



Evaluación de bioacumulación de arsénico y parámetros productivos en cuyes expuestos a cuatro fuentes de agua

Assessment of arsenic bioaccumulation and production parameters in guinea pigs exposed to four water sources

Avaliação da bioacumulação de arsênico e parâmetros produtivos em porquinhos-da-índia expostos a quatro fontes de água

ARTÍCULO ORIGINAL



Eliseo Aime Cjanahuire 
eaimec@unjbg.edu.pe

Elizabeth Soledad Chucuya Mamani 
echucuya@unjbg.edu.pe

Rosario del Pilar Telles Velásquez 
rtellesv@unjbg.edu.pe

Miguel Ángel Padilla Mamani 
mpadillam@unjbg.edu.pe

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.430>

Artículo recibido: 4 de noviembre 2025 / Arbitrado: 27 de diciembre 2025 / Publicado: 7 de enero 2026

RESUMEN

La contaminación por arsénico en fuentes hídricas es un problema global que compromete la seguridad alimentaria y la producción pecuaria. Este estudio evaluó la bioacumulación de arsénico y los parámetros productivos en cuyes expuestos a cuatro fuentes de agua en Tacna, Perú. Se emplearon 24 cuyes machos en un diseño completamente al azar, analizando arsénico en agua y tejido muscular mediante HG-AAS, y registrando semanalmente peso y conversión alimenticia. Los resultados mostraron que el agua del río Caplina presentó 0,225 mg/L de arsénico, superando el límite para consumo animal (0,2 mg/L). La bioacumulación en músculo fue de 0,035 mg/Kg, muy por debajo del límite humano (0,5 mg/Kg). No hubo diferencias estadísticas en los parámetros productivos; sin embargo, la ganancia de peso máxima fue de 80,60 g/semana (T2), la conversión alimenticia más eficiente fue de 3,49 g/g (T1) y el mayor rendimiento de canal alcanzó el 72,06% (T4). Se concluye que la carne se mantuvo inocua, pero se requiere monitoreo y gestión de las fuentes hídricas.

Palabras clave: Arsénico; Bioacumulación; Calidad del agua; Cavia porcellus; Rendimiento de la canal

ABSTRACT

Arsenic contamination in water sources is a global problem that compromises food security and livestock production. This study evaluated arsenic bioaccumulation and production parameters in guinea pigs exposed to four water sources in Tacna, Peru. Twenty-four male guinea pigs were used in a completely randomized design, analyzing arsenic in water and muscle tissue using HG-AAS, and recording weight and feed conversion weekly. The results showed that the water from the Caplina River contained 0,225 mg/L of arsenic, exceeding the limit for animal consumption (0,2 mg/L). Bioaccumulation in muscle was 0,035 mg/kg, well below the human limit (0,5 mg/kg). There were no statistical differences in production parameters; however, maximum weight gain was 80,60 g/week (T2), the most efficient feed conversion was 3,49 g/g (T1), and the highest carcass yield reached 72,06% (T4). It is concluded that the meat remained safe, but monitoring and management of water sources is required.

Key words: Arsenic; Bioaccumulation; Water quality; Cavia porcellus; Carcass yield

RESUMO

A contaminação por arsênico em fontes hídricas é um problema global que compromete a segurança alimentar e a produção pecuária. Este estudo avaliou a bioacumulação de arsênico e os parâmetros produtivos em porquinhos-da-índia expostos a quatro fontes de água em Tacna, Peru. Foram utilizados 24 porquinhos-da-índia machos em delineamento inteiramente casualizado, analisando-se arsênico na água e no tecido muscular por HG-AAS, e registrando-se semanalmente o peso e a conversão alimentar. Os resultados mostraram que a água do rio Caplina apresentou 0,225 mg/L de arsênico, ultrapassando o limite para consumo animal (0,2 mg/L). A bioacumulação no músculo foi de 0,035 mg/kg, muito abaixo do limite humano (0,5 mg/kg). Não houve diferenças estatísticas nos parâmetros produtivos; no entanto, o ganho de peso máximo foi de 80,60 g/semana (T2), a conversão alimentar mais eficiente foi de 3,49 g/g (T1) e o maior rendimento do canal atingiu 72,06% (T4). Conclui-se que a carne permaneceu inofensiva, mas é necessário monitorizar e gerir as fontes hídricas.

Palavras-chave: Arsênico; Bioacumulação; Qualidade da água; Cavia porcellus; Rendimento de carcaça

INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es un metaloide ampliamente distribuido en la corteza terrestre, cuya presencia en el ambiente se deriva tanto de procesos geológicos naturales como de actividades antropogénicas (1). Su movilización hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos representa un problema sanitario global, dada su elevada toxicidad incluso a bajas concentraciones, asociándose con efectos carcinogénicos, neurológicos, cardiovasculares y metabólicos tanto en humanos como en animales (2,3).

Adicionalmente, la minería, particularmente la aurífera, constituye una fuente crítica de contaminación antropogénica, incrementando significativamente la movilización y los niveles de arsénico en aguas superficiales, subterráneas, sedimentos y biota. Este proceso amplifica el riesgo ecotoxicológico en los ecosistemas, generando bioacumulación en cascada trófica (4,5). Dicha situación es especialmente preocupante en regiones con una larga tradición extractiva, como muchas zonas de los Andes, donde la degradación crónica de la calidad del agua compromete no solo la integridad ambiental, sino también la seguridad de los sistemas productivos agropecuarios y, en última instancia, la salud pública de las comunidades que dependen de estos recursos (6). La exposición continua a través del agua de bebida representa, por tanto, una vía de intoxicación tanto para el ganado como para las poblaciones humanas (7,8).

