



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 7

Acumulación de mercurio en variedades criollas de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivadas en suelos de la región de La Mojana.

Mercury accUmulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown in soils of La Mojana region

Laza-Durante, M.¹, Urango-Cárdenas, I.¹, Enamorado-Montes, G.¹, Pinedo-Hernández, J.¹, Marrugo-Negrete, J.¹, Paternina-Urbe, R.^{1,2}, Peroza-Sierra, J.³

¹ Grupo de investigación en Agua, Química Aplicada y Ambiental, Departamento de Química, Universidad de Córdoba.

² Programa de Regencia y Farmacia, Departamento de Regencia y Farmacia, Universidad de Córdoba.

³ Programa de Ingeniería Agronómica, Departamento de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba.

* Autor de correspondencia: marisollazad@correo.unicordoba.edu.co

Resumen

En la región de La Mojana, en el norte de Colombia, el cultivo de arroz es uno de las más importantes en la actividad agrícola de la región, es una fuente importante de ingreso y también uno de los alimentos que satisfacen la dieta local. El objetivo de la presente investigación fue analizar la bioacumulación de mercurio (Hg) en diferentes tejidos comestibles y no comestibles de la especie *Oryza sativa* L., en tres variedades criollas y tres variedades comerciales cultivadas en suelos provenientes de la región de La Mojana, para determinar el nivel de riesgo a la salud por la ingesta de arroz con trazas de Hg. El experimento se condujo bajo condiciones de invernadero, en macetas que contenían 10 kg del suelo proveniente de la región de la Mojana (suelo superficial 0-30 cm). La biomasa seca y el rendimiento fueron significativamente influenciados por la variedad de arroz de acuerdo con el test de ANOVA (nivel alfa de 0,05). La biomasa fue significativamente más alta en las variedades criollas en comparación con las variedades comerciales. El rendimiento fue mayor en las variedades criollas, reportándose valores de $3,73 \pm 0,013 \text{ t ha}^{-1}$ para la variedad Fortuna morao que, a su vez fueron valores altos en comparación con los reportados por otros autores para variedades criollas de la región de La Mojana. La acumulación de Hg fue mayor en la raíz, seguida de la cáscara y el grano. No se presentaron diferencias estadísticas significativas para las concentraciones en el grano, donde el Hg varió entre 0,32 y $31,57 \mu\text{g kg}^{-1}$ con una media general de $11,57 \pm 6,64 \mu\text{g kg}^{-1}$. Los factores de bioconcentración fueron superiores a la unidad en todas las variedades comerciales e inferiores a la unidad para las variedades criollas; entre tanto, los factores de traslocación siempre fueron menores a la unidad, con excepción de la variedad Ina blanco donde se observó un valor superior a 1 para el factor de traslocación suelo/cáscara. La ingesta semanal estimada para el Hg estuvo entre 0,004 y $0,829 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal por semana, siendo inferior al umbral de $4 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal por semana establecido como *ingesta semanal tolerable provisional*. La estimación del cociente de peligro a partir de *ingesta semanal estimada* mostró que la vía de exposición por consumo de arroz no produce un riesgo potencial de acuerdo con la metodología empleada. Otras rutas de exposición a Hg deben ser consideradas en futuras evaluaciones de riesgo a la salud humana.

Palabras clave: bioacumulación, riesgo a la salud, translocación.

Introducción

La minería es una fuente importante de desarrollo económico que plantea desafíos significativos en términos de contaminación ambiental (1). Uno de los contaminantes más preocupantes asociados con la minería es el Hg, un metal pesado que puede tener efectos perjudiciales en los ecosistemas terrestres y acuáticos. La acumulación del Hg afecta la salud de las plantas, altera el equilibrio ecológico y compromete la seguridad alimentaria de las poblaciones locales (2–5). La exposición al Hg representa un grave peligro para la salud humana, debido a que provoca una serie de problemas neurológicos, entre ellos temblores incontrolables, pérdida del equilibrio, neurotoxicidad, malformaciones congénitas y mortalidad perinatal (6). En este contexto, las variedades de arroz criollo, con su potencial adaptación a condiciones locales y su diversidad genética, surgen como una opción viable para abordar los desafíos de la agricultura en suelos contaminados con Hg (7).

El arroz (*Oryza sativa* L) es el alimento básico de más de la mitad de la población mundial, además constituye el sustento económico de los cultivadores de este cereal. Se destaca la producción global en el año 2021 en cerca de 513 millones de toneladas, esto evidencia un incremento de más de tres millones de toneladas en comparación con la cantidad registrada en el año anterior (8). El más reciente pronóstico de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) del año 2023, mostró que la producción global de cereales experimentó un aumento de 5,9 millones de toneladas (un incremento del 0,2 %) en comparación con las cifras del mes anterior; esto representa un total de 2.819 millones de toneladas. Esta indica una elevación anual del 1,1 % y marca un récord histórico en la producción de cereales (9).

En el contexto específico de Colombia, el arroz es un cereal importante en el marco de la canasta básica de la población. Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, en 2023 se produjeron aproximadamente 2,4 millones de toneladas de arroz cáscara, (DANE). Derivado de esta producción, el país se ubicó como uno de principales productores de arroz en América Latina. Durante la primera mitad del año 2023, la cifra estimada para la extensión cultivada de arroz alcanzó las 407.043 hectáreas en el país. Este valor representa un incremento de 49.349 hectáreas en comparación con el total registrado en la misma época del año anterior, que ascendió a 357.694 hectáreas. Este ampliación de un 13,8 % indica una notoria expansión en la superficie destinada al cultivo de arroz en el país en el período mencionado (10).

La Mojana es una extensa área al norte de Colombia y forma parte de la depresión momposina. Esta región se caracteriza por su topografía baja y la presencia de cuerpos de agua, que desempeñan un papel crucial como reguladores de los principales ríos del país, como el Magdalena, Cauca y San Jorge. La altitud de estos cuerpos de agua varía según las temporadas de lluvias y el clima en Colombia, lo cual influye directamente en el caudal de los ríos que fluyen hacia la depresión momposina (11). En la extensa región de La Mojana, la práctica agrícola del cultivo de arroz se establece como un componente de suma relevancia socioeconómica en todos los municipios que hacen parte de la región. Allí, la agricultura del arroz ocupa aproximadamente 513.464 hectáreas. Esta circunstancia otorga al cultivo de arroz un papel importante como principal fuente de recursos destinados a satisfacer las necesidades fundamentales de la población residente (12).

Además de los retos inherentes vinculados a las inundaciones y sequías que impactan la subregión de La Mojana, cobra gran importancia el problema asociado a la contaminación por metales pesados, en particular, el Hg (13). La presencia de este elemento en los alimentos plantea una amenaza directa para la seguridad alimentaria (14). Aunque la explotación aurífera a gran escala no es predominante en esta área, el uso de mercurio en la extracción de oro plantea la posibilidad de contaminación en la región. Esta exposición se origina en gran medida por las conexiones entre las corrientes fluviales que convergen en esta depresión geográfica (15). Se han identificado niveles significativos de Hg en los sedimentos, suelos, peces y macrófitas en la región de la mojana; vale la pena destacar que el ciclo de sequías y precipitaciones desempeña un papel de importancia en la acumulación de este metal (13,16,17).

