto, entre ellos el riego. Además, durante el trabajo de laboratorio se observó una heterogeneidad significativa en el tamaño y la madurez de los frutos al momento de la cosecha, debido a la posible ocurrencia de oleadas de floración distintas que pueden afectar el desarrollo de los frutos de manera uniforme en todos los bloques experimentales. En esta zona, es probable que dicha variabilidad haya enmascarado cualquier beneficio potencial de las enmiendas de Ca, lo que resalta la importancia de las estrategias de manejo específicas para cada sitio y de tomar en cuenta los factores ambientales en la investigación de cultivos perennes.

En conclusión, esta investigación refuerza el papel crítico del Ca en la mitigación del colapso interno de los frutos de mango. Los resultados demuestran un aumento del Ca unido a la pared celular con las enmiendas del suelo, lo que proporciona una base celular para las mejoras observadas en la calidad del fruto. Los resultados de la zona de Taquaritinga muestran claramente que las aplicaciones específicas de caliza y yeso pueden reducir significativamente la incidencia del colapso interno y mejorar la masa seca del fruto, además de influir en los niveles de acidez. Si bien la variabilidad en la zona de Monte Alto pone de relieve la complejidad de las condiciones de campo, la evidencia general apunta a que el manejo eficaz del Ca es una estrategia vital para mejorar la calidad del mango y reducir las pérdidas poscosecha debidas al colapso interno.

5 Conclusiones clave

- Mejora de la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas: la aplicación de piedra caliza y yeso logró aumentar la disponibilidad de Ca, Mg y S. El yeso resultó especialmente eficaz para aportar Ca capaz de filtrarse hasta las capas más profundas del suelo.
- Resultados de productividad por regiones: la fertilidad del suelo mejoró en todos los sitios, y se registró un aumento significativo en el rendimiento frutal específicamente en el experimento de la zona de Petrolina. En esta región, las dosis más altas de yeso dieron lugar a un aumento del 16 % en el rendimiento,

elevando la producción de 24 a 28 toneladas por hectárea.

- Mitigación del colapso interno: en Taquaritinga, las aplicaciones al suelo tanto de caliza como de yeso condujeron a una reducción importante en la incidencia del colapso interno de la fruta. Se determinó que la aplicación combinada de estas enmiendas era una estrategia eficaz para mitigar este trastorno en la zona. Por otro lado, en Petrolina y Monte Alto no se observó ningún efecto significativo.
- Integridad celular de la fruta: los análisis microscópicos y de EDS confirmaron que estos tratamientos del suelo aumentaron la concentración de calcio unido a las paredes celulares dentro de la fruta. Se cree que esta mejora estructural es la razón principal del aumento de la masa seca de la fruta y de la calidad poscosecha.
- Variaciones específicas del sitio: los resultados variaron significativamente según la ubicación, lo que pone de relieve la complejidad de la mitigación del colapso interno. En Monte Alto no se observaron efectos significativos del tratamiento; es probable que esta falta de respuesta se deba a las prácticas de riego localizadas y a la alta variabilidad natural en la madurez de la fruta. De manera similar, Petrolina mostró una respuesta mínima, excepto en los niveles de acidez a los 21 días poscosecha. Estos hallazgos muestran la necesidad de estrategias de manejo específicas para cada sitio y de investigación continua para refinar el colapso interno en diversas condiciones edafoclimáticas.
Recomendaciones de manejo: la aplicación combinada de caliza y yeso demostró ser una estrategia adecuada para la suplementación de Ca. Esta aplicación combinada mejora la calidad del mango y reduce las pérdidas económicas causadas por el colapso interno, particularmente en regiones propensas a restricciones de agua.

6 Conclusión

La aplicación de piedra caliza y yeso provocó cambios en la fertilidad del suelo, principalmente al aumentar la disponibilidad de Ca, Mg y S para las plantas; sin embargo, el efecto de estos cambios solo se observó en la productividad de los frutos en el experimento realizado en el noreste de Brasil. La aparición de colapso de los frutos con la aplicación combinada de piedra caliza y yeso se relacionó con la presencia de Ca en la pared celular.

Referencias

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil (*Mapa de la clasificación climática de Köppen para Brasil*). **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, Germany, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Available in: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

BISSOLI JUNIOR, W. Qualidade de mangas (*Mangifera indica* L. cv. 'Tommy Atkins') sob influência da pulverização pré-colheita dos frutos com cálcio e boro. Lavras, 1992. 86p. **Dissertação**. Escola Superior de Agricultura de Lavras.

BITANGE, N. M. et al. Effect of varied calcium formulations and time of application on postharvest quality and organoleptic acceptability of mango fruits (*Efecto de diferentes formulaciones de calcio y del momento de aplicación sobre la calidad poscosecha y la aceptabilidad organoléptica de los mangos*). **African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 23145-23164, may 2023. DOI: <https://doi.org/10.18697/ajfand.119.22725>. Available in: <https://www.ajfand.net/Volume23/No4/Bitange22725.pdf>.

BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W. & CORNELUIS, P.L. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn (*Influencia del cultivo sin labranza y la fertilización con nitrógeno en determinadas propiedades del suelo tras 5 años de cultivo continuo de maíz*). **Agron. J.**, 69:383-386, 1977.

