

Niveles de plaguicidas y su efecto en las aguas superficiales en zonas agrícolas de la cuenca Pucara, Tiraque-Cochabamba

Mirtha Rivero L.¹, Mercedes Álvarez C.², Henry Antezana F.^{2,*}, Silvia Castellón T.³

¹ Unidad de Limnología Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

² Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

³ Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

¹limnomrl@fcyt.umss.edu.bo, *henr.antezana@umss.edu

Resumen

Se realizó un monitoreo de residuos de plaguicidas en agua de 11 puntos en los ríos de la cuenca Pucara (Provincia Tiraque, Cochabamba-Bolivia), área de producción agrícola intensa, con el propósito de determinar su presencia en aguas superficiales y evaluar la calidad del agua para abastecimiento y riego.

Se analizaron plaguicidas de los grupos órganoclorados, órganofosforados y triazinas por cromatografía gaseosa.

Los plaguicidas de uso agrícola fueron detectados en el 83 % de los puntos estudiados, en concentraciones que implican un riesgo para la salud humana, para el desarrollo de la vida acuática y el medio ambiente. Los principales contaminantes en los ríos estudiados son los plaguicidas órganofosforados, encontrándose en el 80 % de los puntos estudiados. Los niveles detectados de plaguicidas órganoclorados, órganofosforados y atrazina, superan los límites establecidos para descargas en cuerpos receptores de agua según el Reglamento boliviano en Materia de Contaminación hídrica, de la Ley del Medio Ambiente 1333, así como también, en referencia a normas internacionales, en base a las cuales, los ríos estudiados fueron clasificados como contaminados. Estos tóxicos son transportados lejos de los lugares donde se aplican, contaminando otros ecosistemas y fuentes de agua, lo cual, puede ocasionar problemas de salud pública y ambientales.

Palabras clave: *Plaguicidas, Ríos, Agua superficial, Calidad del agua, Contaminación.*

1. Introducción

El requerimiento creciente de alimentos en las últimas décadas ha llevado a la expansión de las áreas agrícolas y consecuentemente, a una utilización mayor de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas) con el fin de lograr rendimientos superiores en los cultivos. El uso intensivo de plaguicidas en la agricultura, inevitablemente conlleva el que los residuos de agroquímicos puedan ser detectados en cada uno de los compartimientos ambientales: agua, aire y suelo (Álvarez, 2006).

Sin embargo, los plaguicidas alteran el balance de la naturaleza desequilibrando los sistemas ecológicos. Este hecho tiene gran trascendencia, ya que el suelo es un ecosistema complejo, en el que coexisten multitud de poblaciones animales, vegetales y microbianas que mantienen entre sí, con el agua y los elementos minerales edáficos un equilibrio dinámico muy preciso. La alteración de este equilibrio por la introducción de agentes químicos tan activos, como suelen ser los plaguicidas, produce una serie de fenómenos variados

que probablemente afectan a muchos de los elementos biológicos del suelo y del agua (Rojas *et al.*, 2014). Diversos estudios reportan daños a la salud por exposición crónica de los plaguicidas órganoclorados respecto a trastornos hormonales, problemas reproductivos, aprendizaje, anomalías congénitas, carcinogenicidad, disruptores del sistema endocrino y neurotoxicidad (Alavanja *et al.*, 2004; Mnif *et al.*, 2011; Mostafalou y Abdollahi, 2013).

La contaminación de los ríos por estos compuestos llega por lixiviación o por escorrentía a través de la red de arroyos afluentes y que varía de acuerdo a la cantidad de precipitación (época seca y de lluvias) (Styezen, 2003). Otra fuente de contaminación en forma directa es el lavado de envases y equipos de fumigación, al descargar los remanentes que transporta el contaminante a los sistemas acuáticos. Por la toxicidad que presentan los plaguicidas influyen sobre la biota acuática y el hombre debido a que ambos dependen del agua como recurso imprescindible (Pastor

Benito *et al.*, 2002).

Como todo país en desarrollo, el uso de plaguicidas en Bolivia desempeña un papel importante en la sostenibilidad de la producción agrícola, por lo que, se incrementaron las importaciones de 1.289.641,52 kilos en el año 2010 a 5.772.412,83 kilos en el año 2016 (Saravia, 2017). Este incremento en el uso de los agroquímicos actúa negativamente sobre los organismos acuáticos, llegando mediante la cadena trófica, a los seres humanos y otros organismos del ecosistema.

La información disponible sobre los procesos de contaminación por plaguicidas y los efectos ecotoxicológicos en Bolivia es muy escasa y dispersa debido al costo elevado que representan los análisis de estos compuestos orgánicos. Por otro lado, si bien se tienen normativas y reglamentos de valores máximos permisibles de residuos de plaguicidas, no se dispone para una mayoría de los mismos, que son usados por el sector agrícola y que son de elevada toxicidad. Es el caso del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, Ley 1333 (BO-DS-24176, 1995), para cuerpos receptores de aguas superficiales donde solo existen referencias de límites máximos permisibles para algunos plaguicidas.

En nuestro país, las investigaciones relacionadas con la contaminación por plaguicidas son escasas y recientes. Una de ellas evaluó la calidad del agua a través del uso de herramientas ecotoxicológicas y químicas, en la cuenca Chipiriri, Chapare-Cochabamba, a través de asimetría fluctuante e inhibición de acetilcolinesterasa (Rivero *et al.*, 2008). Así también, se evidencio la contaminación por plaguicidas en agua, sedimento y material biológico en ríos de la Cuenca Pucara y Omereque, debido a los niveles elevados de plaguicidas encontrados en el 90 % de los ríos muestreados, en las diferentes matrices estudiadas: agua, sedimento, suelos y tomate (*Solanum lycopersicum*) (Alvarez y Sans, 2010, Rivero *et al.*, 2016 y 2019).

Se evaluó la calidad del agua mediante la determinación de plaguicidas organoclorados, organofosforados y triazinas en el agua de los ríos de la cuenca Pucara, cuyas aguas son utilizadas para riego, consumo humano y abrevadero. Las concentraciones encontradas de plaguicidas en el agua fueron comparadas con normas internacionales y nacionales para su posterior clasificación.