El objetivo de la presente investigación fue analizar la bioacumulación de Hg en diferentes tejidos comestibles y no comestibles de la especie *Oriza sativa* L., en tres variedades criollas y tres variedades comerciales cultivadas en suelos provenientes de la región de La Mojana, para determinar el nivel de riesgo a la salud por la ingesta de arroz con trazas de Hg. Esta exploración cobra particular relevancia debido a las evidencias científicas que respaldan la capacidad del Hg para ser absorbido por la planta de arroz y llegar al grano (18–22); así mismo, es relevante considerar el potencial riesgo que esto implica para la salud humana (14).

Materiales y métodos

Muestreo y preparación del suelo

Se tomaron aproximadamente 300 kg de suelo superficial (0-30 cm) en un campo donde se han realizado cultivos de arroz durante varios años consecutivos, en el municipio de Majagual (Sucre). El suelo se trasladó hasta las instalaciones del Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba en el municipio de Montería. Para la selección del sitio de muestreo se tuvo en cuenta la influencia por contaminación de Hg, debido a los aportes que hacen los ríos por la hidrodinámica de la zona. En la región de Caño Mojana, perteneciente al municipio de Majagual, se han reportado concentraciones en sedimentos de 1187,6 ng g⁻¹ (23). El suelo se transportó en sacos de polipropileno nuevos que fueron previamente lavados con agua destilada y enjuagados con solución de ácido nítrico

al 5 %; luego, fue homogenizado y analizado para su contenido de Hg total, nutrientes y caracterización fisicoquímica; posteriormente, se cribó con un tamiz 4 y se dividió en dos lotes (24) y; finalmente, se humedeció hasta saturación y quedó listo para realizar el ensayo en donde se comparan las variedades comerciales y criollas.

Ensayo de potes

El experimento se llevó a cabo en una instalación de casa malla, situada en las instalaciones de la Universidad de Córdoba, durante el periodo comprendido entre octubre de 2014 y febrero de 2015. En este lapso, se registró una temperatura promedio de 27,8°C, con una humedad relativa entre el 76-82 %, condiciones climáticamente similares a las de la región de La Mojana. La ubicación geográfica fue a 8°55' de latitud norte y 75°49' de longitud oeste, y a una altitud de 20 metros sobre el nivel del mar.

Las semillas de arroz se clasificaron en dos subgrupos: 1) morfotipos comerciales: Fedearroz 2000, Fedearroz 473, Fedearroz Mocarí, las cuales fueron suministradas por la Federación Nacional de Arroceros de Colombia, y 2) morfotipos criollos: Ligerito belepano, Ina blanco y Fortuna morao, ampliamente cultivados en la región de La Mojana; estos fueron proporcionados por agricultores locales a partir de las semillas de la cosecha del ciclo anterior de arroz. Las semillas se sumergieron en un recipiente con agua durante 2 minutos y se descartaron aquellas que permanecieron flotando. Las semillas que pasaron el control de calidad anterior se consideraron para el experimento. Cada pote con capacidad aproximada de 20 litros, con una altura aproximada de 30 cm y un diámetro superior de 28 cm. En cada pote se agregaron 10 kg del suelo y sembraron 4 semillas.

Manejo agronómico del cultivo

Se realizó control de malezas de manera manual eliminando cualquier competencia para las plantas, de tal forma que no influenciaran su crecimiento. Se implementó un programa de fertilización edáfica basada en el requerimiento nutricional del cultivo. La primera aplicación de fertilizantes, compuesta por DAP (fosfato diamónico) y úrea, tuvo lugar 16 días después de que emergieran las plantas de arroz. Esta combinación permitió suplementar el nitrógeno proporcionado por la urea con fósforo adicional. A los días 45 y 80 después de la emergencia, se llevaron a cabo una segunda y tercera aplicación de urea y KCl (cloruro de potasio) para evitar posibles deficiencias en los macronutrientes esenciales para el desarrollo normal de las plantas. Además, el cultivo fue irrigado adecuadamente, dado que las unidades experimentales estaban contenidas en recipientes plásticos, lo que evitó pérdidas por infiltración. El suministro de agua se realizaba dos veces al día, tanto por la mañana como por la tarde, lo cual aseguró condiciones óptimas sin estrés hídrico.

Monitoreo del cultivo

El monitoreo del cultivo se realizó cada 5 días, verificando las condiciones fitosanitarias y la presencia de malezas. El monitoreo incluyó el registro de la altura de la planta y número de macollas. La medición de las alturas de las plantas se llevó a cabo con un flexómetro, desde la base del tallo de la planta de arroz hasta los ápices de las hojas, con un intervalo de registro de datos de 10 días, continuando así hasta el momento de la cosecha. Para el número de macollas por planta, se realizó un recuento de las macollas de cada planta a los 80 días desde su emergencia, con el propósito de asegurar que este proceso se hubiera desarrollado de manera significativa en las diversas variedades de arroz.

La biomasa en base seca fue determinada al concluir el ciclo de cultivo y se llevó a cabo mediante un corte basal de las plantas, las cuales se colocaron en bolsas de papel previamente rotuladas. Posteriormente, se sometieron a un proceso de secado en un horno a una temperatura constante de 38°C. Durante este proceso, se monitoreó de manera continua el peso de las muestras hasta que se alcanzó un peso constante.

A los 130 días desde la emergencia, se realizó la medición de la producción estimada en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}) con el objetivo de evaluar todos los tratamientos. En primer lugar, se desgranaron las espigas y se pesaron los granos de cada planta individualmente en cada tratamiento. Posteriormente, se calculó el peso promedio por réplica para obtener la producción por planta en cada tratamiento. Este cálculo se utilizó luego para estimar la producción por hectárea de arroz, expresada en kg ha^{-1} , multiplicando el peso promedio por planta por el número total de plantas por hectárea cosechada. Se tuvieron en cuenta, como datos referenciales para la estimación de la productividad (ton ha^{-1}), los valores aproximados promedios que se obtienen en la zona de las variedades tanto criollas como comerciales, teniendo como base que la producción óptima se da entre 200 y 250 plantas m^{-2} .

Análisis físico-químico del suelo

Se realizó análisis químico y físico a los suelos utilizando los siguientes métodos: CIC= capacidad de intercambio catiónico que corresponde a la sumatoria de $\text{Ca}+\text{K}+\text{Mg}+\text{Na}$; pH (potenciométrico relación suelo agua 1:1); materia orgánica (Walkley-Black); textura (método Boyoucos); azufre (monofosfato de calcio 0.008M); fósforo (Bray II) y Ca, K, Mg y Na (acetato de amonio 1M pH 7.0).

Análisis de mercurio total

Las muestras de suelo, raíz, grano y cáscara fueron secadas. Las muestras de suelo, a temperatura ambiente, en una cámara de secado por convección y las muestras de las diferentes partes de las plantas, en una estufa de secado por convección con control de temperatura a 38°C . Todas las muestras fueron finamente pulverizadas; para el caso de las muestras de suelo se empleó un mortero, mientras que, para los órganos de planta se empleó un molino tipo willye. Más adelante, las muestras se pasaron por un tamiz con un tamaño de malla de 20 y 200 mesh, para las plantas y suelo, respectivamente. La determinación de Hg se realizó por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica mediante análisis directo con el equipo DMA-80 TRICELL (Milestone) siguiendo el método EPA 7473 (25). El límite de detección fue de 0,01 ng de Hg total por muestra, y las curvas de calibración mostraron valores R^2 superiores a 0,9995. La exactitud se evaluó utilizando el material de referencia CRM 1753a de hojas de tomate, proporcionado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), Gaithersburg, MD, EE. UU. Se obtuvieron recuperaciones de $0,0339 \pm 0,0013 \text{ mg kg}^{-1}$, las cuales están dentro del rango permitido por dicho material. Para el análisis de suelos, se empleó el material de referencia IAEA-456 de sedimentos marinos, suministrado por el Departamento de Ciencias Nucleares y Aplicaciones de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), Viena, Austria, con recuperaciones de $0,07 \pm 0,003 \text{ mg kg}^{-1}$, también dentro del rango permitido por este material.

