

Capítulo 26. Metales pesados en arroz

Eimmy Ramírez M., Jorge Yáñez S., Mario Paredes C., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V.

La alimentación puede constituir una importante fuente de exposición a metales y metaloides para la población, en comparación con otras formas como la inhalación y el contacto dérmico (Jarup, 2003; Zhuang et al., 2009; Orisakwe et al., 2012). Considerando que el arroz es un alimento básico de consumo masivo para más de la mitad de la población mundial, su inocuidad es relevante (Gross y Zhao, 2014). Además, el arroz es la principal fuente de carbohidratos usada en la elaboración de alimentos para niños (infant foods) y celíacos (Guillod-Magnin et al., 2018; Jung, 2018). Varios estudios recientes han informado sobre la presencia de arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg) en el arroz (Farías et al., 2015; Fu et al., 2015; Jallad, 2015; Keshavarzi et al., 2015; Liu et al., 2016; Segura et al., 2016; Nunes y Otero, 2017; Al-Saleh y Abduljabbar, 2017; Suriyagoda et al., 2018; Chen et al., 2018). Por ejemplo, en Argentina los niveles promedio de As en arroz alcanzan $380 \mu\text{g kg}^{-1}$, en Ecuador $60 \mu\text{g kg}^{-1}$, en Brasil $138 \mu\text{g kg}^{-1}$, China $140 \mu\text{g kg}^{-1}$, Bangladesh $130 \mu\text{g kg}^{-1}$, U.S.A. $250 \mu\text{g kg}^{-1}$, España $200 \mu\text{g kg}^{-1}$, e Italia $150 \mu\text{g kg}^{-1}$, entre otros países (Cuadro 1).

Cuadro 1. Concentración promedio de metales pesados en muestras de arroz.

Tipo	País de origen	As ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Cd ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Pb ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Hg ($\mu\text{g kg}^{-1}$)
Grano largo blanco	Australia	160	5	7	8
Orgánico negro	China	320	15	6	5
Blanco	Egipto	69	5	8	8
Blanco	Egipto	130	5	6	8
Grano largo blanco	Francia	183	12	6	4
Mezcla arroz orgánico	Alemania	380	5	11	5
Grano largo integral	India	160	5	8	6
Grano largo blanco	India	74	22	7	5
Grano largo integral	India	160	16	6	6
Grano largo blanco	Italia	350	28	6	4
Grano largo blanco	Pakistán	100	39	7	5
Samba	Sri Lanka	53	5	6	7
Rojo crudo	Sri Lanka	56	170	5	8
Grano largo blanco	Tailandia	200	5	5	6
Glutinoso	Tailandia	150	15	7	5
Grano largo blanco	U.S.A.	210	15	5	7
Medio blanco	U.S.A.	140	5	8	14
Grano largo integral	U.S.A.	370	22	6	4

Fuente: Jallad, 2015.

La exposición crónica, incluso a bajos niveles de As y metales, puede dañar múltiples órganos y está relacionada con distintas enfermedades (Tchounwou et al., 2012). Particularmente el As se asocia con mayores tasas de cáncer de piel, vejiga, pulmón y riñón, así como también con enfermedades del corazón (Hite, 2013). En el caso específico de los niños, el As puede provocar retraso en el crecimiento, incremento de la presión sanguínea y compromiso en la función renal (Gardner et al., 2013; Hawkesworth et al., 2013). Dentro de la producción de granos, el mayor problema se presenta en el arroz (Meharg et al., 2009; EFSA, 2009; FAO-WHO, 2012), ya que la planta absorbe y asimila hasta 10 veces más As que otros cereales, convirtiéndose en una de las principales fuentes de As en la dieta de la población (Williams et al., 2005; Meharg et al., 2009; Tuli et al., 2010; Gilbert-Diamond et al., 2011). Por otro lado, el contenido de metales pesados, incluido el As, en el arroz, varía con el tipo de suelo, pH, manejo del agua, suministro de fertilizantes y variedades genéticas de la planta (Kumarathilaka et al., 2018).