2. Materiales y métodos

Área de estudio y Selección de puntos de muestreo

El área de estudio abarca principalmente, la cuenca Pucara, que comprende gran parte de la provincia Tiraque, y también, áreas de las provincias Punata, Carrasco, Araní y Chapare del departamento de Cochabamba. Pertenece a la región Mesoandina más conocida como Tiraque valle, donde se encuentran varias fuentes de agua (lagos y ríos) que aprovechan los pobladores de los alrededores. Tiene una superficie aproximada de 68.000 hectáreas, de las cuales 13.856 has son terrenos explotados en la actividad agrícola, con tubérculos, hortalizas, cereales y leguminosas, utilizando agroquímicos para sus diferentes cultivos, de las cuales cerca de 6.399 has tienen riego y 7.456 has de cultivos a secano (PDM, 2008-2012). Se encuentra entre: 17°18" y 17°32" de latitud Sur y 65°33" y 65°53" de longitud Oeste, a 60 km de la ciudad de Cochabamba (PDM, 2008 – 2012, Cruz, 2009).

Tomando en cuenta la red hídrica principal, la cuenca Pucara (Figura 1) se divide en cinco subcuencas: Cabeceras de Millu Mayu, Toralapa, Ch'aqo Millu Mayu, Ch'aki Mayu y Pucara Mayu. La subcuenca Cabeceras de Millu Mayu es la zona de mayor potencial de fuentes de agua superficial y Pucara Mayu, la subcuenca más seca y de menor rendimiento hidrológico (Cruz, 2011).

Los 11 puntos de muestreo: PLA 1, PLA 6, PLA 7, PLA 8 y PLA 10 fueron ubicados en el río Millu Mayu, PLA 2 en el río Sapanani. El punto PLA 3 en el río Parra Mayu, los puntos PLA 4 y PLA 5 en el río Toralapa a la altura de la comunidad Chaco Capilla, el punto PLA 9 ubicado en una vertiente que es afluente del río Mulli Mayu y PLA 11 ubicado en el río Pucara a la Altura de Kuchu Punata. Estos se seleccionaron tomando en cuenta su proximidad a los campos de cultivo, así como, la accesibilidad a los mismos (Figura 1). Se consideró el punto PLA 10 como punto de control, debido a que presenta menor actividad antropogénica al estar ubicado a mayor altitud, aproximadamente a 4.000 m.s.n.m. El punto PLA 11 fue seleccionado como zona de descarga de la cuenca Pucara a una altitud de 2.800 m.s.n.m., donde confluyen todas las aguas de los distintos afluentes de la cuenca.



Figura 1. Cuenca Pucara: subcuencas y puntos de muestreo. El Abanico de Punata no pertenece a la cuenca Pucara, pero utiliza el agua de esta cuenca. Fuente: modificado de Cruz (2011).

Colecta de muestras de agua

Las muestras de agua se colectaron a través de un muestreo simple aleatorio, en botellas de vidrio con tapa de teflón preservadas con diclorometano, las cuales se colocaron en contenedores refrigerados con hielo seco, para evitar alteraciones de sus condiciones iniciales. Posteriormente, fueron almacenadas en cámara fría a 4 °C, hasta el análisis.

Determinación de plaguicidas

Los análisis de las muestras de agua se realizaron en los laboratorios del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA), de la FCyT-UMSS.

La extracción de los residuos de plaguicidas en agua fue realizada mediante extracción líquido – líquido, se tomó una alícuota de 1L de agua de cada uno de los diferentes sitios de muestreo, la extracción se realizó con tres porciones de diclorometano, posteriormente, se realizó la concentración y limpieza del extracto. El solvente de los eluatos se evaporó en ambiente de nitrógeno y el extracto seco se resuspendió con diclorometano, transfiriendo en un vial ambarado para su posterior análisis.

Los análisis se realizaron según Procedimientos Normalizados de Operación (Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 2012) método EPA 8081A y EPA 8141A modificados para plaguicidas organoclorados y organofosforados, respectivamente. Se utilizó un cromatógrafo de gases SHIMADZU 17A equipado con un detector de captura de electrones (ECD) para los compuestos organoclorados y un

detector termoiónico de llama (FTD) para los organofosforados. Los parámetros del sistema y los datos cromatográficos fueron controlados y analizados usando el software SHIMADZU CLASS VPTM 4.3. El gas portador fue helio, se utilizó una columna Cpsil19cb (Varian) (50 m de longitud, 0,25 mm de diámetro interno y 0,2 μm de espesor de película). El modo de inyección fue Split-Splitless, la temperatura del inyector de 220 °C. El programa de temperatura fue: 100 °C durante 2 min, 100-150 °C a 15 °C min^{-1} , 150 °C durante 5 min, 150-240 °C a 10 °C min^{-1} , 240 °C durante 11 min, 240–245 °C a 10 °C min^{-1} , y finalmente a 245 °C durante 19,5 min. Las condiciones de los detectores fueron los siguientes: detector ECD a 300 °C, gas portador He (presión de entrada 60 kPa, relación 1:10, gas de arrastre N_2 a 80 kPa y 15 mL min^{-1}); detector FTD a temperatura de 290 °C, gas portador He a 60 kPa, relación 1:10, gas de reposición (He) a 80 kPa y 30 mL min^{-1} , Hidrógeno a 50 kPa y 3 mL min^{-1} , aire a 30 kPa y 80 mL min^{-1} . La cuantificación se realizó a través del método del estándar externo y/o interno y los picos se identificaron según su tiempo de retención.

Criterios para la evaluación de resultados

Los resultados de concentraciones de plaguicidas en agua, en los diferentes puntos de muestreo, fueron comparados con Normas de calidad de agua para uso agrícola de la República Dominicana y de Chile, y según la Ley boliviana del medio ambiente 1333, para cuerpos receptores hídricos superficiales (BO-DS-24176, 1995) (Tabla 1).

Tabla 1

Valores máximos permisibles para plaguicidas en cuerpos de agua según normas nacionales e internacionales.

Plaguicidas	Ley Boliviana del medio ambiente 1333 * ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Normas Chilenas 1.333 ** ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Normas de la República Dominicana *** ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Aldrin	0,03	0,004	0,0008
Atrazina	NE	NE	NE
Dieldrin	0,03	0,5	0,0008
Endrin	NE	NE	0,002
Heptacloro	0,1	0,01	0,001
Dimetoato	NE	6,2	NE
Clorpirifos	NE	NE	0,04
Malation	0,04	NE	0,10
Metilparation	NE	NE	0,01
Monocrotofos	NE	NE	NE

Fuente: *BO-DS-24176: Parámetros en cuerpos receptores. **Norma Chilena 1.333 of 78, modificada (1987), para diferentes clases de calidad de agua. ***Normas de Calidad del agua y control de descarga (2001) para diferentes clases de calidad de agua.