Factores de translocación y bioconcentración

Los factores de bioacumulación se calcularon como la relación entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de Hg en los diferentes tejidos de interés (raíz, grano pilado y cáscara) de las variedades de *Oryza sativa* L (26) de acuerdo con la ecuación 1. Por otra parte, el factor de translocación se calculó de acuerdo con la ecuación 2, mediante la relación entre la concentración de Hg en el grano y en la cáscara, y la concentración de Hg en la raíz.

$$F_{\text{bioacumulación}} = \frac{Hg_{\text{Organo de la planta}}}{Hg_{\text{suelo}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$F_{\text{translocación}} = \frac{Hg_{\text{grano o cáscara}}}{Hg_{\text{raíz}}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Evaluación del riesgo a la salud humana

Para evaluar la exposición al mercurio (Hg) debido al consumo de arroz, se calculó la ingesta semanal de Hg (IS_{Hg}), expresada en $\mu\text{g Hg kg}^{-1}$ de peso corporal semana⁻¹, utilizando la ecuación 3. Donde, C representa la concentración de Hg en el grano de arroz para cada uno de los tratamientos, medida en $\mu\text{g kg}^{-1}$, y IR es la tasa de consumo semanal de arroz, expresada en gramos por semana (g semana⁻¹). Según Argumedo-García *et al.* (15) en la región de La Mojana, la tasa de consumo semanal de arroz es de 1218 g semana⁻¹. Por su parte, el factor de exposición (FE) se considera igual a 1 cuando la dosis de exposición a un contaminante es igual a la referencia de dosis segura establecida por una agencia reguladora, como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este factor incorpora las variables de frecuencia la exposición (365 días año⁻¹), duración de la exposición (se consideró como 70 años) y el promedio de exposición o la cantidad de días al año que se debe estar expuesto para observar efectos no cancerígenos (se consideró como 365 días durante 70 años) (27). En este estudio, el peso corporal (PC) empleado para un adulto fue de 60 kg (28).

$$IS_{Hg} = C * \frac{IR}{PC} * FE \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 3 \end{array} \right.$$

Para evaluar el riesgo no cancerígeno a la salud humana, debido a la exposición de Hg a través del consumo de arroz, se empleó el cociente de peligro (CP_{Hg}) de acuerdo con la ecuación 4 (29). Esta ecuación relaciona la ingesta semanal de Hg calculada en la ecuación 3 con el valor de la ingesta semanal tolerable provisional (ISTP) para el Hg inorgánico, establecido por El Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios $4 \mu\text{g Hg kg}^{-1}$ de peso corporal semana⁻¹ (30)

$$CP_{Hg} = \frac{IS_{Hg}}{ISTP} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación 4} \end{array} \right.$$

Cuando los valores estimados de se encuentran por debajo de 1 se considera que no existe riesgo, sin embargo, cuando los valores son superiores a 1 se considera que existe riesgo.

Con el objetivo de evaluar el riesgo para diferentes grupos poblacionales, se utilizaron los datos generales de consumo de arroz de la Encuesta Nacional de Situación Nutricional 2005, incluyendo la información específica de consumo para los grupos etarios de 19 a 50 años y de 51 a 64 años (31). También, se tuvieron en cuenta los datos departamentales de consumo per cápita de arroz de la Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2021, realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y Fedearroz para el primer semestre del 2022, sobre el consumo semanal de arroz por persona, para los departamentos que incluyen municipios dentro de la región de La Mojana, los cuales reportan valores de acuerdo con la zona rural, cabecera municipal y población total (10).

Diseño experimental y análisis estadístico

Para la comparación entre variedades criollas y variedades comerciales se empleó la prueba t anidada. Las variedades criollas conformaron un tratamiento a partir de las tres repeticiones de cada uno de los tres morfotipos (Fortuna morao, Ina blanco, Ligerito belepano) y las variedades comerciales conformaron otro tratamiento formado a partir de las tres repeticiones de cada uno de los tres morfotipos (Fedearroz 2000, Fedearroz Mocari y Fedearroz 473).

Para la comparación entre morfotipos se empleó un análisis de la varianza (ANOVA) de una vía con seis tratamientos: tres tratamientos provenientes de las variedades comerciales y tres tratamientos

provenientes de las variedades criollas, cada tratamiento con tres repeticiones. En los casos en los que el ANOVA dio diferencias estadísticas significativas, se realizaron pruebas de contrastes múltiples de Tukey a un nivel de significancia del 95 %. Los resultados se presentan como la media \pm la desviación estándar de la media. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software GraphPad Prism 8.

Resultados y discusión

Crecimiento y desarrollo de las variedades criollas de arroz

Los resultados de la caracterización del suelo se muestran en la **tabla 7-1**. El suelo empleado presentó una textura franco-arcillosa, caracterizada por un pH ligeramente ácido de 5,7. En términos de composición, se identificó un contenido de materia orgánica del 2,51 %. Además, se observaron concentraciones significativas de calcio ($16,2 \text{ cmol+ kg}^{-1}$), magnesio ($10,4 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) y azufre ($55,4 \text{ mg kg}^{-1}$). Sin embargo, las proporciones de potasio ($0,32 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) y fósforo ($18,9 \text{ mg kg}^{-1}$) resultaron ser inferiores a las requeridas para el desarrollo fisiológico óptimo de las plantas.

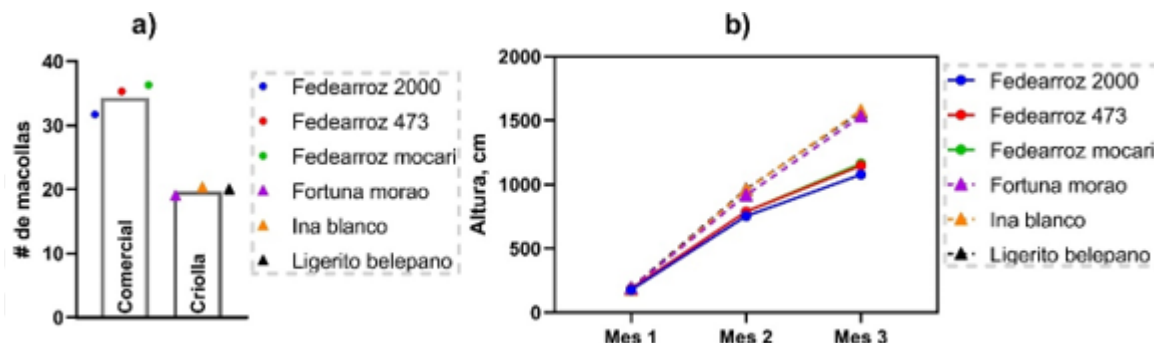
Tabla 7-1. Caracterización del suelo proveniente de Majagual empleado en el ensayo de potes

pH	Materia orgánica %	Azufre mg kg^{-1}	Fósforo mg kg^{-1}	Textura	
5,70	2,51	55,4	18,9	Franco - Arcillosa	
CIC	K	Mg	Ca	Na	Hg
	cmol+ kg^{-1}				mg kg^{-1}
27,0	0,32	10,4	16,2	0,09	0,13

