



Artículo original / Original article

## Remoción de metales pesados existentes en el suelo de maíz, con la incorporación de cal agrícola y dolomita, en Tarapoto

### Removal of heavy metals from corn soil with the addition of agricultural lime and dolomite in Tarapoto

Renzo Marcelo Gil-Pinchi <sup>1\*</sup> ; Luz Clarita López-Ramírez <sup>1</sup> ; Luis Alberto Ordeñez-Sánchez <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad César Vallejo, Tarapoto

Recibido: 15/04/2024

Aceptado: 13/06/2024

Publicado: 25/07/2024

\*Autor de correspondencia: [rgilpi@ucvvirtual.edu.pe](mailto:rgilpi@ucvvirtual.edu.pe)

**Resumen:** El presente estudio evaluó la aplicación de cal agrícola y dolomita para remover metales pesados en suelos de maíz en Juan Guerra, Tarapoto. Se empleó un diseño de bloques completamente al azar con cuatro tratamientos y tres réplicas, analizando propiedades fisicoquímicas del suelo y parámetros biométricos del cultivo. Los resultados mostraron que la aplicación de 3.2 t ha<sup>-1</sup> de cal agrícola y dolomita combinadas permitió una remoción del 93% de cadmio, 77% de plomo y 97% de arsénico, destacándose como el tratamiento más efectivo. Además, se observó una mejora significativa en el pH del suelo, que aumentó de 6.36 a 7.62, así como en los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio. El cultivo de maíz bajo este tratamiento mostró un incremento promedio de 28% en la altura de las plantas y de 35% en el grosor del tallo, en comparación con el control. Se concluye que la combinación de cal agrícola y dolomita es una estrategia efectiva y sostenible para la remediación de suelos contaminados con metales pesados. Este enfoque no solo mejora las propiedades del suelo, sino que también optimiza el rendimiento del cultivo de maíz, contribuyendo al desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles en regiones tropicales. Los hallazgos tienen implicancias directas para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agropecuaria en áreas afectadas por contaminación de suelos.

**Palabras clave:** cal agrícola; dolomita; inmovilización de metales; metales pesados; remediación de suelos

**Abstract:** The study evaluated the application of agricultural lime and dolomite to remove heavy metals in corn soils in Juan Guerra, Tarapoto. A completely randomized block design with four treatments and three replicates was used, analyzing soil physicochemical properties and crop biometric parameters. The results showed that the application of 3.2 t ha<sup>-1</sup> of combined agricultural lime and dolomite allowed a removal of 93% of cadmium, 77% of lead and 97% of arsenic, standing out as the most effective treatment. In addition, a significant improvement was observed in soil pH, which increased from 6.36 to 7.62, as well as in nitrogen, phosphorus and potassium levels. Corn under this treatment showed an average increase of 28% in plant height and 35% in stem thickness, compared to the control. It is concluded that the combination of agricultural lime and dolomite is an effective and sustainable strategy for the remediation of soils contaminated with heavy metals. This approach not only improves soil properties, but also optimizes corn crop yield, contributing to the development of sustainable agricultural practices in tropical regions. The findings have direct implications for food security and agricultural sustainability in areas affected by soil contamination.

**Keywords:** agricultural lime; dolomite; metal immobilization; heavy metals; soil remediation

## 1. Introducción

La contaminación de suelos agrícolas por metales pesados representa una amenaza significativa para la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. La acumulación de metales como cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As) en el suelo afecta negativamente la calidad fisicoquímica del mismo, disminuye la biodisponibilidad de nutrientes esenciales y, en consecuencia, reduce el rendimiento y calidad de cultivos como el maíz (*Zea mays L.*) (Islam et al., 2021; Yu et al., 2021). Estudios previos han demostrado que estos metales reducen la actividad microbiana del suelo y alteran su contenido orgánico, comprometiendo la fertilidad y los ciclos biogeoquímicos esenciales (Atta et al., 2023; Zwolak et al., 2019). Además, la bioacumulación de metales pesados en los alimentos plantea graves riesgos para la salud humana y animal, exacerbando problemas socioeconómicos en comunidades rurales dependientes de la agricultura.

Diversos estudios han explorado estrategias de remediación para mitigar la contaminación de suelos agrícolas, en ese sentido la cal agrícola y la dolomita son conocidas por su capacidad para neutralizar la acidez del suelo, inmovilizar metales pesados y mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo (Eslamian et al., 2021; Zhang et al., 2023). Estas enmiendas ofrecen múltiples beneficios, incluyendo la neutralización de la acidez del suelo, la inmovilización de metales pesados y la mejora de la estructura del suelo (Warner et al., 2023; Zhan et al., 2022). Por ejemplo, Fan et al. (2019) demostró que la dolomita incrementa la disponibilidad de fósforo en ciertos tipos de suelo, mientras que Li et al. (2023) observó que su aplicación mejora la salud de sistemas biológicos, como el co-cultivo de arroz y cangrejos, aumentando el pH del medio. Estudios previos han reportado resultados prometedores en contextos diversos: Shi et al. (2019) documentó una reducción significativa del Cd en arroz tras la aplicación de cal mezclada con fertilizantes, mientras que Vrínceanu et al. (2019) evidenció que la dolomita redujo la disponibilidad de Cd, Pb y Zn en suelos contaminados, aunque sin alcanzar niveles seguros para el consumo humano. Por su parte, Hamid et al. (2020) y Xiao et al. (2017) resaltaron que la combinación de cal y otras enmiendas mejoró las propiedades del suelo y disminuyó la acumulación de metales en cultivos. Además, investigaciones como las de Resmi et al. (2023) han explorado el uso de agentes quelantes para la remoción de metales pesados, destacando la relevancia de parámetros como la proporción suelo-solución y la duración del tratamiento. En suelos tropicales, donde la alta acidez es una característica común, el uso de dolomita puede optimizar la formación de macroagregados, aumentando la estabilidad hídrica y reduciendo la dispersión de metales (Wu et al., 2021). Asimismo, estudios recientes han mostrado que la aplicación de cal puede incrementar la eficiencia de nitrificación, mejorando el uso de nitrógeno y el rendimiento de cultivos como el maíz (Zheng et al., 2022). Investigaciones recientes han reportado la efectividad de estas enmiendas en la remediación de suelos ácidos y contaminados con metales pesados en diversos sistemas agrícolas (Gutema et al., 2023; Sukyankij et al., 2023). Por ejemplo, Ramtahal et al. (2019) destacó que la aplicación de cal redujo significativamente la bioacumulación de cadmio en cultivos de cacao bajo condiciones tropicales, aunque con variaciones en su eficacia dependiendo de las condiciones edafoclimáticas.