NE = No se establece

Los resultados también, se compararon con los valores guías de la calidad de agua para la protección de la vida acuática en agua dulce sugeridos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación de la República Argentina (SRHNA, 2005) y según la Guía de la Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2001) mencionado por Gil *et al.* (2005) para la protección de la vida acuática (Tabla 2).

Tabla 2

Valores guías de calidad para la protección de la vida acuática en agua dulce

Plaguicida	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina* ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Canadian Council of Ministers of the Environment ** ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Atrazina	≤ 3	1,8
Captan	≤ 2	1,3
Carbaril	$\leq 0,5$	0,20
Carbendazin	≤ 1	NE
Carbofuran	$\leq 0,5$	1,8
Clordano	$\leq 0,08$	0,006
Clorpirifos	$\leq 0,006$	0,0035
Deltametrina	$\leq 0,001$	0,0004
Dimetoato	$\leq 6,4$	6,2
Endosulfan	$\leq 0,007$	0,02
Glifosato	≤ 240	65
Lindano (γ - HCH)	$\leq 0,02$	0,01
Metil Azinfos	$\leq 0,02$	NE
Permetrina	$\leq 0,01$	NE
Malation	0,1	NE
Metilparation	0,1	NE
Monocrotofos	0,1	NE
Clorpirifos	NE	0,002
Aldrin + Dieldrin	NE	0,004
DDT total	NE	0,001
Endrin	NE	0,0023
Heptacloro	$\leq 0,02$	0,01
Heptacloro- epoxide	$\leq 0,02$	0,01

Fuente: *SRHNA (2005) mencionado por Gil *et al.* (2005); **CCME (2001)

Dónde: NE= No se establece

Cabe indicar que el desarrollo de las normas nacionales e internacionales en aguas superficiales para los diversos usos están basados en contextos medio ambientales, sociales, culturales y económicos propios de cada país, así como otros factores que afectan la exposición ambiental, lo que da lugar a los diferentes valores máximos permisibles. Es importante indicar

que la comparación se realizó con varias normas, debido a que, no todos los plaguicidas encontrados en la zona de estudio están listados en cada una de estas normas nacionales e internacionales.

3. Resultados y Discusión

En las aguas de los diferentes ríos estudiados se encontraron los siguientes residuos de plaguicidas organoclorados y triazinas: Aldrin, Dieldrin, DDT, Endrin, Heptacloro y Atrazina.

El Heptacloro se detectó en el agua de los puntos PLA 2, PLA 3 y PLA 4, en concentraciones de $0,071 \mu\text{g L}^{-1}$, en PLA 1 ($0,080 \mu\text{g L}^{-1}$). Las mayores concentraciones se presentaron en los puntos PLA 8 ($0,87 \mu\text{g L}^{-1}$) y PLA 11 ($1,97 \mu\text{g L}^{-1}$) que exceden ampliamente los límites máximos permisibles ($0,1 \mu\text{g L}^{-1}$) del Reglamento boliviano en Materia de Contaminación hídrica de la Ley 1333 (BO-DS-24176, 1995). En los puntos mencionados, de igual manera, las concentraciones de plaguicidas se encuentran por encima de los valores de las normas: chilenas ($0,01 \mu\text{g L}^{-1}$), de la República Dominicana ($0,001 \mu\text{g L}^{-1}$), y los Valores Guías de la calidad de agua según SRHNA (2005) ($0,02 \mu\text{g L}^{-1}$) y CCME (2001) ($0,01 \mu\text{g L}^{-1}$), clasificándose estos puntos como contaminados (Figura 2).

La permanencia de los plaguicidas organoclorados en los ecosistemas acuáticos debido a su uso en el pasado, determina que sean detectados en la actualidad. Es así que, el Heptacloro se puede detectar en concentraciones mínimas en el suelo de 14 a 16 años después de su aplicación (FAO, 2000). Los compuestos organoclorados son altamente tóxicos y permanecen en el medio ambiente, especialmente en sistemas acuáticos debido a sus características de alta persistencia, lenta degradación y alta estabilidad química (Pelosi *et al.*, 2017). Entre los efectos negativos, que puede producir en los sistemas acuáticos esta la declinación de las poblaciones de organismos, efectos teratogénicos sobre la salud humana, como cáncer, problemas reproductivos, además de enfermedades genéticas (Moreno, 2003).

Polanco Rodríguez *et al.* (2019) mencionan que existen evidencias de contaminación del acuífero de Yucatan por plaguicidas organoclorados y que a través de la cadena trófica llegan al ser humano, incorporándose en los órganos e incrementándose progresivamente la cantidad tóxica, como consecuencia de que la velocidad de absorción es superior a la velocidad de eliminación, produciéndose bioacumulación y biomagnificación.

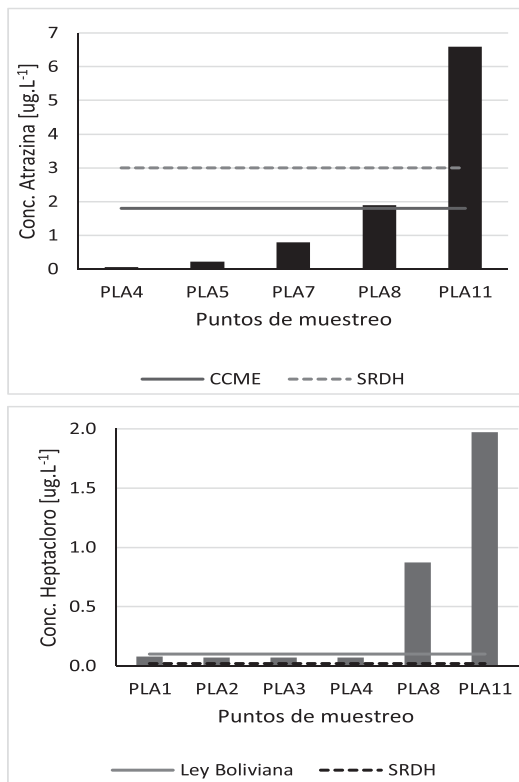


Figura 2. Concentración de Atrazina (arriba) y Heptacloro (abajo) en agua de los ríos de la Cuenca Pucara en los puntos donde se encontraron los plaguicidas, comparadas con Normas nacionales e internacionales.