La altura de las plantas y el número de macollas se presenta en la **figura 7-1**. Durante el primer mes, las plantas de *O. sativa* mostraron una altura similar con un rango entre 17,7 y 19,0 cm. No obstante, a partir del segundo mes, las variedades criollas mostraron longitudes notoriamente mayores (91,7-96,3 cm) respecto de las variedades comerciales (75,3-78,7 cm). Para el tercer mes, la diferencia de alturas fue más notoria, duplicando la diferencia del mes anterior, con la variedad criolla Ina blanco que fue de mayor longitud con 157,7 cm, mientras que la variedad Fedearroz 2000 fue la que presentó una menor altura final con 107,7 cm (**Figura 7-1b**). El número de macollas presentó un comportamiento inverso a la altura de las plantas (**Figura -1a**), dado que para las variedades comerciales se observó un mayor número de macollas (31,7 a 36,39 macollas por pote) en comparación con las variedades criollas (19,0 a 20,3 por pote).

Es sabido que la altura de las plantas se encuentra influenciada por factores tanto intrínsecos como extrínsecos, además su desarrollo está condicionado por una combinación entre sus patrones genéticos y cómo este se manifiesta bajo diversas condiciones agroecológicas. Así, la uniformidad en las mediciones de altura de la planta puede derivar de la predisposición genética a mantener esta propiedad constante en ciertas condiciones cualitativas (32); sin embargo, las condiciones de estrés generadas por la presencia del contaminante pueden no ser suficientes para provocar algún tipo de alteración en la altura de la planta (33). Aunque, es factible que en situaciones de estrés más intensas se presenten modificaciones en esta variable (34). Por otra parte, la diferencia entre el número de macollas de las variedades criollas y las variedades comerciales es atribuible al material genético, más que a las condiciones ambientales, dado que el número de macollas podría relacionarse con el rendimiento del cultivo, esta podría ser una desventaja de las variedades criollas respecto de las variedades comercial (35).

Figura 7-1. Variables morfométricas obtenidas de variedades comerciales y criollas del cultivo de *O. Sativa* L. a) número de macollas a los 80 días después de la emergencia y b) altura promedio (cm) mensual de las diferentes variedades de arroz analizadas en este estudio



Efecto sobre la biomasa y rendimiento

Los valores medios para la biomasa seca (g), y el rendimiento ($t\ ha^{-1}$) de cada variedad se presentan en la **Tabla 7-2**. Los valores máximos de biomasa y rendimiento se reportan para las variedades criollas, destacándose la variedad Fortuna morao con una biomasa y rendimiento de $366,16 \pm 56,50\ g$ y $3,73 \pm 0,013\ t\ ha^{-1}$. Estos valores de rendimiento para las variedades criollas son superiores a los reportados por Cadena y Reza, (36) en donde el mayor rendimiento obtenido en granjas del municipio de Majagual fue de $2,81\ t\ ha^{-1}$ en 2010; también, por Cárdena-Torres *et al.* (11), quienes reportaron rendimientos promedio de $2,25\ t\ ha^{-1}$, sin embargo, el rendimiento promedio de todos los municipios estudiados estuvo por debajo de $2,3\ t\ ha^{-1}$. Estas diferencias pueden deberse a la vulnerabilidad que se presenta en los agricultores locales, principalmente por la variabilidad climática y un manejo inadecuado de los paquetes tecnológicos, los cuales fueron controlados en el presente experimento. Con relación a las variedades comerciales, presentaron tanto biomasa como rendimientos inferiores a las variedades criollas, con los valores más bajos para Fedearroz Mocari con $178,46 \pm 32,25\ g$ de biomasa y un rendimiento de $2,45 \pm 0,004\ t\ ha^{-1}$.

Tabla 7-2. Biomasa seca, rendimiento de variedades criollas y comerciales de *O. sativa* L. cultivadas en suelos de La Mojana, prueba t anidada y ANOVA de una vía. Los tratamientos que comparten letras son estadísticamente iguales ($\alpha=0,05$) de acuerdo con la prueba de Tukey

Variedades	Tipo de variedad	Biomasa seca, g				Rendimiento, $t\ ha^{-1}$			
Fortuna morao	Criolla	366,13 \pm 56,50 a				3,73 \pm 0,013 a			
Ina blanco		364,61 \pm 33,83 a				2,62 \pm 0,019 b			
Ligerito belepano		302,89 \pm 42,14 ac				3,62 \pm 0,005 c			
Fedearroz 473	Comercial	180,31 \pm 58,20 b				2,47 \pm 0,003 dg			
Fedearroz 2000		215,00 \pm 22,22 bc				2,25 \pm 0,001 e			
Fedearroz mocari		178,46 \pm 32,25 b				2,45 \pm 0,004 fg			
Prueba t anidada		p=0,003 t=6,517 df=4				p=0,053 t=2,729 df=4			
ANOVA		SS	DF	MS	F; valor p	SS	DF	MS	F; valor p
Tratamiento entre columnas		1,768	5	0,3536	10,47; p<0,001	0,7037	5	0,1407	11897; p<0,001
Residual (intracolumnas)		0,4052	12	0,03377		0,000142	12	0,00001183	
Total		2,173	17			0,7038	17		

El ANOVA de una vía mostró que tanto la biomasa como el rendimiento fueron significativos ($p < 0,05$). Aunque todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticas en el rendimiento (excepto entre Fedearroz Mocari y Fedearroz 473, como se indica con letras diferentes en la Tabla 7 - 2), la prueba t anidada reveló que no hay diferencias significativas entre las variedades criollas y comerciales ($p = 0,053$). En cambio, para la biomasa, se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$).

Se debe prestar especial atención al hecho de que las variedades criollas alcanzaron mayores biomasa y rendimientos, aun cuando se realizó un manejo agronómico similar para todos los tratamientos, basado en los requerimientos del suelo de La Mojana. Esto podría sugerir la gran adaptabilidad de las variedades criollas a este tipo de suelo contrastado. Se puede esperar que, al evaluar diferentes genotipos de una especie, bajo las mismas condiciones, se presente una variabilidad en algunas características poligénicas, debido a la plasticidad fenotípica propia de los individuos (37).

Acumulación de mercurio en los tejidos de las plantas

La **Figura 7-2** muestra las concentraciones medias de Hg en raíz, grano y cáscara para los 6 morfotipos estudiados. La acumulación de Hg en los diferentes tejidos mostró la siguiente tendencia: raíz > cáscara > grano, excepto para la variedad Ina blanco, en donde la concentración en la cáscara superó la concentración de la raíz. Los morfotipos de arroz estudiados lograron bioacumular niveles de Hg en las raíces ($104,91$ a $199,99 \mu\text{g kg}^{-1}$) hasta un orden de magnitud similar al que se encontraban expuestas ($130 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Hg en el suelo), con excepción de Fedearroz Mocari, para la cual se hallaron concentraciones 2 y 3 veces mayores que el resto de las variedades ($345,2 \pm 196,9 \mu\text{g kg}^{-1}$). Algunos estudios manifiestan que las plantas usan a las raíces como un mecanismo de defensa ya que la mayor parte del contaminante queda almacenado en las raíces, donde la placa de hierro de la superficie de la raíz actúa como una barrera crítica para el transporte de Hg a las partes aéreas (21,38,39).

