

ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

**TOXICITY OF MINING DRILLING SLUDGE IN
THE *PORCELLIO LAEVIS* (LATREILLE, 1804)
(CRUSTACEA: ISOPODA) BIOINDICATOR**

**TOXICIDAD DEL LODO DE PERFORACIÓN MINERA
EN EL BIOINDICADOR *PORCELLIO LAEVIS*
(LATREILLE, 1804) (CRUSTACEA: ISOPODA)**

Yadira Blanca Bautista-Medina¹ & José Iannacone^{1,2}

1 Universidad Científica del Sur. Facultad de Ciencias Ambientales - Villa el Salvador, Lima, Perú.

2 Universidad Ricardo Palma. Facultad de Ciencias Biológicas. Laboratorio de Parasitología. Santiago de Surco, Lima, Perú.

* Author for correspondence: joseiannaconeoliver@gmail.com

ABSTRACT

The toxicity of mining drilling mud was evaluated based on the lethal effect and evasion in the terrestrial bioindicator *Porcellio laevis* (Latreille, 1804). The following treatments were considered: drilling mud, suspended phase of drilling mud and mining drilling fluid in acute toxicity tests and short evasion test. Toxicity tests did not show a lethal effect in drilling mud, in the suspended phase of drilling mud, and in mineral drilling fluid in *P. laevis*. In the evasion tests, considering uncontrolled humidity conditions, it was observed that there was a preference for *P. laevis* towards the land with the presence of drilling mud. However, considering controlled humidity conditions, the preference of *P. laevis* towards the muddy land was confirmed. The results of this investigation allow documenting a protocol to evaluate the toxicity of mining drilling muds and serve as a reference for future investigations in Peru.

Key words: drilling mud – evasion test – *Porcellio laevis* – toxicity

RESUMEN

Se evaluó la toxicidad del lodo de perforación minera en base al efecto letal y de evasión en el bioindicador terrestre *Porcellio laevis* (Latreille, 1804). Se

consideraron los siguientes tratamientos: lodo de perforación, fase suspendida del lodo de perforación y fluido de perforación minera en ensayos de toxicidad aguda y prueba de evasión de corta duración. Los ensayos de toxicidad no mostraron un efecto letal en el lodo de perforación, en la fase suspendida del lodo de perforación y en el fluido de perforación minera en *P. laevis*. En las pruebas de evasión, considerando condiciones de humedad no controladas se observó que hubo preferencia de *P. laevis* hacia la tierra con presencia del lodo de perforación. Sin embargo, considerando condiciones de humedad controladas se confirmó la preferencia de los *P. laevis* hacia la tierra con lodo. Los resultados de la presente investigación permiten documentar un protocolo para evaluar la toxicidad de los lodos de perforación minera y sirven como referente para futuras investigaciones en el Perú.

Palabras clave: *Porcellio laevis* – toxicidad – lodos de perforación – prueba de evasión

INTRODUCCIÓN

Para las actividades de perforación minera se emplean fluidos que facilitan el trabajo de perforación y arrastran el detritus hasta el exterior, constituyéndose en residuos semisólidos (Castilla & Herrera, 2012; Wojtanowicz, 2016; Gaevaya *et al.*, 2019).

La composición de estos residuos puede ser variable, debido a que dependerá del protocolo empleado, así como del sustrato donde se realiza la perforación; por lo general se emplean diferentes polímeros como el almidón y la celulosa (Silva-Zea, 2001; Ejiogu *et al.*, 2020); así como agentes densificantes como la barita (sulfato de bario), hematina (óxido de hierro), galena (mineral del grupo de los sulfuros) y carbonato de calcio. También se usan agentes viscosificantes como la bentonita, carboxicelulosa, celulosa polianiónica, y agentes dispersantes como taninos, lignitos (carbón mineral), lignosulfatos

y polifosfatos (Agila-Soto, 2008). Del mismo modo se usan materiales para evitar la pérdida de circulación tales como cascarilla de arroz, mica, mezclas de cáscaras de coco y nueces, aserrín, semilla de algodón, cemento y también aditivos para la alcalinidad como soda caustica (hidróxido de sodio), cal hidratada, yeso, entre otros (Agila-Soto, 2008).