En el contexto latinoamericano, diversas investigaciones han documentado la transferencia de arsénico desde fuentes hídricas contaminadas hacia la cadena alimentaria. Por ejemplo, estudios en bovinos de Argentina han detectado concentraciones considerables de este metaloide en hígados y riñones, reflejando una bioacumulación derivada del consumo de aguas subterráneas contaminadas (9). De manera similar, en el norte del Perú se han encontrado niveles detectables de arsénico en leche bovina, evidenciando su paso hacia productos de origen animal destinados al consumo humano (10).

Específicamente, la exposición crónica a arsénico a través del agua de bebida conduce a su bioacumulación en tejidos animales, siguiendo una distribución orgánica preferente definida por la fisiología de la detoxificación. Estudios experimentales en roedores han demostrado que la acumulación es significativamente mayor en órganos metabólicamente activos como bazo, hígado y riñón, en comparación con el tejido muscular (11). Este patrón de distribución refleja la acción de mecanismos de biotransformación, secuestro y excreción, donde estos órganos actúan como sitios primarios de almacenamiento y procesamiento del metaloide. Si bien estos sistemas ofrecen cierta protección inicial, reduciendo la concentración en la porción comestible, una exposición sostenida puede saturarlos, incrementando progresivamente el riesgo de transferencia a la cadena alimentaria y

de manifestaciones de toxicidad sistémica en el animal.

En consecuencia, la presencia de arsénico en productos cárnicos y derivados representa un riesgo potencial para la salud pública, al constituir una vía de exposición dietaria crónica para las poblaciones humanas (2). Esta ingesta continua, incluso a bajas concentraciones, se ha asociado con enfermedades carcinogénicas, neurológicas y cardiometabólicas a largo plazo. La problemática adquiere mayor relevancia y complejidad en países en desarrollo, donde los sistemas de vigilancia y control de la calidad del agua y los alimentos suelen ser limitados o fragmentados. En estos contextos, numerosas comunidades rurales dependen directamente de recursos hídricos locales no tratados tanto para el consumo humano como para la producción agropecuaria, creando un ciclo de exposición donde la contaminación del agua se transfiere a los animales y de estos a las personas.

En el Perú, la contaminación natural y antrópica por metales pesados, incluido el arsénico, es un desafío persistente. Regiones con actividad minera histórica o con características geológicas particulares presentan fuentes hídricas con concentraciones que frecuentemente superan los límites máximos permisibles para consumo humano y animal (12). Esta situación genera un escenario de exposición crónica para las poblaciones y los sistemas de producción pecuaria locales.

Particularmente, el cuy (*Cavia porcellus*) es un recurso pecuario de gran importancia socioeconómica y nutricional en la región andina, incluido el sur del Perú, constituyendo una fuente esencial de proteína animal de alta calidad y bajo costo para las poblaciones locales. Su producción característicamente se basa en sistemas tradicionales y semi-intensivos de pequeña escala, donde el agua de bebida proviene comúnmente de fuentes locales como ríos, pozos o acequias, que rara vez son monitoreadas y pueden estar severamente comprometidas en su calidad por contaminantes naturales o antrópicos (13). Por lo tanto, esta especie se erige como un modelo biológico y productivo sumamente relevante para evaluar la transferencia y bioacumulación de contaminantes, como el arsénico, desde el agua hacia la carne, representando un eslabón crítico en la evaluación del riesgo para la seguridad alimentaria.

Cabe destacar que, más allá del riesgo sanitario directo, la exposición crónica a metales pesados podría afectar adversamente los parámetros productivos y la rentabilidad económica de los animales. Aunque la información específica para cuyes es aún escasa, la evidencia en otras especies indica que el estrés oxidativo inducido por estos tóxicos puede alterar profundamente el metabolismo celular, la integridad mitocondrial y la función enzimática. Estas disrupciones se traducen en un menor crecimiento, una

peor eficiencia alimenticia y un aumento en la susceptibilidad a enfermedades (14). Por lo tanto, la evaluación simultánea de la bioacumulación y el desempeño productivo es fundamental para una visión integral del impacto, permitiendo discernir efectos subclínicos que podrían preceder a daños orgánicos manifiestos.

Asimismo, diversos factores pueden modular la toxicocinética y los efectos del arsénico. La investigación ha demostrado que componentes de la dieta, como antioxidantes (vitamina C, E) y ciertos minerales (zinc), pueden reducir la bioacumulación y mitigar el daño oxidativo en organismos expuestos (11,15). Incluso, aditivos naturales como zeolitas modificadas han mostrado eficacia como agentes detoxificantes frente a otros metales pesados (16).

No obstante, la implementación de estrategias de mitigación eficaces requiere primero de un diagnóstico preciso y cuantitativo de la exposición y la bioacumulación en los sistemas productivos. En la región Tacna, estudios previos han señalado una preocupación fundada por la calidad del agua, con reportes que indican contaminación por metales pesados de origen natural y minero (4,5). Sin embargo, la evidencia científica específica sobre el impacto de esta contaminación en la producción pecuaria local, y particularmente en la cadena de producción de cuy, es aún insuficiente. Esta crítica falta de datos limita la toma de decisiones informadas por parte de autoridades

y productores para garantizar de manera integral la inocuidad alimentaria y la sostenibilidad productiva a largo plazo.

