



**Facultad de Ciencias de la Vida**

Contenido de Cadmio en Arroz: relación suelo-planta en fincas de Daule  
y Nobol - Ecuador

VIDA-436

**Proyecto Integrador**

**Previo la obtención del Título de:**

Ingeniería Agrícola y Biológica

**Presentado por:**

Benjamín Argelis Núñez Ramos

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## **Dedicatoria**

---

El presente proyecto lo dedico a mi hermano mayor, José, por marcar siempre el camino y ayudarme a seguirlo; a mis hermanas, Natasha y María, por su constante apoyo; y, a mis padres, Narcisa y Argely por su amor y enseñanzas, que me han permitido llegar hasta aquí y no rendirme.

Asimismo, deseo dedicar este proyecto al PhD. Eduardo Chávez, a la Ing. Yesenia Pacheco, al Ing. Diego Villa y MSc. Luis Vaca, por la confianza y oportunidades brindadas, que me han dejado enseñanzas muy valiosas.

## Agradecimientos

---

Quiero agradecer a la PhD María Isabelita Jiménez por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación. A mis amigos y compañeros del Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de la ESPOL, por su paciencia y apoyo incondicional. A la Mgtr. Diana Vega Quezada por su valiosa ayuda en la escritura de este documento. También a la Ing. Ana Piña, por su colaboración en el acercamiento a los productores de arroz. Y, por supuesto, a mis gatos, por arrancarme siempre una sonrisa.

Finalmente, agradezco a mi familia, amigos y compañeros de la carrera quienes estuvieron conmigo brindándome palabras de aliento para no rendirme. A todos ellos, muchas gracias.

## **Declaración Expresa**

---

Yo Benjamín Argelis Núñez Ramos acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, septiembre del 2025.

---

Benjamín Núñez Ramos

## **Evaluadores**

---

**PhD. Maria Isabelita Jimenez Feijoo**

Profesor de Materia

---

**PhD. Eduardo Francisco Chávez Navarrete**

Tutor de proyecto

## Resumen

El arroz constituye uno de los principales productos agrícolas de la región Costa del Ecuador y un alimento fundamental en la dieta nacional, por lo que resulta prioritario garantizar su inocuidad frente a contaminantes como el cadmio (Cd). Este proyecto tuvo como objetivo evaluar la concentración de Cd en la planta de arroz y en los suelos donde es cultivado, con la finalidad de identificar patrones de absorción y acumulación en relación con propiedades edáficas y prácticas agronómicas. Para ello se recolectaron muestras de suelo y tejido vegetal de doce fincas de los cantones de Daule y Nobol, analizadas mediante fluorescencia monocromática de rayos X de bajo consumo (HDXRF); este proceso fue complementado con técnicas estandarizadas de caracterización química y control de calidad. Los granos presentaron concentraciones por debajo de 0.10 mg/kg, cumpliendo los límites establecidos por la FAO y la UE. Además, se evidenció una correlación positiva ( $r=0.71$ ) entre el contenido total de Cd y zinc (Zn), así como una disminución de Cd en raíces asociada a la aplicación de encalados. En conclusión, el arroz producido en las fincas estudiadas cumple con los parámetros de inocuidad, y el manejo agronómico tiene potencial de incidencia en la reducción de la acumulación de Cd.

**Palabras Clave:** Inocuidad, suelos agrícolas, HDXRF, encalados

## ***Abstract***

*Rice is one of the main agricultural products in the coastal region of Ecuador and a staple food in the national diet; therefore, ensuring its safety against contaminants such as cadmium (Cd) is a priority. This study aims to evaluate Cd concentration in rice plants and agricultural soils to identify absorption and accumulation patterns in relation to edaphic properties and agronomic practices. Soil and plant tissue samples were collected from twelve farms located in the cantons of Daule and Nobol and analyzed using low-powder monochromatic X-ray fluorescence (HDXRF), complemented with standardized chemical characterization techniques and quality control procedures. The results showed that rice grains contained Cd concentrations below 0.10 mg/k, meeting the limit established by FAO and the EU. A positive correlation ( $r=0.71$ ) was observed between total Cd and zinc (Zn) in soils, while a reduction of Cd in roots was associated with liming practices. In conclusion, rice produced in the studied farms complies with food safety standards, and agronomic management practices influence Cd accumulation reduction.*

*Keywords: Safety, agricultural soils, HDXRF, liming*

# ÍNDICE

|                                                 |      |
|-------------------------------------------------|------|
| Resumen .....                                   | V    |
| <i>Abstract</i> .....                           | VI   |
| Abreviaturas .....                              | X    |
| Simbología .....                                | XI   |
| Índice de Figuras .....                         | XIII |
| Índice de Tablas .....                          | XIV  |
| Capítulo 1 .....                                | 2    |
| 1.1    Introducción .....                       | 2    |
| 1.2    Descripción del Problema .....           | 3    |
| 1.3    Justificación del Problema .....         | 4    |
| 1.4    Objetivos .....                          | 5    |
| 1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....             | 5    |
| 1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....        | 5    |
| 1.5    Marco teórico .....                      | 6    |
| 1.5.1    Inocuidad agroalimentaria.....         | 6    |
| 1.5.2    Cultivo de arroz.....                  | 6    |
| 1.5.3    Cultivo de arroz en el Guayas .....    | 9    |
| 1.5.4    El cadmio en suelos agrícolas .....    | 10   |
| 1.5.5    Efecto del cadmio en las plantas ..... | 11   |

|                |                                                                                            |    |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.5.6          | Translocación del cadmio en las plantas de arroz .....                                     | 12 |
| 1.5.7          | Fluorescencia de rayos X de alta definición (HDXRF) para análisis de metales pesados ..... |    |
| 1.5.8          | Límites máximos de Cd en arroz.....                                                        | 14 |
| Capítulo 2     | .....                                                                                      | 16 |
| 2. Metodología | .....                                                                                      | 17 |
| 2.1.           | Muestreo.....                                                                              | 18 |
| 2.1.1          | Recolección de muestras .....                                                              | 18 |
| 2.1.2          | Preprocesamiento y procesamiento de muestras .....                                         | 20 |
| 2.1.3          | Elaboración de entrevistas.....                                                            | 23 |
| 2.2            | Análisis.....                                                                              | 24 |
| 2.2.1          | Determinación de características químicas del suelo .....                                  | 24 |
| 2.2.2          | Análisis de partes vegetales (hojas, tallos, raíces y granos de arroz).....                | 25 |
| 2.2.3          | Análisis estadístico .....                                                                 | 27 |
| Capítulo 3     | .....                                                                                      | 28 |
| 3.1.           | Resultados .....                                                                           | 29 |
| 3.1.1.         | Ubicaciones georreferenciadas.....                                                         | 29 |
| 3.1.2.         | Resultados de suelos.....                                                                  | 30 |
| 3.1.3          | Resultados tejidos.....                                                                    | 34 |
| 3.1.4          | Resultados encuestas .....                                                                 | 38 |
| Capítulo 4     | .....                                                                                      | 43 |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 4.1 Conclusiones y recomendaciones..... | 44 |
| <i>4.1.1 Conclusiones</i> .....         | 44 |
| <i>4.1.2 Recomendaciones</i> .....      | 44 |
| 4. Bibliografía.....                    | 46 |

## Abreviaturas

|         |                                                                           |
|---------|---------------------------------------------------------------------------|
| FAO     | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura |
| OMS     | Organización Mundial de la Salud                                          |
| UE      | Unión Europea                                                             |
| ODS     | Objetivos de Desarrollo Sostenible                                        |
| CE      | Conductividad Eléctrica                                                   |
| HDXRF   | Fluorescencia monocromática de rayos X de bajo consumo                    |
| ICP-OES | Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente       |
| CRM     | Material de Referencia Certificado                                        |
| BLD     | Por debajo del límite de detección                                        |
| LOQ     | Límite de cuantificación                                                  |
| JMP     | Software de análisis estadístico                                          |
| GPS     | Sistema de Posicionamiento Global                                         |
| FAO     | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura |
| OMS     | Organización Mundial de la Salud                                          |
| Cps     | Cuentas por segundo                                                       |

## Simbología

|                                                                           |                     |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| K                                                                         | Potasio             |
| Ca                                                                        | Calcio              |
| Cr                                                                        | Cromo               |
| Mn                                                                        | Manganeso           |
| Fe                                                                        | Hierro              |
| Ni                                                                        | Níquel              |
| Cu                                                                        | Cobre               |
| Zn                                                                        | Zinc                |
| As                                                                        | Arsénico            |
| Cd                                                                        | Cadmio              |
| Pb                                                                        | Plomo               |
| Mg                                                                        | Magnesio            |
| Na                                                                        | Sodio               |
| C                                                                         | Carbono             |
| P                                                                         | Fósforo             |
| H <sup>+</sup>                                                            | Ion hidrógeno       |
| OH <sup>-</sup>                                                           | Ion hidroxilo       |
| Fe <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> | Cationes divalentes |

|                  |                                 |
|------------------|---------------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de carbono              |
| H <sub>2</sub> O | Agua                            |
| pH               | Potencial de Hidrógeno          |
| mg/kg            | Miligramo por kilogramo         |
| ppm              | Partes por millón               |
| %                | Porcentaje                      |
| μS/cm            | Microsiemens por centímetro     |
| mS/cm            | Milisiemens por centímetro      |
| dS/m             | Decisiemens por metro           |
| PSU              | Unidades Prácticas de Salinidad |
| ml               | Mililitro                       |
| g                | Gramo                           |
| cm               | Centímetro                      |
| mm               | Milímetro                       |
| μm               | Micrómetro                      |
| °C               | Grado Celsius                   |
| rpm              | Revoluciones por minuto         |
| n                | Número de muestras              |
| CV               | Coefficiente de variación       |

# Índice de Figuras

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1</b> <i>Morfología de la planta de arroz</i> .....                                                                           | 7  |
| <b>Figura 1.2</b> <i>Etapas fenológicas del arroz</i> .....                                                                               | 8  |
| <b>Figura 1.3</b> <i>Translocación del Cd en la planta de arroz</i> .....                                                                 | 13 |
| <b>Figura 2.1</b> <i>Metodología para la evaluación de cadmio en suelo y granos de arroz</i> .....                                        | 18 |
| <b>Figura 2.2</b> <i>Mapa de los cantones donde se realizaron los muestreos</i> .....                                                     | 20 |
| <b>Figura 2.3</b> <i>Recolección de muestras de suelo en fincas de arroz</i> .....                                                        | 21 |
| <b>Figura 2.4</b> <i>Preprocesamiento de muestras de tejido</i> .....                                                                     | 22 |
| <b>Figura 2.5</b> <i>Trituración de muestras de suelo.</i> .....                                                                          | 22 |
| <b>Figura 2.6</b> <i>Etiquetado de muestras procesadas</i> .....                                                                          | 23 |
| <b>Figura 2.7</b> <i>Medición de concentración de Cd y otros elementos en E-max</i> .....                                                 | 27 |
| <b>Figura 3.1</b> <i>Distribución espacial de las fincas seleccionadas para el presente estudio</i> .....                                 | 29 |
| <b>Figura 3.2</b> <i>Correlación de contenido total de Cd con hierro (Fe) y zinc (Zn)</i> .....                                           | 34 |
| <b>Figura 3.3</b> <i>Diagrama de cajas de concentración de Cd en varias partes de la planta</i> .....                                     | 36 |
| <b>Figura 3.4</b> <i>Concentración media de Cd <math>\pm</math> Ds (desviación estándar) en cada organelo de la planta de arroz</i> ..... | 37 |
| <b>Figura 3.5</b> <i>Número de fertilizaciones aplicadas</i> .....                                                                        | 39 |
| <b>Figura 3.6</b> <i>Aplicación de encalados y pH del suelo.</i> .....                                                                    | 40 |
| <b>Figura 3.7</b> <i>Concentración de Cd en raíces en relación con la aplicación de encalados o correctores de suelo.</i> .....           | 41 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 3.8</b> <i>Manejo post cosecha de los agricultores encuestados.</i> ..... | 42 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|

## Índice de Tablas

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.1</b> <i>Limites permisibles para Cd de acuerdo con las entidades reguladoras</i> .....                     | 15 |
| <b>Tabla 2.1</b> <i>Cantidad de muestras recolectadas</i> .....                                                        | 19 |
| <b>Tabla 2.2</b> <i>Concentraciones para material de referencia SAN JOAQUIN</i> .....                                  | 24 |
| <b>Tabla 1.3</b> <i>Concentraciones para material de referencia MONTANA I</i> .....                                    | 25 |
| <b>Tabla 2.4</b> <i>Concentraciones para material de referencia NIST 1573a</i> .....                                   | 26 |
| <b>Tabla 2.5</b> <i>Concentraciones para material de referencia NIST 1570a</i> .....                                   | 26 |
| <b>Tabla 3.1</b> <i>Estadística descriptiva (n = 15) de las propiedades químicas de los suelos muestreados</i> .....   | 31 |
| <b>Tabla 3.2</b> <i>Estadística descriptiva (n = 15) de las concentraciones de micronutrientes en los suelos</i> ..... | 31 |
| <b>Tabla 3.3</b> <i>Estadística descriptiva (n=15) de las concentraciones de metales pesados en los suelos.</i> .....  | 32 |

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

El arroz es uno de los alimentos más consumidos en el mundo, proporcionando alrededor del 20% del suministro de energía a nivel global (FAO Food and Nutrition Division, 2004). En Ecuador, en el 2020 el consumo anual de este cereal era de 50 kilogramos por persona (Sánchez, Vayas, Mayorga, & Freire, 2020), convirtiéndolo así en uno de los alimentos esenciales en la dieta de los ecuatorianos.