CORREIA, M. A. R. et al. Using Limestone to Improve Soil Fertility and Growth of Mango (*Mangifera Indica* L.) (*Uso de la piedra caliza para mejorar la fertilidad del suelo y el crecimiento del mango (Mangifera Indica L.)*). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 49, n. 8, p. 903–912, 2018. Available in: <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1448407>

GAO, Q. et al. Calcium and calcium sensors in fruit development and ripening (*El calcio y los sensores de calcio en el desarrollo y la maduración de la fruta*). **Scientia Horticulturae**, v. 253, p. 412–421, 2019. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.04.069. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423819303243>

GONZALES-ÉRICO, E.; KAMPRATH, E.J.; NADERMANN, G.C. & SOARES, W.V. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of Central Brazil (*Efecto de la profundidad de incorporación de la cal sobre el crecimiento del maíz en un oxisol del centro de Brasil*). **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 43:1155-1158, 1979.

HARTER, R.D. & NAIDU, R. Role of metal-organic complexation in metal sorption by soils (*El papel de la complejación metal-orgánica en la sorción de metales por los suelos*). **Adv. Agron.**, 55:219-263, 1995.

KIST, B. B. et al. Anuário Brasileiro de Horti & Fruti 2023. **Gazeta de Santa Cruz**, Santa Cruz do Sul, p. 108 p, 2023. Available in: https://www.editoragazeta.com.br/sitewp/wp-content/uploads/2023/08/HF-2023_DUPLAS.pdf

MA, X. et al. The Link between Mineral Elements Variation and Internal Flesh Breakdown of 'Keitt' Mango in a Steep Slope Mountain Area (La relación entre la variación de los elementos minerales y la descomposición interna de la pulpa del mango «Keitt» en una zona montañosa de pendientes pronunciadas), Southwest China. **Horticulturae**, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 533, 2022. Available in: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060533>

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & SANTOS, J.C.F. Effects of addition of crop residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols (*Efectos de la incorporación de residuos de cultivos sobre la lixiviación de Ca y Mg en los oxisoles*). In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH**, 4., Belo Horizonte, Brazil, 1996. Abstracts. Belo Horizonte, SBCS/ Embrapa-CPAC, 1996. p.8.

NATALE, W.; PRADO, R.M.; ROZANE, D.E.; ROMUALDO, L.M. Efeitos da calagem, na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **R. Bras. Ci. Solo**, 31:1475-1485, 2007.

OLIVEIRA, E.L.; PARRA, M.S. & COSTA, A. Resposta da cultura do milho, em um Latossolo Vermelho álico, à calagem. **R. Bras. Ci. Solo**, 21:65-70, 1997.

PAULETTI, V. & MONTE SERRAT, B. **Nutrição de plantas aplicada**. 2025. 112 p.

PEARSON, R.W.; ABRUNA, F. & VICE-CHANCES, J. Effect of lime and nitrogen applications on downward movements of calcium and magnesium in two humid soils of Puerto Rico (*Efecto de las aplicaciones de cal y nitrógeno sobre el movimiento descendente del calcio y el magnesio en dos suelos húmedos de Puerto Rico*). **Soil Sci.**, 93:77-82, 1962.

RABELO, J.E.S.; SILVA, M.M.; GASPAR, J.W.; COUTO, F.A.A. **Efeito da aplicação foliar de cloreto de cálcio e ácido bórico sobre o "colapso interno" da manga "Tommy Atkins"**. In: SÃO JOSÉ, A.R.; SOUZA, I.V.B.; MARTINS FILHO, J.; MORAIS, O.M. Coords. Manga: tecnologia e produção e mercado. Vitória da Conquista: DFZ/UESB, 1996. p.136-138.

SAMPAIO, V. R., SCARPARE FILHO, J. A.; KLUGE, R. A. Distúrbios fisiológicos da manga: efeito da aplicação de Ca em pulverização foliar. **Scientia Agricola**, 56(2), 459–463, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000200028>

SEIBERT, E.; BENDER, R. J. Effect of calcium sprays and fruit ripeness on the incidence of internal breakdown on Cv. Tommy Atkins mangoes (*Efecto de los aerosoles de calcio y la madurez del fruto sobre la incidencia de descomposición interna en los mangos de la variedad Tommy Atkins*). **Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha**, [S.], v. 25, n. 1, 2024. Available in: <https://www.redalyc.org/journal/813/81378878004/html/>

SHIVASHANKAR, S. Physiological disorders of mango fruit (*Trastornos fisiológicos del mango*). **Horticultural Reviews**, [S. l.], v. 42, p. 313–347, 2014. Available in: <https://doi.org/10.1002/9781118916827.ch06>

TRIDGE. **Global Production of Fresh Mango - Production Overview of Top 10 Countries (*Producción mundial de mango fresco: resumen de la producción de los 10 principales países*)**. [s.l.], 2022. Available in: <https://www.tridge.com/intelligences/mango/production>. Access in: fev 12 2022.

ULLAH, M. A. et al. Internal Disorders of Mango Fruit and Their Management - Physiology, Biochemistry, and Role of Mineral Nutrients (*Trastornos internos del mango y su manejo: fisiología, bioquímica y papel de los nutrientes minerales*). **Plants**, [S. l.], v. 13, n. 18, p. 2596, 2024. Available in: <https://doi.org/10.3390/plants13182596>