Durante la perforación minera se emplean diferentes productos químicos adicionales con la finalidad de controlar las propiedades de los fluidos (Wojtanowicz, 2016), los cuales reaccionan con los constituyentes de las formaciones rocosas en las que se realiza la perforación, formando una mezcla compleja que podría contaminar el medio (ARPEL, 2005; Bonell-Rosabal, 2009; Gaevaya *et al.*, 2019).

La perforación minera puede generar impacto sobre las aguas subterráneas debido a que podrían interrumpir el flujo natural que

alimenta a los manantiales o cuerpos de agua superficial; así como afectar su calidad por la presencia de elementos de origen antrópico. El suelo también podría verse afectado debido a la contaminación, generada del mismo modo por la presencia de compuestos provenientes de la preparación de los fluidos de perforación. Además de reducir la vegetación y provocar el desplazamiento de la fauna silvestre (SGM, 1998; Espinoza, 2015; Wojtanowicz, 2016; Aslan *et al.*, 2019).

En el Perú las empresas mineras que realizan las actividades de exploración manejan los residuos de perforación (lodos) en función a lo propuesto en sus instrumentos ambientales aprobados por la autoridad competente, tal como es el encapsulamiento, confinamiento, entre otros (Wojtanowicz, 2016; Gaevaya *et al.*, 2019).

La exploración minera permite demostrar las características de los minerales en los yacimientos, para lo cual se emplean métodos de perforación a rotación con recuperación del testigo (Pachas, 2015). Esta actividad requiere de fluidos, siendo la función principal acarrear los ripios de perforación hacia la superficie, para finalmente conformar residuos semisólidos de la perforación (ARPEL, 2005; Castilla & Herrera, 2012; Gaevaya *et al.*, 2019).

Los impactos ambientales que generan las actividades de exploración minera pueden ser tanto directos como indirectos, afectando principalmente al componente agua, suelo, aire y medios biológicos (Espinoza, 2015; Ajah *et al.*, 2019; Aslan *et al.*, 2019). Uno de los principales problemas operacionales

en la perforación minera es la pérdida de circulación (Marcano *et al.*, 2011) el cual es muy común (Baggini *et al.*, 2014), debido a que las formaciones geológicas donde se realiza la perforación no son completamente permeables o presentan fracturas generando la pérdida parcial de fluido, el cual podría afectar a los acuíferos debido a su composición (TRT, 1991).

Es importante conocer los efectos que podrían causar los residuos generados por acción de las actividades antropogénicas como los lodos de perforación. La ecotoxicología a través de ensayos de toxicidad a corto plazo permiten determinar dichos efectos, los que consisten en exponer a organismos a distintas concentraciones de una muestra durante periodos de tiempo determinados, y evaluar la letalidad o el comportamiento (Murialdo, 2016; Zurek *et al.*, 2017; Jelassi *et al.*, 2109).

En ecotoxicología terrestre, los crustáceos isópodos son empleados para evaluar la toxicidad y bioacumulación de sustancias químicas puras y muestras ambientales (Madžarić *et al.*, 2018; Eijasackers *et al.*, 2019; Gospodarek *et al.*, 2019; Selonon *et al.*, 2020; Ouni *et al.*, 2019). Estos isópodos terrestres juegan un papel importante en el ambiente, debido a que participan en los ciclos biogeoquímicos y mantienen los flujos de energía en el suelo; además pueden ser encontrados en ambientes contaminados por metales (Iannacone *et al.*, 2001; Iannacone, 2003; Szlavecz *et al.*, 2018; Khemaissia *et al.*, 2019; van Gestel *et al.*, 2018). Se les considera de utilidad como

bioindicadores de impacto ambiental y como modelos de investigación (Paoletti & Hassall, 1999; Iannacone & Alvarino, 2002, 2007; Iannacone *et al.*, 2008; Madžarić *et al.*, 2018; Benmouhoub *et al.*, 2019). Uno de los organismos de prueba más usados para determinar la toxicidad y bioacumulación es *Porcellio laevis* (Latreille, 1804) (Ghemari *et al.*, 2017, 2019ab; Zidar *et al.*, 2019).