Además de su importancia alimentaria, el arroz desempeña un rol clave en la economía rural del país. De acuerdo con datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2023), aproximadamente 74,080 personas estuvieron involucradas en su proceso productivo; por otra parte, el 51% de los productores cultiva superficies menores a 11 hectáreas. Esto evidencia que una parte significativa de los pequeños y medianos productores dependen de este cultivo como principal fuente de ingreso.

En el año 2022 la producción nacional alcanzó alrededor de 1,561 toneladas, siendo Guayas la provincia líder en el cultivo con una producción de 940.57 mil toneladas, concentrando más del 60% del total de la producción nacional en el año 2021 (Corporación Financiera Nacional, 2024).

No obstante, la intensificación agrícola necesaria para alcanzar estos niveles de producción requiere el uso constante de fertilizantes inorgánicos y pesticidas. La aplicación inadecuada y la presencia de contaminantes en estos insumos pueden provocar la contaminación de los suelos con metales pesados como el arsénico (As) y el cadmio (Cd), representando un riesgo para la salud humana y seguridad alimentaria.

En particular, el Cd puede ingresar al ambiente agrícola a través de fuentes antropogénicas y geogénicas. Este metal se desplaza en el suelo mediante procesos como la

escorrentía y la erosión, llegando a contaminar cuerpos de agua utilizados para el riego. Además, posee la capacidad de reaccionar con otros elementos y formas compuestos estables que le permiten persistir en el suelo durante largos periodos, lo cual puede reducir el rendimiento del cultivo debido a su toxicidad para las plantas (Bayona, 2020).

A pesar de la relevancia del arroz en la dieta y la economía ecuatoriana, existe escasa información sobre los niveles de Cd y otros contaminantes presentes en los suelos arroceros y en el grano que se comercializa. Esta falta de datos limita la capacidad para evaluar riesgos y establecer estrategias preventivas. Por este motivo, a través de esta investigación se busca aportar evidencia científica que contribuya a un manejo más sostenible del cultivo y fortalezca la inocuidad alimentaria en el país.

## **1.2 Descripción del Problema**

La región Costa del Ecuador se destaca por su alta productividad agrícola, siendo responsable de una parte significativa del abastecimiento nacional de alimentos. Dentro de esta región, el cultivo de arroz representa un componente clave tanto para la seguridad alimentaria del país como para la economía rural. Debido a esto, es esencial no solo asegurar la productividad del cultivo, sino también la inocuidad del grano que llega al consumidor final.

Una de las amenazas que comprometen la calidad e inocuidad del arroz es la contaminación del suelo por metales pesados, especialmente el Cd. Este contaminante puede estar presente en los suelos como resultados de actividades antropogénicas como la minería ilegal, uso de fertilizantes fosfatados, agua de riego contaminadas o prácticas agrícolas no sostenibles. Este metal es absorbido por las raíces de la planta de arroz y puede trasladarse hasta el grano en concentraciones superiores a los límites establecidos por entidades reguladoras, representando un riesgo directo para la salud humana al ser consumido en cantidades importantes y de forma regular.

El presente estudio se centra en analizar la concentración de cadmio en suelos y muestras de arroz obtenidas en campos de producción ubicados en la provincia del Guayas. De esta forma, las variables de interés son: la concentración de Cd en suelo, en el grano de arroz, tipo de manejo agrícola y características físicoquímicas del suelo. Estas variables están relacionadas directamente con el comportamiento del metal en el sistema suelo-planta.

Este problema es susceptible de observación, análisis y medición a través de metodologías de muestreo de suelos y análisis instrumental, lo que permite establecer relaciones cuantificables entre las prácticas agrícolas y los niveles de contaminación por Cd en arroz.

### **1.3 Justificación del Problema**

La inocuidad alimentaria es esencial para consumir alimentos de calidad que no pongan en riesgo la salud de las personas. En Ecuador, existe poca información acerca del riesgo de consumir alimentos contaminados por metales pesados como el Cd, cuya acumulación puede comprometer la inocuidad del grano y la salud de los consumidores; en estudios realizados recientemente en ESPOL se identifica que, el principal aporte de Cd en la dieta de los ecuatorianos es el arroz.

El Cd es un metal pesado tóxico tanto para las plantas como para las personas, el cual puede alojarse en los granos de arroz a través de su absorción por medio de las raíces de la planta. La exposición crónica a este metal, incluso en concentraciones bajas puede afectar los riñones, el sistema esquelético y respiratorio, además de que se lo considera un cancerígeno (Organización Mundial de la Salud, 2019). A nivel internacional, organismos como la Comisión del Codex Alimentarius y la Unión Europea han establecido límites máximos permitidos en alimentos, incluyendo el arroz. No obstante, en el contexto ecuatoriano, la información sobre niveles actuales de cadmio en zonas productoras es escasa o inexistente.

Desde el punto de vista técnico y productivo, esta investigación beneficiará a los productores agrícolas al brindarles información útil para conocer los niveles de Cd en los suelos y la transferencia a las plantas de arroz, así como, algunas posibles alternativas agronómicas que podrían emplear para reducir la translocación a la planta. De este modo, el estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 3: Salud y Bienestar, al promover la disponibilidad de alimentos seguros para el consumo humanos, y con el ODS 12: Producción y Consumo Responsables, al fomentar prácticas agrícolas sostenibles que minimicen el impacto ambiental y garanticen la calidad de los productos alimentarios.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Evaluar la relación entre el contenido de cadmio (Cd) en la planta de arroz y los suelos agrícolas donde es cultivado para la identificación de factores edáficos y de manejo agronómico que influyen en su absorción y acumulación, garantizando la inocuidad del grano.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Diseñar un plan de muestreo para la recolección de muestras de suelo y granos de arroz en zonas seleccionadas de la provincia del Guayas.
- Aplicar técnicas analíticas estandarizadas de laboratorio para la cuantificación del contenido de cadmio (Cd) en muestras de suelo y planta, que incluyen granos de arroz.
- Analizar los resultados obtenidos para la identificación de patrones de concentración de cadmio y su posible relación con las características fisicoquímicas del suelo o prácticas de manejo agrícola.
- Recomendar potenciales alternativas de manejo agronómico para sitios con concentraciones de Cd superiores a lo recomendado por entidades de regulación.

## **1.5 Marco teórico**

### **1.5.1 Inocuidad agroalimentaria**

La inocuidad de los alimentos está directamente relacionada con su calidad, la cual tiene como finalidad garantizar la seguridad de las personas e incentivar prácticas sostenibles para la producción agropecuaria (Guzmán & Martínez, 2024). La inocuidad debe garantizar el bienestar de las personas desde que se preparan como cuando se consumen los alimentos.

Los alimentos pueden contaminarse a lo largo de la cadena de suministros, ya sea por factores ambientales como el suelo, el agua, aire o por factores antropogénicos, como el contacto con equipos y superficies utilizadas durante la producción, elaboración, transporte y almacenamiento, representando un riesgo significativo para la salud humana.

Por ello, es fundamental la implementación de medidas higiénicas y controles de calidad que aseguren la inocuidad de los alimentos desde su origen hasta su consumo final, reduciendo así la probabilidad de contraer enfermedades transmitidas por alimentos y certificando productos de alta calidad, aptos para el mercado nacional e internacional (Olivo, González, & Franco, 2023).

### **1.5.2 Cultivo de arroz**

**1.5.2.1 Morfología.** La planta de arroz (*Oryza sativa*) presenta una morfología característica de las gramíneas, compuesta por órganos vegetativos (raíces, tallos, hojas) y reproductivos (panícula y grano), cuya estructura y funcionamiento influyen directamente en la absorción y translocación de nutrientes.

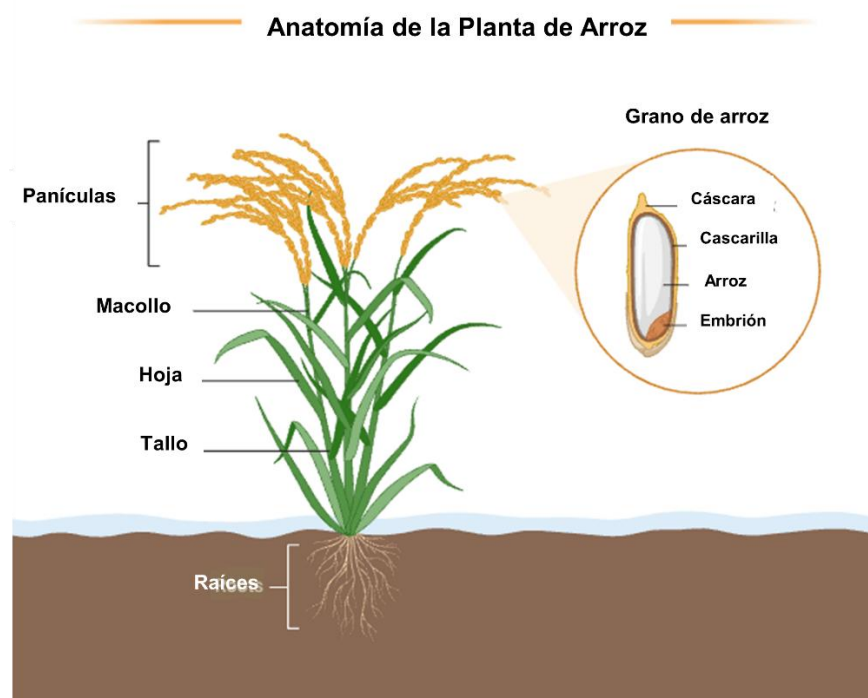
El sistema radicular se encarga de la absorción de agua y nutrientes, y está formado por una raíz primaria y raíces adventicias que emergen de los nudos del tallo. Estas últimas juegan un papel importante en la absorción de elementos del suelo.

El tallo es cilíndrico, hueco entre sus nudos y permite el transporte de agua y nutrientes través del xilema y floema. A partir del tallo se forman estructuras secundarias llamadas macollos, que contribuyen al desarrollo vegetativo.

Las hojas están compuestas por una vaina y una lámina lanceolada, siendo fundamentales para la fotosíntesis. La inflorescencia, conocida como panícula, contiene las espiguillas que producen el grano (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2021).

### Figura 1.1

*Morfología de la planta de arroz*



*Nota.* Imagen adaptada de Eunice Huang, vía BioRender.com.

**1.5.2.2 Fenología.** La fenología del arroz se divide en tres fases principales: vegetativa, reproductiva y de maduración. Estas fases son relevantes para comprender la absorción y translocación de nutrientes en la planta, ya que la movilidad de estos dentro de la planta varía según el estado fenológico del cultivo.

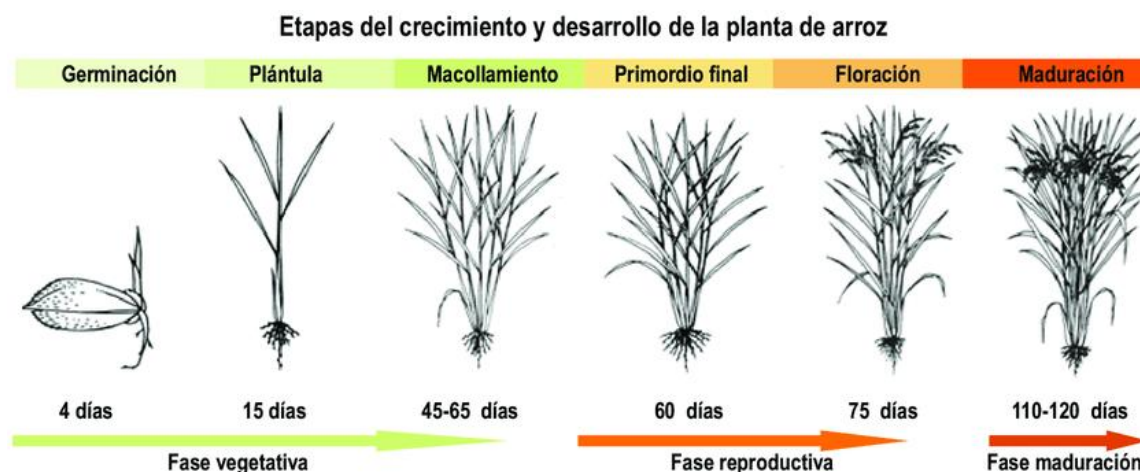
La fase vegetativa inicia con la germinación de la semilla (7 a 8 días) y se extiende hasta la diferenciación del primordio floral, abarcando entre 30 y 50 días. Durante este periodo se desarrollan las hojas, raíces y los macollos, estructuras que forman nuevos tallos. Esta fase se ve favorecida por las altas temperaturas y una buena disponibilidad hídrica.

La fase reproductiva comienza con la formación del primordio floral y culmina en la floración. En este estadio se produce el embuchamiento y el llenado inicial de las espiguillas, momento en el cual se incrementa el transporte de nutrientes desde las raíces hasta la parte aérea de la planta.

Finalmente, la fase de maduración comprende desde la floración hasta la madurez fisiológica del grano. Luego de la polinización, el grano pasa por etapas de desarrollo: lechoso, pastoso y maduro (Miguel, 2021).

**Figura 1.2**

*Etapas fenológicas del arroz*



*Nota.* Imagen de Quirós MCIntire (2005) en ResearchGate

### **1.5.3 Cultivo de arroz en el Guayas**

En el Ecuador, el Guayas es la provincia con mayor producción, con una superficie cultivada de 56.275 hectáreas y un rendimiento de 5.79 t/ha. Además, debido a sus condiciones climáticas y ubicación geográfica se caracteriza por realizar hasta 3 ciclos del cultivo por año.