Regulación y normativas

En los últimos años, los problemas por sustancias o elementos peligrosos en los alimentos han empezado a tomar una mayor relevancia debido a las mayores exigencias de inocuidad de los alimentos y a que las agencias reguladoras de los países y el comercio internacional son cada vez más estrictas para resguardar la salud de la población (Meharg et al., 2009). En consecuencia, algunas organizaciones internacionales, como La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), y el Comité Mixto de Expertos (JECFA), establece una ingesta diaria tolerable (TDI) para el As, Cd, Pb y Hg, de 50; 1; 3,6 y 0,7 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de peso corporal, respectivamente (WHO, 2000). Además, la ingesta semanal tolerable provisional (ISTP) establecida para Cd, Pb y Hg alcanza a 7, 25 y 5 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de peso corporal, respectivamente (WHO, 1988). En el Cuadro 2 se indican rangos de concentración de metales en la dieta de países del mundo. Sin embargo, en Chile no existe una normativa que regule los límites máximos de metales pesados en arroz, como lo establecen otros países (EFSA, 2009) y como recomienda la FAO/OMS (FAO/WHO, 2012) que fijan estrictas normativas para la presencia de niveles máximos de As inorgánico en arroz blanco, integral y arroz para consumo infantil (200, 400 y 100 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente).

En Chile, el Reglamento Sanitario de los Alimentos, Decreto Supremo N°977/96, señala que los elementos como cereales, legumbres y leguminosas, no deberán sobrepasar los niveles de As (500 $\mu\text{g kg}^{-1}$), Hg (50 $\mu\text{g kg}^{-1}$) y Pb (500 $\mu\text{g kg}^{-1}$), no existiendo información para el caso del Cd. Específicamente, en el caso del arroz, el Reglamento Sanitario de los Alimentos (Decreto Supremo N°977/96) señala que el límite máximo de arsénico en arroz pulido no podrá sobrepasar los 0,20 mg kg^{-1} de As total.

Respecto al agua de riego, la Norma Chilena Oficial NCH 1333 (INN, 1987) indica que las concentraciones máximas de los elementos químicos en agua para riego son: As (0,10 mg L^{-1}), Cd (0,01 mg L^{-1}), Hg (0,001 mg L^{-1}), Pb (5,0 mg L^{-1}). En suelos agrícolas, la Normativa Chilena vigente NCh 2952c (INN, 2004) indica que el límite máximo permitido para metales pesados es 20 mg kg^{-1} . Sin embargo, no existe una norma específica que establezca límites permitidos de estos elementos en el grano de arroz y sus derivados.

Cuadro 2. Ingesta diaria promedio estimada de metales pesados en base a datos recopilados en la literatura para una persona de 60 kg.

País	Consumo arroz (kg año ⁻¹ cápita ⁻¹)	As MEDI (µg d ⁻¹ kg ⁻¹ pc)	As % TDI	Cd MEDI (µg d ⁻¹ kg ⁻¹ pc)	Cd % TDI	Pb MEDI (µg d ⁻¹ kg ⁻¹ pc)	Pb % TDI
Australia	21,6	0,1	0,2	0,02	1,87	0,02	0,49
Bangladesh	215,3	1,0	1,9	0,19	18,68	0,18	4,92
China	95,4	0,4	0,9	0,08	8,28	0,08	2,18
India	79,0	0,4	0,7	0,07	6,85	0,06	1,80
Indonesia	161,4	0,7	1,5	0,14	14,00	0,13	3,68
Japón	61,6	0,3	0,6	0,05	5,34	0,05	1,41
Malasia	95,9	0,4	0,9	0,08	8,32	0,08	2,19
Birmania	227,0	1,0	2,1	0,20	19,69	0,19	5,18
Pakistán	15,2	0,1	0,1	0,01	1,32	0,01	0,35
Filipinas	128,1	0,6	1,2	0,11	11,11	0,11	2,92
Corea del Sur	93,0	0,4	0,8	0,08	8,07	0,08	2,12
Taiwán	46,0	0,2	0,4	0,04	3,99	0,04	1,05
Tailandia	165,0	0,7	1,5	0,14	14,32	0,14	3,77
Vietnam	217,4	1,0	2,0	0,19	18,86	0,18	4,96
Unión Europea	6,0	0,1	0,1	0,00	0,30	0,00	0,08
Emiratos Árabes	80,0	0,3	0,5	0,08	8,40	0,34	9,44
Egipto	42,1	0,1	0,3	0,04	4,42	0,18	4,97
Irán	49,8	0,2	0,3	0,05	5,23	0,21	5,87
Irak	43,2	0,1	0,3	0,05	4,54	0,18	5,10
Arabia Saudita	46,1	0,1	0,3	0,05	4,84	0,20	5,44
Turquía	8,8	0,0	0,1	0,01	0,92	0,04	1,04
Costa de Marfil	76,7	-	-	0,06	5,53	-	-
Nigeria	37,5	-	-	0,03	2,71	-	-
Sudáfrica	20,2	-	-	0,01	1,46	-	-
Canadá	11,3	0,1	0,2	0,01	1,34	0,01	0,16
México	8,7	0,1	0,2	0,01	1,31	0,00	0,10
EE.UU.	14,0	0,1	0,3	0,02	1,66	0,01	0,20
Argentina	8,0	0,1	0,2	0,01	1,21	0,00	0,09
Uruguay	32,7	0,4	0,9	0,05	4,93	0,01	0,37