Los bioensayos de toxicidad aguda de corta duración se emplean con el fin de observar la respuesta letal de los organismos. Asimismo, las pruebas de evasión se realizan para determinar el comportamiento de la especie ante el suelo tóxico (De Silva y Van Gestel, 2009; Ghemari *et al.*, 2019ab; Jelassi *et al.*, 2019; Zidar *et al.*, 2019).

A la fecha no se tienen trabajos publicados que evalúen la toxicidad de lodos de perforación minera sobre *P. laevis*. Por ende, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la toxicidad de lodos de

perforación minera en el bioindicador *P. laevis* (Crustacea: Isopoda).

MATERIALES Y MÉTODOS

Organismos prueba

Fue empleada la especie *P. laevis* para la presente investigación. Se recolectaron 200 individuos adultos de las áreas verdes del parque Sergio Bernales, distrito de La Victoria, Lima, Perú, entre machos (N = 100) y hembras (N = 100). Los organismos de prueba fueron identificados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, de acuerdo a sus características morfotaxonómicas (Pérez-Schultheiss, 2010; García, 2015).

Sustrato para los bioensayos

El sustrato empleado tanto para la prueba de toxicidad aguda y para la prueba de evasión fue tierra preparada. Las características físico-químicas fueron analizadas siguiendo los protocolos que se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis físico-químico de la tierra preparada.

Conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹)	4,03	Lectura de extracto de relación suelo agua 1:1 y extracto de la pasta saturada
Relación 1:1		
Arena (%)	69,84	
Análisis mecánico		Método de hidrómetro
Limo (%)	18,56	
Arcilla (%)	11,6	
Textura	Franco arenoso	
pH		Método de potenciómetro
Relación 1:1	8,16	
Materia orgánica (%)	6,94	Método de Walkley & Black
Fósforo (ppm)	114,76	Método de Olsen modificado

Continúa Tabla 1

Continúa Tabla 1

Potasio (ppm)	3000	Extracto de Acetato de Amonio
CaCO ₃ (%)	1,76	Método gaso-volumétrico
CIC total	11,94	Acetato de Amonio
Ca ⁺⁺	7,59	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Cationes cambiables		
Mg ⁺⁺	2,24	Espectrofotometría de Absorción Atómica
Na ⁺	0,1	Espectrofotometría de Absorción Atómica
K ⁺	2,01	Espectrofotometría de Absorción Atómica

Por otro lado, el análisis de metales de la tierra fue realizada empleando la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de metales de la tierra preparada.

Metal	Concentración (mg·kg ⁻¹)	Metal	Concentración (mg·kg ⁻¹)
Aluminio	11.692,39	Litio	19,69
Antimonio	0,9	Magnesio	8974,75
Arsénico	20,94	Manganeso	629,7
Bario	86,15	Mercurio	0,13
Berilio	0,36	Molibdeno	1,94
Bismuto	0,36	Níquel	5,93
Boro	38,35*	Plata	0,56
Cadmio	0,72	Plomo	25,91
Calcio	34.187,88	Potasio	5542,11
Cerio	14,13	Selenio	0,35
Cobalto	7,8	Sodio	3046,58
Cobre	35,49*	Talio	<0,04
Cromo	9,74	Titanio	634,1
Estaño	2,46	Torio	1,19
Estroncio	187,88	Uranio	0,94
Fósforo	3.670,24	Vanadio*	41,52
Hierro	19.808,45	Zinc*	148,99

*Valores que sobrepasaron los criterios referenciales de calidad del suelo de Ecuador (DS-Ecuador, 2003).