El arroz se puede sembrar de 3 formas distintas: transición, orgánica y convencional, sin embargo, la mayoría de los productores la realizan de forma convencional. En esta provincia, el 65.28% de los productores optan por usar semillas recicladas en lugar de las que poseen certificación, teniendo una procedencia de casi el 40% de otros productores del sector. De esta forma, las variedades más utilizadas para la siembra son la SFL-11 (48.61%), FERÓN (13.89%) y INIAP 11 (11.11%).

Durante el ciclo del cultivo, se usan hasta 15000 m<sup>3</sup>/ha de agua y durante invierno el agua requerida por el cultivo es aportada por la lluvia, lo que se conoce como arroz de secano (INIAP, 2023). El sistema de riego usado es por gravedad donde se produce la inundación de la parcela. Sin embargo, un tercio de los productores (35.16%) no poseen un sistema de riego. En este contexto, el 37.29% de productores utiliza mecanización para preparar el riego por gravedad, mientras que el resto lo realiza de forma manual.

La fertilización se la realiza de una a 3 aplicaciones por ciclo, a pesar de esto, la mayoría de los productores realizan entre 2 y 3 fertilizaciones. De esta forma, la aplicación promedio de nutrientes en kg/ha es de 90 para nitrógeno, 17 para fósforo y 24 para el potasio (Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), 2024).

#### **1.5.4 El cadmio en suelos agrícolas**

En investigaciones internacionales, se reporta que las principales fuentes de contaminación por Cd en suelos destinados al cultivos de arroz corresponden a actividades antropogénicas como la aplicación de fertilizantes fosfatados, los cuales pueden contribuir hasta con un al 56% del total de Cd presente en suelos agrícolas (Wang, y otros, 2021). Además, de la deposición atmosférica y actividades como la minería que pueden contaminar el agua del riego (Liang, y otros, 2017).

El cadmio se lo puede encontrar en varias formas químicas en el suelo, sin embargo, las que representan un riesgo para las plantas son las formas solubles e intercambiables como es el Cd unido a óxidos de Fe-Mn, carbonatos y a la materia orgánica. Además, debemos entender que la disponibilidad de Cd en el suelo va a depender de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Liu, y otros, 2020).

Toda esta información corresponde a estudios en países como China. Hasta el momento, no se han realizado estudios que evalúen la concentración de Cd en la producción de arroz en el Ecuador. No obstante, de acuerdo con Alloway (2010), el promedio mundial de este metal en suelos es de aproximadamente 0.2 mg/kg, valor que suele emplearse como referencia para comparar niveles de contaminación en diferentes regiones.

#### **1.5.4.1 Relación de la disponibilidad de Cd con las propiedades fisicoquímicas**

**del suelo.** En general, a mayor pH del suelo (valores superiores a 6.0), la disponibilidad del Cd disminuye debido a procesos de precipitación y absorción a partículas del suelo. Por el contrario, en suelos ácidos, el Cd tiende a encontrarse en formas más solubles e intercambiables, lo que incrementa su absorción por las raíces (*Kulsum, y otros, 2023*).

La materia orgánica también cumple un rol importante, ya que puede dificultar o absorber iones de Cd, inmovilizándolos temporalmente a través de complejos metálicos. Sin embargo, esta capacidad depende de la calidad de la materia orgánica, el pH y las condiciones microbianas (Ali, y otros, 2020).

Por otro lado, el potencial redox (Eh) del suelo regula las condiciones de oxidación y reducción, especialmente en suelos inundados como los que se usan en el cultivo de arroz. Bajo condiciones reductoras (bajo Eh), es común la formación de sulfuro de cadmio (CdS), un compuesto insoluble que disminuye la biodisponibilidad del metal. No obstante, estas condiciones varían a lo largo del ciclo del cultivo (Lin, He, Gary, & Zuliang, 2021).

Finalmente, en suelos oxisoles, los cuales son altamente meteorizados y con altas concentraciones de óxidos de Fe y Mn, el Cd se absorbe fuertemente a estos compuestos mediante la sorción. Por lo que, en este tipo de suelos con un pH ácido los óxidos pueden liberar el Cd y aumentar su disponibilidad (Wang, Wang, Gu, Kopittke, & Zhao, 2019).

#### **1.5.5 Efectos de la intoxicación de cadmio en las plantas**

El Cd en las plantas puede causar retraso en el crecimiento y el enraizamiento, en esta última, el cadmio cambia la morfología de las raíces, volviéndolas mucilaginosas, de una tonalidad parda y disminuyendo el rango de las raíces laterales, además de curvar las raíces

principales. Otro de los efectos que tiene el cadmio en la morfología es en la parte apical de la planta, provocando una disminución del crecimiento.

El Cd también afecta a la nutrición de la planta, ya que reduce la absorción, transporte translocación de macronutrientes (calcio, fosforo y magnesio), y micronutrientes (azufre, hierro, zinc, boro, etc.).

### **1.5.6 Translocación del cadmio en las plantas de arroz**

El cadmio (Cd) es absorbido por las plantas en su forma iónica ( $\text{Cd}^{2+}$ ) y en  $\text{CdCl}_2$ , principalmente a través de las raíces. Este proceso se ve facilitado por la presencia de transportadores que reconocen otros cationes divalentes como  $\text{Fe}^{2+}$   $\text{Zn}^{2+}$   $\text{Mn}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Además, los ácidos orgánicos de bajo peso molecular exudados por las raíces pueden incrementar la solubilidad y absorción de Cd (Rizwan, y otros, 2017).

Una vez en la raíz, el Cd se almacena principalmente en las vacuolas o se une a las paredes celulares, lo que actúa como mecanismo de defensa de la planta. La proteína OsNRAMP5 (Proteína 5 de Macrófagos Asociada a la Resistencia Natural) regula su ingreso desde el suelo hasta el tejido radicular, sin embargo, su absorción se ve favorecida por su expresión (Zhang, y otros, 2022).

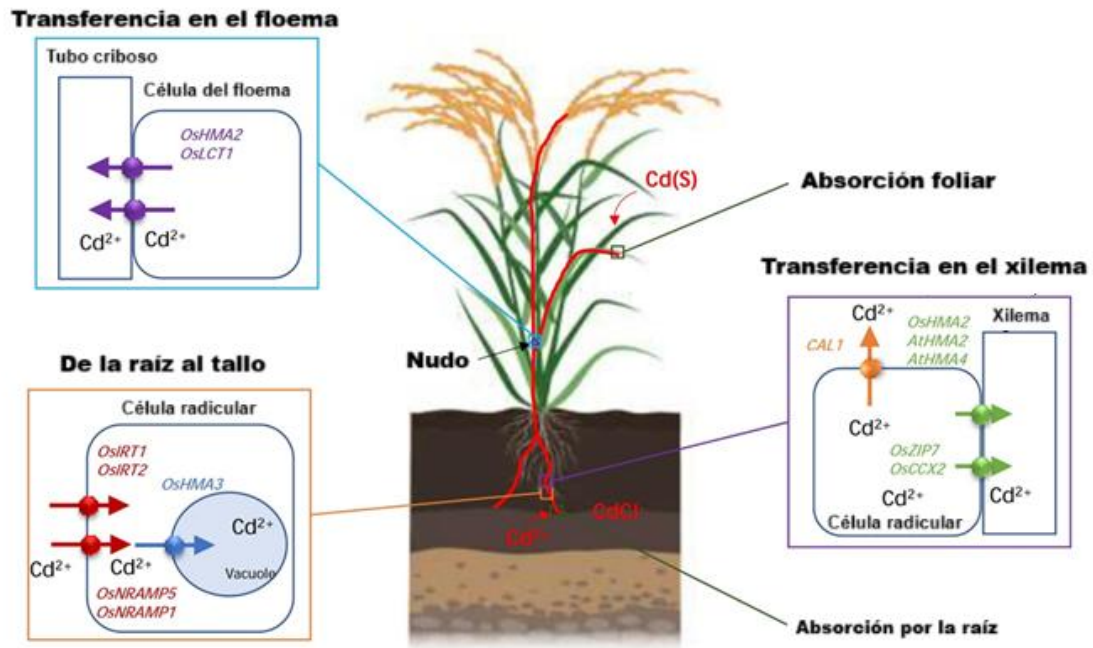
Posteriormente, el Cd es transportado hacia la parte aérea de la planta mediante el xilema, gracias a la acción del transportador OsHMA2 (asociada a la proteína *Oryza Sativa* heavy metal ATPasa 2), cuya sobreexpresión se asocia con una mayor translocación de Cd en los brotes (Yamaji, y otros, 2017). Por otra parte, el gen OsNramp1 actúa reteniendo parte del Cd en las hojas, regulando su paso hacia las estructuras reproductivas (Chang, y otros, 2020).

Durante el llenado del grano, se produce una transferencia de Cd desde el xilema al floema en los nudos del tallo, especialmente en el nudo superior cercano a la panícula. A partir

de allí, Cd puede alcanzar el grano de arroz a través de 2 rutas: directamente por el floema o pasando por la hoja bandera y el raquis de la panícula (Jing, y otros, 2023) Revisar esta cita.

**Figura 1.3**

*Translocación del Cd en la planta de arroz*



Nota: Adaptado al idioma español a partir de la figura de Zhao et al. (2023), Science of The Total Environment, 896, 165238.

### 1.5.7 Fluorescencia de rayos X de alta definición (HDXRF) para análisis de metales pesados

La fluorescencia de rayos X de alta definición (HDXRF) es una técnica analítica no destructiva que permite cuantificar la concentración de metales pesados como el Cadmio (Cd), Arsénico (As), Níquel (Ni) y Plomo (Pb), entre otros, de manera rápida, sencilla y precisa. Requiere menos de un gramo de muestra con un tamaño de partícula aproximado de 0.18 mm y un tiempo de medición cercano a los 600 segundos.

En esta técnica, las muestras son irradiadas con rayos X, lo que provoca la excitación de electrones en los orbitales internos. Cuando los electrones externos transitan hacia los niveles más cercanos al núcleo, se libera energía en forma de radiación fluorescente característica. Esta radiación es registrada como líneas espectrales propias de cada elemento, cuya intensidad está directamente relacionada con su concentración.

Además, la HDFRX determina la concentración elemental mediante el cálculo de las tasas de recuento (cuentas por segundo o cps) y su posterior correlación con las curvas de calibración específicas, lo que garantiza exactitud y reproducibilidad del análisis (Wang, Dong, Xiao, Hu, & Zh, 2022).

Dekeyrel (2024) propone 3 lecturas con un tiempo de medición de 200 segundos y un tamaño de partículas de  $500\mu\text{m}$  en muestras de tejido vegetal y suelos, ya que, con estas consideraciones se obtienen valores de coeficiente de variación inferiores al 15% y un límite de cuantificación (LOQ) de 0.102 mg/kg en muestras de tejido y 0.126 mg/kg en muestras de suelo.

### **1.5.8 Límites máximos de Cd en arroz**

Como ya se mencionó anteriormente, el cadmio tiene múltiples efectos negativos tanto en las plantas como en la salud humana. Por esta razón, organizaciones internacionales como la FAO y la Unión Europea (UE) han establecido normativas que definen los niveles máximos permitidos de contaminantes en los alimentos, incluidos los metales pesados.

En este trabajo se considerarán dos referencias normativas principales: el Codex Alimentarius, elaborado por la FAO y la OMS, y la regulación vigente de la Unión Europea. Estas normativas establecen los límites máximos de contaminantes que no se han añadido intencionalmente a los alimentos, pero que pueden estar presentes como resultado de la

producción, procesamiento, transporte y comercialización. Su objetivo es proteger la salud pública y fomentar buenas prácticas agrícola e industriales.

Los límites máximos establecidos para el contenido de Cd en arroz son los siguientes:

**Tabla 1.1**

*Limites permisibles para Cd de acuerdo con las entidades reguladoras*

| Entidad Reguladora | Concentración (mg/kg) | Observación                                                 |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------|
| Unión Europea      | 0.15                  | Reglamento (UE) 2023/915.<br>Aplica para arroz pulido.      |
| Codex Alimentarius | 0.4                   | Norma FAO/OMS (1995).<br>Aplica en general a todo<br>arroz. |

Nota: Los datos de la tabla fueron tomados de Codex Alimentarius (FAO & OMS, 1995) y del Reglamento (UE) 2023/915 (Unión Europea, 2023).