En la Figura 2, se observa que la Atrazina está presente en el agua del río Toralapa (PLA 4 y PLA 5), río Millu mayu (PLA 7 y PLA 8), y río Pucara (PLA 11). Nuevamente, en los puntos PLA 8 ($1,9 \mu\text{g L}^{-1}$) y PLA 11 ($6,59 \mu\text{g L}^{-1}$), las concentraciones de Atrazina se encuentran por encima de los Valores Guía recomendados por la CCME (2001) ($\leq 1,8 \mu\text{g L}^{-1}$), que indican impactos severos en los organismos acuáticos, sobre todo en los macroinvertebrados bentónicos, que representan un eslabón importante en la cadena trófica (Figuroa *et al.*, 2003). Estas concentraciones tan elevadas posiblemente se deban a que en los puntos mencionados existe gran actividad de lavado de tubérculos y hortalizas que se producen en la zona, observándose atajados para este fin.

Es importante indicar que, la Unión Europea (UE) formuló patrones de calidad ambiental en el área de la política del agua, estableciendo límites en concentraciones máximas aceptables para las

substancias de mayor interés (PE, 2008), en el caso de la Atrazina el nivel máximo aceptable es de $2 \mu\text{g L}^{-1}$ en aguas superficiales, con respecto a este valor las concentraciones en los puntos PLA8 y PLA 11 exceden este límite.

Residuos de Endrin fueron detectados en el agua de los puntos PLA 4 y PLA 5, en ambos casos en una concentración de $0,06 \mu\text{g L}^{-1}$, que se encuentra por encima de los valores dados por Normas internacionales (Figura 3).

Se considera que el Endrin en el agua presenta alta movilidad y persistencia, es extremadamente tóxico en ambientes acuáticos, especialmente para anfibios y peces. También tiene efectos negativos en la reproducción de las aves; toxicidad alta en insectos (abejas) y lombrices de tierra, son reportados como disruptores endocrinos y/o con efectos reproductivos. (Cruz *et al.*, 2021).

En el presente estudio se reportaron concentraciones elevadas, que probablemente ocasionarán cambios drásticos en el medio ambiente, como la desaparición de especies acuáticas, que puede afectar la estructura y dinámica de las comunidades.

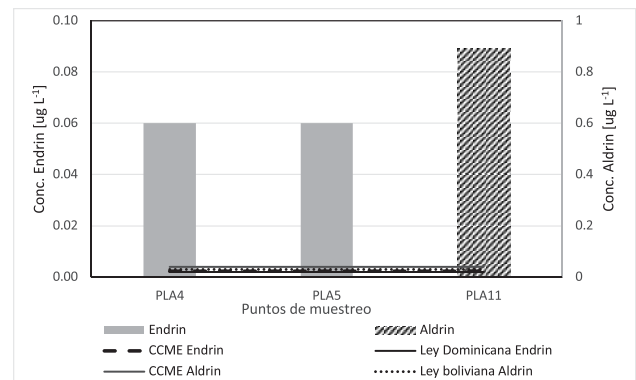


Figura 3. Concentración de plaguicidas organoclorados: Aldrin y Endrin, en agua de los ríos de la Cuenca Pucara comparadas con Normas internacionales y bolivianas.

El insecticida Aldrin presentó concentraciones elevadas en las aguas del punto PLA 11 ($0,89 \mu\text{g L}^{-1}$) y PLA 4 ($0,03 \mu\text{g L}^{-1}$), excediendo las normas internacionales como se observa en la Figura 3.

Respecto a los plaguicidas organofosforados de los 11 puntos de muestreo estudiados corresponden: 64 % a Dimetoato, 54 % Metilparation, 27 % Monocrotofos, 9 % Clorpirifos y 10% Malatión.

El Dimetoato (nombre comercial Perfekthion) es uno de los mayores contaminantes para las aguas superficiales, por su alta solubilidad, muy utilizado para el control de una amplia gama de insectos, aplicado en cultivos de hortalizas y tubérculos en la cuenca de estudio. Se detectó residuos de este compuesto en todos los puntos, excepto en PLA 1, PLA 6, PLA 9 y PLA 10, en un intervalo de concentraciones de 0,33 a 16,4 $\mu\text{g L}^{-1}$. La concentración mayor corresponde a PLA 11 en el río Pucara, con un valor alarmante, posiblemente debido a la confluencia de las aguas de todos los ríos de la cuenca en estudio y a la gran actividad antropogénica en el lugar. Esta concentración se encuentra por encima de los Valores Guía de la CCME (2001), las normas: chilena (6,2 $\mu\text{g L}^{-1}$) y argentina (SRHNA, 2005), para la protección de la biota acuática ($\leq 6,4 \mu\text{g L}^{-1}$) (Figura 4). Verma y Mohanty (2009) advierten que la exposición al Dimetoato presenta problemas durante la gestación y el período de lactancia en animales de experimentación, causando complicaciones en el sistema reproductor de los animales.

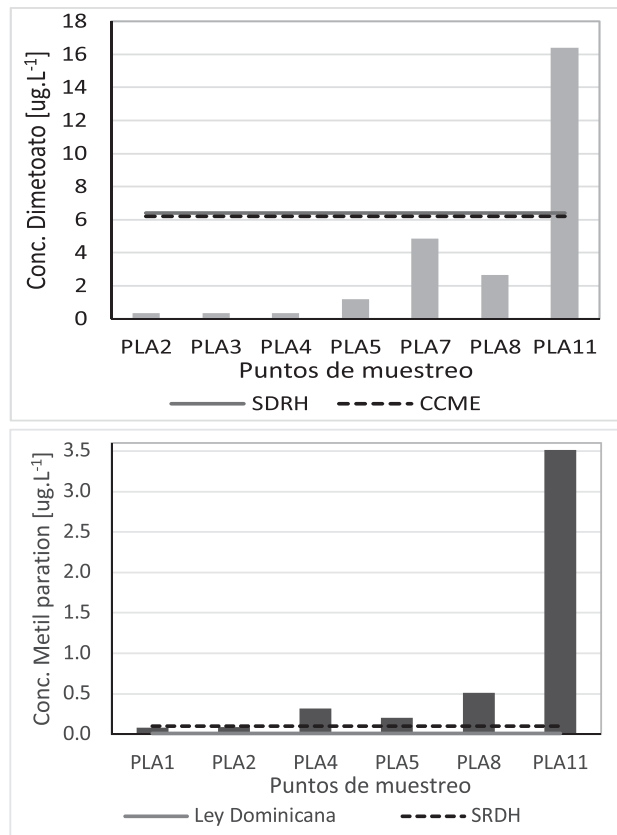


Figura 4. Concentración de plaguicidas organofosforados: Dimetoato (arriba) y Metilparation (abajo) en agua de los ríos de la Cuenca Pucara comparadas con Normas internacionales.