Tabla 3. Metales pesados de la tierra preparada y su comparación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo según DS N° 011-2017-MINAM (Ministerio Nacional del Ambiente, 2017).

Metal	Concentración (mg·kg ⁻¹)	ECA Suelo agrícola* (mg·kg ⁻¹)
Arsénico	20,94	50
Bario	86,15	750
Cadmio	0,72	1,4
Cromo	9,74	**
Mercurio	0,13	6,6
Plomo	25,91	70

* Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa como es el caso de las áreas naturales protegidas (DS N° 011-2017-MINAM). ** Este símbolo dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para el uso de suelo agrícola.

Los metales pesados presentes en la tierra preparada se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa nacional “Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo” del tipo de uso “Suelo agrícola” aprobado mediante DS N° 011-2017-MINAM (MINAM, 2017) (Tabla 3). Sin embargo, de acuerdo a la normativa internacional, los valores resultantes sobrepasan algunos estándares internacionales establecidos, tal es el caso del Boro, Cobre, Vanadio y Zinc (DS-Ecuador, 2003). En el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Científica del Sur (UCSUR), se determinó el porcentaje de humedad de la tierra preparada (7,96%) a través del método gravimétrico.

Cultivo

Los adultos de los *P. laevis* fueron dispuestos en cuatro acuarios de

vidrio con medidas de 35 cm de largo, 20 cm de ancho, 25 cm alto. La tierra preparada no presentó tóxicos mayores a límites nacionales (Tabla 2). La tierra preparada previamente fue tamizada con una malla de 0,7 mm con la finalidad de conseguir una textura uniforme, y fue colocada en acuarios hasta una altura aproximada de 3 cm. Posteriormente los acuarios fueron forrados con un plástico negro, a fin de mantener una temperatura ambiental de 20 ± 2 °C, la cual fue verificada mediante un termohigrómetro de la Estación meteorológica Vantage Pro2 instalado en el laboratorio y una consola para la visualización de los datos.

En cada acuario se colocaron 25 machos y 25 hembras, los cuales fueron previamente identificados y verificados en el laboratorio de acuerdo a sus características morfológicas (García, 2015).

La tierra con los individuos del *P. laevis* fue regada con agua potable cada cuatro días durante aproximadamente siete semanas, la cantidad de agua de riego suministrada fue de aproximadamente 80 mL. La alimentación cada cuatro días de los organismos consistió principalmente en cáscara de zanahoria (*Daucus carota* L.).

Lodos

Para el desarrollo de las pruebas de toxicidad aguda en base a la mortalidad, y a las pruebas de evasión con *P. laevis* se emplearon lodo de perforación y fase suspendida del lodo de dos proyectos de exploración minera. En adición, solo para las pruebas de toxicidad aguda se empleó

una muestra de fluido de perforación minera, que fue tomada antes del ingreso a la sarta de perforación, la cual aún no tuvo contacto con el suelo donde se realizó la perforación. Por motivos de confidencialidad no se mencionan el origen específico de las tres muestras. Las muestras fueron transportadas en recipientes de polipropileno de 5 L, los cuales fueron mantenidos a temperatura ambiente.

En la tabla 4 se muestra las principales características físico-químicas del lodo de perforación y de la fase suspendida del lodo de dos proyectos de exploración minera. Todos los parámetros físico-químicos fueron medidos siguiendo las recomendaciones de Rice *et al.* (2017).

Tabla 4. Características físico-químicas del lodo de perforación y de la fase suspendida del lodo de dos proyectos de exploración minera.

Parámetros	Unidad	lodo de perforación	fase suspendida del lodo
Temperatura	°C	14,1	13,8
pH	Unidad de pH	8,07	7,92
Conductividad eléctrica	µS	6,94	6,50
Total de solidos disueltos	Ppm	15 ,25	14,89

Los valores de los metales del lodo de perforación y de la fase suspendida del lodo de dos proyectos de exploración minera son mostrados en la Ta-

bla 5. Los metales fueron determinados empleando la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) (Rice *et al.*, 2007).