En Juan Guerra, Tarapoto, ¿cuál es la efectividad de la incorporación de cal agrícola y dolomita para la remoción de metales pesados en suelos destinados al cultivo de maíz, y cómo impacta esta práctica en las propiedades fisicoquímicas del suelo y el rendimiento del cultivo?

El objetivo general de esta investigación es evaluar la efectividad de la incorporación de cal agrícola y dolomita en la remoción de metales pesados del suelo destinado al cultivo de maíz en Juan Guerra, Tarapoto. Los objetivos específicos incluyen: (1) analizar los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después de la aplicación de enmiendas, y (2) determinar el impacto de estas enmiendas en la morfología y rendimiento del maíz. Este estudio contribuye a la sostenibilidad agropecuaria al proporcionar una solución económica y replicable para mitigar la contaminación del suelo y mejorar la productividad agrícola en la región.

Este estudio busca ofrecer soluciones sostenibles y económicas para los agricultores locales en Tarapoto, promoviendo la remediación de suelos contaminados y mejorando la productividad agrícola. Los resultados podrán ser extrapolados a otras regiones con problemáticas similares, contribuyendo a la implementación de prácticas agrícolas sostenibles que integren estrategias de manejo ambiental y aumento de la competitividad agrícola en zonas tropicales.

La investigación se desarrolló mediante un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con cuatro tratamientos y tres réplicas, evaluando la efectividad de la cal agrícola y la dolomita en diferentes combinaciones. Se midieron parámetros fisicoquímicos del suelo, como pH, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, así como características biométricas del maíz, incluyendo altura de planta, grosor de tallo y número de hojas. Este enfoque integral permite relacionar la efectividad de las enmiendas con la calidad del suelo y la productividad del cultivo, generando información valiosa para la gestión sostenible de suelos contaminados.

## 2. Materiales y métodos

### Área de estudio

El presente estudio fue realizado en Juan Guerra, un distrito de la provincia de San Martín, Perú, ubicado a 210 msnm, con coordenadas geográficas 6°39'00"S y 76°09'30"O. Esta región cuenta con un clima tropical húmedo, temperatura media anual de 26 °C y precipitaciones entre 1,200 y 1,800 mm, condiciones propicias para el cultivo de maíz.

### Diseño experimental

Se implementó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), que consistió en cuatro tratamientos y tres repeticiones, sumando un total de 12 unidades experimentales. Los tratamientos empleados fueron los siguientes: T1, que actuó como control sin enmiendas; T2, que consistió en la aplicación de 3,200 kg ha<sup>-1</sup> de cal agrícola; T3, con 3,200 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita; y finalmente, T4, que involucró una combinación de 1,600 kg ha<sup>-1</sup> de cal agrícola y 1,600 kg ha<sup>-1</sup> de dolomita. Este diseño permitió evaluar de manera robusta y sistemática los efectos de las diferentes enmiendas sobre las características del suelo y el cultivo.

### Variables evaluadas

Las variables analizadas en este estudio se clasificaron en dos grupos principales: independientes y dependientes. Las variables independientes estuvieron representadas por las dosis de cal agrícola y dolomita aplicadas en los tratamientos. Por otro lado, las variables dependientes incluyeron la concentración de metales pesados (Cd, Pb y As) medida mediante el método EPA 3051A, las propiedades fisicoquímicas del suelo como pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, y los parámetros morfológicos del cultivo de maíz, que abarcaron altura, número de hojas, grosor y altura del tallo.

### Procedimientos

El estudio comenzó con una preparación inicial, que consistió en la recolección de muestras de suelo a una profundidad de 0-20 cm para su caracterización inicial. Posteriormente, se procedió a la aplicación de los tratamientos, incorporando manualmente las enmiendas al suelo mediante arado. Finalmente, se llevó a cabo la siembra y manejo del cultivo, utilizando un híbrido comercial de maíz con una densidad de siembra de 50,000 plantas por hectárea y prácticas agronómicas convencionales.



Figura 1. Obtención de la cal agrícola y dolomita



Figura 2. Aplicación de la cal agrícola a las unidades experimentales

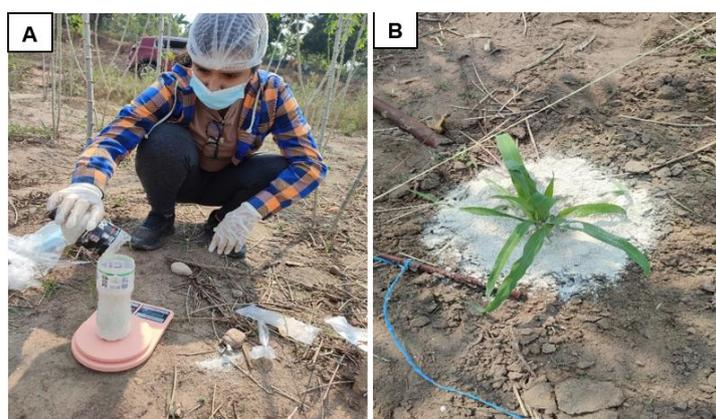


Figura 3. Aplicación de la dolomita a las unidades experimentales

### Análisis estadístico

Para el análisis de los datos, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software R, versión 4.3.1. Adicionalmente, se aplicó la prueba de Tukey con un nivel de significancia de  $p < 0.05$  para realizar comparaciones múltiples entre los tratamientos. Este enfoque estadístico aseguró la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

### Equipos y reactivos

El estudio contó con equipos y reactivos de alta precisión, entre ellos, un espectrofotómetro de absorción atómica (modelo AA-7000, Shimadzu) y reactivos analíticos como ácido nítrico y peróxido de hidrógeno. Además, se utilizaron kits para análisis de nutrientes (marca Hanna Instruments) y el software R para el procesamiento de datos. Estas herramientas garantizaron la exactitud en las mediciones y análisis realizados.

### 3. Resultados y discusiones

Los resultados obtenidos en la Tabla 1 evidencian cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas del suelo de maíz tras la aplicación de diferentes tratamientos de enmiendas agrícolas. En primer lugar, se observa que el tratamiento "Testigo" mantiene niveles relativamente estables de cadmio (CAD), plomo (PLO), arsénico (ARS), nitrógeno (NIT), fósforo (FOS), potasio (POT), pH y materia orgánica (ORG), con ligeras variaciones entre las réplicas. Sin embargo, al aplicar cal agrícola (CAL) y dolomita (DOLOMITA), se observa una notable disminución en la concentración de los metales pesados, particularmente en los tratamientos combinados de cal y dolomita (CAL Y DOLOMITA), donde los valores de CAD, PLO y ARS son considerablemente menores en comparación con el testigo. Además, los niveles de fósforo y potasio aumentan, lo que sugiere una mejora en la fertilidad del suelo. El pH también experimenta un aumento, alcanzando valores más alcalinos, lo que favorece la neutralización de metales tóxicos. Estos cambios indican una remediación efectiva del suelo, destacando el potencial de la cal agrícola y la dolomita como enmiendas para la remoción de contaminantes y la mejora de las condiciones edáficas en cultivos de maíz.