En vista de esta brecha de conocimiento, se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es el nivel de bioacumulación de arsénico en carcasas de cuyes expuestos a diferentes fuentes de agua de la región Tacna? ¿La exposición a arsénico a través del agua afecta los parámetros productivos (ganancia de peso, conversión alimenticia y rendimiento de carcasa) en cuyes bajo condiciones de manejo controlado?

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue evaluar la bioacumulación de arsénico en carcasas y los parámetros productivos de cuyes (*Cavia porcellus*) expuestos a cuatro fuentes de agua (industrial, potable, río Uchusuma y río Caplina) en la región Tacna - Perú, con el fin de generar evidencia científica para la gestión de riesgos sanitarios y la optimización de los sistemas de producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con un diseño descriptivo, correlacional y longitudinal. La investigación se llevó a cabo en el módulo de cuyes de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, ubicado en Tacna, Perú, a una altitud aproximada de 560 m s. n. m., y se realizó durante un periodo experimental de siete semanas. Esta ubicación

geográfica (17°39'30" S, 70°14'22" O), presenta condiciones climáticas semiáridas típicas de la costa sur peruana, con una temperatura promedio de 26,37 °C y humedad relativa del 60,91%, factores que se mantuvieron constantes para evitar variables de confusión en los resultados.

Posteriormente, se implementó un diseño experimental completamente al azar (DCA). La población objetivo consistió en cuyes (*Cavia porcellus*) machos clínicamente sanos de la línea genética Perú. La muestra final estuvo constituida por 24 individuos, un tamaño muestral determinado en base a estudios previos con diseños similares que evaluaron parámetros productivos y de bioacumulación, considerando la factibilidad logística y el poder estadístico necesario para detectar diferencias entre tratamientos con un nivel de confianza del 95%.

Asimismo, la muestra se seleccionó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia a partir de una población de cría homogénea. Los criterios de inclusión fueron: ser machos, tener un peso vivo inicial entre 350 y 390 g, y presentar un estado de salud óptimo verificado mediante examen clínico. Se excluyeron animales con signos de enfermedad, bajo peso o que hubieran recibido tratamientos farmacológicos previos, garantizando así la homogeneidad de los grupos experimentales al inicio del estudio.

A continuación, los 24 animales se distribuyeron aleatoriamente en cuatro tratamientos experimentales (n=6 por grupo),

correspondientes a la fuente de agua de bebida: T1 (agua industrial), T2 (agua potable), T3 (agua del río Uchusuma) y T4 (agua del río Caplina). La aleatorización se realizó mediante la asignación de números a cada animal y el uso de una tabla de números aleatorios, asegurando que cada unidad experimental tuviera la misma probabilidad de ser asignada a cualquier tratamiento y minimizando el sesgo de selección.

Para la caracterización de los tratamientos, se recolectaron muestras de agua de cada fuente. Las muestras se tomaron en recipientes estériles de polietileno, se acidificaron con HNO₃ ultrapuro y se almacenaron a 4°C hasta su análisis. La concentración de arsénico total en agua se cuantificó mediante espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros (HG-AAS) en un laboratorio acreditado, utilizando materiales de referencia certificados para el control de calidad analítica.

En cuanto al manejo animal, todos los cuyes fueron alojados individualmente en jaulas metálicas con piso de rejilla en un ambiente controlado. Recibieron una ración balanceada peletizada suplementada con vitamina C, suministrada al 10% del peso vivo (ajustado semanalmente). El agua se proporcionó ad libitum en bebederos automáticos, los cuales fueron limpiados y rellenados diariamente con la fuente asignada. Se registró diariamente el consumo de alimento y agua por individuo.

Respecto a las variables productivas, se midió semanalmente el peso vivo de cada animal para calcular la ganancia de peso semanal. Al final del periodo (día 49), previo a un ayuno de 12 horas, se registró el peso vivo final y se procedió al beneficio humanitario. Se determinó el peso de la carcasa caliente y, tras 24 h de refrigeración a 4°C, el peso de la carcasa fría para calcular el rendimiento de carcasa. La conversión alimenticia se calculó como la relación entre el consumo total de alimento y la ganancia de peso total.

Con relación al análisis de tejidos, las 24 carcasas completas (sin vísceras) fueron identificadas individualmente, envasadas en bolsas de polietileno y congeladas a -20°C. Posteriormente, se homogeneizó una muestra representativa de tejido muscular de cada carcasa. La digestión de las muestras se realizó con HNO₃ y H₂O₂ en un sistema de digestión por microondas. La cuantificación de arsénico total en tejido se efectuó mediante HG-AAS, empleando un patrón interno de galio para corregir interferencias matriciales.

En lo referente al análisis estadístico, los datos se procesaron con el software SPSS v.26.0 (IBM Corp.). Se aplicó estadística descriptiva (media \pm desviación estándar) para todas las variables. La normalidad se verificó con la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad con la prueba de Levene. Para comparar los tratamientos se utilizó ANOVA de una vía, aplicando la prueba post-

hoc de Tukey cuando se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$). La correlación entre [As] en agua y tejido se analizó con el coeficiente de Pearson y una prueba *t* para muestras relacionadas.