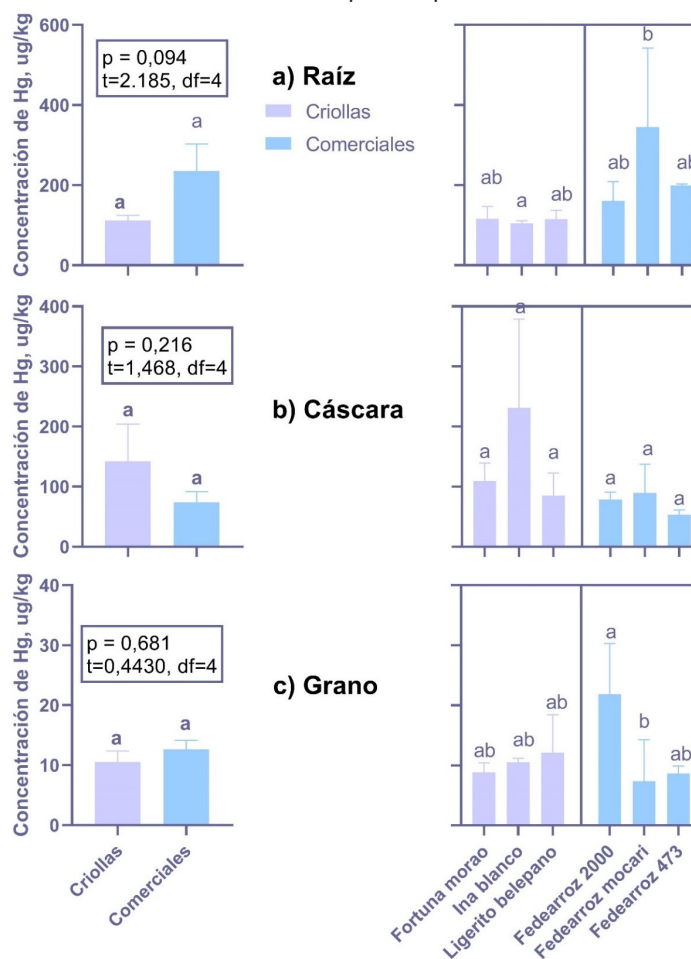
Por otro lado, en las variedades Fedearroz 473 y Ligerito belepano, la concentración de Hg en la cáscara alcanzó el mismo orden de magnitud ($109,65 \pm 29,58 \mu\text{g kg}^{-1}$ y $231,43 \pm 147,37 \mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente) que la concentración del suelo. Esto supone una necesidad de hacer seguimiento a la disposición de este residuo, dado que en diferentes localidades rurales de la región de La Mojana suele usarse como suplemento alimenticio para animales de corral e incluso para cerdos. La acumulación de Hg en el grano fue limitada con valores entre $0,32$ y $31,57 \mu\text{g kg}^{-1}$, y una media general de $11,57 \pm 6,64 \mu\text{g kg}^{-1}$; el promedio obtenido para la variedad Fedearroz 2000 fue de $21,84 \pm 8,47 \mu\text{g kg}^{-1}$, superando ligeramente el límite permisible para alimentos del estándar chino, el cual se encuentra fijado en $20 \mu\text{g kg}^{-1}$, con una de tres réplicas superando el umbral (40).

La concentración de Hg en la raíz de las variedades criollas frente a la concentración de Hg en la raíz de las variedades comerciales fue estadísticamente igual ($p = 0,094$). En promedio, las variedades comerciales bioacumulaban más Hg en la raíz, un comportamiento similar se observó para la concentración de Hg en el grano, donde la concentración de Hg fue ligeramente superior para las variedades comerciales, sin diferencias estadísticas comparadas con el grupo de variedades criollas. A diferencia de los tejidos mencionados, en la cáscara la concentración de Hg fue ligeramente superior en el grupo de variedades criollas, respecto del grupo de las variedades comerciales, sin diferencias estadísticas entre ambos grupos ($p = 0,681$).

En la **Figura 7-2b** se puede apreciar que, aunque la variedad Ina blanco mostró niveles de Hg en la cáscara más altos, en comparación con el resto de las variedades criollas y comerciales, la prueba de Tukey mostró que la concentración fue estadísticamente similar al resto de tratamientos. En general, se encontraron pocas diferencias entre tratamientos, sin importar el tejido estudiado.

Es conocido que el Hg puede interactuar con las diferentes partes de la planta de arroz, y que puede presentarse vía suelo-planta (39). El mecanismo de absorción por la planta podría ser similar al proceso aceptado para los micronutrientes (39). Sin embargo, también es aceptado que el mecanismo puede cambiar dependiendo de la especie, orgánica e inorgánica, del metal (41). Mayores concentraciones de Hg en la raíz pueden atribuirse a que es este órgano el que se encuentra directamente en contacto con el medio contaminado, lo cual ha sido evidenciado para diferentes especies vegetales (34,42,43), incluido el arroz (14,20,21,39). Asimismo, se espera que al incrementarse las concentraciones de Hg en el suelo, se incrementen las concentraciones de Hg en la raíz (22).

Figura 7-2. Concentraciones de Hg en a) raíz, b) cáscara y c) grano de las variedades criollas y comerciales cultivadas en suelos de La Mojana. df=grados de libertad. Los tratamientos que comparten letras son estadísticamente iguales ($\alpha=0,05$)



Las concentraciones de Hg en el grano para las variedades comerciales y criollas son consistentes con los reportados por Argumedo *et al.* (7), para arroz comercializado en las localidades rurales de Bajo Perano ($18,4 \pm 0,38 \mu\text{g kg}^{-1}$) y Caño Rabón ($15,7 \pm 0,47 \mu\text{g kg}^{-1}$), en el municipio de San Marcos; pero, no se especifica qué tipo de variedad se empleó en dicho estudio. Asimismo, los resultados obtenidos en el presente trabajo, bajo condiciones controlados en casa malla, son comparables a los reportados por Marrugo-Negrete *et al.* (44) quienes monitorearon cultivos de arroz en los municipios de Guaranda, San Marcos, Sucre, San Benito y Majagual de la región de la Mojana, y observaron concentraciones de Hg en el grano de 15,3, 12,0, 11,6, 10,5 y 8,7 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente.

En cuanto a otros estudios en Colombia, se han reportado concentraciones similares a las de nuestro estudio en la región del Atrato, donde Caicedo-Rivas *et al.* (45) reportaron concentraciones de $12,02 \pm 2,2$ para el medio Atrato y de $1,51 \pm 0,1 \mu\text{g kg}^{-1}$ en Vigía del Fuerte. Por su parte, Alfaro-Rodríguez *et al.* (46)

hallaron concentraciones de Hg de 22 a 24 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en granos de arroz cultivados en la cuenca del río Bogotá. Como contraparte, los niveles de Hg en el grano en nuestro estudio son ligeramente superiores a los referidos por Han *et al.* (27) para 143 variedades de arroz comercializadas en el mercado de Guiyang, quienes localizaron concentraciones de Hg entre 0,97 y 13,1 $\mu\text{g kg}^{-1}$, con una media de 3,88 $\mu\text{g kg}^{-1}$.