Metilparation, conocido con el nombre comercial de Folidol, se halló en los puntos PLA 1, PLA 2, PLA 4, PLA 5, PLA 8 y PLA 11, los niveles de este plaguicida oscilan en un intervalo de concentraciones de 0,08 a 3,51 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 4). Se compararon con las normativas de la República Dominicana (0,01 $\mu\text{g L}^{-1}$) y Argentina (SRHNA, 2005) (0,1 $\mu\text{g L}^{-1}$) observándose que exceden los valores límites para uso agrícola y para la protección de la vida acuática. En la Figura 4, se muestran que los puntos que exceden este valor son PLA 4 (0,32 $\mu\text{g L}^{-1}$), PLA 5 (0,20 $\mu\text{g L}^{-1}$), PLA 8 (0,51 $\mu\text{g L}^{-1}$) y PLA 11 (3,51 $\mu\text{g L}^{-1}$).

Este compuesto orgánico se considera muy tóxico por la alta solubilidad en los sistemas acuáticos, al ingresar a la cadena trófica y estar en contacto con los organismos vivos produce alteraciones e inhibición a nivel de la actividad de la enzima acetil colinesterasa (OMS/IPCS, 1995). Este plaguicida es muy usado como insecticida en cosechas de tarhui, haba, papa, maíz y otros, controla insectos chupadores y masticadores que ocasionan pérdidas en cultivos. Debido a su toxicidad aguda letal y potente contaminador de aguas, la EPA (1999 y 2011) restringió el uso y la aplicación de este compuesto (Orme y Kegley, 2006).

Se detectó Clorpirifos en el río Ch'aqo Millu mayu (PLA 1) en una concentración de 0,030 $\mu\text{g L}^{-1}$, que excede considerablemente a los Valores Guías de la SRHNA (2005) y la normativa CCME (2001) que indican valores límites de 0,006 y 0,0035 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente (Figura 5). Su acción tóxica radica en su activación metabólica al oxonclorpirifos, compuesto que inactiva la enzima acetilcolinesterasa, encargada de inhibir la acción del neurotransmisor acetilcolina. La inactivación de esta enzima provoca una sobre excitación del sistema nervioso periférico que incluso puede llegar a la muerte de los organismos. Sin embargo, la sensibilidad de las diversas especies acuáticas es muy variable, probablemente debido a diferencias en el comportamiento de los hábitos alimenticios, la sensibilidad de los receptores y la farmacocinética (Giesy *et al.*, 1999). Así mismo, Slager *et al.* (2010), Weichenthal *et al.* (2010) mencionan que el Clorpirifos afecta a las vías respiratorias y está relacionada con diversos tipos de cáncer en trabajadores agrícolas.

Residuo de Malatión se encontró solamente en el agua del punto PLA 4 (0,27 $\mu\text{g L}^{-1}$), concentración que excede los niveles de referencia de la República Dominicana (0,1 $\mu\text{g L}^{-1}$), los Valores Guías de la

SRHNA (2005) ($0,10 \mu\text{g L}^{-1}$) y la Ley 1333-boliviana ($0,04 \mu\text{g L}^{-1}$). Así también, la EPA (2000) ha establecido Criterios de Concentración Crónica (CCC) para este compuesto vertidas en agua dulce, fijando Valores Guía de concentración tóxica para organismos acuáticos de $0,1 \mu\text{g L}^{-1}$, clasificándose el agua del río Toralapa como contaminada (Figura 5).

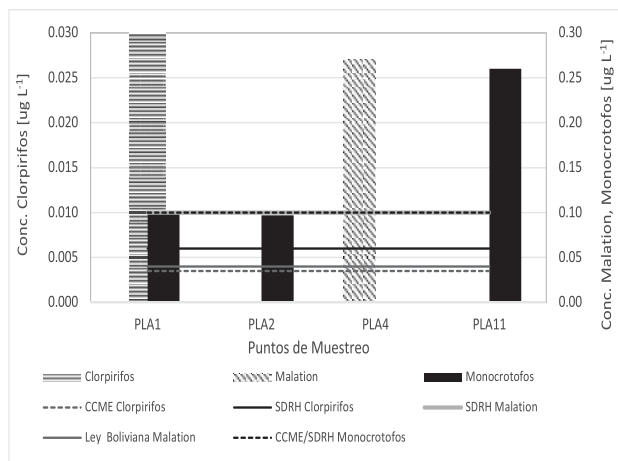


Figura 5. Concentración de plaguicidas organofosforados en agua de los ríos de la Cuenca Pucara comparadas con Normas internacionales y bolivianas.

En la Figura 5, se observa que el Monocrotofos se encontró en el agua en tres puntos de estudio, PLA 1 ($0,30 \mu\text{g L}^{-1}$), PLA 2 ($0,097 \mu\text{g L}^{-1}$), y PLA 11 ($0,26 \mu\text{g L}^{-1}$). Los puntos PLA 1 y PLA 11 exceden el nivel de referencia de la normativa SRHNA (2005) ($0,1 \mu\text{g L}^{-1}$). Posiblemente, las aguas del río Ch'aqo Millu mayu (PLA 1) estén contaminadas con este plaguicida por encontrarse en una zona de intensa actividad agrícola durante todo el año con rotación de cultivos.

En general, los compuestos organofosforados actúan principalmente en la inhibición de la enzima acetilcolinesterasa afectando el sistema nervioso, los músculos, el hígado y el páncreas (Rastogi *et al.*, 2009, Soltaninejad y Abdollahi, 2009).

El uso inadecuado de estos compuestos orgánicos ha sido reportado por Molina-Morales *et al.* (2012), en las investigaciones realizadas sobre la contaminación por plaguicidas de los principales cursos de aguas superficiales del municipio Rivas Dávila, Mérida-Venezuela, que mencionan cantidades altas de Atrazina ($0,0030 \mu\text{g L}^{-1}$), Clorpirifos ($0,128-1,02 \mu\text{g L}^{-1}$), Dimetoato ($0,118 \mu\text{g L}^{-1}$), Malation ($0,08-3,38 \mu\text{g L}^{-1}$) y Metil paratión ($0,080-0,040 \mu\text{g L}^{-1}$). Si bien estos valores son elevados, los resultados obtenidos en las

aguas de los ríos de la presente investigación exceden los reportados por estos autores.