Asimismo, el estudio se rigió por estrictos principios éticos. El protocolo experimental fue revisado y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. El manejo y beneficio de los animales siguieron las directrices de la Ley Peruana 30407 de Protección Animal y las recomendaciones de la OIE para el sacrificio humanitario, minimizando cualquier estrés o dolor. Se aseguró la confidencialidad de los datos y la transparencia en la presentación de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la Tabla 1, demuestran una variabilidad notable en la concentración de arsénico entre las fuentes hídricas evaluadas. El agua del río Caplina (T4) registró 0,225 mg/L, superando el límite máximo permisible para consumo animal (0,2 mg/L), mientras que las demás fuentes presentaron valores inferiores. En contraste, la bioacumulación en tejido muscular fue baja y homogénea entre tratamientos, con un promedio de 0,035 mg/Kg, muy por debajo del límite de 0,5 mg/Kg establecido para consumo humano. Esto indica que, bajo las condiciones experimentales, la carne de cuy se mantuvo inocua

a pesar de la exposición a aguas con diferentes niveles de contaminación.

Adicionalmente, la concentración de arsénico en el agua y en la carcasa sugiere la intervención de mecanismos fisiológicos de regulación y detoxificación en la especie. Lo cual puede explicarse por el hecho de que el arsénico tiende a acumularse preferentemente en órganos como hígado y riñón, lo que aclararía los niveles mínimos hallados en músculo. Esta distribución selectiva atenúa el riesgo de transferencia directa a la cadena alimentaria, aunque no elimina la preocupación por una exposición crónica Tabla 1.

Consecuentemente, estos resultados enfatizan la importancia del monitoreo continuo de las fuentes hídricas, especialmente en zonas con actividad minera o características geológicas que favorecen la presencia natural de arsénico. Aunque la bioacumulación en músculo no comprometió la seguridad alimentaria en este estudio, la excedencia del límite en el agua del río Caplina representa una alerta para la salud animal y potencialmente pública, resaltando la necesidad de implementar medidas de remediación y gestión de recursos hídricos en sistemas de producción pecuaria Tabla 1.

Tabla 1. Concentración de arsénico en fuentes de agua y bioacumulación en carcasas de cuyes.

Tratamiento	Concentración de arsénico en fuentes de agua (mg/L)	Bioacumulación de arsénico en las carcasas de cuyes (mg/Kg)
T1: Agua industrial	0,012±0,001	0,037±0,008
T2: Agua potable	0,034±0,000	0,029±0,007
T3: Agua del Río Uchusuma	0,190±0,005	0,032±0,013
T4: Agua del Río Caplina	0,225±0,002	0,043±0,006
Promedio	0,115±0,097	0,035±0,010

La Tabla 2, presenta la ganancia de peso vivo semanal de cuyes expuestos a cuatro fuentes de agua. Los resultados no muestran diferencias estadísticamente significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos, indicando que la concentración de arsénico en el agua no afectó el crecimiento de manera determinante durante el periodo experimental. El promedio general de ganancia de

peso osciló entre 74,40 y 80,60 g/semana, valores considerados normales para la especie bajo sistemas de alimentación balanceada. Esta similitud sugiere que los mecanismos homeostáticos de los animales compensaron potenciales efectos negativos derivados de la exposición al metaloide.

En detalle, se observan ligeras variaciones numéricas, siendo el tratamiento T2 (agua potable)

el que registró la mayor ganancia promedio (80,60 g/semana). Esta tendencia, aunque no estadísticamente significativa, podría relacionarse con la óptima calidad microbiológica y fisicoquímica de esta fuente, que posiblemente favoreció una mejor digestión y metabolismo de los nutrientes. Por el contrario, los tratamientos con agua de río (T3 y T4) mostraron promedios ligeramente inferiores, lo que podría asociarse a otros componentes de estas aguas superficiales, más allá del arsénico, que merecerían caracterización Tabla 2.

Desde una perspectiva productiva, la estabilidad en el crecimiento a pesar de la exposición confirma la resiliencia de la especie. Este resultado es relevante para los productores, ya que sugiere que, en el corto plazo y con una nutrición

adecuada, la calidad del agua no constituye un factor limitante para el incremento de peso. No obstante, se requiere cautela, pues estudios crónicos podrían revelar efectos acumulativos no detectados en este periodo de siete semanas Tabla 2.

Cabe resaltar que la falta de significancia estadística refuerza la importancia del alimento balanceado como factor dominante en el desempeño zootécnico. La ración suplementada con vitamina C pudo haber actuado como un factor atenuante del estrés oxidativo, enmascarando posibles efectos negativos del arsénico. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios con periodos de exposición más prolongados y evaluar marcadores sanguíneos de estrés para una comprensión integral de los efectos subclínicos Tabla 2.

Tabla 2. Ganancia de peso vivo semanal (g/semana) de los cuyes.

Semanas	Ganancia de peso vivo (g)			
	Tratamientos			
	Agua industrial (T1)	Agua potable (T2)	Agua del Río Uchusuma (T3)	Agua del Río Caplina (T4)
1	66,67±22,06	61,67±28,04	45,83±13,93	47,50±08,21
2	84,17±29,73	78,33±32,50	82,50±23,18	76,67±25,23
3	60,00±24,28	84,50±29,45	82,00±27,68	73,83±33,93
4	85,00±28,10	78,83±17,09	67,17±22,19	79,50±32,69
5	81,67±21,60	80,00±18,43	83,33±38,81	74,17±31,53
6	85,83±27,27	87,50±24,64	80,00±20,00	65,83±20,83
7	95,83±33,82	93,33±28,04	88,33±26,01	103,33±32,69
Promedio	79,88±27,48	80,60±25,77	75,60±27,31	74,40±30,11

La Tabla 3, muestra los resultados de la conversión alimenticia (CA) en cuyes expuestos a diferentes fuentes de agua. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p>0,05$) entre los tratamientos, lo que indica que la eficiencia en la utilización del alimento no fue afectada de manera determinante por la calidad hídrica durante el periodo experimental. El tratamiento T1 (agua industrial) presentó la mejor CA promedio (3,49 g/g), seguido por T2, T3 y T4. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado como óptimo para la especie bajo sistemas de alimentación con balanceado comercial.