Lo anterior podría sugerir que la acumulación de Hg en el grano de *O. sativa* es limitada y no representaría ningún tipo de riesgo. No obstante, en China se ha reportado que el grano de arroz puede acumular Hg en niveles entre 52,0 a 632,2 $\mu\text{g kg}^{-1}$ cuando se cultiva en suelos con alto contenido de Hg (4,7 mg kg^{-1}), lo que sugiere que la acumulación es dependiente de las características fenotípicas y genotípicas (47).

En el caso de áreas rurales de la provincia de Guizhou, donde las concentraciones de Hg en el grano de arroz superaron los 70 $\mu\text{g kg}^{-1}$, una evaluación de riesgo de múltiples fuentes de exposición a Hg y metilmercurio (MeHg), incluido el pescado, mostró que el MeHg contribuía en más de un 90 % de la ingesta probable diaria, lo que sugiere que la fuente de exposición por consumo de arroz puede llegar a ser más relevante que otras fuentes de exposición como el consumo de pescado (48).

Factores de bioacumulación y translocación

En la **Tabla 7-3** se presentan los factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT) para las variedades de arroz estudiadas en el experimento. Se observa que las tres variedades comerciales presentan FBC suelo/raíz superior a la unidad, entre 1,22 y 2,66. En conjunto, las variedades comerciales también sobrepasaron el límite de 1, sugiriendo el potencial de bioacumulación de Hg en las raíces de *O. sativa* L., incluso en suelos con concentraciones bajas de Hg como los del presente estudio. Los FBC raíz obtenidos se encuentran en el rango de los reportados por Liu *et al.* (49) quienes encontraron FBC entre 0,86 y 3,9 para variedades de arroz cultivadas en China, en suelos con concentraciones de Hg en el rango de 35 y 140 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Los FBC suelo/grano y suelo/cáscara fueron inferiores a la unidad, demostrando la poca habilidad de *O. sativa* L., para transferir el Hg desde el suelo hasta el tejido superior en las variedades comerciales.

Las variedades criollas presentaron FBC suelo/raíz inferior a la unidad en todos los tratamientos y también en el conjunto de las tres variedades. Esto podría sugerir una habilidad para prevenir la transferencia del Hg desde el suelo hacia otros órganos de la planta. Los demás factores de bioconcentración suelo/grano y suelo/cáscara también fueron menores a 1, e incluso fueron menores que el factor de bioconcentración en la raíz ($\text{FBC}_{\text{raíz}}$). No obstante, el factor de translocación en la raíz – cáscara ($\text{FT}_{\text{raíz-cáscara}}$) para la variedad Ina blanco fue superior la unidad, siendo el único tratamiento y el único de los factores de translocación (FT) calculados para el cual se observó este comportamiento.

En general, las variedades de *O. sativa* L. de nuestro estudio presentaron una habilidad limitada para traslocar el Hg desde el suelo o la raíz hacia los tejidos aéreos, sobre todo hacia el grano. Algunos autores sugieren que valores de $\text{FBC}_{\text{raíz}} \leq 1$ indican que la planta puede absorber el metal, pero no lo puede bioacumular (49). No obstante, para el caso de la especie *O. sativa* L., la bioacumulación de Hg ha sido ampliamente estudiada, y se ha demostrado que se encuentra mediada por la cantidad de MeHg en el suelo. Cuanto más MeHg hay en el suelo, mayor es la posibilidad de bioacumulación de MeHg en cualquier órgano; sin embargo, la metilación de Hg en suelos se encuentra limitada por diferentes factores ambientales y biológicos. En cuanto al Hg inorgánico, es aceptado que existen dos fuentes posibles de su presencia en el grano: una vía es por absorción desde las raíces y translocación hacia el grano, pero la mayor cantidad de Hg inorgánico proviene de la absorción foliar del Hg atmosférico (49).

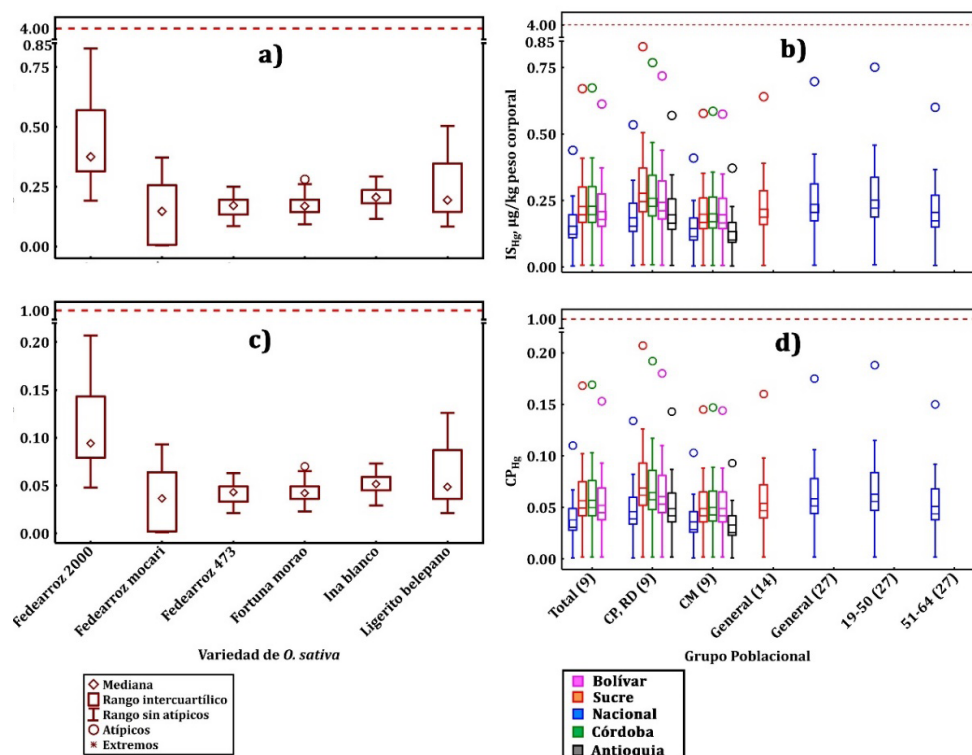
Tabla 7-3. Factores de bioconcentración y translocación de Hg estimados para las variedades criollas y comerciales de arroz en suelos de la región de La Mojana

Variedad	FBC _{raíz}	FBC _{grano}	FBC _{cáscara}	FT _{raíz-grano}	FT _{raíz-cáscara}	FT _{grano-cáscara}
Fedearroz 2000	1,23 ± 0,38	0,07 ± 0,04	0,09 ± 0,05	0,01 ± 0,01	0,18 ± 0,1	0,14 ± 0,08
Fedearroz mocari	2,66 ± 1,52	0,05 ± 0,03	0,36 ± 0,21	0,05 ± 0,03	0,15 ± 0,08	0,15 ± 0,09
Fedearroz 473	1,54 ± 0,02	0,01 ± 0,01	0,06 ± 0,03	0,01 ± 0,00	0,04 ± 0,02	0,05 ± 0,03
Variedades comerciales	1,81 ± 1,02	0,10 ± 0,07	0,57 ± 0,23	0,07 ± 0,05	0,36 ± 0,17	0,19 ± 0,13
Fortuna morao	0,89 ± 0,24	0,01 ± 0,01	0,23 ± 0,13	0,04 ± 0,02	0,14 ± 0,08	0,05 ± 0,03
Ina blanco	0,81 ± 0,05	0,01 ± 0,00	1,13 ± 0,65	0,01 ± 0,01	1,34 ± 0,77	0,04 ± 0,02
Ligerito belepano	0,89 ± 0,17	0,05 ± 0,03	0,29 ± 0,17	0,06 ± 0,04	0,42 ± 0,24	0,03 ± 0,02
Variedades criollas	0,86 ± 0,15	0,08 ± 0,03	1,09 ± 0,79	0,10 ± 0,04	1,31 ± 0,97	0,10 ± 0,05

Riesgo a la salud humana

La Figura 7-3 permite visualizar tanto los valores de *ingesta semanal* de Hg debido al consumo de arroz y el cociente de peligro estimado a partir de la *ingesta semanal* de Hg, y del umbral de ISTP de la JECFA. La IS_{Hg} estuvo entre 0,004 y 0,829 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal a la semana, con una media de 0,225 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal a la semana. La variedad Federarroz 2000 exhibió los niveles más altos, $0,424 \pm 0,161 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal a la semana, siendo este valor 10 veces más bajo que el valor de ISTP de la JECFA.