MEDI: Medio; TDI: ingesta diaria tolerable; pc: peso corporal. Fuente: Jallad, 2015.

Factores que influyen en el contenido de metales pesados y arsénico en el grano de arroz

Existen diversas medidas agronómicas que pueden ser usadas para minimizar la biodisponibilidad de As y otros metales en el suelo y, por lo tanto, su acumulación en la planta de arroz, aunque se requieren más estudios para probar su efectividad y reproducibilidad. Estas medidas incluyen parámetros fisicoquímicos del suelo como: concentración de estos elementos en el suelo, estado redox, concentración y tipo de hidróxidos de Fe poco cristalinos, P disponible, textura, pH, silicio (Si) disponible y azufre (S) (Cheng et al., 2004; Bogdan y Schenk, 2009; Zhao et al., 2010; Fu et

al., 2011; Amaral et al., 2017). Además, durante las últimas décadas se han desarrollado otros métodos, como proporcionar fuentes alternativas de riego y/o estrategias de manejo del agua de riego, aplicación de biosorbentes, fitorremediación, uso de suelos recuperados, selección de variedades genéticas de arroz, los cuales también tienen influencia en el contenido de As y metales en la planta y grano de arroz (Suriyagoda et al., 2018).

Fertilización

Existe un amplio número de trabajos que indican un potencial de reducción en la absorción y acumulación de As mediante la aplicación de fertilizantes inorgánicos y orgánicos (compost), los cuales pueden inmovilizar, adsorber o co-precipitar el As *in situ*. Particularmente, la competencia entre el fosfato y el As (V) debido a sus similitudes químicas, se ha descrito a menudo en la literatura (Sadiq, 1997; Bogdan y Schenk, 2009). El fosfato puede desplazar al As (V) desde los sitios de unión en el suelo y, por lo tanto, aumentar la disponibilidad de As y la absorción por las plantas (Peryea, 1991; Sadiq, 1997). Por otro lado, las plantas absorben fosfato y As (V) por los mismos canales transportadores (Ullrich-Eberius et al., 1989; Meharg y Macnair, 1992). Por ello, en suelos con una alta concentración de P disponible para la planta, la competencia entre As (V) y P por los transportadores de fosfato en las raíces, disminuiría la absorción de As y su concentración y contenido en la planta (Meharg y Macnair, 1990; Jiang et al., 2014). Además, una alta concentración interna de P induce la regulación a la baja de los transportadores de P, lo que conduce a la supresión de una mayor absorción de As (Finnegan y Chen, 2012). Se ha descrito en varios reportes científicos una reducción en la toxicidad de As o en la concentración de As en el grano con el aumento en la concentración de P total y/o disponible en el suelo para diferentes cultivos de arroz, regiones y/o condiciones de crecimiento (Wang y Duan, 2009; Lu et al., 2010; Fu et al., 2011; Lou-Hing et al., 2011; Rahaman et al., 2011; Talukder et al., 2012; Jiang et al., 2014; Suriyagoda et al., 2018). Sin embargo, estudios realizados en el extranjero, indican que aplicaciones a largo plazo de fertilizantes fosfatados, pueden contribuir a aumentar elementos trazas tales como As, Cd y Pb en cultivos, lo que dependería de la calidad (pureza) del fertilizante aplicado. Además, la acumulación de los elementos trazas fue limitada y localizada (Jiao et al., 2012; Hartley et al., 2013).

En general, el manejo de P en los suelos para reducir la acumulación de As en el grano de arroz, se debe realizar con cuidado, ya que un aumento de P en el suelo resultaría en una disminución en la solubilidad, biodisponibilidad, absorción y acumulación de As en el grano. Por otro lado, en suelos con una adecuada concentración inicial de P y/o con una baja disponibilidad de As, un aumento adicional en la concentración de P en el suelo aumentaría la concentración de P en la rizósfera y provocaría una regulación a la baja de los transportadores de P y, por lo tanto, una mayor competencia entre As y P, lo que conduce a la planta a reducir la absorción y acumulación de As en el grano (Suriyagoda et al., 2018).