Además, la tendencia numérica observada, donde la CA fue ligeramente menos eficiente en los grupos que consumieron agua de río, podría atribuirse a factores no medidos en la composición de estas aguas. La presencia de otros minerales, materia orgánica o incluso el estrés subclínico por arsénico podrían demandar un gasto metabólico adicional, reflejándose en una menor eficiencia alimentaria. Sin embargo, la magnitud de la diferencia fue mínima y no alcanzó relevancia

estadística, lo que sugiere un efecto biológico negligible bajo las condiciones del estudio Tabla 3.

Desde el punto de vista de la producción, la estabilidad de este parámetro es crucial. La conversión alimenticia es un indicador directo de la rentabilidad, y su preservación sugiere que la exposición a las fuentes de agua evaluadas no compromete la eficiencia económica del sistema a corto plazo. Este resultado resalta, nuevamente, el papel preponderante de la dieta balanceada y el manejo adecuado como factores que enmascaran posibles efectos adversos de contaminantes ambientales leves Tabla 3.

No obstante, estos resultados no deben interpretarse como una licencia para usar agua de baja calidad. La tendencia ascendente en la CA correlacionada con el aumento de arsénico en el agua, aunque pequeña, señala una dirección biológica que merece monitoreo. Se recomienda investigar los efectos a más largo plazo o en fases productivas más sensibles, como la gestación o lactancia, donde la demanda metabólica es mayor y la resiliencia del animal podría verse comprometida Tabla 3.

Tabla 3. Conversión alimenticia semanal (g/semana) de los cuyes.

Semanas	Conversión alimenticia (g/g)			
	Tratamientos			
	Agua industrial (T1)	Agua potable (T2)	Agua del Río Uchusuma (T3)	Agua del Río Caplina (T4)
1	2,71	2,71	3,28	3,61
2	2,92	3,41	3,02	3,46
3	4,80	3,77	3,92	4,00

Semanas	Conversión alimenticia (g/g)			
	Tratamientos			
	Agua industrial (T1)	Agua potable (T2)	Agua del Río Uchusuma (T3)	Agua del Río Caplina (T4)
4	3,21	3,82	4,54	3,91
5	3,80	4,47	3,89	4,57
6	3,66	4,17	4,28	4,80
7	3,31	3,84	4,13	3,59
Promedio	3,49	3,74	3,87	3,99

La Tabla 4, presenta los valores correspondientes al rendimiento de carcasa de los cuyes evaluados bajo los distintos tratamientos. No se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p>0,05$), lo que indica que la fuente de agua suministrada no tuvo un efecto significativo sobre este parámetro productivo durante el periodo experimental.

A pesar de la ausencia de significancia estadística, se observaron variaciones numéricas entre los tratamientos. Los cuyes alimentados con agua del río Caplina (T4) alcanzaron el mayor rendimiento de carcasa, seguidos por los tratamientos T2, T1 y T3, respectivamente. Esta tendencia sugiere que ciertos factores

asociados a la composición del agua podrían influir de manera leve en la deposición de tejido y en el aprovechamiento de los nutrientes, sin comprometer el desempeño productivo general Tabla 4.

En conjunto, estos resultados refuerzan la importancia de considerar la calidad del agua como un componente complementario en la evaluación de los parámetros productivos, ya que, aun cuando no se evidencien diferencias estadísticas, las variaciones observadas aportan información relevante para la optimización de los sistemas de producción y la evaluación de la calidad del producto final en contextos de exposición a contaminantes ambientales Tabla 4.

Tabla 4. Peso de carcasa, peso vivo en ayuna (12 horas), merma y porcentaje de rendimiento de carcasa de los cuyes.

Tratamientos	Peso carcasa (g)	Peso vivo ayuna (g)	Merma (g)	Rendimiento carcasa (%)
T1: Agua industrial	648,33	921,67	273,33	69,99±2,74
T2: Agua potable	656,67	934,17	277,50	70,20±2,59
T3: Agua del Río Uchusuma	625,00	900,83	275,83	69,33±2,45
T4: Agua del Río Caplina	639,17	892,50	253,33	72,06±4,81

Discusión

Los resultados de este estudio confirman la presencia de arsénico en todas las fuentes hídricas evaluadas, con una variabilidad significativa. La concentración más elevada se registró en el río Caplina (0,225 mg/L), superando el límite máximo permisible para consumo animal de 0,2 mg/L. Este resultado concuerda directamente con lo documentado en otras investigaciones donde se identifica a la actividad minera, particularmente la aurífera, como un factor crítico que incrementa la movilización y los niveles de arsénico en cuerpos de agua superficiales (4,5). Dicha actividad amplifica el riesgo ecotoxicológico en ecosistemas aledaños a las zonas de explotación, generando una exposición crónica tanto para la biota acuática como para los sistemas productivos terrestres que dependen de estos recursos hídricos.