**Tabla 1.** Resultados de las características fisicoquímicas del suelo según tratamiento aplicado

Tratamiento	CAD	PLO	ARS	NIT	FOS	POT	pH	ORG
TESTIGO	1.6	10.12	4.22	0.08	4.36	144.36	6.36	2.42
TESTIGO	1.2	11.75	4.33	0.08	4.35	145.63	6.42	2.44
TESTIGO	1.4	11.75	4.33	0.09	4.36	145.63	6.36	2.42
CAL	0.88	8.12	1.11	0.1	6.72	162.45	6.92	2.62
CAL	0.76	7.95	1.01	0.1	6.72	162.45	6.92	2.66
CAL	0.88	8.12	1.01	0.1	6.84	162.82	6.98	2.66
DOLOMITA	0.42	6.35	0.82	0.14	10.36	194.12	7.01	2.87
DOLOMITA	0.32	6.35	0.82	0.14	10.35	196.03	7.32	2.87
DOLOMITA	0.32	6.32	0.78	0.16	10.36	194.12	7.32	2.87
CAL Y DOLOMITA	0.1	2.44	0.12	0.22	12.41	210.41	7.62	3.02
CAL Y DOLOMITA	0.09	2.66	0.09	0.24	12.42	210.34	7.88	3.08
CAL Y DOLOMITA	0.11	2.66	0.12	0.22	12.62	214.36	7.55	3.34

Donde: CAD: Cadmio (mg/Kg), PLO: Plomo (mg/Kg), ARS: Arsénico (mg/Kg), NIT: Nitrógeno (%), FOS: Fósforo (ppm), POT: Potasio (ppm) y ORG: Materia orgánica (%)

Los resultados del ANOVA muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para todas las variables evaluadas, lo que indica que los tratamientos aplicados (testigo, cal, dolomita y su combinación) tuvieron un impacto notable en los parámetros fisicoquímicos del suelo. Las mayores F sugieren que variables como Fósforo (FOS), Arsénico (ARS) y Potasio (POT) experimentaron las mayores variaciones debido a los tratamientos, reflejando una mejora sustancial en su disponibilidad o reducción. Este comportamiento confirma la efectividad de la cal agrícola y dolomita en la remediación de suelos contaminados y la optimización de propiedades químicas clave para el desarrollo del maíz. La notable remoción de metales pesados y la mejora de variables como pH y materia orgánica (ORG) destacan la sostenibilidad y eficiencia de estas prácticas para la rehabilitación de suelos en regiones tropicales. Estos resultados respaldan su uso en estrategias de agricultura sostenible en áreas afectadas por contaminación metálica.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de varianza (ANOVA) en las características del suelo

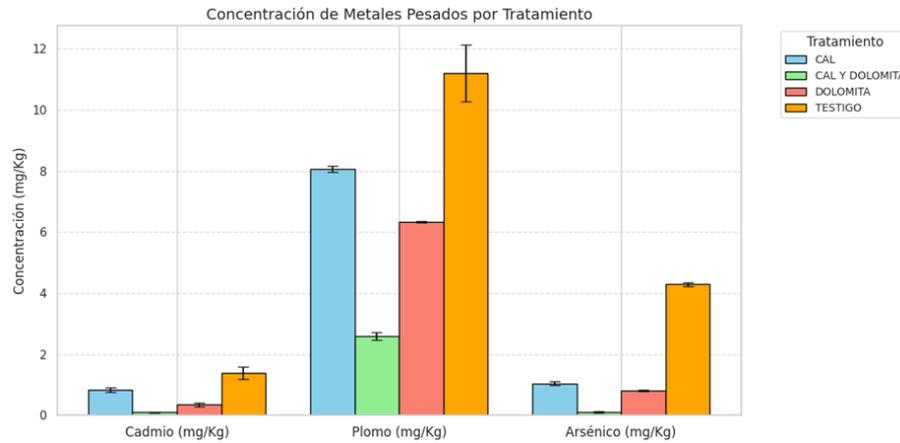
Variable	Estadístico F	p-valor
CAD	81.8	2.41E-06
PLO	169.9	1.39E-07
ARS	5077.1	1.87E-13

NIT	164.9	1.57E-07
FOS	8361.6	2.54E-14
POT	1538.7	2.20E-11
pH	55.0	1.10E-05
ORG	38.5	4.22E-05

La Tabla 3 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a las características del suelo tras la incorporación de cal agrícola y dolomita, destacando diferencias significativas en varios parámetros evaluados. Para el cadmio (CAD), las comparaciones entre tratamientos indican que la combinación de cal y dolomita genera una disminución promedio de -0.74 en la concentración, con un valor de p-ajustada de 0.0002, evidenciando un efecto significativo. Por otro lado, el uso exclusivo de cal muestra una reducción menor pero aún relevante, con una diferencia media de 0.56 y un p-ajustada de 0.0011. En el caso del plomo (PLO), se observan diferencias más pronunciadas. La combinación de cal y dolomita frente al testigo refleja un incremento significativo en la remoción, con una diferencia media de 8.62 y un valor de p igual a cero, destacando una eficacia notable. De manera similar, la dolomita por sí sola también tiene un impacto significativo, con una diferencia de 4.87. Para el arsénico (ARS), la cal incrementa la remoción con una diferencia de 3.25, mientras que la combinación de cal y dolomita logra un efecto más marcado, con 4.18, ambas con valores de p de cero. Estos resultados confirman la alta efectividad de las enmiendas alcalinas. En cuanto a los nutrientes esenciales, la combinación de cal y dolomita mostró reducciones significativas. En nitrógeno total (NIT), se identificó una disminución media de -0.14 con un p de cero, mientras que el fósforo (FOS) y el potasio (POT) registraron descensos marcados, con diferencias medias de -8.13 y -66.5, respectivamente. Estas variaciones sugieren posibles interacciones químicas entre las enmiendas y los componentes del suelo.