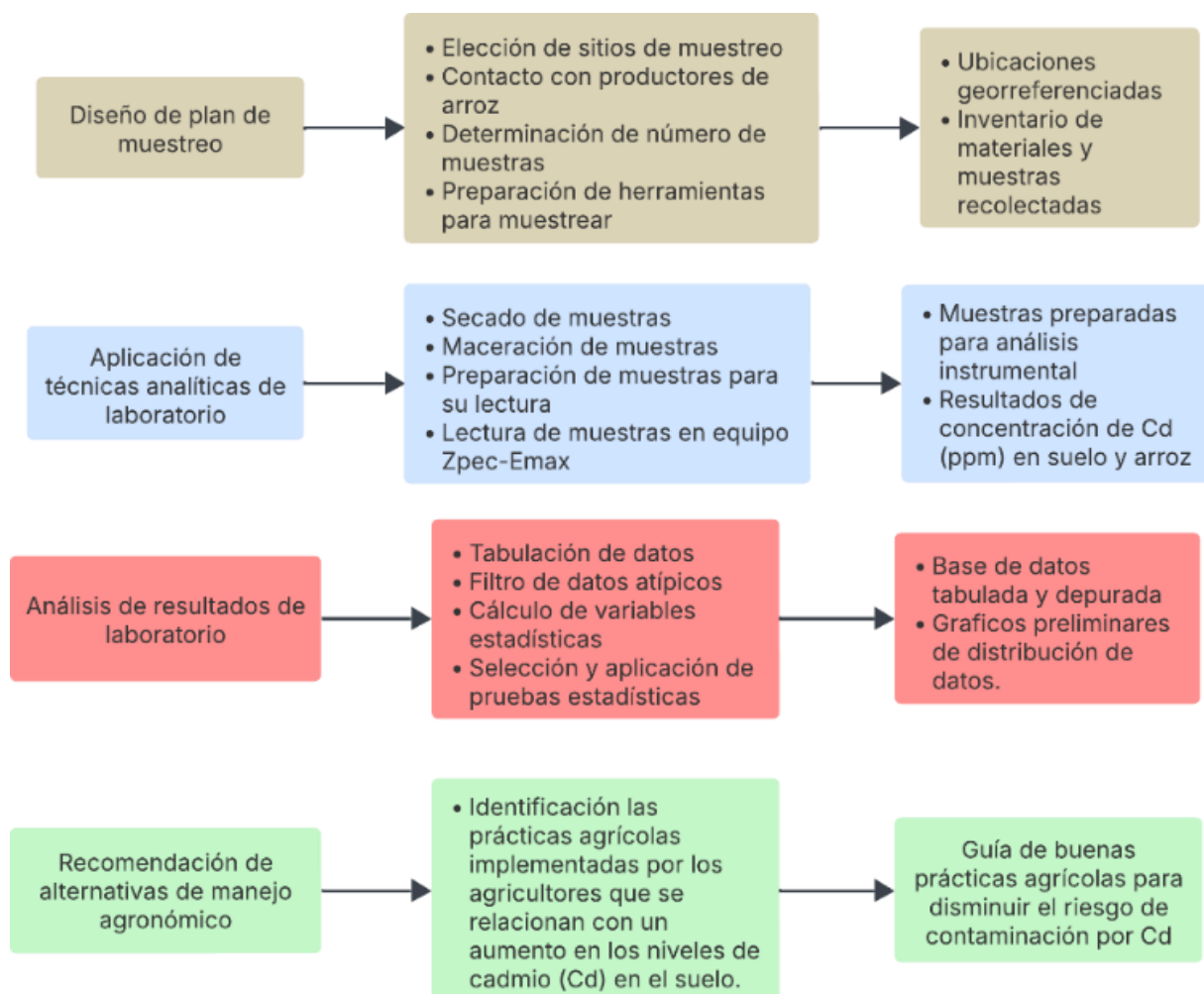
## **Capítulo 2**

## **2. METODOLOGÍA**

Para evaluar la relación entre el contenido de Cd en el grano de arroz y su concentración en suelos agrícolas de la provincia del Guayas, se implementó una metodología estructurada en cuatro fases. En primer lugar, se diseñó un plan de muestreo que contempló la selección de zonas productoras representativas y la planificación de la recolección de muestras de suelo y plantas de arroz. En segundo lugar, se realizó la recolección y conservación de las muestras bajo protocolos que garanticen su representatividad y eviten contaminaciones cruzadas. En la tercera fase, se aplicaron técnicas analíticas estandarizadas en laboratorio como el análisis de fluorescencia monocromática de rayos X de bajo consumo (HDXRF, EMAX, ZSpec, New Jersey, US). Y, finalmente, en la cuarta fase los resultados obtenidos fueron sometidos a análisis estadístico con el fin de establecer la relación entre la concentración de Cd en el suelo y el grano de arroz, así como verificar si los niveles presentes en el grano comercializado cumplían con los límites permisibles establecidos por organismos de regulación alimentaria.

**Figura 2.1**

*Metodología para la evaluación de cadmio en suelo y granos de arroz*



## 2.1. Muestreo

### 2.1.1 Recolección de muestras

Las muestras fueron recolectadas en la región costa de Ecuador, específicamente en la provincia de Guayas, en 12 fincas de los cantones de Nobol y Daule . De estas, se recolectaron alrededor de 15 muestras de suelo y 15 de plantas. Una vez recolectadas las muestras, se tomaron las coordenadas del punto de muestreo con ayuda del equipo Garmin GPS64st para su georreferenciación.

Para la toma de muestras de suelo se utilizó una pala, la cual se introdujo a una profundidad de 0 a 15 cm. Por cada muestra compuesta, se tomaron 2 submuestras provenientes de distintos puntos de la finca, las cuales fueron homogeneizadas en un balde plástico, obteniendo una muestra final.

La disponibilidad de muestras de tejido dependió del estado fenológico del cultivo en cada finca. Para ello, al igual que el suelo se realizó un muestreo destructivo de 2 plantas de arroz que se encontraban en la fase de maduración. Con las plantas ya recolectadas, se separaron hojas, tallos, granos con cascarilla y raíces, las cuales fueron lavadas con agua potable.

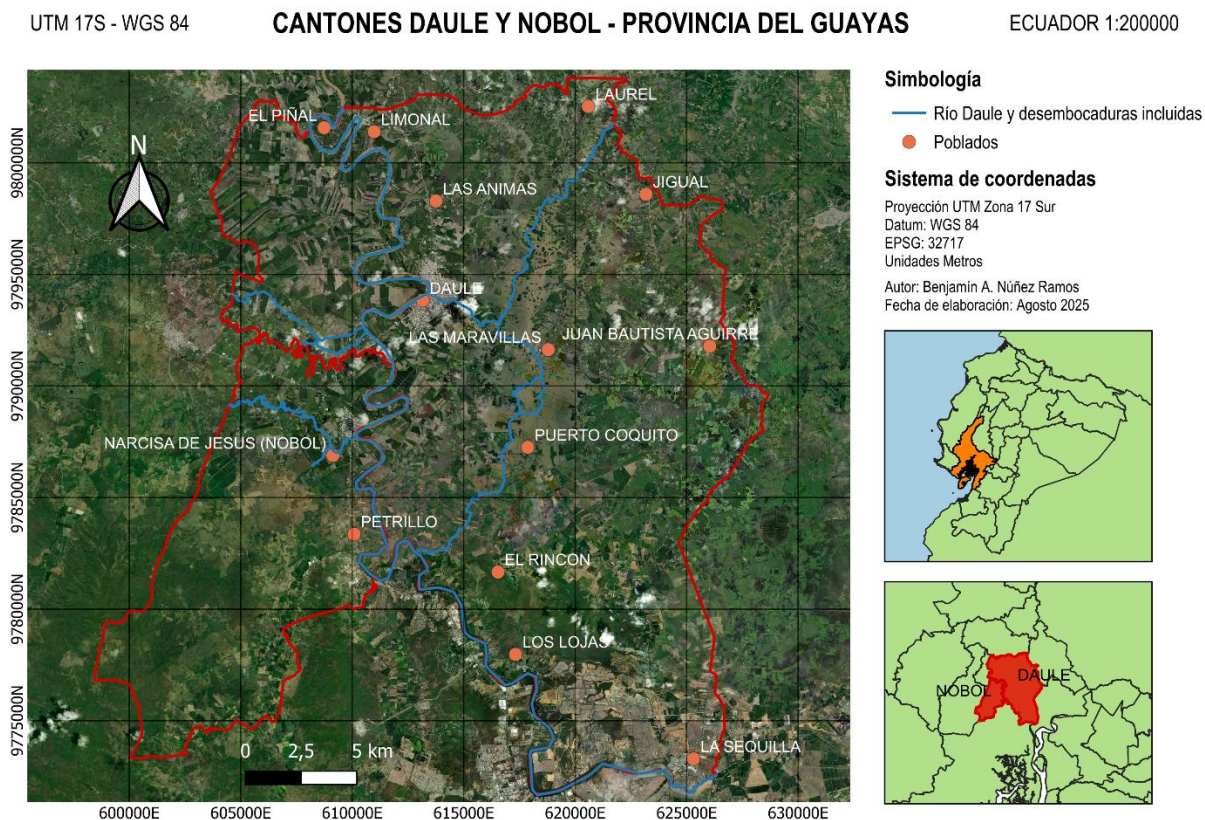
**Tabla 2.1**

*Cantidad de muestras recolectadas*

| Origen                 | Tipo de muestra | Número |
|------------------------|-----------------|--------|
| Guayas – Nobol y Daule | Suelo           | 15     |
|                        | Hoja            | 15     |
|                        | Tallo           | 15     |
|                        | Espiga          | 15     |
|                        | Raíz            | 15     |
| Total                  |                 | 75     |

**Figura 2.2**

*Mapa de los cantones donde se realizaron los muestreos*



Nota: El tramo cartografiado del Río Daule incluye el cauce principal y algunas desembocaduras seleccionadas, no la totalidad del sistema fluvial.

### 2.1.2 Preprocesamiento y procesamiento de muestras

Cada muestra de suelo fue secada a 40°C en un invernadero cerrado. Posteriormente, se maceraron en un mortero de porcelana, luego se tamizaron con un colador de acero inoxidable de 850  $\mu\text{m}$  (0.85 mm) y finalmente se almacenaron en una funda tipo Ziploc debidamente etiquetada.

En el caso de las muestras de hoja, tallos y granos/espigas, estas fueron secadas en una estufa programada a 70°C. Una vez secas, fueron maceradas utilizando una licuadora industrial y sometidas al mismo procedimiento aplicado a las muestras de suelo: tamizado,

almacenamiento y rotulación en fundas tipo Ziploc. Sin embargo, para el tamizado de los granos de arroz luego de pasar por la licuadora, se usó un tamiz de 500  $\mu\text{m}$ .

**Figura 2.3**

*Recolección de muestras de suelo en fincas de arroz*



**Figura 2.4**

*Preprocesamiento de muestras de tejido*



**Figura 2.5**

*Trituración de muestras de suelo.*



**Figura 2.6**

*Etiquetado de muestras procesadas*



### **2.1.3 Elaboración de entrevistas**

Las entrevistas se realizaron a los propietarios de las fincas donde se recolectaron las muestras. En algunos casos, no fue posible obtener toda la información debido a que ciertos productores no se encontraban presentes en el momento de la visita. El cuestionario incluyó preguntas mixtas, tanto de opción múltiple como abiertas, diseñadas para conocer el manejo agronómico aplicado a los cultivos, incluyendo el control de plagas y malezas, la fertilización y uso de correctores de suelo, así como la práctica de manejo postcosecha.

La información obtenida en las entrevistas fue analizada de manera cualitativa, clasificando las respuestas por categorías temáticas según las prácticas de manejo reportadas. Esta clasificación permitió determinar de qué manera las prácticas de los productores influyeron o no en el riesgo de contaminación de Cd en las plantas. En otras palabras, determinó si sus estrategias de fertilización, control de plagas, manejo de malezas y prácticas postcosecha incidieron en la absorción y translocación de este metal pesado dentro de la planta de arroz.

## 2.2 Análisis

### 2.2.1 Determinación de características químicas del suelo

La determinación del pH y conductividad eléctrica (CE), se realizó utilizando una suspensión suelo-agua en 1:5. Para ello se pesaron 5 g de suelo y se añadieron 25 mL de agua destilada. La mezcla se agitó por 30 minutos a 240 rpm y posteriormente se utilizó un medidor multiparámetros (Mettler Toledo, SevenDirect SD23). El equipo fue previamente calibrado con soluciones buffer estándar para pH de 4.01, 7.00 y 10.01 y para conductividad eléctrica de 84  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 12.88 mS/cm.

Finalmente, la concentración de Cd se determinó mediante el equipo portátil E-max a través de análisis de fluorescencia de rayos X monocromáticos de bajo consumo (Z-SPEC, NY, USA).

**Tabla 2.2**

*Concentraciones para material de referencia SAN JOAQUIN*

| Elemento | Concentración | Unidades |
|----------|---------------|----------|
| K        | 2.11          | %        |
| Ca       | 1.91          | %        |
| Cr       | 130           | ppm      |
| Mn       | 529           | ppm      |
| Fe       | 3.36          | %        |
| Ni       | 85            | ppm      |
| Cu       | 33.9          | ppm      |
| Zn       | 103           | ppm      |
| As       | 10.5          | ppm      |
| Cd       | 0.371         | ppm      |
| Pb       | 17.3          | ppm      |

**Tabla 1.3***Concentraciones para material de referencia MONTANA I*

| <b>Elemento</b> | <b>Concentración</b> | <b>Unidades</b> |
|-----------------|----------------------|-----------------|
| <b>K</b>        | 2.17                 | %               |
| <b>Ca</b>       | 0.96                 | %               |
| <b>Cr</b>       | 23                   | ppm             |
| <b>Mn</b>       | 0.21                 | %               |
| <b>Fe</b>       | 4.32                 | %               |
| <b>Ni</b>       | 8                    | ppm             |
| <b>Cu</b>       | 0.34                 | %               |
| <b>Zn</b>       | 0.42                 | %               |
| <b>As</b>       | 0.15                 | %               |
| <b>Cd</b>       | 12.3                 | %               |
| <b>Pb</b>       | 0.55                 | %               |

### **2.2.2 Análisis de partes vegetales (hojas, tallos, raíces y granos de arroz)**

Para la extracción de nutrientes presentes en las muestras de hojas se realizó una digestión ácida. A cada una de las muestras se le añadieron 4mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) con una concentración al 69%, y luego se lo introdujo en un horno microondas (modelo ETHOS UP, marca Milestone®) bajo condiciones controladas de temperatura y presión.

Tras la digestión en microondas, las muestras se diluyeron con 6 mL de agua ultrapura. Posteriormente, se sometieron a una digestión en bloque hasta alcanzar un volumen residual aproximado de 1 mL. Finalmente, se añadieron 24 mL adicionales de agua ultrapura y las soluciones fueron analizadas por ICP-OES, donde se usaron CRM de tejidos.

Por último, para la determinación de Cd y otros elementos en las demás partes vegetales de la planta se usó el equipo E-max<sup>TM</sup>, pero a diferencia de las muestras de suelo, se

utilizó otra calibración y como CRM se usaron NIST 1573a (hoja de tomate) y NIST 1570a (hoja de espinaca).