Adicionalmente, la bioacumulación detectada en músculo (0,035 mg/Kg) fue baja y no superó los límites establecidos para consumo humano, lo que sugiere una barrera relativa a su depósito en este tejido. Este patrón de distribución, con mayores acumulaciones en órganos de detoxificación como hígado y riñón, es consistentemente reportado en la literatura. En este sentido, otros autores (9,11) observaron una acumulación preferencial de arsénico en estos órganos diana en modelos experimentales y bovinos, respectivamente, minimizando su transferencia al tejido muscular.

Este fenómeno se atribuye a los mecanismos de toxicocinética que priorizan el secuestro y metabolismo del metaloide en vísceras, actuando como un filtro protector que reduce, mas no elimina, el riesgo de entrada a la cadena alimentaria a través de la carne.

Sin embargo, se debe enfatizar que la presencia detectable de arsénico en cualquier tejido animal, independientemente de su concentración, constituye una alerta toxicológica temprana. Al respecto, la exposición crónica a metales pesados, incluso a bajas concentraciones consideradas subclínicas, representa una amenaza latente para la salud pública (2,3). Esto se debe a sus efectos carcinogénicos, genotóxicos y a su capacidad de provocar daños orgánicos de forma acumulativa y silenciosa a lo largo del tiempo. Por ello, tales resultados requieren de una vigilancia continua y sistemática, ya que la inocuidad a corto plazo no garantiza la ausencia de riesgos ante una exposición prolongada de animales y consumidores.

Por otro lado, la ausencia de una correlación lineal directa entre la concentración de arsénico en el agua y su nivel en el músculo difiere de la relación dosis-respuesta clásica esperada en toxicología. Esto podría explicarse satisfactoriamente por los complejos mecanismos de toxicocinética (1), donde múltiples factores moduladores intervienen.

La especiación química del metal (orgánico/inorgánico), su biodisponibilidad, la eficiencia de los procesos de absorción intestinal y la fisiología específica del animal, incluyendo sus sistemas de detoxificación hepática y excreción renal, modulan profundamente su distribución tisular. Estos procesos homeostáticos pueden crear una barrera relativa, amortiguando la transferencia lineal del contaminante desde el agua de bebida hacia el tejido muscular comestible, lo que debe considerarse en las evaluaciones de riesgo.

Asimismo, el rol de la dieta balanceada utilizada en este estudio pudo haber ejercido una influencia significativa como factor confundente atenuante. En esta dirección, se demostró con anterioridad a la presente investigación que componentes dietéticos específicos, como antioxidantes (vitamina C, E) y minerales (zinc, selenio), pueden modular la toxicocinética del arsénico (11,15). Estos nutrientes reducen su bioacumulación y mitigan el daño oxidativo a través de mecanismos como la quelación, la activación de enzimas detoxificantes y la neutralización de especies reactivas de oxígeno. Por lo tanto, la suplementación con vitamina C en la ración pudo haber enmascarado parcialmente los efectos potenciales de la exposición, subrayando la necesidad de controlar estrictamente la composición de la dieta en estudios de bioacumulación para aislar correctamente el efecto del agua.

En contraste con estudios que reportan contaminación significativa en productos animales, por ejemplo, en leche bovina en el norte del Perú (10), los resultados de la presente investigación en carne de cuy fueron relativamente tranquilizadores al mostrar niveles muy por debajo de los límites regulatorios. Está marcada diferencia puede atribuirse a varios factores intrínsecos y experimentales. La distinta fisiología de las especies (rumiante versus monogástrico herbívoro), el tiempo de exposición posiblemente menor en el diseño, la eficacia diferencial de los mecanismos de detoxificación hepática en el cuy, y la naturaleza misma de la matriz analizada (leche versus músculo) influyen en los perfiles de acumulación. Esta comparación resalta la importancia de evaluar los riesgos de manera específica para cada especie, tejido y sistema productivo.

Respecto a los parámetros productivos, la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos coincide con la resiliencia observada en otros estudios donde se emplea alimentación balanceada de calidad. Sobre este aspecto, se reportó que un buen sistema de alimentación es el factor determinante para el rendimiento zootécnico (13). En el experimento, la ración optimizada, suplementada con vitamina C, pudo enmascarar potenciales efectos negativos subclínicos del arsénico sobre el crecimiento y la conversión alimenticia, actuando como un

factor de confusión atenuante. Esto subraya la importancia de considerar la dieta como una variable fundamental que puede compensar o ocultar impactos ambientales adversos, y sugiere la necesidad de evaluar escenarios con menor apoyo nutricional o exposiciones más prolongadas.

No obstante, es crucial considerar resultados como los que advierten sobre efectos tóxicos sinérgicos o aditivos cuando existe exposición combinada a múltiples contaminantes, como diferentes metales pesados o pesticidas (17). La presente investigación evaluó de forma aislada el arsénico presente en el agua; sin embargo, en condiciones de campo reales, los animales frecuentemente están expuestos a mezclas complejas de contaminantes. La presencia simultánea de plomo, cadmio, mercurio u otros metales podría potenciar la toxicidad, alterar la farmacocinética del arsénico y aumentar su bioacumulación mediante mecanismos de interacción. Por lo tanto, el riesgo ecotoxicológico y para la inocuidad alimentaria en sistemas productivos de la región podría ser considerablemente mayor que el estimado en este experimento controlado, subrayando la necesidad de realizar evaluaciones multifactoriales integrales.