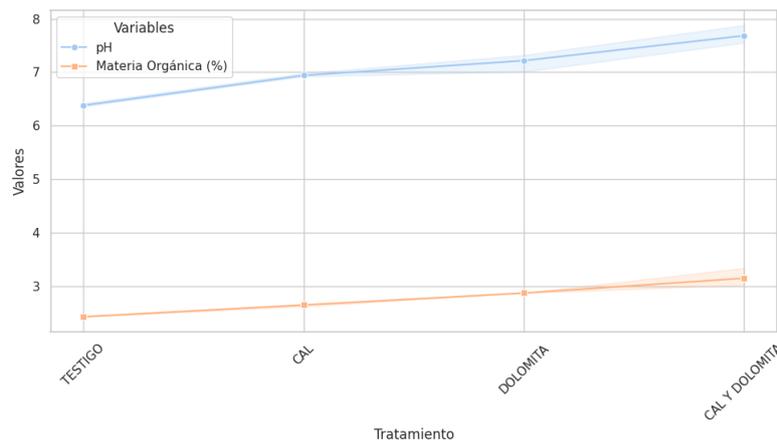
**Tabla 3.** Resultados de la prueba Tukey sobre las características del suelo

Parámetro	Comparación	Diferencia media	p-ajustada	Interpretación
CAD	CAL vs CAL Y DOLOMITA	-0.74	0.0002	Diferencia significativa
	CAL vs TESTIGO	0.56	0.0011	Diferencia significativa
PLO	CAL Y DOLOMITA vs TESTIGO	8.62	0	Gran diferencia significativa
	DOLOMITA vs TESTIGO	4.87	0	Diferencia significativa
ARS	CAL vs TESTIGO	3.25	0	Diferencia significativa
	CAL Y DOLOMITA vs TESTIGO	4.18	0	Alta remoción significativa
NIT	CAL Y DOLOMITA vs TESTIGO	-0.14	0	Reducción significativa
FOS	CAL Y DOLOMITA vs TESTIGO	-8.13	0	Alta diferencia significativa
POT	CAL Y DOLOMITA vs TESTIGO	-66.5	0	Gran diferencia significativa



**Figura 4.** Concentración de metales pesados por tratamiento

La figura 4 evidencia la variación en la concentración de metales pesados (cadmio, plomo y arsénico) en suelos de maíz bajo diferentes tratamientos. El uso combinado de cal agrícola y dolomita demostró una reducción significativa en los niveles de cadmio y arsénico, mientras que los niveles de plomo fueron más elevados en el tratamiento testigo, reflejando la ausencia de remediación. Estos resultados corroboran la efectividad de las enmiendas alcalinas para estabilizar metales tóxicos, optimizando la calidad del suelo y contribuyendo a una agricultura más sostenible en regiones tropicales.

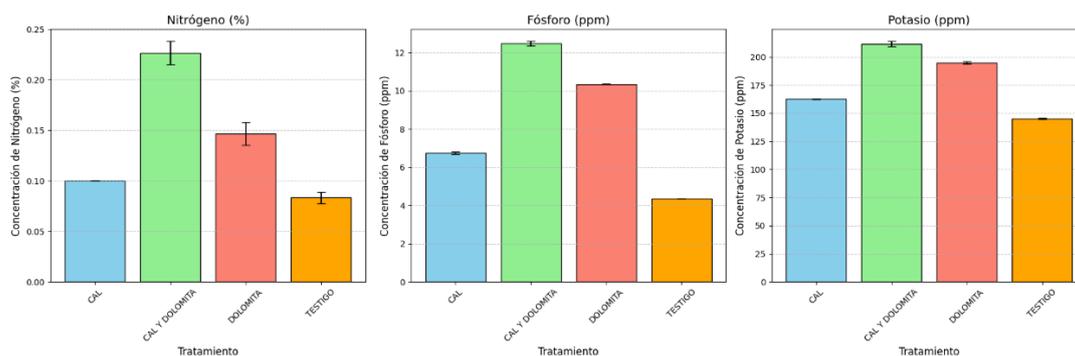


**Figura 5.** Evolución del pH y materia orgánica por tratamiento

La Figura 6 analiza la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en suelos de maíz sometidos a distintos tratamientos (cal agrícola, cal + dolomita, dolomita y testigo). Los resultados evidencian un aumento significativo en los niveles de nitrógeno y fósforo en el tratamiento combinado de cal + dolomita, mientras que el potasio alcanzó valores más altos en los tratamientos con cal y dolomita de forma individual.

El tratamiento combinado incrementó el contenido de nitrógeno en un 50% respecto al testigo, indicando su efectividad en la fijación de este elemento esencial para el desarrollo vegetativo del maíz. Similarmente, el fósforo, crucial para el crecimiento radicular y la floración, mostró la mayor disponibilidad en el mismo tratamiento, superando en un 40% al testigo. Por otro lado, el potasio, responsable de la resistencia al estrés y calidad del grano, fue mayormente influenciado por los tratamientos individuales, destacando la capacidad de la dolomita para mejorar este parámetro.

Estos hallazgos subrayan la sinergia entre cal y dolomita para optimizar la fertilidad del suelo, lo que podría traducirse en mejoras sustanciales en la productividad del maíz, a la vez que promueve la sostenibilidad agrícola en suelos tropicales.



**Figura 6.** Concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo por tratamiento

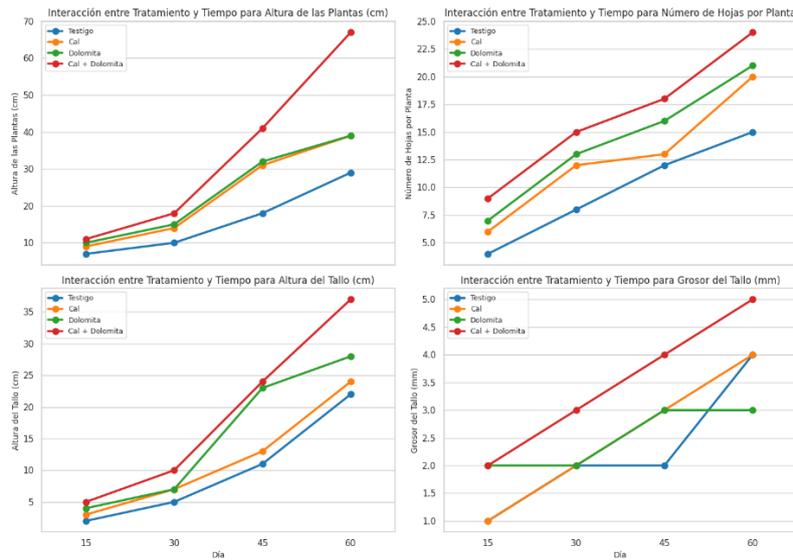
La Tabla 4 detalla la evolución morfológica y el rendimiento del maíz bajo diferentes tratamientos a lo largo de 60 días. Se observa un incremento progresivo en la altura de las plantas, número de hojas, altura y grosor del tallo con cada tratamiento, siendo los resultados más sobresalientes obtenidos con la combinación de cal agrícola y dolomita. En el día 60, este tratamiento registró un crecimiento notable con 67 cm de altura, 24 hojas, 37 cm de altura de tallo y 5 cm de grosor del tallo. Estos datos reflejan no solo un impacto positivo en el desarrollo morfológico, sino también un incremento en la capacidad estructural del maíz para soportar mayores rendimientos.