Figura 7-3. a) valores de ingesta semanal estimada de Hg (IS_{Hg}) de acuerdo con la variedad de arroz y b) de acuerdo con el grupo poblacional, c) cocientes de peligro para las seis variedades estudiadas y d) para los grupos poblacionales



Con relación a los valores de IS_{Hg} estimados de acuerdo con el tipo de población, se observa una amplia dispersión de los datos sin importar la variedad; al comparar este valor con el reportado para los Centros Poblados (CP) y Rural Disperso (RD) del departamento de Sucre (Figura 7-3b) se encontró el valor más elevado de IS_{Hg} . En ninguno de los casos analizados, el cociente de peligro fue mayor a la unidad, demostrando que no existe riesgo a la salud por exposición a Hg debido al consumo de arroz. Los

cocientes de peligros estuvieron entre 0,001 y 0,207. En general, los valores de CPHg presentaron medias similares, aunque en la **Figura 7–3d** se observa que para los datos provenientes de la Encuesta Nacional de Vida del DANE existe una mayor dispersión, principalmente porque los datos de consumo de arroz son más elevados. Los resultados para el cociente de peligro fueron menores en todos los tratamientos a los reportados por Enamorado *et al.* (22) y Argumedo *et al.* (15). Estos últimos encontraron que el 5 % de sus muestras sobrepasaba el valor de dosis de referencia RfD. Por su parte, Argumedo *et al.* (15) y Caicedo Rivas *et al.* (45) reportaron valores de *ingesta diaria estimada* de Hg, entre 0,06 y 0,08 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal día y 0,002 y 0,021 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal día, que al convertirlos a Ingesta Semanal se observa que están en el mismo rango de lo reportado en el presente estudio.

Conclusiones

Las diferentes variedades de *Oryza sativa* L. cultivadas en suelos de la región de La Mojana con bajo contenido de Hg, se lograron llevar hasta su cosecha exitosa, bajo un plan de fertilización acorde a los requerimientos nutricionales del cultivo y un manejo de malezas adecuado.

La acumulación de Hg en la raíz fue superior a la cáscara y esta, a su vez, superior al grano. La concentración en el grano es similar para todas las especies estudiadas, sin importar si el morfotipo es comercial o criollo. Esto puede deberse a que la raíz de la planta de arroz tiene una gran capacidad de interactuar con el Hg presente en el suelo; lo anterior se evidencia con valores de FBC superiores a la unidad, siendo las variedades criollas menos susceptibles de interactuar con Hg del suelo.

La ruta de exposición a Hg por consumo de arroz no representa un riesgo para la salud en la región de La Mojana, sin importar las variedades comerciales y criollas. Aun cuando el arroz es un alimento de alto consumo en la región y cuando este es cultivado en suelos que han sido impactados indirectamente por la contaminación con Hg.

Agradecimientos

El presente trabajo se financió a través del Fondo Ciencia Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías como parte del proyecto “Implementación de estrategias de gestión de riesgo en el manejo integral de zonas de recarga de los acuíferos utilizados como fuente de abastecimiento de las comunidades de la subregión Mojana, departamento de Sucre”, código BPIN 2020000100361.

Referencias

1. Khan MA, Khan S, Khan A, Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Sci Total Environ.* 2017 Dec;601-602:1591-605.
2. Ma Y, Zheng W, An Y, Chen L, Xu Q, Jiang A. Mercury contamination in terrestrial predatory birds from Northeast China: Implications for species and feather type selection for biomonitoring. *Ecol Indic.* 2021 Nov;130:108108.
3. Oladoye PO, Olowe OM, Asemoloye MD. Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature. *Chemosphere.* 2022 Feb;288:132555.
4. Teng H, Altaf AR. Elemental mercury (Hg⁰) emission, hazards, and control: A brief review. *J Hazard Mater Adv.* 2022 Feb;5:100049.
5. Xiao R, Wang S, Li R, Wang JJ, Zhang Z. Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2017 Jul;141:17-24.
6. Marrugo-Madrid S, Pinedo-Hernández J, Paternina-Urbe R, Marrugo-Negrete J, Díez S. Health risk assessment for human exposure to mercury species and arsenic via consumption of local food in a gold mining area in Colombia. *Environ Res.* 2022 Dec 1;215:113950.

7. Argumedo M, Vergara C, Vidal JV, Marrugo Negrete JL. Evaluación de la concentración de mercurio en arroz (*Oryza sativa*) crudo y cocido procedente del municipio de San Marcos- Sucre y zona aurífera del municipio de Ayapel - Córdoba. *Univ Ind Santander Salud*. 2015;2(47):169-77.
8. Statista. Arroz: producción mundial 2011-2021 [Internet]. 2023 [citado 2023 Sep 11]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/517456/produccion-mundial-de-arroz/>
9. FAO O de las NU para la A y la A. Situación Alimentaria Mundial, Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales [Internet]. 2023 [citado 2023 Oct 5]. Disponible en: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
10. DANE. Encuesta nacional de arroz mecanizado (ENAM), I Semestre 2022 [Internet]. 2022 [citado 2023 Oct 11]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/boletin_ENAM_Isem22.pdf
11. Cadena-Torres J, Cuello-Pérez DM, Romero-Ferrer JL, Pérez-Cantero SP. Characterization of the creole-rice production system in La Mojana, in Colombia. *Cienc Agric*. 2021;18(2):67-82.
12. Camacho J. Acumulación tóxica y despojo agroalimentario en La Mojana, Caribe colombiano. 2017. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0486-65252017000100123&script=sci_arttext
13. De la Ossa CA, Ramírez-Giraldo AF, Arroyo-Alvis K, Marrugo-Negrete J, Díez S. Neuropsychological effects, and cognitive deficits associated with exposure to mercury and arsenic in children and adolescents of the Mojana region, Colombia. *Environ Res*. 2023;216:114467.
14. Tang Z, Fan F, Deng S, Wang D. Mercury in rice paddy fields and how does some agricultural activities affect the translocation and transformation of mercury - A critical review. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2020 Oct 1;202:110950.
15. Argumedo-García M, Consuegra-Solórzano A, Vidal-Durango J, Marrugo Negrete JL. Exposición a mercurio en habitantes del municipio de San Marcos (Departamento de Sucre) debida a la ingesta de arroz (*Oryza sativa*) contaminado. *Rev Salud Publica*. 2013;15(6):903-15.
16. Calao-Ramos C, Gaviria-Angulo D, Marrugo-Negrete J, Calderón-Rangel A, Guzmán-Terán C, Martínez-Bravo C, et al. Bats are an excellent sentinel model for the detection of genotoxic agents. Study in a Colombian Caribbean region. *Acta Trop*. 2021 Dec;224:106141.
17. Marrugo-Negrete J, Vargas-Licon S, Ruiz-Guzmán JA, Marrugo-Madrid S, Bravo AG, Díez S. Human health risk of methylmercury from fish consumption at the largest floodplain in Colombia. *Environ Res*. 2020 Mar;182:109050.
18. He Y, Yang X, Li Z, Wang T, Ma C, Wen X, et al. Aging rice straw reduces the bioavailability of mercury and methylmercury in paddy soil. *Chemosphere*. 2023;339:139711.
19. Li H, Li Y, Tang W, Liu Y, Zheng L, Xu N, et al. Bioavailability and methylation of bulk mercury sulfide in paddy soils: New insights into mercury risks in rice paddies. *J Hazard Mater*. 2022;424:127394.
20. Strickman RJ, Larson S, Huang H, Kakouros E, Marvin-DiPasquale M, Mitchell CPJ, et al. The relative importance of mercury methylation and demethylation in rice paddy soil varies depending on the presence of rice plants. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2022 Jan 15;230:113143.
21. Wang Y, Chen L, Chen Y, Xue Y, Liu G, Zheng X, et al. Effects of varying amounts of different biochars on mercury methylation in paddy soils and methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Sci Total Environ*. 2023 May 20;874:162459.
22. Enamorado-Montes G, Reino-Causil B, Urango-Cardenas I, Marrugo-Madrid S, Marrugo-Negrete J. Mercury accumulation in commercial varieties of *Oryza sativa* L. cultivated in soils of La Mojana region, Colombia. *Toxics*. 2021 Nov;9(11):304.