Tabla 5. Metales del lodo de perforación y de la fase suspendida del lodo de dos proyectos de exploración minera. ECA = Estándar de calidad ambiental. LMP = Límite máximo permisible.

Metal	lodos de perforación (mg·kg ⁻¹)	ECA Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivo* (mg·kg ⁻¹)	fase suspendida del lodo (mg·L ⁻¹)	LMP Efluentes** (mg·L ⁻¹)
Aluminio	5575,78	-	300,38	-
Antimonio	13,09	-	0,0067	-
Arsénico	169,47	140	0,28	0,10
Bario	325,64	2000	21,21	-
Berilio	1,15	-	0,06	-
Bismuto	4,26	-	0,0062	-
Boro	9,04	-	0,31	-
Cadmio	0,27	22	0,004	0,05
Calcio	13055,62	-	1041,94	-
Cerio	28,14	-	1,68	-
Cobalto	3,77	-	0,16	-
Cobre	139,92	-	1,21	0,5
Cromo	25,95	1000	0,45	-
Estaño	2,63	-	0,0006	-
Estroncio	69,34	-	3,78	-
Fósforo	496,25	-	29,68	-
Hierro	14988,02	-	332,81	2
Litio	6,05	-	0,22	-
Magnesio	1883,47	-	112,26	-
Manganeso	250,22	-	10,29	-
Mercurio	2,42	24	0,01	0,002
Molibdeno	19,49	-	0,15	-
Níquel	20,36	-	0,23	-
Plata	22,11	-	0,0038	-
Plomo	80,37	800	0,78	0,2
Potasio	882,64	-	46,34	-
Selenio	0,34	-	0,0045	-
Sodio	7993,54	-	517,71	-
Talio	0,34	-	0,0045	-
Titanio	73,09	-	0,32	-
Torio	7,5	-	0,29	-
Uranio	1,2	-	0,03	-
Vanadio	7,73	-	0,63	-
Zinc	48,07	-	2,33	1,5

* Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción y/o aprovechamiento de recursos naturales y/o transformación o construcción de bienes (D.S N° 011-2017-MINAM) (MINAM, 2017). ** Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicos (D.S N° 010-2010-MINAM) (MINAM, 2010).

Los resultados de los metales del lodo de perforación fueron comparados con la normativa nacional de suelos (DS N° 011-2017-MINAM) (MINAM, 2017) (Tabla 5), cumpliendo en todos los casos, a excepción del Arsénico. De acuerdo a la normativa internacional de Ecuador los valores de metales de los lodos de perforación minera sobrepasan algunos estándares establecidos, tal es el caso del Boro, Cobre, Molibdeno, Níquel, y Cobre (DS-Ecuador, 2003).

Por otro lado, la fase suspendida del lodo fue comparada con el DS N° 010-2010-MINAM, debido a que no se cuenta con normativa específica para la fase suspendida de los lodos de perforación minera. Los resultados mostraron que los metales como el Arsénico, Cobre, Hierro, Mercurio, Plomo y Zinc sobrepasan los límites establecidos por la normativa nacional.

Las concentraciones de los lodos de perforación y de la fase suspendida del lodo empleados para las pruebas de toxicidad y pruebas de evasión se determinaron en base a las condiciones de humedad del sustrato donde se colocarían a los individuos de *P. laevis*, con la finalidad de que dichas condiciones no generen mortalidad en los individuos. Se consideró que la humedad en el sustrato sea menor al 50% para pruebas de toxicidad aguda y de evasión (Hornung *et al.*, 1998; Loureiro *et al.* 2005; Souty-Grosset & Faberi, 2018).

Bioensayos

Se realizaron dos bioensayos, una para determinar la toxicidad del lodo

de perforación minera y otra para determinar la evasión del *P. laevis* frente a los lodos.

Prueba de toxicidad

Se realizaron tres pruebas de toxicidad: la primera con el lodo de perforación, la segunda con la fase suspendida del lodo de perforación y finalmente la tercera con el fluido de perforación.