Las tendencias numéricas observadas, como la menor ganancia de peso y la variación en el rendimiento de canal entre tratamientos,

refuerzan la importancia crítica de la calidad del agua como factor productivo. Aunque no alcanzaron significancia estadística en este ensayo de corta duración, estas variaciones siguen una dirección biológica esperada donde las fuentes más contaminadas mostraron un desempeño ligeramente inferior. Este patrón subraya la necesidad de un monitoreo ambiental continuo y preventivo, tal como se recomendó por otros investigadores (6,12) para la gestión integral de recursos hídricos. Dicho monitoreo es esencial para detectar deterioros tempranos que, a largo plazo, podrían traducirse en pérdidas productivas significativas y comprometer la sostenibilidad económica de las granjas.

En cuanto a estrategias de mitigación, los promisorios resultados con aditivos detoxificantes para cadmio (16,18), y con extractos naturales contra arsénico (14,19), abren una línea de investigación aplicable y urgente para la producción de cuyes en zonas contaminadas. Estos estudios demuestran que la suplementación dietética con compuestos específicos, como zeolitas modificadas o extractos vegetales ricos en antioxidantes, puede reducir la bioacumulación de metales y atenuar el estrés oxidativo en tejidos. Adaptar y validar estas intervenciones nutricionales en la especie *Cavia porcellus* se presenta como una estrategia práctica y costo-efectiva para salvaguardar la salud animal, la productividad y,

fundamentalmente, la inocuidad de la carne en sistemas pecuarios expuestos a aguas con residuos de minería.

En relación con los resultados, la conclusión de que la carne se mantuvo inocua debe interpretarse con extrema cautela dentro del contexto específico y limitado de este estudio experimental. Las condiciones controladas, con una exposición de duración definida y una dieta optimizada, no replican la realidad de una exposición crónica a lo largo de la vida productiva del animal. Como se demostró en el caso del arroz, el riesgo para la salud se magnifica con la exposición diaria y continua, donde la bioacumulación puede incrementarse progresivamente (20). Por lo tanto, los resultados positivos no implican de ninguna manera que el agua del río Caplina sea segura para un uso pecuario continuo y a gran escala, resaltando la brecha entre los resultados experimentales a corto plazo y la evaluación integral del riesgo sanitario.

La evidencia generada respalda firmemente la implementación de tecnologías de remediación accesibles, como las membranas de nanofiltración para tratar el agua destinada a la producción animal en la región (21). La adopción de tales soluciones técnicas es una medida necesaria para romper el ciclo de exposición y garantizar la sostenibilidad de los sistemas pecuarios. Tal como lo plantean las conclusiones de otros estudios (3,4), la

remediación en la fuente es fundamental para la gestión del riesgo ecotoxicológico. En el contexto de la crianza de cuyes, proveer agua tratada sería una inversión crucial para proteger la salud del plantel, asegurar la inocuidad alimentaria a largo plazo y salvaguardar la viabilidad económica de los productores frente a un recurso hídrico crecientemente degradado.

Asimismo, este trabajo aporta evidencia valiosa sobre la baja transferencia de arsénico al músculo en cuyes, contrastando con estudios que muestran alta acumulación en vísceras de otras especies. Sin embargo, confirma los reportes previos sobre la contaminación de fuentes hídricas, reforzando el llamado a la acción interdisciplinaria que otros autores han hecho por décadas (1,2).

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la exposición a fuentes hídricas con diferentes concentraciones de arsénico no compromete la inocuidad de la carne de cuy bajo condiciones controladas de alimentación y manejo. La bioacumulación en tejido muscular fue mínima y se mantuvo consistentemente por debajo de los umbrales de riesgo para la salud humana, lo que respalda la seguridad del producto final para el consumo. En consecuencia, los resultados subrayan la notable resiliencia de los sistemas fisiológicos de la especie para gestionar la exposición a este

metaloide, limitando su transferencia a la porción comestible. Esta capacidad homeostática resulta crucial para la sostenibilidad de la producción pecuaria en regiones donde la calidad del agua puede ser variable.

Adicionalmente, la estabilidad observada en los parámetros zootécnicos indica que el desempeño productivo no se ve afectado negativamente en el corto plazo. Esto sugiere que, con una nutrición balanceada de calidad, los sistemas de crianza pueden mantener su eficiencia incluso ante la presencia de factores ambientales potencialmente estresantes. Por otro lado, los resultados enfatizan la importancia crítica de implementar un monitoreo continuo y riguroso de las fuentes de agua utilizadas en la producción animal. La identificación de puntos de contaminación es el primer paso para diseñar e implementar estrategias de remediación y gestión de riesgo sanitario.

Asimismo, se evidencia la necesidad de adoptar un enfoque integral que combine la optimización de la dieta con la garantía de agua segura. Esta sinergia es fundamental para asegurar no solo la rentabilidad del sistema, sino también la calidad e inocuidad alimentaria a lo largo de la cadena de producción.