23. Pinedo-Hernández J, Marrugo-Negrete J, Díez S. Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere*. 2015 Jan 1;119:1289-95.
24. Mahar A, Wang P, Ali A, Awasthi MK, Lahori AH, Wang Q, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2016 Apr 1;126:111-21.
25. U.S. EPA. Method 7473 (SW-846): Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry. Washington, DC; 1998.
26. Yanqun Z, Yuan L, Jianjun C, Haiyan C, Li Q, Schwartz C. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China. *Environ Int*. 2005 Jul 1;31(5):755-62.
27. Han J, Chen Z, Pang J, Liang L, Fan X, Li Q. Health risk assessment of inorganic mercury and methylmercury via rice consumption in the urban city of Guiyang, Southwest China. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(2):216.
28. UERIA. Perfil de riesgo de arsénico en arroz en Colombia. [Internet]. Bogotá: Instituto Nacional de Salud; 2013 [citado 2023 Oct 9]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/Vigilancia/Publicaciones%20ERIA%20y%20Plaguicidas/PERFIL%20ARSENICO%20EN%20ARROZ.pdf>
29. Granero S, Domingo JL. Levels of metals in soils of Alcalá de Henares, Spain: Human health risks. *Environ Int*. 2002;28(3):159-64.
30. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the Seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). World Health Organ. 2011;791 p.
31. ICBF. Encuesta nacional de la situación nutricional en Colombia (ENSIN). Bogotá: ICBF; 2005 [citado 2023 Oct 9]. Disponible en: <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/encuesta-nacional-situacion-nutricional>
32. FAO o de las NU para la A y la A. Problemas y limitaciones de la producción de arroz [Internet]. 2023 [citado 2023 Sep 11]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/Y2778S/y2778s04.htm>
33. Huybrechts M, Hendrix S, Kyndt T, Demeestere K, Vandamme D, Cuyper A. Short-term effects of cadmium on leaf growth and nutrient transport in rice plants. *Plant Sci*. 2021 Dec;313:111054.
34. Marrugo-Negrete J, Durango-Hernández J, Pinedo-Hernández J, Olivero-Verbel J, Díez S. Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. *Chemosphere*. 2015;127:58-63.
35. Jarama A, Degiovanni Beltramo VM, Montoya RA. Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. En: Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) [Internet]. Cali, co: Publicación CIAT No. 365; 2010. p. 60-82. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/82473>
36. Cadena J, Reza S. Evaluación a nivel de prefactibilidad de los requerimientos para establecer un nicho mojanero de arroz limpio (arroz fino). 2013.
37. Donoso C, Premoli AC, Gallo L, Ipinza R. Variación intraespecífica en las Especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. 2004. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/256477385_Variacion_Intraespecifica_En_Las_Especies_Arboreas_De_Los_Bosques_Templados_De_Chile_Y_Argentina
38. Tang B, Chen J, Wang Z, Qin P, Zhang X. Mercury accumulation response of rice plant (*Oryza sativa* L.) to elevated atmospheric mercury and carbon dioxide. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2021 Nov 1;224:112628.
39. Zhao L, Meng B, Feng X. Mercury methylation in rice paddy and accumulation in rice plant: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2020;195:110462.

40. CNSA. Maximum levels of contaminants in foods. In: Chinese National Standard Agency BiC, editor. Beijing; 2005.
41. Pu Q, Zhang K, Poulain AJ, Liu J, Zhang R, Abdelhafiz MA, *et al.* Mercury drives microbial community assembly and ecosystem multifunctionality across a Hg contamination gradient in rice paddies. *J Hazard Mater.* 2022;435:129055.
42. Pérez Vargas HM, Vidal Durango JV, Marrugo JL. Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají (*Capsicum annum*). *Rev Salud Pública.* 2015 Jul 16;16(6):897-909.
43. Vidal Durango JV, Marrugo Negrete JL, Jaramillo Colorado B, Perez Castro LM. Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ing Desarro.* 2010 Jun;(27):113-29.
44. Marrugo Negrete JL, Pinedo-Hernández J, Paternina-Uribe R, Quiroz-Aguas L, Pacheco-Florez S. Distribución espacial y evaluación de la contaminación ambiental por mercurio en la región de la Mojana, Colombia. *Rev MVZ Córdoba.* 2018;23.
45. Caicedo-Rivas G, Salas-Moreno M, Marrugo Negrete JL. Health risk assessment for human exposure to heavy metals via food consumption in inhabitants of middle basin of the Atrato River in the Colombian Pacific. *Int J Env Res Public Health.* 2023;20(1).
46. Alfaro-Rodríguez R, García-Barros E, Montenegro-Ramos O. Niveles de contaminación de mercurio, cadmio, arsénico y plomo en subsistemas de producción de la cuenca baja del río Bogotá. *Bogotá Univ Cienc Apl Ambient.* 2002.
47. Zhu C, Shen G, Yan Y, He J. Genotypic variation in grain mercury accumulation of lowland rice. *J Plant Nutr Soil Sci.* 2008;171(2):281-5.
48. Zhang H, Feng X, Larssen T, Qiu G, Vogt RD. In Inland China, rice, rather than fish, is the major pathway for methylmercury exposure. *Environ Health Perspect.* 2010. Disponible en: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.1001915>
49. Liu WX, Shen LF, Liu JW, Wang YW, Li SR. Uptake of toxic heavy metals by rice (*Oryza sativa* L.) cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou City, People's Republic of China. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2007;79(2):209-13.