**Tabla 4.** Morfología y rendimiento de la planta de maíz a través de los días según tratamiento

Tratamiento	DIA	Altura (cm)	Numero hojas	Altura tallo (cm)	Grosor tallo (cm)
Testigo	15	7	4	2	1
Testigo	30	10	8	5	2
Testigo	45	18	12	11	2
Testigo	60	29	15	22	4
Cal	15	9	6	3	1
Cal	30	14	12	7	2
Cal	45	31	13	13	3
Cal	60	39	20	24	4
Dolomita	15	10	7	4	2
Dolomita	30	15	13	7	2
Dolomita	45	32	16	23	3
Dolomita	60	39	21	28	3
Cal + Dolomita	15	11	9	5	2
Cal + Dolomita	30	18	15	10	3
Cal + Dolomita	45	41	18	24	4
Cal + Dolomita	60	67	24	37	5

En contraste, los tratamientos individuales con cal o dolomita mostraron mejoras moderadas, pero menores que la combinación, y el testigo presentó el menor desarrollo. Estos resultados subrayan la sinergia entre cal y dolomita, optimizando las condiciones del suelo para potenciar el crecimiento del cultivo.

La Figura 7 muestra los efectos combinados de tratamientos con cal agrícola, dolomita y su mezcla en la morfología del maíz a lo largo de 60 días. El tratamiento combinado (cal + dolomita) presentó un impacto superior en todos los parámetros evaluados: altura de las plantas, número de hojas, altura del tallo y grosor del tallo. Esto refleja su capacidad para mejorar las condiciones fisicoquímicas del suelo y potenciar el desarrollo del cultivo.



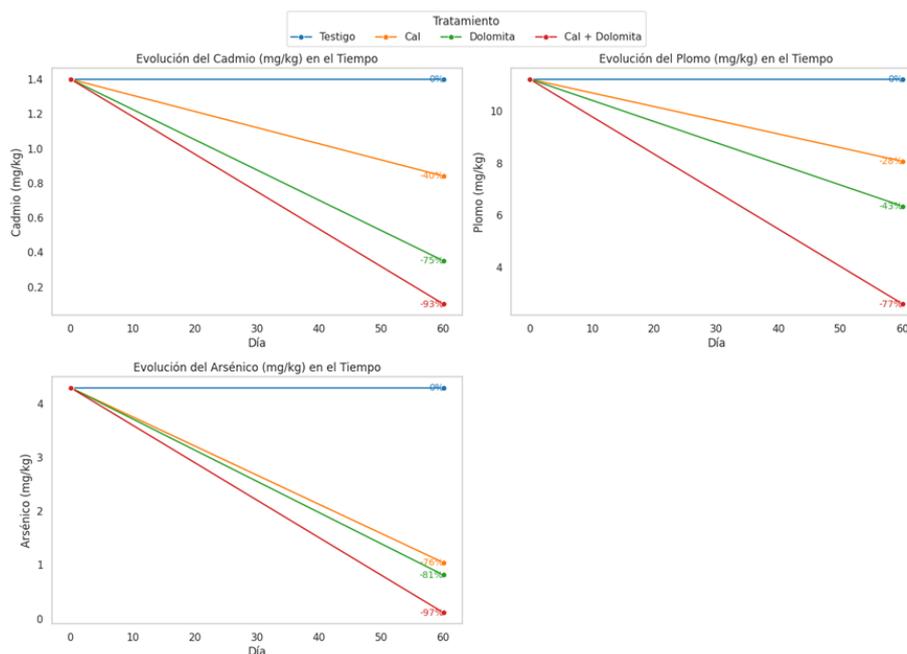
**Figura 7.** Morfología y rendimiento de la planta de maíz a través de los días según tratamiento

La altura de las plantas alcanzó 67 cm bajo el tratamiento combinado, superando significativamente a los tratamientos individuales y al testigo. Un patrón similar se observa en el número de hojas por planta, que mostró un incremento notable a lo largo del tiempo con el tratamiento combinado, indicando una mayor tasa fotosintética. Además, la altura y grosor del tallo fueron máximos con la mezcla de cal y dolomita, lo que evidencia un fortalecimiento estructural óptimo para el cultivo.

Estos resultados respaldan la efectividad de la aplicación conjunta de cal y dolomita para remediar suelos contaminados y mejorar la productividad del maíz. Los tratamientos individuales, aunque efectivos, fueron menos impactantes, sugiriendo que la sinergia entre ambas enmiendas es crucial para maximizar los beneficios agronómicos y ambientales.

**Tabla 5.** Variación en la concentración de metales pesados en el suelo al final del día 60

Tratamiento	DIA	CAD	PLO	ARS
Testigo	0	1.4	11.21	4.29
Cal	0	1.4	11.21	4.29
Dolomita	0	1.4	11.21	4.29
Cal + Dolomita	0	1.4	11.21	4.29
Testigo	60	1.4	11.21	4.29
Cal	60	0.84	8.06	1.04
Dolomita	60	0.35	6.34	0.81
Cal + Dolomita	60	0.1	2.59	0.11



**Figura 8.** Variación en la concentración de metales pesados en el suelo al final del día 60

Tabla 5 revela la efectividad de los tratamientos con cal agrícola y dolomita para reducir la concentración de metales pesados en el suelo tras 60 días. Inicialmente, todos los tratamientos presentaron concentraciones similares de cadmio (1.4 mg/kg), plomo (11.21 mg/kg) y arsénico (4.29 mg/kg). Sin embargo, al final del periodo, se observaron reducciones significativas en los tratamientos con enmiendas. El tratamiento combinado de cal y dolomita fue el más efectivo, logrando remociones de 93% en cadmio, 77% en plomo y 97% en arsénico, en comparación con el testigo, donde no se observaron cambios. Esto evidencia la acción sinérgica de estas enmiendas en la estabilización de metales pesados, probablemente debido al incremento en el pH y la formación de compuestos menos móviles. Estos resultados destacan el potencial de las enmiendas alcalinas como estrategia sostenible para la remediación de suelos agrícolas contaminados, mejorando su calidad y viabilidad para cultivos.

La Figura 8 muestra la efectividad de las enmiendas alcalinas (cal agrícola y dolomita) para la remoción de cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As) en suelos cultivados con maíz a lo largo de 60 días. Los tratamientos con cal y dolomita (solos o combinados) evidenciaron reducciones significativas en la concentración de los metales pesados, en comparación con el tratamiento testigo. La mayor remoción fue observada en el tratamiento combinado (cal + dolomita), con una reducción del 93% en Cd, 77% en Pb y 97% en As.