Para realizar la prueba de toxicidad con *P. laevis* se estableció un diseño experimental que consistió en cuatro concentraciones: (1) lodo de perforación: control, 0,07 g·g⁻¹, 0,14 g·g⁻¹ y 0,27 g·g⁻¹; (2) fase suspendida del lodo: control, 0,1 mL·g⁻¹, 0,2 mL·g⁻¹ y 0,4 mL·g⁻¹, y (3) fluido de perforación minera: control, 0,1 mL·g⁻¹, 0,2 mL·g⁻¹ y 0,4 mL·g⁻¹.

Luego de determinar las concentraciones para cada tratamiento se procedió con el rotulado de los recipientes de plástico opacos de 177,4 mL. Se consideraron cuatro repeticiones por cada concentración. Después de la rotulación se procedió al pesado de 50 g de sustrato de tierra preparada para cada uno de los recipientes. Se le agregó a cada recipiente la cantidad de muestra necesaria por cada tratamiento excepto al control, y se empleó una varilla para mezclar la tierra preparada con las tres muestras por separado, con la finalidad de obtener una muestra homogénea.

En cada recipiente se colocaron 10 individuos juveniles de *P. laevis* de aproximadamente 3 mm, sin distinción del sexo de los individuos, y se

comprobó que los individuos presenten estrategias antidepredatorias de fuga (“runners”) como respuesta a estímulos de tacto (Waller-Panzardi, 2012), lo que indicaría que los individuos se encontraban saludables antes de iniciar con los bioensayos. Cada recipiente fue cubierto previa perforación de las tapas con el objetivo de permitir la circulación del aire. Las lecturas se realizaron a las 24 h, 48 h y 72 h de exposición. Se evaluó la temperatura (23,2 °C) y humedad (70,3%) de los tratamientos. La respuesta evaluada en los tratamientos experimentales de toxicidad aguda fue la mortalidad. Pudiendo ingresar la muestra en la especie *P. laevis* a través de la vía dérmica debido al contacto que tuvieron los individuos con el lodo y por la ruta oral debido a la ingesta.

Prueba de evasión

Se emplearon recipientes de plástico transparentes de 0,5 kg, los cuales fueron adaptados con separadores con la finalidad de que el suelo control y el suelo con lodo no se mezclen. En total se realizaron cinco repeticiones para dicha prueba, para el lodo de perforación minera y para la fase suspendida del lodo. Las tapas de los envases se perforaron con la finalidad de permitir el flujo de aire.

Previamente en recipientes de 177,4 mL, se realizó la mezcla de tierra preparada con lodo a una concentración de 0,54 g·g⁻¹ para el lodo de perforación minera, y en otros cinco recipientes se realizó la mezcla para la fase suspendida del lodo a una concen-

tración de 0,8 mL·g⁻¹. Las muestras ya homogenizadas fueron colocadas a un extremo de cada recipiente, las cuales fueron contenidas por un separador, al otro extremo del mismo recipiente se colocó 100 g de tierra preparada sin lodo (control), siendo contenida del mismo modo que las muestras con lodo, este procedimiento se realizó para las 10 repeticiones. Se midió el porcentaje de humedad de ambos sustratos, dando como resultado 7,37% ± 0,14 (N=4) para el suelo control (sin lodo) y 38,17% ± 0,18 (N=4) para la mezcla de suelo con lodo, con condiciones no controladas de humedad en las cuales se realizaron las pruebas de evasión inicial.

Se realizó una segunda prueba de evasión, pero con condiciones controladas de humedad para ambos sustratos, es decir para la muestra con lodo y para el control, siendo los porcentajes de humedad para el suelo control de 39,15% ± 0,39 (N=3) y para el suelo con lodo fue de 38,23% ± 0,15 (N=3). En el laboratorio se prepararon las mezclas para cinco repeticiones, con concentraciones de 0,27 g·g⁻¹ de lodo de perforación minera, la muestra se homogenizó con una varilla, ambos sustratos (control y suelo con lodo) presentaron la misma textura. En un extremo del recipiente se colocó 50 g de la muestra control (tierra sin lodo) y en el otro la mezcla de tierra con lodo. Ambos contenidos por un separador para evitar la combinación. Se realizaron cinco repeticiones para la prueba de evasión con el lodo de perforación minera.