Llama la atención el uso indiscriminado de estos plaguicidas en la zona de estudio, que comprueba prácticas agrícolas inadecuadas, que incide negativamente en la flora y fauna, así como, en la salud de la población en general y la seguridad toxicológica de los ecosistemas acuáticos, por lo que están catalogados, según Neumeister y Weber (2009) como muy peligrosos.

Los resultados obtenidos en la presente investigación para aguas superficiales se sintetizan en mapas ambientales, donde se muestra la evaluación de la calidad del agua respecto a los plaguicidas organoclorados y triazinas (Figura 6) y organofosforados (Figura 7).

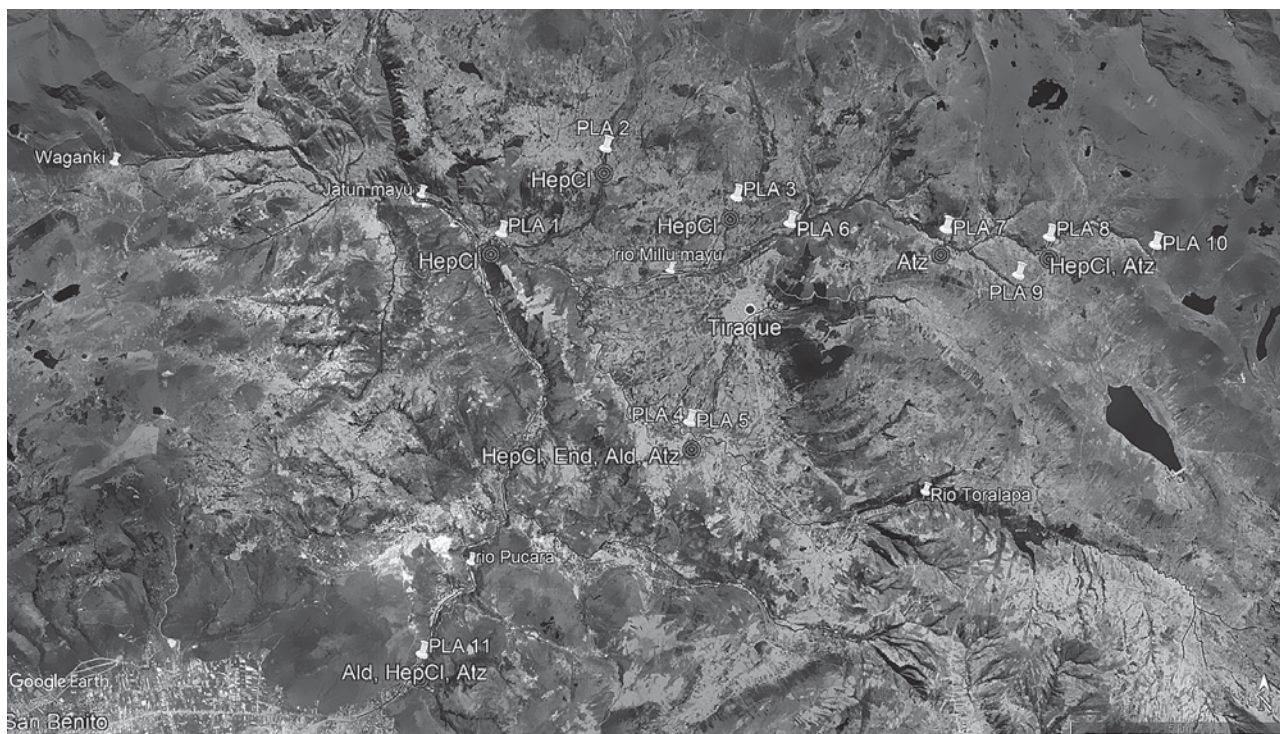


Figura 6. Mapa Ambiental de plaguicidas organoclorados y triazinas en agua de los ríos de la cuenca Pucara. Ald=Aldrin, Atz= Atrazina, End= Endrin y HepCl= Heptacloro.