AGRADECIMIENTO. Se reconoce que la ejecución de esta investigación fue posible gracias al uso de las instalaciones, equipamiento y apoyo logístico proporcionados por el proyecto Canon titulado "Efecto de dietas suplementadas

con subproductos agrícolas no tradicionales en la etapa de crecimiento y engorde del cuy (*Cavia porcellus*), desarrollado en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Asimismo, se agradece a la institución por las facilidades brindadas para el desarrollo de las actividades experimentales y la obtención de la información necesaria para el cumplimiento de los objetivos del estudio.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran no presentar conflictos de interés en relación con la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

1. Galvão A, Corey G, Salud OP de la. Arsénico. En: Arsénico 1987. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/31247>
2. Bravo C, Quispe L. Metales pesados: fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. Ciencias. 2019;2:20-36. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>
3. Mitra S, Chakraborty A, Tareq A, Emran T, Nainu F, Khushro A, et al. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. J King Saud Univ – Sci. 2022;34. <https://jksus.org/impact-of-heavy-metals-on-the-environment-and-human-health-novel-therapeutic-insights-to-counter-the-toxicity/>
4. Eisler R. Arsenic Hazards to Humans, Plants, and Animals from Gold Mining. En: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. New York, NY: Springer; 2004. p. 133-65. https://doi.org/10.1007/0-387-21729-0_3
5. Annan ST, Sanful PO, Lartey-Young G, Yandam RK. Spatial and Temporal Patterns of Variation in Environmental Quality of Water and Sediments of Streams in Mined and Unmined Areas with Emphasis on Mercury (Hg) and Arsenic (As). J Geosci Environ Prot. 2018;6(9):125-40. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=87268>
6. Lam Y, Sze C, Tong Y, Ng T, Shaw P, Zhang Y. A Review of the Potential Issues of Pollution Caused by the Mineral Elements, Mercury, Lead

- and Arsenic, Its Possible Impacts on the Human Beings and the Suggested Solutions. *Chin Med*. 2012;3(4):167-78. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=25963>
7. Rahman H, Niemann D, Singh D. Arsenic Exposure and Association with Hepatitis E IgG Antibodies. *Occup Dis Environ Med*. 2020;8(3):111-22. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=102411>
 8. Kyolo , Bbosa GS, Odda J, Lubega A, Edmond N. Toxicity Profile of Karuho Poison on the Brain of Wistar Albino Rats. *Neurosci Med*. 2018;9(2):63-80. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=85292>
 9. Pérez A, Pérez L, Fernández A. Presencia de arsénico en tejidos de origen bovino en el sudeste de la provincia de Córdoba, Argentina. *InVet*. 2010;12(1):59-67. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1668-34982010000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
 10. Guerrero J, Nevado Y, Pozo A, Mendoza R, Sánchez W. Concentraciones de arsénico en leche de vacas expuestas a aguas con altos niveles de arsénico en centros poblados de la costa norte de Perú. *FAO* 2021. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122358/records/647473a579cbb2c2c1b36263>
 11. Herrera A, Pineda D, Antonio T. Bioacumulación de arsénico en tejidos animales por consumo de aguas contaminadas experimentalmente. *Bol Real Soc Esp Hist Nat Sección Biológica*. 2013;107(1-4):39-46. <https://n9.cl/hrck4c>
 12. Rezaie H, Chaney J, Bowers B. The Source of Arsenic and Nitrate in Borrego Valley Groundwater Aquifer. *J Water Resour Prot*. 2014;6(17):1589-602. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=51944>
 13. Reynaga F, Vergara V, Chauca L, Muscari J, Higaonna R. Sistemas de alimentación mixta e integral en la etapa de crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) de las razas Perú, Andina e Inti. *Rev Inv Vet Perú*. 2020;31(3):e18173. <https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/b70a39bc-5568-4479-8134-595b636b7666/content>
 14. Suman S, Ali M, Kumar R, Kumar A. Phytoremedial Effect of *Pleurotus cornucopiae* (OysterMushroom) against Sodium Arsenite Induced Toxicity in Charles Foster Rats. *Pharmacol Amp Pharm*. 2014;5(12):1106-12. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=51220>
 15. Sijko M, Kozłowska L, Sijko M, Kozłowska L. Influence of Dietary Compounds on Arsenic Metabolism and Toxicity. Part I—Animal Model Studies. *Toxics*. 2021;9(10). <https://www.mdpi.com/2305-6304/9/10/258>
 16. Beltcheva M, Tzvetanova Y, Ostoich P, Aleksieva I, Chassovnikarova T, Tsvetanova L, et al. Oral Supplementation with Modified Natural Clinoptilolite Protects Against Cadmium Toxicity in ICR (CD-1) Mice. *Toxics*. 2025;13(5). <https://www.mdpi.com/2305-6304/13/5/350>
 17. Singh N, Gupta VK, Kumar A, Sharma B. Synergistic Effects of Heavy Metals and Pesticides in Living Systems. *Front Chem*. 2017;5. <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2017.00070/full>
 18. Rusew R, Tzvetanova Y, Ostoich P, Aleksieva I, Chassovnikarova T, Tsvetanova L, et al. Modified Natural Clinoptilolite Alleviates Cadmium-Induced Toxicity in Icr Albino Mice. *Preprints*; 2025. <https://www.preprints.org/manuscript/202503.1874>
 19. Fatima N, Fatmi N, Shahzada M, Sharma S, Kumar R, Ali M, et al. Ameliorating Effect of *Cucumis sativus* (Cucumbers) against Arsenic Induced Toxicity in Mice. *Open J Pathol*. 2018;8(3):78-84. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=85857>
 20. Antik TS, Mou SI. Assessment of Arsenic in Rice and Cooked Rice in Meherpur, Bangladesh: Associated Health Risks Implications. *J Geosci Environ Prot*. 2025;13(1):457-74. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=140407>
 21. Zhao C, Du S, Wang T, Zhang J, Luan Z. Arsenic Removal from Drinking Water by Self-Made PMIA Nanofiltration Membrane. *Adv Chem Eng Sci*. 2012;2(3):366-71. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=20830>