Con respecto a la productividad, el rendimiento en función de la aplicación de fertilizantes fosfatados, por lo general, aumenta junto con el incremento de la dosis de fertilizante.

Manejo del agua

El manejo de agua utilizada en los campos de arroz es un importante regulador de la cantidad y forma de As y metales disponibles para las plantas de arroz (Rahaman et al., 2011; Hua et al., 2013; Ma et al., 2014; Hu et al., 2015; Newbigging et al., 2015; Das et al., 2016; Norton et al., 2017; Wu et al., 2017). En los últimos años, el cultivo de arroz bajo condiciones de riego aeróbicas, intermitentes y con suelo saturado, presenta un menor contenido de As en la planta comparado con el sistema convencional-inundado que se utiliza normalmente. Sin embargo, esta conclusión debe ser evaluada también en el contexto productivo, debido a que el rendimiento

del arroz en condiciones aeróbicas resulta, en algunos casos, en una reducción importante del rendimiento en grano, comparado con los otros sistemas de riego. Cabe destacar que se debería evaluar el efecto en otros metales, como el Cd, que podría presentar un efecto opuesto sobre la especiación y biodisponibilidad en la planta (Xu et al., 2008; Li et al., 2009; Arao et al., 2009; Deng et al., 2010; Somenahally et al., 2011; Talukder et al., 2011; 2012; Sarkar et al., 2012; Spanu et al., 2012; Ma et al., 2014; Moreno-Jiménez et al., 2014; Hu et al., 2015; Linqvist et al., 2015; Das et al., 2016; LaHue et al., 2016; Carrijo et al., 2017). También se ha informado que, en comparación con el As en el suelo, el As disponible a través del riego muestra una fuerte relación con la especiación de As en varias partes de la planta. Según, Sarkar et al. (2012), el uso de riego intermitente sólo en la etapa vegetativa es mejor, ya que en sus experimentos observaron una reducción en la concentración de As en la cáscara y grano de arroz en 23 % y 33 %, respectivamente, en comparación con el riego continuo y sin una disminución en el rendimiento del grano. Por otro lado, se debe considerar que la disminución de los niveles de As en condiciones de riego intermitente e inundado, está relacionado a factores como el potencial redox del suelo, baja concentración de As (III) en el suelo, disminución en la abundancia relativa de As, bacterias reductoras de Fe y S, aumento en la abundancia relativa de As, bacterias oxidantes de Fe y S, y formación de placas de Fe que unen el As (III) y As (V) a la superficie de la raíz del arroz (Deng et al., 2010; Deng y Kim, 2016).

Variabilidad genética

Varios estudios indican que diferentes variedades de arroz, presentan diferentes tasas de absorción y acumulación de As, reportándose diferencias significativas tanto entre variedades de arroz como en la ubicación geográfica donde éste se cultiva (Norton et al., 2009; Meharg et al., 2009; Khan et al., 2010; Pillai et al., 2010; Rauf et al., 2011; Hua et al., 2011; Hu et al., 2013; Kuramata et al., 2013; Sommella et al., 2013). Recientemente, Punshon et al. (2017) y Suriyagoda et al. (2018) revisaron los mecanismos de absorción y translocación de As y la resistencia de las plantas, para acumular As en el grano de arroz. Las variedades de arroz con mayor porosidad radicular, pérdida de oxígeno radial, o la formación de placas de Fe que se unen a As, reducen la absorción de As (Pan et al., 2014; Suriyagoda et al., 2018). El uso de estas variedades de arroz es de gran importancia para los cultivos inundados, ya que la pérdida de oxígeno radial es el mecanismo clave para oxidar la rizósfera, inducir la formación de placas de Fe y transformar el As (III) en As (V) poco soluble. Varios mecanismos están asociados con la translocación de As a granos de arroz, entre ellos la reducción mediada por glutatión/glutaredoxina y la complejación y el secuestro dependiente de fitoquelatinas en vacuolas que dan como resultado una menor translocación de As a los granos de arroz. Además, la generación de especies reactivas de oxígeno y la producción de enzimas antioxidantes, reducen aún más la toxicidad del As (es decir, la resistencia al As) (Finnegan y Chen, 2012; Suriyagoda et al., 2018). Por lo tanto, la concentración de As en la planta de arroz disminuye en el siguiente orden: raíces > hojas > granos. Estos mecanismos de bloqueo y resistencia al As son afectados por las interacciones de manejo, el ambiente y variedades. En forma más específica, un estudio realizado por Zhang et al. (2008) en 3.000 accesiones de arroz provenientes de diferentes partes del mundo, permitió detectar la presencia de un amplio número de loci asociados a la presencia de As, Cu, Zn y Mo en el grano de arroz, además de localizar genes candidatos relacionados con la absorción y transporte de estos elementos. La diversidad genética en la acumulación de As y otros elementos en la planta de arroz, permitiría, por ejemplo, la selección continua de genotipos de arroz que absorben menos As y metales (Cheng et al., 2006). Por lo tanto, la selección de variedades para reducir la carga de As en los granos de arroz es un proceso complejo debido a la existencia de amplias variaciones en las condiciones del suelo, las prácticas de manejo adoptadas por los agricultores y la disponibilidad de recursos.