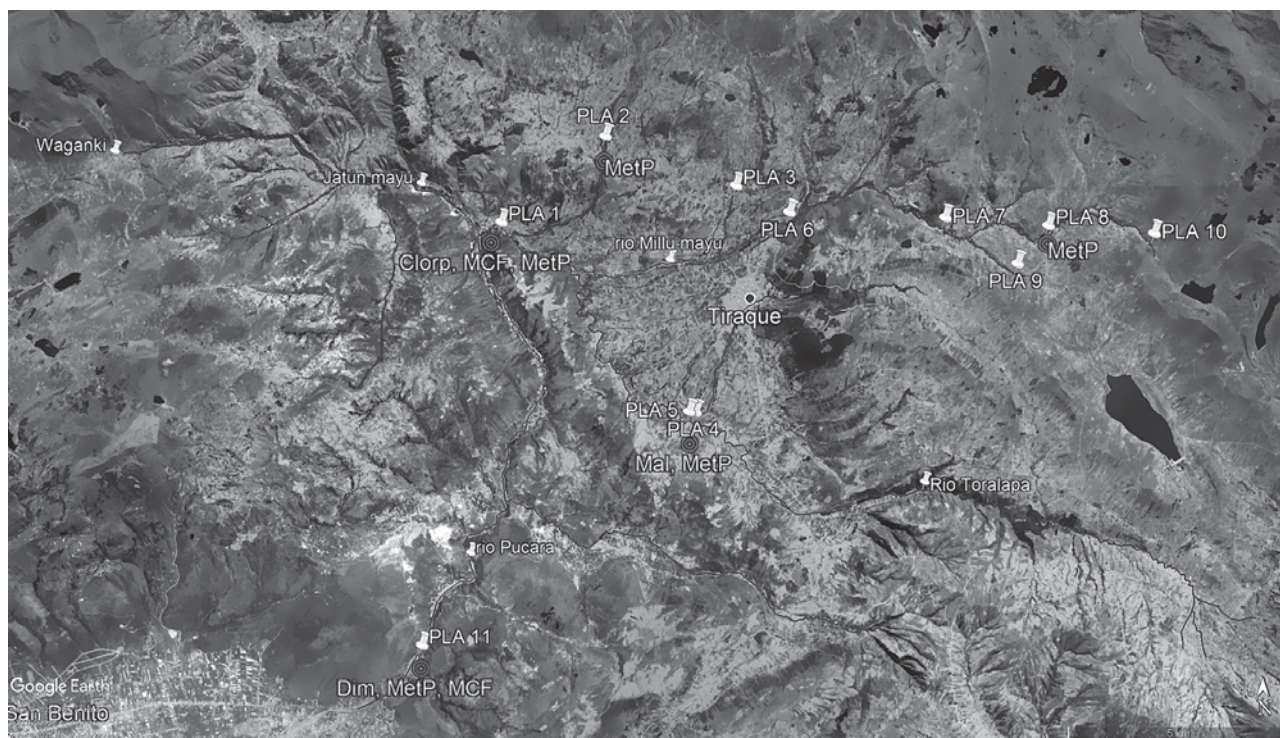


Figura 7. Mapa Ambiental de plaguicidas organofosforados en agua de los ríos de la cuenca Pucara. Dónde: Clorp= Clorpirifos, Dim= Dimetoato, Mal= Malation, MCF= Monocrotofos y MetP= Metil paration.

En la mayoría de los casos, los plaguicidas organoclorados (Heptacloro, Aldrin y Endrin), organofosforados (Clorpirifos, Malatión, Metil paration, monocrotofos y Dimetoato) y Atrazina encontrados en el agua de los ríos superan ampliamente los Valores Guías de las normas nacionales e internacionales de calidad de agua recomendados para la protección de la vida acuática, que significa un peligro de extinción para los organismos acuáticos e implican riegos para la salud de la población.

4. Conclusiones

El presente estudio reportó concentraciones de tres grupos de plaguicidas: organoclorados, organofosforados y atrazina; éste último está presente en todas las estaciones de muestreo con una frecuencia de aparición de 80 %, demostrando que estos compuestos están siendo usados en el control de los cultivos y, además, que existe una preocupante persistencia de estos contaminantes en el medio acuático.

Las aguas de los ríos de la zona de estudio fueron clasificadas como contaminadas al ser comparadas con las normativas nacionales e internacionales al exceder los límites máximos permitidos.

El agua del río Pucara en el punto PLA 11 es el más contaminado por considerarse la zona donde confluyen todos los ríos y llegando a transportar los contaminantes desde las cabeceras de la cuenca. Así también, el punto PLA 8 (río Millu mayu) es uno de los más contaminados por el lavado de tubérculos y hortalizas. Por otro lado, se ha observado que el río Toralapa (PLA 4 y PLA 5) está afectado por el ingreso de aguas grises provenientes de la Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Tiraque.

La agricultura intensiva es la principal causa de contaminación por plaguicidas en el agua superficial de la cuenca Pucara, por lo cual, es necesario promover una cultura ambiental en toda la población de Tiraque. Es necesaria una capacitación a los agricultores de la zona sobre el uso y manejo adecuado de estos contaminantes, lo cual implicaría una reducción de la contaminación de las aguas, la conservación del ambiente y, por consiguiente, disminuiría los problemas de salud pública.

Una de las principales causas del problema de la contaminación del agua en el país ha sido la falta de control de las autoridades para mitigar la incorporación de desechos provenientes de la actividad agrícola a los

recursos hídricos. A pesar de que existe una legislación al respecto, el problema persiste debido a que, además de la falta de control, prevalece una práctica agrícola basada en la utilización excesiva y redundante de agroquímicos.

5. Referencias bibliográficas

- Alvarez, M. (2006). *Detección de Plaguicidas en la Cuenca Jatun Mayu de la provincia Punata* (Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Alvarez, M. y Sans, C. (2010). Estudio y evaluación de la contaminación por plaguicidas en aguas, suelo y tomate en zonas productoras de Bolivia. Alternativas de tratamiento para la remoción de plaguicidas en agua. XXXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Nov. 2010. Punta Cana Bávaro, Santo Domingo.
- Alavanja M. C. R., Hoppin, J. A. y Kamel, F. (2004). Health Effects of Chronic Pesticide Exposure: Cancer and Neurotoxicity. *Annual Review of Public Health*, 25: 155-197.
- BO-DS-24176 (1995). Bolivia: Decreto Supremo N° 24176, 8 de diciembre de 1995. *Reglamento de la Ley del Medio Ambiente*. La Paz, Bolivia. Recuperado de <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-24176.xhtm>.
- Cruz, R. (2009). Estudio Hidrológico de la micro-región Tiraque Valle. Compitiendo por el agua: entendiendo el conflicto y la cooperación en la gobernanza local del agua. Valoración de los recursos hídricos del municipio de Tiraque. Centro AGUA. Cochabamba, Bolivia.
- Cruz, R. (2011). Modelo de Gestión del Agua de la Cuenca Pucara. Centro AGUA-UMSS. Cochabamba, Bolivia.
- Cruz, E., Bravo, V., Ramirez, F. (2021). Manual de Plaguicidas de Centroamérica Costa Rica Instituto Regional de Estudio de Sustancias toxicas (IRET) Heredia Costa Rica.
- CCME (2001). Canadian Council of Ministers of the Environment. (CEQGs). Environment Canada. Hull, Quebec. 8 chapters.
- EPA (1999). Compliance Review of Biotechnology