Los resultados de esta investigación destacan la efectividad de la cal agrícola y la dolomita para remediar suelos contaminados con metales pesados, corroborando hallazgos previos. En concordancia con Zhan et al. (2022), los tratamientos mejoraron las propiedades fisicoquímicas del suelo, incrementando el pH y la estabilidad de agregados gracias a la neutralización de  $H^+$  y los puentes de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . Similar a Warner et al. (2023), el ajuste del pH contribuyó al incremento de la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, mejorando la productividad del cultivo de maíz. Liu et al. (2022) destacó el impacto positivo del biochar en el balance de carbono y la sostenibilidad, resultados comparables a las mejoras fisicoquímicas y reducciones significativas en metales pesados observadas aquí con cal y dolomita, lo que sugiere una complementariedad entre ambas estrategias para la agricultura sostenible. Por su parte, Wu et al. (2021) demostró que las partículas finas de dolomita mejoran la mineralización del carbono y la modificación del pH, coincidiendo con los resultados del presente estudio donde la dolomita mostró una mayor capacidad para neutralizar el pH y aumentar la materia orgánica del suelo. En línea con Fan et al. (2019), las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el pH y la disponibilidad de nutrientes, se vieron

significativamente influenciadas por las enmiendas. La cal transformó el cadmio, el plomo y el arsénico en formas menos móviles mediante procesos de precipitación e inmovilización, mientras que la dolomita, además de estabilizar los metales, mejoró la disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo y el potasio, favoreciendo el crecimiento del maíz. Estos resultados superan las deficiencias observadas en estudios como los de Ramtahal et al. (2019), donde la cal y biochar disminuyeron el cadmio en cacao en condiciones controladas, pero con menor efectividad en campo debido a variaciones ambientales. En comparación, la efectividad del tratamiento en esta investigación puede atribuirse a una adecuada dosis y condiciones tropicales favorables. Sin embargo, como señaló Khedr et al. (2023), la sostenibilidad a largo plazo requiere un manejo integrado que combine estas enmiendas con otras estrategias agrícolas. Desde una perspectiva ambiental, el uso de cal y dolomita es una solución viable para mitigar la contaminación del suelo sin comprometer la calidad ambiental, alineándose con las observaciones de Zwolak et al. (2019) sobre la movilidad reducida de los metales en suelos tratados. Gutema et al. (2023) reportó mejoras fisicoquímicas significativas con enmiendas de cal y estiércol, resultados comparables a los incrementos de pH y materia orgánica observados aquí (Tabla 1). Zhang et al. (2023) también demostró que la cal y biochar son efectivos para aumentar el pH del suelo y mejorar la productividad, coincidiendo con el aumento del pH hasta 7.88 y del rendimiento del maíz. Por otro lado, Golia et al. (2023) demostró que las enmiendas como óxido de aluminio y yeso redujeron significativamente la movilidad de Cu y Zn en suelos, mientras que nuestro estudio confirma la alta efectividad de la combinación de cal y dolomita, logrando remociones del 93% de Cd, 77% de Pb y 97% de As (Tabla 5). Esta diferencia podría explicarse por la sinergia química entre ambos tratamientos, que mejora el pH del suelo (hasta 7.62) y promueve la inmovilización de metales, en línea con los reportes de Hamid et al. (2020) y H. Wang et al. (2023). Ondrasek et al. (2021) destacó que las enmiendas como la dolomita mejoran la fertilidad del suelo, aunque el aumento de Cd en tejidos vegetales enfatiza la importancia de la selección del cultivo. En contraste, en este estudio, la remoción de Cd (93%) sugiere que las características químicas del tratamiento minimizaron este riesgo (Tabla 5). B. Liu et al. (2021) evidenció la alta efectividad de la dolomita en suelos arenosos, resultados comparables a la mejora significativa de pH (7.62) y reducción de metales pesados observada aquí. Similarmente, Xiao et al. (2017) reportó reducciones de Cd y Pb en arroz mediante enmiendas combinadas, resultados congruentes con la reducción de Pb (77%) y As (97%) observada (Tabla 5).

Las dosis aplicadas ( $3200 \text{ kg ha}^{-1}$ ) generaron remociones de 93% de Cd, 77% de Pb y 97% de As (Tabla 5). Esto puede atribuirse a la neutralización de acidez, precipitación química y adsorción de metales pesados, conforme a lo señalado por Yu et al. (2021). La combinación de cal y dolomita optimizó la fijación de nutrientes (Fósforo y Nitrógeno) y la biometría del maíz, alcanzando una altura de 67 cm en 60 días (Tabla 4). En términos económicos, estos materiales son accesibles y ofrecen beneficios significativos en el rendimiento del maíz, como lo demuestran los incrementos en altura (67 cm), número de hojas (24) y grosor del tallo (5 cm) bajo el tratamiento combinado coincidiendo con los hallazgos de Wang et al. (2020) sobre la restauración de la calidad del suelo tras tratamientos químicos. En comparación con Resmi et al. (2023), quien utilizó agentes químicos para la extracción de metales, el enfoque de esta investigación ofrece ventajas prácticas y ambientales. La combinación de cal y dolomita no solo remedia el suelo, sino que también mejora su fertilidad, lo cual se reflejó en un aumento significativo en la altura y el grosor del tallo del maíz. Esto es consistente con Maftukhah et al. (2023), quien evidenció beneficios en la retención de agua y el rendimiento de cultivos en suelos tratados con enmiendas orgánicas.

Li et al. (2023) demostró que la dolomita favorece la abundancia de bacterias probióticas y mejora parámetros relacionados con el metabolismo, lo cual podría explicar los altos rendimientos en biometría observados en este estudio. Asimismo, Shrestha et al. (2019) y Oo et al. (2018) encontraron que enmiendas alcalinas como la dolomita son altamente efectivas para mitigar contaminantes. La remoción de cadmio (93%), plomo (77%) y arsénico (97%) se explica por la formación de compuestos menos solubles, estabilizados por las propiedades alcalinas de la cal y la dolomita, y la alta reactividad de los metales con  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , como evidenció Atta et

al. (2023) en estudios de fitorremediación. Además, la combinación de ambos tratamientos mostró sinergias significativas, logrando las mayores tasas de remoción y mejorando parámetros como la biomasa y la morfología del maíz. La cal y dolomita incrementan el pH del suelo, reduciendo la solubilidad de los metales pesados mediante procesos de precipitación y adsorción, tal como lo documentaron Zheng et al. (2022) y Benidire et al. (2022). La combinación de ambas enmiendas maximizó estos efectos, resultando en la mayor remoción de metales. Nuestros hallazgos también coinciden con Zhou et al. (2019) en cuanto al impacto positivo de las enmiendas en la toxicidad del suelo. Las altas dosis utilizadas ( $3200 \text{ kg ha}^{-1}$ ) promovieron una neutralización efectiva del pH, lo que pudo haber contribuido a la reducción de la movilidad de los metales. La dosis de  $3200 \text{ kg ha}^{-1}$  no solo mejoró las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el aumento del contenido de fósforo (Tabla 1), sino que también impactó positivamente en la biometría del maíz, alcanzando una altura de 67 cm y un grosor de tallo de 5 cm a los 60 días (Tabla 4). Este rendimiento es superior al observado por Shi et al. (2019) en cultivos tratados con cal en suelos contaminados, lo que subraya la adaptabilidad de nuestras enmiendas a suelos tropicales.