Conclusiones

El nivel de consumo de arroz por la población y la concentración de As y metales en el grano, contribuyen a altos o bajos niveles de ingesta diaria de metales tóxicos.

A nivel mundial, la concentración de As y metales pesados varía en los diferentes tipos de suelos y regiones geográficas de los arrozales. Debido a que el arroz se cultiva principalmente en condiciones de riego sumergidas o inundadas, existe una mayor biodisponibilidad de As, con un aumento en la proporción de formas tóxicas y reducidas de As inorgánico y orgánico.

Las condiciones del suelo sumergido, el pH reducido del suelo, las bajas concentraciones de P, Fe, Mn y Si en el suelo, y la adición de materia orgánica, aumentan la biodisponibilidad de As en las plantas de arroz en la mayoría de los casos. Por lo tanto, el adecuado control de los factores antes mencionados, más la implementación del riego intermitente y la selección de variedades de arroz adecuadas, son estrategias que permitirán reducir la biodisponibilidad de As y metales en el suelo, y su absorción por las plantas de arroz.

Referencias

- Al-Saleh, I., Abduljabbar, M. 2017. Heavy metals (lead, cadmium, methylmercury, arsenic) in commonly imported rice grains (*Oryza sativa*) sold in Saudi Arabia and their potential health risk. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 220:1168-1178.
- Amaral, D.C., Lopes, G., Guilherme, L.R.G., et al. 2017. A new approach to sampling intact Fe plaque reveals Si-induced changes in Fe mineral composition and shoot As in rice. *Environ. Sci. Technol.* 51:38-45.
- Arao, T., Kawasaki, A., Baba, K., et al. 2009. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice. *Environ. Sci. Technol.* 43:9361-9367.
- Bogdan, K., Schenk, M.K. 2009. Evaluation of soil characteristics potentially affecting arsenic concentration in paddy rice (*Oryza sativa* L.) *Environ. Pollut.* 157:2617-2621.
- Carrijo, D.R., Lundy, M.E., Linnquist, B.A. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 203:173-180.
- Chen, H., Tang, Z., Wang, P., et al. 2018. Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice. *Environ. Pollut.* 238:482-490.
- Cheng, W.D., Zhang, G.P., Yao, H.G., et al. 2004. Possibility of predicting heavy-metal contents in rice grains based on DTPA-extracted levels in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35:2731-2745.
- Cheng, W., Zhang, G., Yao, H., et al. 2006. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, arsenic, nickel and lead concentrations in rice grains. *J. Zhejiang Univ. Sci. B.* 7:565-571.
- Das, S., Chou, M.L., Jean, J.S., et al. 2016. Water management impacts on arsenic behavior and rhizosphere bacterial communities and activities in a rice agro-ecosystem. *Sci. Total Environ.* 542:642-652.
- Deng, B.L., Kim, E.S. 2016. Co-adsorption of trichloroethylene and arsenate by iron-impregnated granular activated carbon. *Water Environ. Res.* 88:394-402.
- Deng, D., Wu, S.C., Wu, F.Y., et al. 2010. Effects of root anatomy and Fe plaque on arsenic uptake by rice seedlings grown in solution culture. *Environ. Pollut.* 158:2589-2595.
- EFSA. 2009. European Food Safety Authority (EFSA). Panel on Contaminants in the Food Chain. Scientific opinion on arsenic in food. *EFSA J.* 7:1351-1550.
- FAO/WHO. 2012. Food standards programme, codex committee on contaminants in foods. Proposed draft maximum levels for arsenic in rice. CX/CF 12/6/8. FAO/World Health Organization (WHO), Rome, Italy.