**Tabla 2.4**

*Concentraciones para material de referencia NIST 1573a*

| <b>Elemento</b> | <b>Concentración</b> | <b>Unidades</b> |
|-----------------|----------------------|-----------------|
| <b>K</b>        | 2.70                 | %               |
| <b>Ca</b>       | 5.00                 | %               |
| <b>Cr</b>       | 1.99                 | ppm             |
| <b>Mn</b>       | 246                  | ppm             |
| <b>Fe</b>       | 368                  | ppm             |
| <b>Ni</b>       | 1.59                 | ppm             |
| <b>Cu</b>       | 4.7                  | ppm             |
| <b>Zn</b>       | 30.9                 | ppm             |
| <b>As</b>       | 0.11                 | ppm             |
| <b>Cd</b>       | 1.52                 | ppm             |

**Tabla 2.5**

*Concentraciones para material de referencia NIST 1570a*

| <b>Elemento</b> | <b>Concentración</b> | <b>Unidades</b> |
|-----------------|----------------------|-----------------|
| <b>K</b>        | 2.90                 | %               |
| <b>Ca</b>       | 1.52                 | %               |
| <b>Mn</b>       | 76                   | ppm             |
| <b>Ni</b>       | 2.142                | ppm             |
| <b>Cu</b>       | 12.22                | ppm             |
| <b>Zn</b>       | 82.3                 | ppm             |
| <b>As</b>       | 0.068                | ppm             |
| <b>Cd</b>       | 2.876                | ppm             |
| <b>Pb</b>       | 0.2                  | ppm             |

**Figura 2.7**

*Medición de concentración de Cd y otros elementos en E-max*



### 2.2.3 Análisis estadístico

El cálculo de las variables estadísticas y la elaboración de gráficos se realizaron en el *software* JMP Student Edition, versión 18. A los datos se les aplicó un análisis descriptivo que incluyó medidas de tendencia central (media y mediana) y de dispersión (mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variación), complementado con representaciones gráficas que facilitaron la organización, interpretación y síntesis de la información obtenida.

La elección de este *software* se debió a su capacidad para integrar análisis estadístico y visualización en una misma plataforma, lo que permitió identificar patrones, comparar resultados y detectar posibles valores atípicos de forma rápido y precisa, mejorando así la comprensión de la variabilidad presente en los datos.

## Capítulo 3

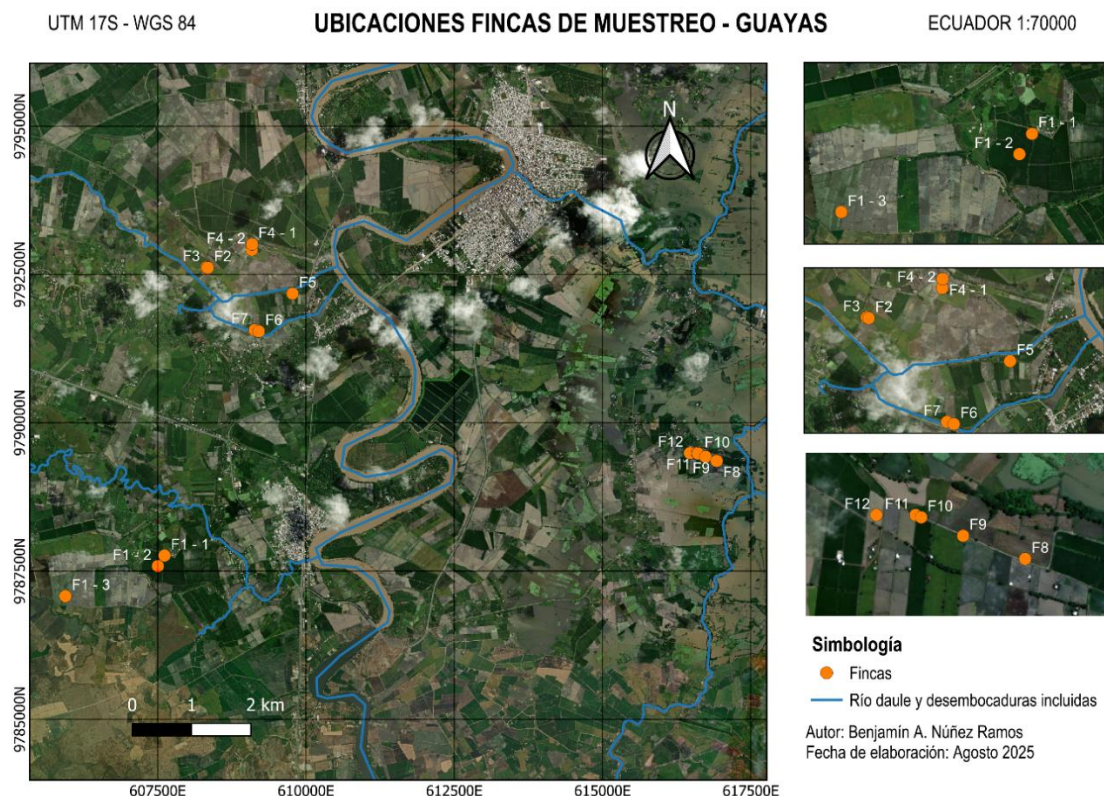
### 3.1. RESULTADOS

#### 3.1.1. Ubicaciones georreferenciadas

Las muestras fueron tomadas en 12 fincas. La primera, de mayor extensión, está situada en el cantón Nobol, cercana a la parroquia Narcisa de Jesús y tiene una extensión aproximada de 70 hectáreas. Por su parte, las fincas 2, 3, 4, 5, 6 y 7, se encuentran cerca de la cabecera cantonal de Daule; y desde las fincas 8, 9, 10, 11 y 12, se ubican entre el poblado Puerto Coquito y Las Maravillas, también en el cantón de Daule. En cuanto a sus extensiones, estos dos últimos grupos de fincas poseen entre 2 hasta 14 hectáreas de superficie cultivada.

**Figura 3.1**

*Distribución espacial de las fincas seleccionadas para el presente estudio*



### 3.1.2. Resultados de suelos

Los resultados de las propiedades fisicoquímicas del suelo se presentan en la tabla 3.1. Los rangos de pH de suelo obtenidos fueron de ácidos a neutros. Sin embargo, la media (6.51) y la mediana (6.56) indican que, en general, el pH de los suelos evaluados tendió a ser neutro. Respecto a la conductividad eléctrica, el valor medio registrado fue de 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , equivalente a 0.60 dS/cm, el cual, de acuerdo con los criterios de la FAO (2021), está muy por debajo del umbral de 4 dS/m que caracteriza a un suelo con problemas de salinidad. En cuanto a la salinidad estimada, los valores fueron bajos, con una media de 0.28 PSU y un rango entre 0.06 y 0.68 PSU, lo que confirmó que no se presentaron condiciones salinas restrictivas para el desarrollo vegetal.

En suelos ácidos se produce la reacción de reducción de óxidos férricos y de mangánicos, lo que conlleva al consumo de iones  $\text{H}^+$  y aumenta la cantidad de iones oxidrilo ( $\text{OH}^-$ ), provocando el aumento del pH hasta valores cercanos a la neutralidad.

Por otra parte, en suelos con pH alcalino, la inundación provocó que el  $\text{CO}_2$  proveniente de las raíces y los microorganismos se acumulen, reaccionando con el agua y los carbonatos de Ca y Na principalmente, lo que a su vez, ocasionó que se libere  $\text{H}^+$  y se reduzca el pH hasta alcanzar la neutralidad.

De esta forma, los suelos presentaron un pH cercano a la neutralidad, lo que favorecerá la absorción de nutrientes, ya que, la mayoría de estos poseen una disponibilidad máxima en un rango de pH que va de 6 a 7.

**Tabla 3.1***Estadística descriptiva (n = 15) de las propiedades químicas de los suelos muestreados*

| <b>Propiedad química del suelo</b>                     | <b>Media</b> | <b>Mediana</b> | <b>Min</b> | <b>Max</b> | <b>Desv. Estándar</b> | <b>CV</b> |
|--------------------------------------------------------|--------------|----------------|------------|------------|-----------------------|-----------|
| <b>pH</b>                                              | 6.516        | 6.56           | 5.38       | 7.55       | 0.73                  | 11.19     |
| <b>Conductividad eléctrica (<math>\mu S/cm</math>)</b> | 600.39       | 516.7          | 108.8      | 1288.7     | 360.42                | 60.03     |
| <b>Salinidad</b>                                       | 0.28         | 0.23           | 0.06       | 0.68       | 0.18                  | 64.92     |

En la tabla 3.2 se describe medidas de tendencia central correspondientes a micronutrientes con cationes divalentes, en este caso  $Fe^{2+}$   $Zn^{2+}$   $Mn^{2+}$  ya que la recuperación del  $Ca^{2+}$  fue superior a 120%.

Los valores promedios mundiales para el Fe, Mn y Zn corresponden a 35000 , 850 y 50 mg/kg respectivamente, lo cual indicó que todos los suelos muestreados presentan concentraciones dentro del rango normal para estos microelementos. A partir de estas cifras, se constató que tanto el Zn como el Fe de los suelos de las fincas estudiadas, poseen valores altos respecto a la media mundial. De esta manera, se estima que estos microelementos pueden influir en la absorción y traslocación de Cd en la planta de arroz, afectando su acumulación en diferentes órganos.

**Tabla 3.2***Estadística descriptiva (n = 15) de las concentraciones de micronutrientes en los suelos*

| <b>Micronutrientes</b> | <b>N</b> | <b>Media</b> | <b>Mediana</b> | <b>Min</b> | <b>Max</b> | <b>Desv. Estándar</b> | <b>CV</b> |
|------------------------|----------|--------------|----------------|------------|------------|-----------------------|-----------|
| <b>Mn (mg/kg)</b>      | 15       | 794          | 819            | 351        | 1500       | 354                   | 44.60     |
| <b>Fe (mg/kg)</b>      | 15       | 51013        | 49450          | 25900      | 77650      | 14225                 | 27.89     |
| <b>Zn (mg/kg)</b>      | 15       | 103          | 105            | 45.01      | 153        | 32.49                 | 31.50     |

En la tabla 3.3 se presentan las concentraciones de metales pesados en los suelos agrícolas muestreados, destacando las medias de cada uno: Cd 0.23 mg/kg, arsénico (As) 6.11 mg/kg y plomo (Pb) 9.87 mg/kg. Al comparar estos valores con los promedios mundiales de metales pesados en suelos agrícolas, se observó que Cd presentó una concentración ligeramente superior al promedio mundial de 0.2 mg/kg . Por otro lado, el As mostró una concentración dentro del rango promedio mundial (5-7.5 mg/kg). En cuanto al Pb, la concentración observada en los suelos muestreados se encuentra muy por debajo del promedio mundial de 17 mg/kg (Alloway, 2013).

Además, se observa que el elemento con mayor variación es el As, con valores que van de 3.11 a 11 mg/kg; mientras que el Pb, fue el elemento con la menor variación, con un rango de 7.94-11.37 mg/kg.

Estos resultados sugirieron que las concentraciones de estos metales pesados en estos suelos estuvieron dentro de los rangos reportados a nivel mundial, por lo cual, estos no deberían de ser considerados como fuente de contaminación a las plantas de arroz.

**Tabla 3.3**

*Estadística descriptiva (n=15) de las concentraciones de metales pesados en los suelos.*

| <b>Metales pesados</b> | <b>Media</b> | <b>Mediana</b> | <b>Min</b> | <b>Max</b> | <b>Desv. Estándar</b> | <b>CV</b> |
|------------------------|--------------|----------------|------------|------------|-----------------------|-----------|
| <b>Cd (mg/kg)</b>      | 0.23         | 0.20           | 0.1        | 0.39       | 0.09                  | 37.28     |
| <b>As (mg/kg)</b>      | 6.11         | 4.63           | 3.31       | 11.00      | 2.50                  | 40.91     |
| <b>Pb (mg/kg)</b>      | 9.87         | 9.96           | 7.94       | 11.37      | 0.80                  | 8.08      |

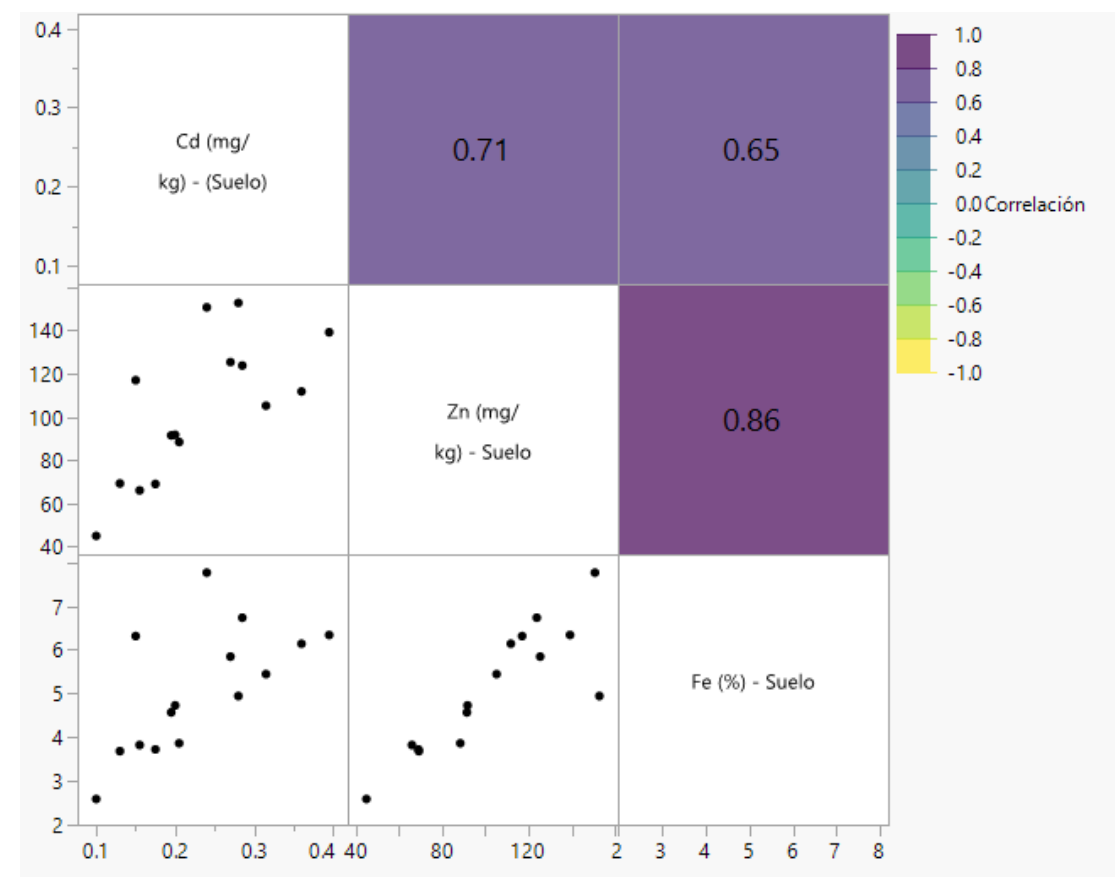
En la figura 3.2 se presentan la correlación entre la concentración total Cd y cada uno de los micronutrientes analizados. Observamos que existió una fuerte correlación positiva entre el Cd:Fe (0.65) y Cd:Zn (0.71), mientras que entre el Cd:Mn la correlación también fue positiva pero no tan alta (0.41).