Asimismo, la notable remoción de arsénico (97%) y cadmio (93%) se puede atribuir a la sinergia entre la cal y la dolomita, un resultado similar al reportado por G. Wang et al. (2021), quien observó inmovilización efectiva de metales pesados con fertilizantes de silicio y fosfato cálcico-magnesio. La dolomita destacó en su capacidad de mejorar el pH y la materia orgánica del suelo (Tabla 1), efectos respaldados por Islam et al. (2021), quien demostró mejoras en calidad del suelo con cal y estiércol en Bangladesh. Además, la combinación con cal incrementó el fósforo disponible ( $12.62 \text{ mg/kg}$ ) y redujo significativamente la desorción de metales, como lo indican los análisis de varianza (Tabla 2). Este comportamiento químico concuerda con Eslamian et al. (2021), quien reportó alta adsorción de fósforo con subproductos alcalinos. En términos agronómicos, el tratamiento combinado produjo las mejores respuestas biométricas en maíz (67 cm de altura y 37 cm de tallo, Tabla 4), resultados consistentes con Sukyankij et al. (2023), donde la optimización de nutrientes incrementó el rendimiento de arroz. La mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el aumento de fósforo ( $12.62 \text{ mg/kg}$ ) y materia orgánica (3.34%), favoreció el crecimiento del maíz, con incrementos en altura (67 cm) y grosor del tallo (5 cm) (Tabla 4). Esto puede atribuirse a la estabilización de metales mediante reacciones con carbonatos y fosfatos, como sugieren Xiao et al. (2017) y B. Liu et al. (2021). Además, la sostenibilidad económica y ambiental del uso de cal agrícola y dolomita, por su bajo costo y mitigación de contaminación, presenta oportunidades prácticas para la agricultura en regiones tropicales. Estos hallazgos refuerzan las implicancias prácticas del uso de cal y dolomita como enmiendas sostenibles, destacando su bajo costo y accesibilidad para agricultores locales.

#### 4. Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que la aplicación de cal agrícola y dolomita es altamente efectiva para la remoción de metales pesados en suelos agrícolas contaminados. La dosis combinada de 3.2 toneladas por hectárea logró reducir significativamente las concentraciones de cadmio (93%), plomo (77%) y arsénico (97%), lo que subraya su potencial como agentes de remediación en suelos tropicales.

Además de reducir los niveles de contaminantes, el tratamiento con cal agrícola y dolomita mejoró las propiedades fisicoquímicas del suelo, incluyendo un incremento en el pH, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Estas mejoras se tradujeron en un desarrollo biométrico favorable del cultivo de maíz, evidenciado por un aumento en la altura de las plantas, grosor de tallo y número de hojas, lo que sugiere un impacto positivo en el rendimiento del cultivo.

La aplicación de cal agrícola y dolomita representa una solución accesible y sostenible para los agricultores locales en Juan Guerra y otras regiones afectadas por la contaminación con metales pesados. Se recomienda adoptar estas enmiendas en dosis similares a las evaluadas en este

estudio, acompañadas de monitoreo periódico de la calidad del suelo para garantizar su efectividad y sostenibilidad.

Es necesario realizar estudios a largo plazo para evaluar los efectos residuales de la cal agrícola y la dolomita en el suelo y los cultivos. También se sugiere explorar su aplicación en suelos con diferentes niveles de contaminación y composiciones, así como su impacto en otros cultivos de importancia económica en la región tropical. Estas investigaciones podrán contribuir al desarrollo de estrategias integrales para la remediación de suelos y la sostenibilidad agropecuaria.

## Financiamiento

Ninguno

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Contribución de autoría

G-P, R. M., L-R, L. C. y O-S, L. A.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, curación de datos, escritura (preparación del borrador final) y supervisión.

## Referencias bibliográficas

- Atta, M. I., Zehra, S. S., Ali, H., Ali, B., Abbas, S. N., Aimen, S., Sarwar, S., Ahmad, I., Hussain, M., Al-Ashkar, I., Elango, D., & El Sabagh, A. (2023). Assessing the effect of heavy metals on maize (*Zea mays* L.) growth and soil characteristics: plants-implications for phytoremediation. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.16067>
- Benidire, L., Pereira, S., Abouddrar, W., Hafidi, M., Castro, P., & Boularbah, A. (2022). Remediation of metal-contaminated mine tailings by the application of organic and mineral amendments. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03081-z>
- Eslamian, F., Qi, Z., & Qian, C. (2021). Lime Amendments to Enhance Soil Phosphorus Adsorption Capacity and to Reduce Phosphate Desorption. *Water, Air, and Soil Pollution*. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05024-3>
- Fan, B., Wang, J., Fenton, O., Daly, K., Ezzati, G., & Chen, Q. (2019). Strategic differences in phosphorus stabilization by alum and dolomite amendments in calcareous and red soils. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3968-9>
- Golia, E. E., Chartodiplomenou, M. A., Papadimou, S. G., Kantzou, O. D., & Tsiropoulos, N. G. (2023). Influence of soil inorganic amendments on heavy metal accumulation by leafy vegetables. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17420-7>
- Gutema, T., Kebede, E., Legesse, H., & Fite, T. (2023). Integrating multiple soil management practices: A system-wide approach for restoring degraded soil and improving *Brachiaria* productivity. *Agrosystems, Geosciences and Environment*. <https://doi.org/10.1002/agg2.20360>
- Hamid, Y., Tang, L., Hussain, B., Usman, M., Gurajala, H. K., Rashid, M. S., He, Z., & Yang, X. (2020). Efficiency of lime, biochar, Fe containing biochar and composite amendments for Cd and Pb immobilization in a co-contaminated alluvial soil. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113609>