- Facilities. United States of America: Environmental Protection Agency. p. 73.
- EPA (2000). Environmental Protection Agency. Test Methods of Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods – Chapter Four – Organic Analytes – 4.1. Sample Considerations. Recuperado de www.epa.gov/SW-846/pdfs/chapter4.pdf - Dato tomado 10/10/19
- EPA (2011). Drinking Water Contaminants. United States Environmental Protection Agency, 1, 11, 2011. [3, 30, 2011.] Recuperado de <http://water.epa.gov/drink/contaminants/index.e fm>.
- FAO (2000). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación. *Evaluación de la contaminación del suelo*. Roma.
- Figueroa, R., Valdovinos, C., Araya, E., y Parra, O. (2003). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de ríos del Sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 76: 275-285.
- Giesy J.P., Solomon K.R., Coats J.R., Dixon K.R., Giddings J.M., Kenaga E.E. (1999) Chlorpyrifos: Ecological Risk Assessment in North American Aquatic Environments. In: Ware G.W. (eds) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, vol 160*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1498-4_1.
- Gil, M. I., Aschkar, G. A., Pozzo Ardizzi, M. C., Pellejero, G., Abrameto, M. (2005). Evaluación de residuos de plaguicidas en aguas del río negro en sitios estratégicos para la captación de agua potable. *Pilquen-Sección Agronomía* 7, 1-9.
- Molina-Morales, Y., Flores-García, M., Balza-Quintero, A., Benítez-Díaz, P. y Miranda-Contreras, L. (2012). Niveles de plaguicidas en aguas superficiales de una región agrícola del estado Mérida, Venezuela, entre 2008 y 2010. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28(4), 289-301.
- Mnif, W., Hassine, A. I. H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., & Roig, B. (2011). Effect of Endocrine Disruptor Pesticides: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(6), 2265–2303.
- Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph8062265>.
- Moreno, D. (2003). *Toxicología Ambiental: Evaluación de riesgo para la salud humana*. Ed. McGraw-Hill/Interamericana. España. 280-304.
- Mostafalou, S. y Abdollahi, M. (2013). Pesticides and human chronic diseases: evidences, mechanisms, and perspectives. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 268(2):157-177.
- Neumeister L. y Weber C. (2009). PAN Internacional, Lista de plaguicidas altamente peligrosos. Hamburgo - Alemania: *Pesticide Action Network International*, pp. 1-15.
- Norma Chilena 1.333 of 78, modificada (1987). Gobierno de Chile. Ministerio de Agricultura. Comisión Nacional de riego. Aguas limpias y agricultura sustentable. Normas de calidad para la protección de aguas continentales superficiales.
- Normas de Calidad del agua y control de descarga (2001). Secretaria de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Version 1.0. junio 2001. *Editora Buho*. Santo Domingo, República Dominicana.
- OMS/IPCS (1995). Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas: Informe del director General sobre los progresos realizados. Asamblea Mundial de la Salud, 48. Organización Mundial de la salud. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/203719>.
- Orme, S. & Kegley, S. (2006). PAN Pesticide Database. Pesticide Action Network North America, San Francisco.
- Pastor Benito, S., Creus Capdevila, A. (dir.), Marcos Dauder, R. (dir.) (2002). *Biomonitorización citogenética de cuatro poblaciones agrícolas europeas, expuestas a plaguicidas, mediante el ensayo de micronúcleos* (Tesis doctoral). Universitat Autònoma de Barcelona, España. Facultat de Ciències, Departament de Genètica i de Microbiologia. Recuperado de <https://ddd.uab.cat/record/38401>.
- PDM (2008-2012). Plan de Desarrollo Municipal de Tiraque 2008 – 2012. Tiraque: Gobierno Municipal de Tiraque, Cochabamba, Bolivia.
- PE (2008) Directive 2008/105/EC of the European

- Parliament and of the Council of 16 December, 2008 on environmental quality standards in the field of water policy. European Parliament and Council. L348, 2008, Official Journal of the European Union 51, 84-96.
- Pelosi, C., Barriuso, E., Bedos, C., Benoit, P., Mamy, L. & Mougin, C. (2017). Fate and impact of pesticides: new directions to explore. *Environment and Science Pollution Research*, (24): 6841-6843. Recuperado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11356-017-8383-0.pdf>
- Pinilla A., G. A. (Ed.). (1998) *Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia: compilación bibliográfica*. Centro de Investigaciones Científicas de la Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Polanco Rodríguez, A. G., Magaña Castro, T. V., Cetz Luit, J., & Quintal López, R. (2019). Uso de agroquímicos cancerígenos en la región agrícola de Yucatán, México. *Centro Agrícola*, 46(2), 72-83. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0253-57852019000200072&script=sci_arttext&tlng=pt.
- Rastogi, S. K., Satyanarayan, P. V., Ravishankar, D., & Tripathi, S. (2009). A study on oxidative stress and antioxidant status of agricultural workers exposed to organophosphorus insecticides during spraying. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 13(3), 131-134. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.58916>.
- Rivero, M., Campero, M., Alvarez, M., Medrano, N., Pérez, T. & Céspedes A. (2008). Evaluación de la sensibilidad de biomarcadores para la detección de contaminación por pesticidas en organismos acuáticos, Chapare, Cochabamba. *Revista de la ULRA-UMSS*. pp. 35.
- Rivero, M., Alvarez, M., Antezana, H., Campero, M., Ledo, C., Castellón, S., y Villaruel, K. (2016). Presencia de residuos de plaguicidas en ríos de la cuenca Pucara y efectos sobre los macroinvertebrados bentónicos. *Revista Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental y Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos*. Universidad Mayor de San Simón. Financiado por la agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (ASDI) – Suecia. Cochabamba – Bolivia. Pp 34.
- Rivero, M., Alvarez, M., Antezana, H., Castellón, S. y Campero, M. (2019). Evaluación y efecto de los plaguicidas en ecosistemas acuáticos de la Cuenca del Valle Alto de Cochabamba- Bolivia. *Revista Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental-Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos*. Universidad Mayor de San Simón. Financiado por la agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (ASDI) – Suecia. Cochabamba – Bolivia. Pp. 56.
- Rojas, D., Vazquez, G., Ricca, A. P., Cristos, D., Ortiz, M. L. (2014). Residuos de plaguicidas en aguas superficiales y subterráneas en cuencas rurales de la provincia de Buenos Aires – *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)*. *Artículo de divulgación*. 23/9/2014. Argentina.
- Saravia. I. (2017) *Estado actual de la comercialización y uso de plaguicidas en el Departamento de Cochabamba* (Trabajo de adscripción para obtener el título de Licenciatura en Biología). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba-Bolivia. pp 24-50.
- Slager, R. E., Simpson, S. L., LeVan, T. D., Poole, J. A., Sandler, D. P. & Hoppin, J. A. (2010). Rhinitis associated with pesticide use among private pesticide applicators in the agricultural health study. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 73:20, 1382-1393, DOI: 10.1080/15287394.2010.497443.
- Soltaninejad, K. y Abdollahi, M. (2009). Current opinion on the science of organophosphate pesticides and toxic stress: A systematic review. *Med. Sci. Monitor* 15(3), 75-90.
- Standard Methods for the Examination of water and wastewater. (2012). 22th Edition. AWWA, APHA, WEF. USA.
- Verma, R. y Mohanty, B. (2009). Early-life exposure to dimethoate-induced reproductive toxicity: Evaluation of effects on pituitary-testicular axis of mice. *Toxicological Sciences*, 112(2), 450-458. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfp204>.
- Weichenthal, S., Moase, C. y Chan, P. (2010). A review of pesticide exposure and cancer incidence in the agricultural health study cohort., *Environ. Health Persp.* 118(8), 1117-1125.