Esta alta correlación se debió a que tanto el Cd, Zn y Fe pueden estar presentes en la roca parental de manera análoga, por lo que sus concentraciones pueden aumentar o disminuir en conjunto., lo que explicó la correlación positiva.

Finalmente, en condiciones anaeróbicas de suelo (como ocurre temporalmente en arroz) el Mn se encuentra principalmente como  $Mn^{2+}$  el cual se caracteriza por ser más móvil y no estar ligado a la fracción sólida del suelo, además, a diferencia del Fe y Zn, el Mn no comparte fuentes similares con el Cd, lo cual reduce su correlación.

**Figura 3.2**

*Correlación de contenido total de Cd con hierro (Fe) y zinc (Zn).*



### 3.1.3 Resultados tejidos

En la figura 3.3 se presenta un diagrama de cajas con los resultados obtenidos para cada parte de la planta de arroz: raíz, tallo, hojas y granos. En ese sentido, se observó que las concentraciones en raíces y tallos mostraron valores próximos al límite de detección del equipo (0.10 mg/kg).

En el resumen estadístico, la media de la concentración de Cd en raíces correspondió a 0.64 mg/kg y la mediana a 0.53 mg/kg. Este comportamiento se explica porque el Cd absorbido por la planta tiende a acumularse en las vacuolas celulares de las raíces mediante la acción del transportador OsHMA3, lo que limitó su traslocación hacia los órganos aéreos. Sin

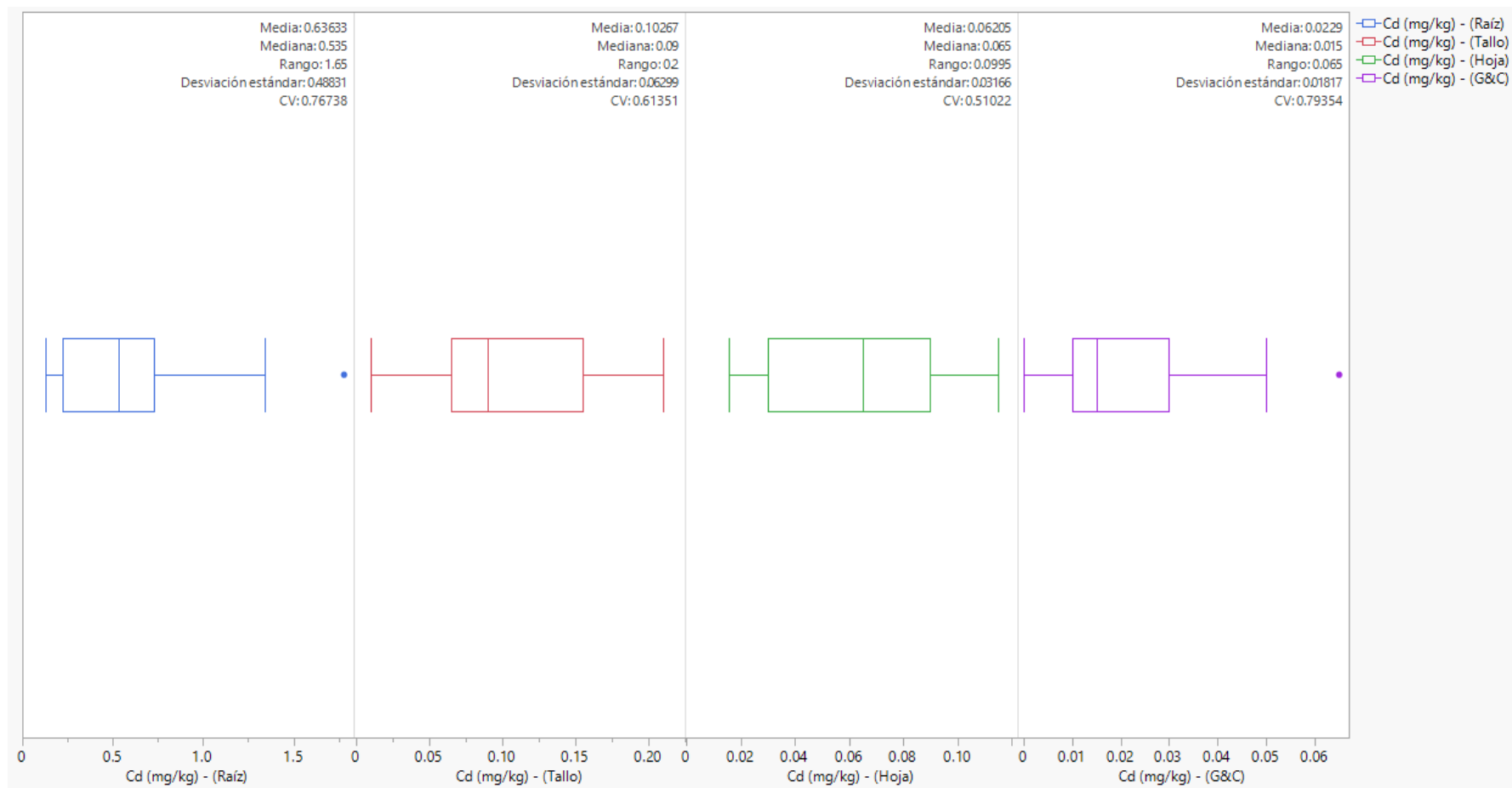
embargo, es importante considerar que estos valores pueden estar levemente influenciados por la posible presencia de partículas de suelo adheridas a las raíces.

Por otra parte, se observó que el contenido de Cd disminuyó notablemente desde la raíz hacia el tallo. La presencia del metal en este órgano se asocia con el proceso de intercambio intervascular en los nudos, donde parte del Cd translocado por el xilema puede transferirse al floema, permitiendo su redistribución hacia las hojas, panículas y finalmente a los granos (Sun, y otros, 2019).

Respecto a la concentración presente en las hojas y granos, se determinó que su media y mediana se encuentran bajo el límite de detección (0,10 mg/kg), por lo que son considerados como inocuos para el consumo. Con estos valores no se podrá calcular parámetros estadísticos.

**Figura 3.3**

*Diagrama de cajas de concentración de Cd en varias partes de la planta*

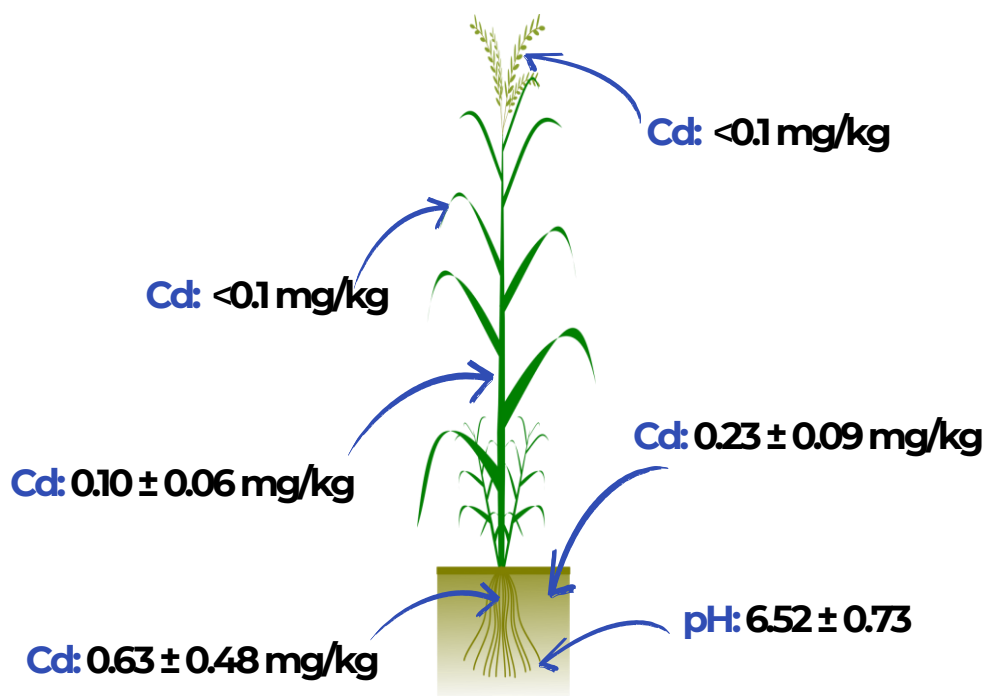


Las concentraciones de los granos fueron inferiores a 0.10 mg/kg, es decir, por debajo del límite de detección del equipo. Al comparar estos resultados con los valores máximos permisibles establecidos por la Unión Europea (0.15 mg/kg) y la FAO (0.40 mg/kg) para arroz de consumo, se evidenció que ninguna de las fincas evaluadas superó dichos umbrales. En consecuencia, el arroz analizado no presentó un riesgo de contaminación por Cd y su consumo es seguro.

En la imagen 3.4 se presenta la concentración promedio de Cd en cada una de las partes de la planta, además del suelo y su pH. A nivel de planta, a medida que asciende este metal por la planta, su concentración va disminuyendo hasta alcanzar valores inferiores a 0.10 mg/kg.

**Figura 3.4**

*Concentración media de Cd  $\pm$  Ds (desviación estándar) en cada organelo de la planta de arroz*



### 3.1.4 Resultados encuestas

Se entrevistó a 10 de 12 productores en cuyas fincas se realizaron los muestreos. En algunos casos, ciertas respuestas pudieron complementarse mediante la observación directa de las labores efectuadas durante las visitas.

La superficie cultivada varió entre un máximo de 70 ha y un mínimo de 0.70 ha, equivalente a una cuadra. Todos los productores establecieron el cultivo mediante el trasplante de plántulas adquiridas, en donde 9 de los 12 encuestados usaron la variedad SFL-11.

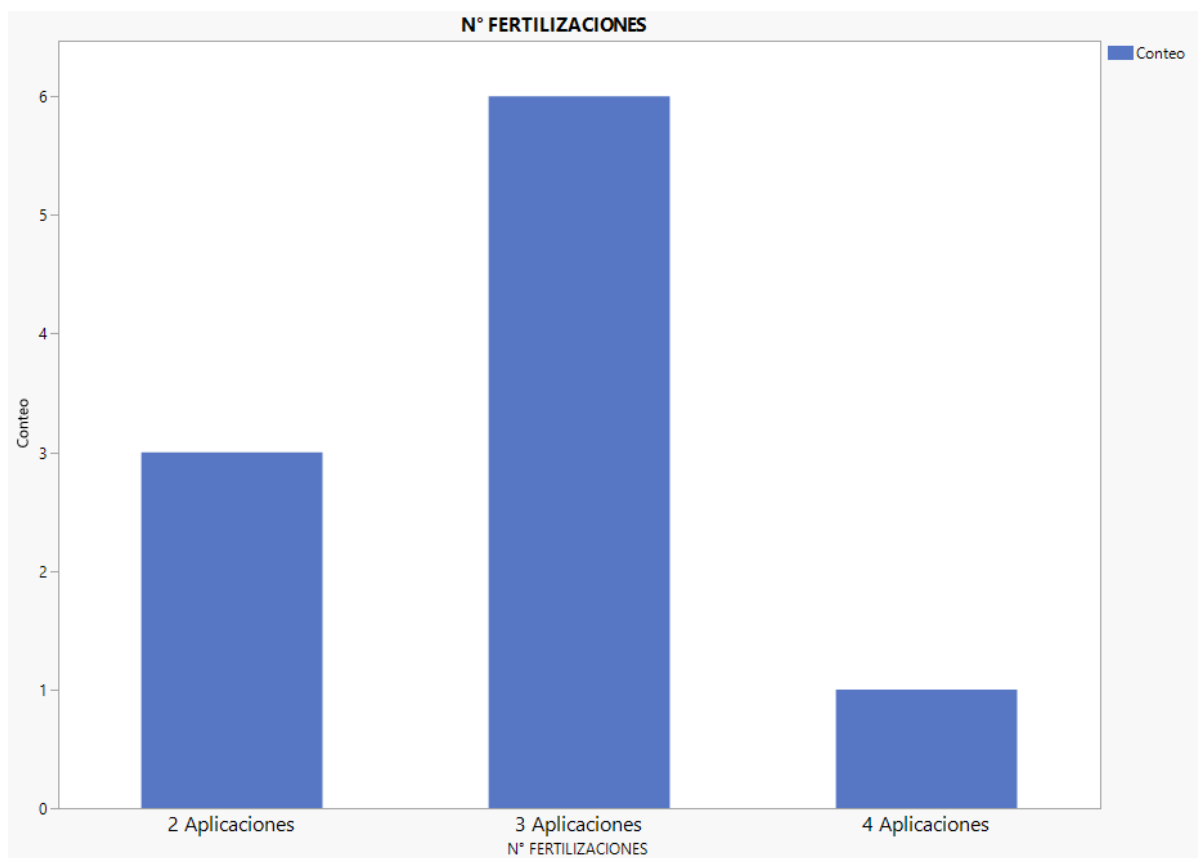
En cuanto al manejo del cultivo, el control de malezas se realizó principalmente mediante herbicidas. El producto de mayor uso fue Loyant™ Neo (Dow AgroSciences LLC), cuyo ingrediente activo es Florpyrauxifen-benzyl, un herbicida sistémico aplicado en postemergencia para el control de gramíneas, ciperáceas y malezas de hoja ancha

Respecto al manejo de plagas y enfermedades, todos los productores reportaron el uso de pesticidas. Los principales productos empleados fueron Topgun, un fungicida utilizado contra la roya y oídio, y Rifle, un insecticida aplicado para el control de *Spodoptera frugiperda* (langosta).