- Fariás, S.S., Londonio, A., Quintero, C., et al. 2015. On-line speciation and quantification of four arsenical species in rice samples collected in Argentina using a HPLC-HG-AFS coupling. *Microchem. J.* 120:34-39.
- Finnegan, P.M., Chen, W.H. 2012. Arsenic toxicity: The effects on plant metabolism. *Front. Physiol.* 3:182.
- Fu, Y.R., Chen, M.L., Bi, X.Y., et al. 2011. Occurrence of arsenic in brown rice and its relationship to soil properties from Hainan Island, China. *Environ. Pollut.* 159:1757-1762.
- Fu, Q.L., Li, L., Achal, V., et al. 2015. Concentrations of heavy metals and arsenic in market rice grain and their potential health risks to the population of Fuzhou, China. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 21:117-128.
- Gardner, R.M., Kippler, M., Tofail, F., et al. 2013. Environmental exposures to metals and children's growth to five years: a prospective cohort study. *Am. J. Epidemiol.* 177(12):1356-1367.
- Gilbert-Diamond, D., Cottingham, K.L., Gruber, J.F., et al. 2011. Rice consumption contributes to arsenic exposure in US women. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108:20656-20660.
- Gross, B.L., Zhao, Z. 2014. Archaeological and genetic insights into the origins of domesticated rice. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111:6190-6197.
- Guillod-Magnin, R., Brüscheweiler, B.J., Aubert, R., et al. 2018. Arsenic species in rice and rice-based products consumed by toddlers in Switzerland. *Food Addit. Contam. Part A* 35:1164-1178.
- Hartley, T.N., Macdonald, A.J., Mc Grath, S.P.M., et al. 2013. Historical arsenic contamination of soil due to long-term phosphate fertilizer applications. *Environ. Pollut.* 180:259-264.
- Hawkesworth, S., Wagatsuma, Y., Kippler, M., et al. 2013. Early exposure to toxic metals has a limited effect on blood pressure or kidney function in later childhood, rural Bangladesh. *Int. J. Epidemiol.* 42:176-185.
- Hite, A.H. 2013. Arsenic and rice: a call for regulation. *Nutrition* 29:353-354.
- Hu, P., Huang, J., Ouyang, Y., et al. 2013. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars. *Environ. Geochem. Health* 35:767-778.
- Hu, P.J., Ouyang, Y.N., Wu, L.H., et al. 2015. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar. *J. Environ. Sci.* 27:225-231.
- Hua, B., Yan, W., Wang, J., et al. 2011. Arsenic accumulation in rice grains: Effects of cultivars and water management practices. *Environ. Eng. Sci.* 28:591-596.
- Hua, B., Yan, W.G., Yang, J. 2013. Response of rice genotype to straight head disease as influenced by arsenic level and water management practices in soil. *Sci. Total Environ.* 442:432-436.
- INN. 1987. Norma Chilena Oficial 1333 Of. 78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.
- INN. 2004. Norma uso de lodos y Norma chilena Compost-Clasificación y requisitos. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.
- Jallad, K.N. 2015. Heavy metal exposure from ingesting rice and its related potential hazardous health risks to humans. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:15449-15458.
- Jarup, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.* 68:167-182.
- Jiang, W., Hou, Q.Y., Yang, Z.F., et al. 2014. Evaluation of potential effects of soil available phosphorus on soil arsenic availability and paddy rice inorganic arsenic content. *Environ. Pollut.* 188:159-165.
- Jiao, W., Chen, W., Chang, A., et al. 2012. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizer applications: a review. *Environ. Pollut.* 168:44-53.
- Jung, M.Y. 2018. Inorganic arsenic contents in infant rice powders and infant rice snacks marketed in Korea determined by a highly sensitive gas chromatography-tandem mass spectrometry following derivatization with British Anti-Lewisite. *Food Sci. Biotechnol.* 27:617-622.