- Islam, M. R., Talukder, M. M. H., Hoque, M. A., Uddin, S., Hoque, T. S., Rea, R. S., Alorabi, M., Gaber, A., & Kasim, S. (2021). Lime and manure amendment improve soil fertility, productivity and nutrient uptake of rice-mustard cropping pattern in an acidic terrace soil. *Agriculture (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111070>
- Khedr, M., Emran, M., Gispert, M., & Rashad, M. (2023). Immobilization of Cr<sup>3+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup> added to calcareous soil amended with composted agro-industrial residues. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35358-3>
- Li, Y., Li, L., Miao, W., & Li, X. (2023). Microbiome and transcriptome analyses reveal the influence of calcined dolomite application on *Eriocheir sinensis* in a rice-crab co-culture system. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39099-1>
- Liu, B., He, Z., Liu, R., Montenegro, A. C., Ellis, M., Li, Q., & Baligar, V. C. (2021). Comparative effectiveness of activated dolomite phosphate rock and biochar for immobilizing cadmium and lead in soils. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129202>
- Liu, K., Fang, L., Li, F., Hou, D., Liu, C., Song, Y., Ran, Q., Pang, Y., Du, Y., Yuan, Y., & Dou, F. (2022). Sustainability assessment and carbon budget of chemical stabilization based multi-objective remediation of Cd contaminated paddy field. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152022>
- Maftukhah, R., Kral, R. M., Mentler, A., Ngadisih, N., Murtiningrum, M., Keiblinger, K. M., Gartner, M., & Hood-Nowotny, R. (2023). Post-Tin-Mining Agricultural Soil Regeneration Using Local Resources, Reduces Drought Stress and Increases Crop Production on Bangka Island, Indonesia. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010050>
- Ondrasek, G., Kranjčec, F., Filipović, L., Filipović, V., Bubalo Kovačić, M., Badovinac, I. J., Peter, R., Petravić, M., Macan, J., & Rengel, Z. (2021). Biomass bottom ash & dolomite similarly ameliorate an acidic low-nutrient soil, improve phytonutrition and growth, but increase Cd accumulation in radish. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141902>
- Oo, A. Z., Sudo, S., Akiyama, H., Win, K. T., Shibata, A., Yamamoto, A., Sano, T., & Hirono, Y. (2018). Effect of dolomite and biochar addition on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from acidic tea field soil. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192235>
- Ramtahal, G., Umaharan, P., Hanuman, A., Davis, C., & Ali, L. (2019). The effectiveness of soil amendments, biochar and lime, in mitigating cadmium bioaccumulation in *Theobroma cacao* L. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.369>
- Resmi, G., Thampi, S. G., & Chandrakaran, S. (2023). Heavy Metal Removal from Contaminated Soil Using Soil Washing Techniques. *Nature Environment and Pollution Technology*. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.V22I01.011>
- Shi, L., Guo, Z., Peng, C., Xiao, X., Feng, W., Huang, B., & Ran, H. (2019). Immobilization of cadmium and improvement of bacterial community in contaminated soil following a continuous amendment with lime mixed with fertilizers: A four-season field experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.006>
- Shrestha, P., Salzl, M. T., Jimenez, I. J., Pradhan, N., Hay, M., Wallace, H. R., Abrahamson, J. N., & Small, G. E. (2019). Efficacy of spent lime as a soil amendment for nutrient retention in bioretention green stormwater infrastructure. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w11081575>
- Sukyankij, S., Sukyankij, S., & Panich-Pat, T. (2023). Effect of Co-Fertilizer Application and Dolomite Amendments on Yield and Grain Quality of Rice Grown on Post-Active Acid Sulfate Soil. *Agrivita*. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v45i2.4079>
- Vrinceanu, N. O., Motelică, D. M., Dumitru, M., Calciu, I., Tănase, V., & Preda, M. (2019). Assessment of using bentonite, dolomite, natural zeolite and manure for the

- immobilization of heavy metals in a contaminated soil: The Copșa Mică case study (Romania). *Catena*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.015>
- Wang, G., Zhang, Q., Du, W., Lin, R., Li, J., Ai, F., Yin, Y., Ji, R., Wang, X., & Guo, H. (2021). In-situ immobilization of cadmium-polluted upland soil: A ten-year field study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111275>
- Wang, H., Wang, L., Yang, B., Li, X., Hou, R., Hu, Z., & Hou, D. (2023). Sustainable soil remediation using mineral and hydrogel: field evidence for metalloids immobilization and soil health improvement. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03541-8>
- Wang, Z., Wang, H., Wang, H., Li, Q., & Li, Y. (2020). Effect of soil washing on heavy metal removal and soil quality: A two-sided coin. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110981>
- Warner, J. M., Mann, M. L., Chamberlin, J., & Tizale, C. Y. (2023). Estimating acid soil effects on selected cereal crop productivities in Ethiopia: Comparing economic cost-effectiveness of lime and fertilizer applications. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280230>
- Wu, H., Hu, J., Shaaban, M., Xu, P., Zhao, J., & Hu, R. (2021). The effect of dolomite amendment on soil organic carbon mineralization is determined by the dolomite size. *Ecological Processes*. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00278-x>
- Xiao, R., Huang, Z., Li, X., Chen, W., Deng, Y., & Han, C. (2017). Lime and phosphate amendment can significantly reduce uptake of Cd and Pb by field-grown rice. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su9030430>
- Yu, X., Zhou, T., Zhao, J., Dong, C., Wu, L., Luo, Y., & Christie, P. (2021). Remediation of a metal-contaminated soil by chemical washing and repeated phytoextraction: a field experiment. *International Journal of Phytoremediation*. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1840509>
- Zhan, Y., Jiang, K., Jiang, J., Zhang, L., Gao, C., Qi, X., Fan, J., Li, Y., Sun, S., & Fan, X. (2022). Soil Aggregate Construction: Contribution from Functional Soil Amendment Fertilizer Derived from Dolomite. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su141912287>
- Zhang, S., Zhu, Q., de Vries, W., Ros, G. H., Chen, X., Muneer, M. A., Zhang, F., & Wu, L. (2023). Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531>
- Zheng, J., Luan, L., Luo, Y., Fan, J., Xu, Q., Sun, B., & Jiang, Y. (2022). Biochar and lime amendments promote soil nitrification and nitrogen use efficiency by differentially mediating ammonia-oxidizer community in an acidic soil. *Applied Soil Ecology*. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104619>
- Zhou, J., Deng, X., Yu, Y., Dai, S., & Yuan, J. (2019). Aluminum accumulation and release and the alleviating effects of biochar and lime as soil amendments in camellia oleifera leaves. *Taiwan Journal of Forest Science*.
- Zwolak, A., Sarzyńska, M., Szpyrka, E., & Stawarczyk, K. (2019). Sources of Soil Pollution by Heavy Metals and Their Accumulation in Vegetables: a Review. In *Water, Air, and Soil Pollution*. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4221-y>