A continuación, en la figura 3.5 se observa el número de fertilizaciones que realizaron los productores por ciclo; su número varió entre 2 y 4, aunque la mayoría de los productores realizó 3 aplicaciones por ciclo. Los fertilizantes más utilizados fueron de origen químico, principalmente urea, sulfatos y fosfatos, cuya aplicación se efectuó de forma manual. Este número de aplicaciones dependió del nivel de inversión de cada productor.

**Figura 3.5**

*Número de fertilizaciones aplicadas*



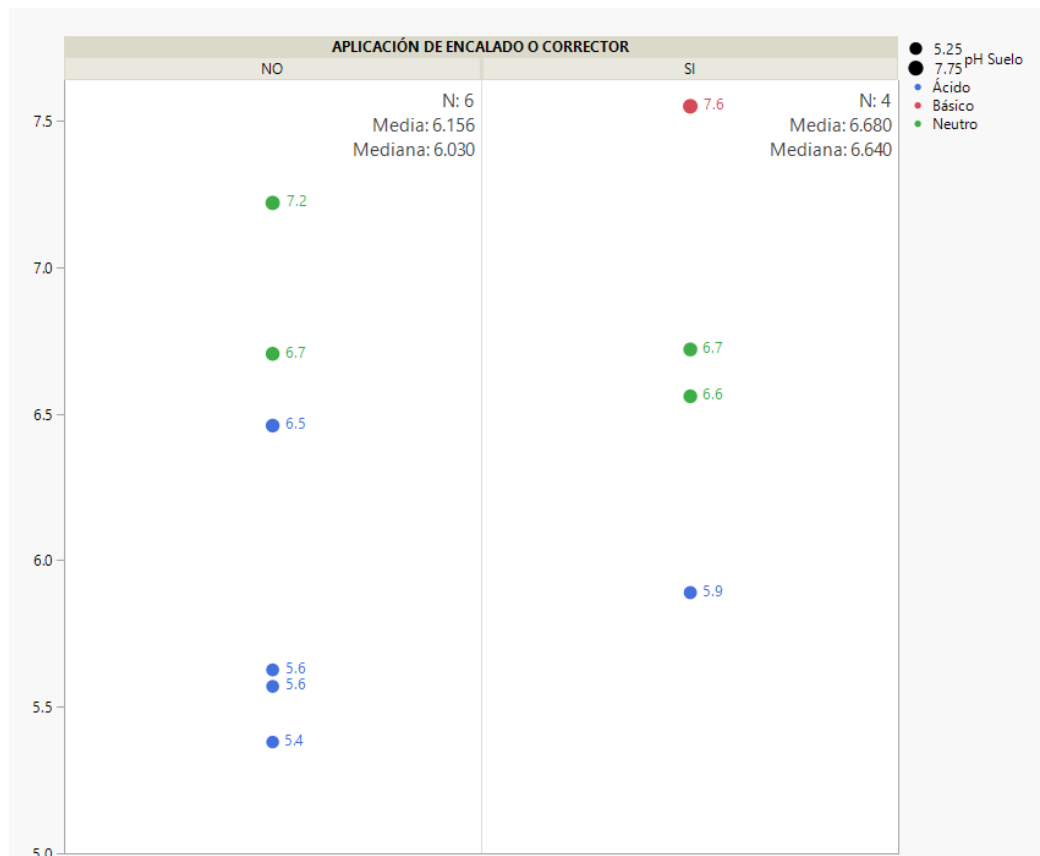
En la figura 3.6, se presenta un diagrama de puntos que muestra los productores que aplicaron encalados o correctores de suelo y los que no, en relación con los valores de pH del suelo. En ese sentido, se observó que alrededor de 4 de los productores encuestados realizaron una aplicación de este tipo de productos con un pH promedio de 6.68, mientras que 6 de ellos no lo hicieron, obteniendo una media de 6.16

A pesar de que la mayoría de encuestados son pequeños productores, podemos observar que alguno de ellos si realiza la aplicación de encalado; sin embargo, más de la mitad de los encuestados ( $n=6$ ) no realiza aplicaciones de estos productos, al igual que en el uso de fertilizantes, esto se debe a los costos que conlleva realizar esta práctica agrícola,

además, esto también se asocia a la falta de conocimiento que tienen los pequeños productores sobre el efecto de los encalados en la fertilidad de suelo.

**Figura 3.6**

*Aplicación de encalados y pH del suelo.*



En la imagen 3.7 se aprecia que las fincas donde se aplicaron encalados o correctores de suelo presentaron un pH promedio más cercano a la neutralidad (6.71). En contraste, las fincas donde no se aplicaron estos productos mostraron un pH ligeramente ácido, con un promedio de 6.1, lo que podría favorecer la solubilización de ciertos metales pesados.

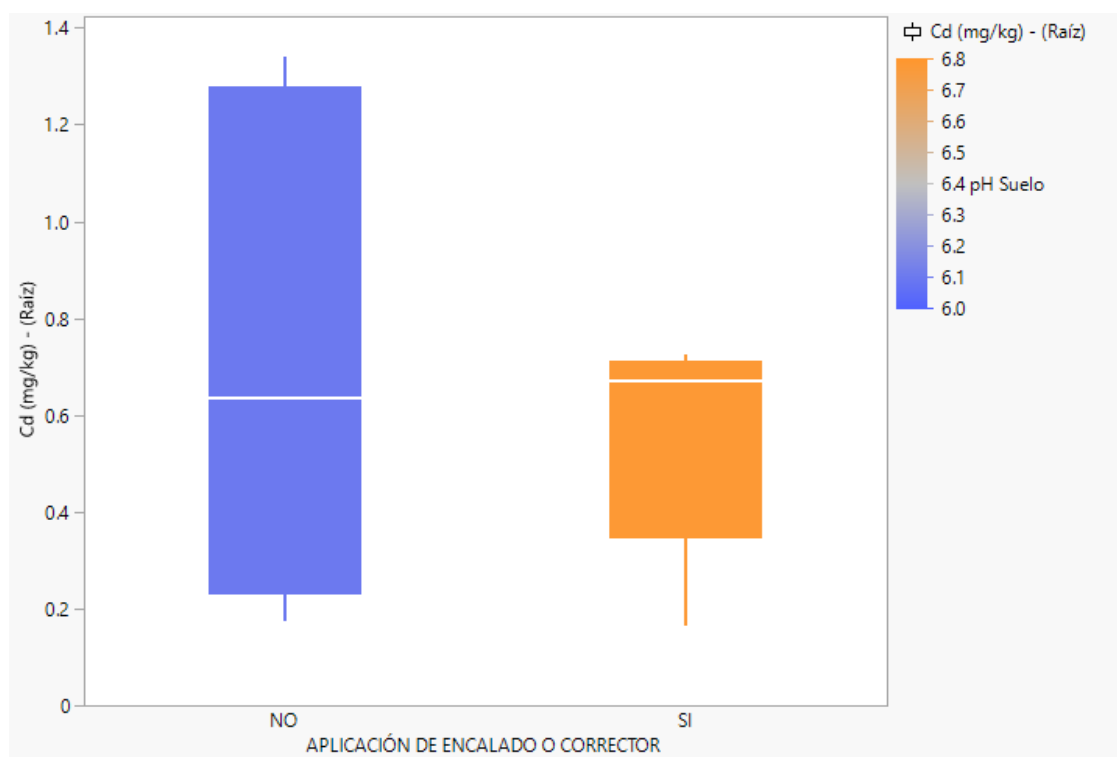
Asimismo, los niveles de Cd en las raíces tendieron a ser mayores en las fincas sin aplicación de correctores (promedio de 0.76 mg/kg) que en las fincas con encalados (0.56 mg/kg). Aunque el número de muestras fue reducido (n=12), estos resultados sugieren que la

aplicación de enmiendas alcalinas podría estar asociada con una menor absorción de Cd por las plantas.

Como se mencionó, debido al tamaño de la muestra, estos hallazgos deben interpretarse con cautela y servir como indicativo preliminar de la relación entre el pH del suelo y la bioacumulación de Cd en las raíces.

**Figura 3.7**

*Concentración de Cd en raíces en relación con la aplicación de encalados o correctores de suelo.*



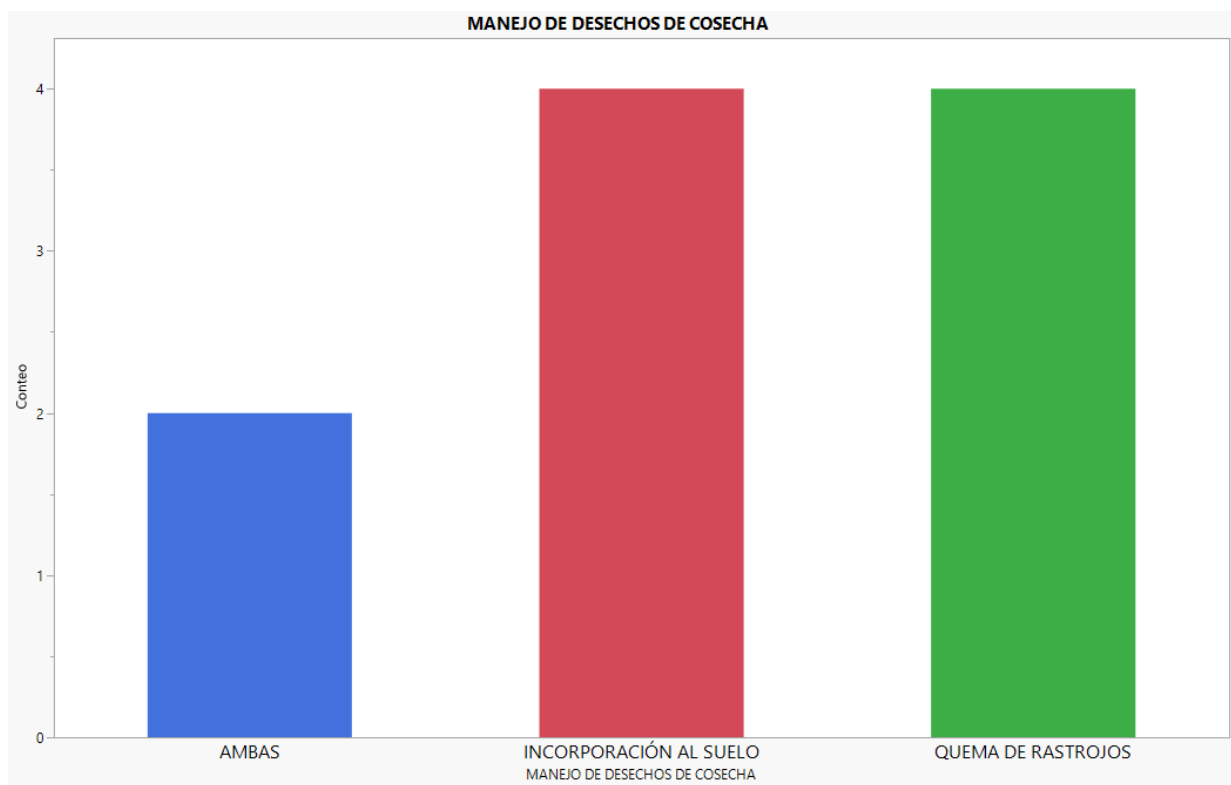
Por otra parte, en la imagen 3.8 observamos que las prácticas de manejo de residuos postcosecha de los agricultores encuestados fueron la incorporación al suelo y la quema de rastrojos y solo un pequeño número de estos realizó ambas prácticas.

La incorporación de los residuos al suelo aportó materia orgánica y con ello carbono, potencialmente inmovilizando Cd y reduciendo la disponibilidad para la planta. Por otra

parte, la quema de rastrojos al reducir rápidamente la biomasa liberó nutrientes como el K, Ca y Mg en forma de , lo que potencialmente pudo favorecer al incremento del pH del suelo, reduciendo la disponibilidad inmediata de Cd, sin embargo, esta práctica podría disminuir la entrada de carbono orgánico al suelo, lo que a largo plazo reduciría la capacidad del suelo de retener Cd en formas estables.