- Keshavarzi, B., Moore, F., Ansari, M., et al. 2015. Macronutrients and trace metals in soil and food crops of Isfahan Province, Iran. *Environ. Monit. Assess.* 187:4113.
- Khan, M.A., Islam, M.R., Panaullah, G.M., et al. 2010. Accumulation of arsenic in soil and rice under wetland condition in Bangladesh. *Plant Soil* 333:263-274.
- Kumarathilaka, P., Seneweera, S., Meharg, A., et al. 2018. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) is influenced by environment and genetic factors. *Sci. Total Environ.* 642:485-496.
- Kuramata, M., Abe, T., Kawasaki, A., et al. 2013. Genetic diversity of arsenic accumulation in rice and QTL analysis of methylated arsenic in rice grains. *Rice* 6:3.
- LaHue, G.T., Chaney, R.L., Adviento-Borbe, M.A., et al. 2016. Alternate wetting and drying in high yielding direct seeded rice systems accomplishes multiple environmental and agronomic objectives. *Agric. Ecosyst. Environ.* 229:30-39.
- Li, R.Y., Ago, Y., Liu, W.J., et al. 2009. The rice aquaporin *Lsi1* mediates uptake of methylated arsenic species. *Plant Physiol.* 150:2071-2080.
- Linquist, B.A., Anders, M.M., Adviento-Borbe, M.A.A., et al. 2015. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biol.* 21:407-417.
- Liu, Z., Zhang, Q., Han, T., et al. 2016. Heavy metal pollution in a soil-rice system in the Yangtze river region of China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13(1):63.
- Lou-Hing, D., Zhang, B., Price, A.H., et al. 2011. Effects of phosphate on arsenate and arsenite sensitivity in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars of different sensitivity. *Environ. Exp. Bot.* 72:47-52.
- Lu, Y., Dong, F., Deacon, C., et al. 2010. Arsenic accumulation and phosphorus status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China. *Environ. Pollut.* 158:1536-1541.
- Ma, R., Shen, J.L., Wu, J.S., et al. 2014. Impact of agronomic practices on arsenic accumulation and speciation in rice grain. *Environ. Pollut.* 194:217-223.
- Meharg, A.A., Macnair, M.R. 1990. An altered phosphate uptake system in arsenate-tolerant *Holcus lanatus* L. *New Phytol.* 116:29-35.
- Meharg, A.A., Macnair, M.R. 1992. Suppression of the high affinity phosphate uptake system: A mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus* L. *J. Exp. Bot.* 43:519-524.
- Meharg, A., Williams, P.N., Adomako, E., et al. 2009. Geographical variation in total and inorganic arsenic content of polished (white) rice. *Environ. Sci. Technol.* 43:1612-1617.
- Moreno-Jiménez, E., Meharg, A.A., Smolders, E., et al. 2014. Sprinkler irrigation of rice fields reduces grain arsenic but enhances cadmium. *Sci. Total Environ.* 485-486:468-473.
- Newbigging, A.M., Paliwoda, R.E., Le, X.C. 2015. Rice: Reducing arsenic content by controlling water irrigation. *J. Environ. Sci.* 30:129-131.
- Norton, G.J., Duan, G., Dasgupta, T., et al. 2009. Environmental and genetic control of arsenic accumulation and speciation in rice grain: comparing a range of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China, and India. *Environ. Sci. Technol.* 43:8381-8386.
- Norton, G.J., Shafaei, M., Travis, A.J., et al. 2017. Impact of alternate wetting and drying on rice physiology, grain production, and grain quality. *Field Crops Res.* 205:1-13.
- Nunes, L.M., Otero, X. 2017. Quantification of health risks in Ecuadorian population due to dietary ingestion of arsenic in rice. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24:27457-27468.
- Orisakwe, O.E., Nduka, J.K., Amadi, C.N., et al. 2012. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of food crops and fruits in Owerri, South Eastern, Nigeria. *Chem. Cent. J.* 6:77.
- Pan, W.S., Wu, C., Xue, S.G., et al. 2014. Arsenic dynamics in the rhizosphere and its sequestration on rice roots as affected by root oxidation. *J. Environ. Sci.* 26:892-899.