**Figura 3.8**

*Manejo post cosecha de los agricultores encuestados.*



## **Capítulo 4**

## **4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1.1 Conclusiones**

- La absorción y traslocación del Cd en la planta pueden estar condicionadas por propiedades químicas del suelo, como el pH. En este estudio, el Zn y Fe mostraron una alta correlación positiva con las concentraciones totales de Cd en el suelo, que se explica por la posible procedencia de la roca parental.
- Las raíces y los tallos presentaron mayores concentraciones de Cd, con promedios de 0.64 y 0.10 mg/kg respectivamente. Sin embargo, la concentración en raíces pudo estar influenciada por partículas de suelo adheridas.
- En los granos no fue posible cuantificar Cd debido al límite de detección del equipo. No obstante, al encontrarse por debajo de este valor, se infiere que cumplen con las normativas de la UE y FAO respecto a los niveles máximos de este metal en arroz de consumo.
- El encalado, la aplicación de correctores de suelo y el manejo de desechos agrícolas aparecen como alternativas de manejo agronómico que pueden influir en la absorción de Cd al regular el pH hacia valores neutros y aportar carbono orgánico al suelo.
- Cabe resaltar que, debido al reducido número de muestras analizadas, los resultados deben interpretarse con cautela, ya que no permiten establecer conclusiones generales ni un soporte estadístico robusto.

### **4.1.2 Recomendaciones**

- Ampliar el área de estudio hacia fincas de otros cantones del Guayas y otras provincias arroceras del país, de modo que se obtengan resultados con mayor representatividad y sustento estadístico.

- Fortalecer la colaboración con entidades públicas y privadas que faciliten el acercamiento y comunicación con los productores de arroz, garantizando así un mejor acceso a fincas y disposición de muestras.
- Determinar de forma específica la relación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y la absorción de Cd por las plantas, considerando su rol en la inmovilización o movilidad del metal.
- Realizar estudios complementarios que permitan evaluar con mayor precisión la influencia del encalado, la aplicación de correctores y el manejo de desechos postcosecha sobre la disponibilidad y acumulación de Cd en el sistema suelo-planta.
- A pesar de que el equipo utilizado en este estudio (E-max), muestra una buena recuperación con los MRC, para arroz, es necesario el uso de técnicas analíticas que permitan establecer límites de detección más bajos, como la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) con la finalidad de detectar concentraciones de Cd inferiores a 0.10 mg/kg y establecer el potencial riesgo de acuerdo con el consumo.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

Agrimortec. (22 de Agosto de 2025). *Topgun*. Obtenido de Agrimortec:

<https://agrimortec.com/productos/topgun/>

Ali, W., Mao, K., Zhang, H., Junaid, M., Xu, N., Rasool, A., . . . Yang, Z. (2020).

Comprehensive review of the basic chemical behaviours, sources, processes, and endpoints of trace element contamination in paddy soil-rice systems in rice-growing countries. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122720.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122720>

Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their*

*Bioavailability*. Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7?utm_source=chatgpt.com)

[7?utm\\_source=chatgpt.com](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7?utm_source=chatgpt.com)

Bayona, L. (2020). Efecto y mitigación de la toxicidad por arsénico y cadmio en el cultivo de

arroz. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 49-62.

Carmona, F. d., Anghinoni, I., & Cao, E. G. (2012). Dinámica del amonio y el pH en la

solución de suelos con diferentes niveles de salinidad, cultivo de arroz de regadío.

*Revista Brasileña de Ciencia del Suelo*, 36 (2). doi:<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200009>

Chang, J.-D., Huang, S., Konishi, N., Wang, P., Chen, J., Huang, X.-Y., . . . Zhao, F.-J.

(2020). Overexpression of the manganese/cadmium transporter OsNRAMP5 reduces cadmium accumulation in rice grain. *Journal of Experimental Botany*, 5705-5715.

doi:<https://doi.org/10.1093/JXB/ERAA287>

- Corporación Financiera Nacional. (2024). *Ficha Sectorial - Arroz*. Obtenido de <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2023/fichas-sectoriales-1-trimestre/Ficha-Sectorial-Arroz.pdf>
- Dekeyrel, J., Atkinson, R., Chavez, E., Silva, M. d., Idarraga-Castaño, O., Pulleman, M., & Smolders, E. (2024). Using optimized monochromatic energy dispersive X-ray fluorescence to determine the cadmium concentration in cacao and soil samples. *Heliyon*, 10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39034>
- FAO Food and Nutrition Division. (2004). *El Arroz y la Nutrición Humana*. Food and Agriculture Organization of the United Nations: FAO.
- FAO y OMS. (1995). *Norma general para los contaminantes y toxinas presentes en los alimentos y piensos*. Roma: Codex Alimentarius – FAO y OMS. Obtenido de [https://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/livestockgov/documents/CXS\\_193s.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXS_193s.pdf)
- Guzmán, M. L., & Martínez, E. A. (2024). *La Inocuidad de Alimentos y su Relación con el Cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible Bajo un Enfoque "Una Salud"*. San José: Revista de Ciencias Agroalimentarias y Biotecnología.
- INIAP, I. N. (2023). *Manejo de Riego*.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2021). Morfología y estados de crecimiento y desarrollo de la planta de arroz. En M. P. C., G. D. Ñ., V. B. V., S. Olmos, R. Rodríguez, M. Paredes, G. Donos-Ñanculao, & V. L. Velásquez (Edits.), *100 AÑOS DEL CULTIVO DE ARROZ EN CHILE En un contexto internacional 1920 - 2020* (págs. 408-445). Chillán, Chile: Ministerio de Agricultura.
- Jing, H., Yang, W., Chen, Y., Yang, L., Zao, H., Yang, Y., . . . Zia-ur-Rehman, M. (2023). Exploración del mecanismo de absorción y translocación del cadmio en el arroz:

- perspectivas futuras sobre la seguridad del arroz. *Science of The Total Environment*, 897, 165369. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165369>
- Jing, H., Yang, W., Chen, Y., Yang, L., Zhou, H., Yang, Y., . . . Zia-ur-Rehman, M. (2023). Transport and accumulation of cadmium in rice: Mechanisms and implications. *Science of The Total Environment*, 896. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165369>
- Kulsum, P. G., Khanam, R., Das, S., Nayak, A. K., Tack, F. M., Meers, E., . . . Biswas, J. K. (2023). A state-of-the-art review on cadmium uptake, toxicity, and tolerance in rice: From physiological response to remediation process. *Environmental Research*, 220, 2020, 115098. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115098>
- Liang, J., Feng, C., Zeng, G., Zhong, M., Gao, X., Li, X., . . . Mo, D. (2017). Atmospheric deposition of mercury and cadmium impacts on topsoil in a typical coal mine city, Lianyuan, China. *Chemosphere* 189, 198-205. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.046>
- Lin, J., He, F., G. O., & Z. C. (2021). How do phytogenic iron oxide nanoparticles drive redox reactions to reduce cadmium availability in a flooded paddy soil? *Journal of Hazardous Materials* , 403, 123736. doi:<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.123736>
- Liu, G., Meng, J., Huang, Y., Dai, Z., Tang, C., & Xu, J. (2020). Effects of carbide slag, lodestone and biochar on the immobilization, plant uptake and translocation of As and Cd in a contaminated paddy soil. *Environmental Pollution*, 266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115194>

- Miguel, B. J. (2021). Importancia de los factores climáticos en el cultivo de arroz. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 6, 28-34.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2023). *Boletín situacional de arroz 2023*.  
MAG. Obtenido de <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/situacionales-agricolas/situacional-arroz>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2024). *Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA)*. Obtenido de Rendimientos de arroz 2024:  
<https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/rendimientos-de-arroz-2024-pa>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (s.f.). *Boletín Situacional - Cultivo de Arroz*. 2023:  
Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Olivo, F. S., González, C. N., & Franco, C. G. (2023). INOCUIDAD ALIMENTARIA Y ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR ALIMENTOS (ETAS); SUS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA: UNA REVISIÓN. *Horizonte de enfermería*, 31, 689-707. doi:[https://doi.org/10.7764/Horiz\\_Enferm.34.3.689-707](https://doi.org/10.7764/Horiz_Enferm.34.3.689-707)
- Omuto, C. T., Vargas, R., Viatkin, K., & Yigini, Y. (2021). *Mapeo de suelos afectados por salinidad*. Sudán: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de  
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bd007ae9-18ef-4f5e-abd3-6194eb8a8100/content#page=26.55>
- Organización Mundial de la Salud. (2019). *Exposición al Cadmio: Un Importante Problema de Salud Pública*. Geneva: Departamento de Salud Pública, Determinantes Ambientales y Sociales de la Salud.

- PDA . (Octubre de 2022). *Impacto del pH en la disponibilidad de nutrientes*. Obtenido de PDA News: <https://www.pda.org.uk/impact-of-ph-on-nutrient-availability/>
- Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Ibrahim, M., Tsang, D. C., Zia-ur-Rehman, M., . . . Ok, Y. S. (2017). A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere*, 182, 90-105.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.013>
- Sánchez, A. M., Vayas, T., Mayorga, F., & Freire, C. (2020). *El Arroz en Ecuador*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- Sun, C., Yang, M., Li, Y., Tian, J., Zhang, Y., Liang, L., . . . Lian, X. (2019). Análisis exhaustivo de la variación de la acumulación de cadmio en el arroz y detección de un nuevo alelo débil de OsHMA3. *Revista de Botánica Experimental*, 6389-6400.  
doi:<https://doi.org/10.1093/jxb/erz400>
- Unión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión, de 25 de abril de 2023, relativo a los niveles máximos de determinados contaminantes en los alimentos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.º 1881/2006*. Bruselas: Diario Oficial de la Unión Europea. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32023R0915>
- Wang, G., Du, W., Xu, M., Ai, F., Ying, Y., & Guo, H. (2021). Integrated assessment of Cd-contaminated paddy soil with application of combined ameliorants: a three-year field study. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107, 1236-1242.  
doi:<https://doi.org/10.1007/S00128-021-03289-2>
- Wang, J., Wang, P.-M., Gu, Y., Kopittke, P. M., & Zhao, F.-J. (2019). Iron-manganese (oxyhydro)oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd

- during soil drainage in paddy soil systems. *Environmental science & technology* 53(5), 2500-2508. doi:<https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B06863>
- Wang, Y., Dong, S., Xiao, J., Hu, Q., & Zh, L. (2022). Método rápido y multielemento para la determinación de As, Cd, Ni, Pb, Sn y Zn en vieiras mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de alta definición (HDXRF). *Métodos analíticos alimentarios*, 2712-2724. doi:<https://doi.org/10.1007/s12161-022-02323-1>
- Yamaji, N., Takemoto, Y., Miyaji, T., Mitani-Ueno, N., Yoshida, K. T., & Ma, J. F. (2017). Reducción de la acumulación de fósforo en los granos de arroz con un transportador alterado en el nudo. *Nature* 541(7635), 92-95.
- Zhang, J., Zhu, Y., Yu, L., Yang, M., Zou, X., Yin, C., & Lin, Y. (2022). Research advances in cadmium uptake, transport and resistance in rice (*Oryza sativa* L.). *Cells*, 11, 569. doi:<https://doi.org/10.3390/CELLS11030569>
- Zhang, Y., Jiang, S., Wang, H., Yu, L., Li, C., 2, L. D., & Shao, G. (2025). Interacciones de Fe, Mn, Zn y Cd en sistemas suelo-arroz: Implicaciones para reducir la acumulación de Cd en el arroz. *Toxics*, 13(8), 633. doi:<https://doi.org/10.3390/toxics13080633>



### 1. Datos generales

Nombre del dueño de la finca:

\_\_\_\_\_

—

Nombre de la finca:

\_\_\_\_\_

—

Superficie cultivada (ha):

\_\_\_\_\_

Ubicación (cantón/parroquia):

\_\_\_\_\_

—

### 2. Producción

Variedad de arroz sembrada:

\_\_\_\_\_

—

Tipo de siembra:

- ☐ Al voleo
- ☐ Por trasplante (plántulas)

Rendimiento aproximado (qq/ha):

\_\_\_\_\_

—

### 3. Manejo del cultivo

¿Cómo controla las malezas?

- ☐ Manual
- ☐ Herbicida (indique nombre si lo recuerda): \_\_\_\_\_
- ☐ Otro: \_\_\_\_\_

Plagas y enfermedades comunes en su cultivo:

¿Cómo controla plagas/enfermedades?

- ☐ Control químico
- ☐ Control biológico
- ☐ No realiza control
- ☐ Otro: \_\_\_\_\_

### 4. Fertilización

¿Cuántas fertilizaciones aplica por ciclo?: \_\_\_\_\_

¿Qué tipo de fertilizante usa?

- ☐ Urea
- ☐ NPK
- ☐ Compost/orgánico
- ☐ Otro: \_\_\_\_\_

¿Conoce la dosis aplicada por hectárea?

- ☐ Sí (especifique): \_\_\_\_\_ kg/ha
- ☐ No

¿Cómo realiza la aplicación del fertilizante?

- ☐ Manual
- ☐ Mecanizada

### 5. Riego

**¿Tipo de riego utilizado?**

- ☐ Inundación
- ☐ Gravedad
- ☐ Aspersión
- ☐ Otro: \_\_\_\_\_

**¿Cuál es la fuente de agua para el riego?**

- ☐ Canal
- ☐ Pozo
- ☐ Río
- ☐ Lluvia
- ☐ Otro: \_\_\_\_\_

**6. Manejo y prácticas agrícolas**

**¿Aplica encalado o correctores del suelo?**

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ No sabe

**¿Qué manejo realiza después de la cosecha?**

- ☐ Quema de rastrojos
- ☐ Incorporación al suelo
- ☐ Otro: \_\_\_\_\_