- Peryea, F.J. 1991. Phosphate-induced release of arsenic from soils contaminated with lead arsenate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1301-1306.
- Pillai, T.R., Yan, W.G., Agrama, H.A., et al. 2010. Total grain-arsenic and arsenic-species concentrations in diverse rice cultivars under flooded conditions. *Crop Sci.* 50:2065-2075.
- Punshon, T., Jackson, B.P., Meharg, A.A., et al. 2017. Understanding arsenic dynamics in agronomic systems to predict and prevent uptake by crop plants. *Sci. Total Environ.* 581-582:209-220.
- Rahaman, S., Sinha, A.C., Mukhopadhyay, D. 2011. Effect of water regimes and organic matters on transport of arsenic in summer rice (*Oryza sativa* L.). *J. Environ. Sci.* 23:633-639.
- Rauf, M.A., Hakim, M.A., Hanafi, M.M., et al. 2011. Bioaccumulation of arsenic (As) and phosphorus by transplanting Aman rice in arsenic-contaminated clay soils. *Aust. J. Crop Sci.* 5:1678-1684.
- Sadiq, M. 1997. Arsenic chemistry in soils: An overview of thermodynamic predictions and field observations. *Water Air Soil Pollut.* 93:117-136.
- Sarkar, S., Basu, B., Kundu, C.K., et al. 2012. Deficit irrigation: An option to mitigate arsenic load of rice grain in West Bengal, India. *Agric. Ecosyst. Environ.* 146:147-152.
- Segura, F.R., de Oliveira, J.M., De Paula, E.S., et al. 2016. Arsenic speciation in Brazilian rice grains organically and traditionally cultivated: Is there any difference in arsenic content? *Food Res. Int.* 89:169-176.
- Somenahally, A.C., Hollister, E.B., Loeppert, R.H., et al. 2011. Microbial communities in rice rhizosphere altered by intermittent and continuous flooding in fields with long-term arsenic application. *Soil Biol. Biochem.* 43:1220-1228.
- Sommella, A., Deacon, C., Norton, G., et al. 2013. Total arsenic, inorganic arsenic, and other elements concentrations in Italian rice grain varies with origin and type. *Environ. Pollut.* 181:38-43.
- Spanu, A., Daga, L., Orlandoni, A.M., et al. 2012. The role of irrigation techniques in arsenic bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.) *Environ. Sci. Technol.* 46:8333-8340.
- Suriyagoda, L.D.B., Dittert, K., Lambers, H. 2018. Arsenic in rice soils and potential agronomic mitigation strategies to reduce arsenic bioavailability: A review. *Pedosphere* 28:363-382.
- Talukder, A.S.M.H.M., Meisner, C.A., Sarkar, M.A.R., et al. 2011. Effect of water management, tillage options and phosphorus status on arsenic uptake in rice. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 74:834-839.
- Talukder, A.S.M.H.M., Meisner, C.A., Sarkar, M.A.R., et al. 2012. Effect of water management, arsenic and phosphorus levels on rice in a high-arsenic soil-water system: II. Arsenic uptake. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 80:145-151.
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., et al. 2012. Heavy metal toxicity and the environment. *Exp. Suppl.* 101:133-164.
- Tuli, R., Chakrabarty, D., Trivedi, P.K., et al. 2010. Recent advances in arsenic accumulation and metabolism in rice. *Mol. Breed.* 26:307-323.
- Ullrich-Eberius, C.I., Sanz, A., Novacky, A.J. 1989. Evaluation of arsenate- and vanadate-associated changes of electrical membrane potential and phosphate transport in *Lemna gibba* G1. *J. Exp. Bot.* 40:119-128.
- Wang, L.H., Duan, G.L. 2009. Effect of external and internal phosphate status on arsenic toxicity and accumulation in rice seedlings. *J. Environ. Sci.* 21:346-351.
- WHO. 1988. Arsenic. Joint Expert WHO/FAO Expert Committee on Food Additives and Contaminants. Vol 24. Food Additives Series. World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.
- WHO. 2000. Lead. In: Safety evaluation of certain food additives and contaminants. Fifty-third meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). WHO Food Additives Series Nr 44. World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland.

- Williams, P.N., Price, A.H., Raab, A., et al. 2005. Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. *Environ. Sci. Technol.* 39:5531-5540.
- Wu, C., Huang, L., Xue, S.G., et al. 2017. Oxic and anoxic conditions affect arsenic (As) accumulation and arsenite transporter expression in rice. *Chemosphere* 168:969-975.
- Xu, X.Y., McGrath, S.P., Meharg, A.A., et al. 2008. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. *Environ. Sci. Technol.* 42:5574-5579.
- Zhang, X, Lin, A.J., Zhao, F.J., et al. 2008. Arsenic accumulation by the aquatic fern *Azolla*: Comparison of arsenate uptake, speciation and efflux by *A. caroliniana* and *A. filiculoides*. *Environ. Pollut.* 156:1149-1155.
- Zhao, F.J., McGrath, S.P., Meharg, A.A. 2010. Arsenic as a food chain contaminant: Mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies. *Annu. Rev. Plant Biol.* 61:535-559.
- Zhuang, P., McBride, M.B., Xia, H., et al. 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Sci. Total Environ.* 407:1551-1561.