Finalizado en los procedimientos descritos anteriormente, se colocaron en medio de los dos separadores a 10 individuos de *P. laevis* de longitudes de 5 a 6 mm en promedio. Estos individuos fueron colocados en el centro de cada uno de los envases, debiendo escoger cada individuo de *P. laevis* entre 3 opciones: suelo con lodos, suelo sin lodos o en ninguno, es decir en la línea de división entre estos dos sustratos. La evaluación del comportamiento de los individuos se realizó cada hora, durante 24 h. Para la determinación de la evasión de los individuos de *P. laevis* se utilizó la fórmula de De Silva & Van Gestel (2009) y de Jelassi *et al.* (2019), la cual se detalla a continuación: $RE = [(C-T)/N] \times 100$

Dónde: RE = respuesta de evasión (%). C = número de individuos en el control. T= número de individuos en el suelo con lodo. N= número total de individuos expuestos. La evasión es indicada como una respuesta positiva

y la atracción o sin respuesta como una respuesta negativa.

Análisis estadístico

A través de un análisis de varianza (ANDEVA) se evaluaron las diferencias entre los porcentajes de mortalidad de *P. laevis* entre las concentraciones del lodo de perforación minera, fase suspendida del lodo y fluido de perforación empleando la prueba a posteriori de Tukey. Un valor $p < 0,05$ indica una diferencia significativa entre las mortalidades de las concentraciones comparadas. Se determinaron los parámetros NOEC = concentración a la cual no se observa efecto y LOEC = concentración más baja a la cual se observa efecto, en base a los resultados de la prueba de Tukey. Asimismo, la corrección de la mortalidad en el control y en los datos de mortalidad fue realizada mediante la fórmula de Schneider-Orellis's (Alegre *et al.*, 2017). La fórmula es indicada a continuación:

$$\text{Corrección \%} = \left(\frac{\% \text{ de mortalidad en el tratamiento} - \% \text{ de mortalidad en el control}}{100 - \% \text{ de mortalidad en el control}} \right) \times 100$$

Para cada uno de los valores promedio de mortalidad en las pruebas de toxicidad aguda y para los valores promedio de porcentajes de individuos en las pruebas de evasión se determinaron los valores de desviación estándar (DE). Los datos de los bioensayos de toxicidad aguda a 24 h, 48 h, 72 h de exposición, y de las pruebas de evasión fueron analizados mediante el programa estadístico IBM SPSS Statistics versión 22,00.

RESULTADOS

Prueba de toxicidad

Como se puede observar en la Tablas 6 al 8, la toxicidad del lodo en base a la mortalidad fue similar para el lodo de perforación minera, para la fase suspendida del lodo de perforación minera y para el fluido de perforación minera. Se determinaron los parámetros NOEC y LOEC para las tres muestras evaluadas.

Tabla 6. Mortalidad de *Porcellio laevis* (Crustacea: Isopoda) por la toxicidad del lodo de perforación minera a 24 h, 48 h y 72 h de exposición. ANDEVA = Análisis de Varianza. F= Estadístico de Fisher del ANDEVA. Sig = significancia. NOEC = concentración a la cual no se observa efecto. LOEC = concentración más baja a la cual se observa efecto.

Concentración	Mortalidad 24 h	Mortalidad 48 h (%)	Mortalidad 72 h
Control	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00
0,07 g·g ⁻¹	2,50a ± 0,50	2,50a ± 0,50	2,50a ± 0,50
0,14 g·g ⁻¹	2,50a ± 0,50	2,50a ± 0,50	2,50a ± 0,50
0,27 g·g ⁻¹	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00	2,50a ± 0,50
ANDEVA (F)	0,67	0,67	0,80
Sig	0,59	0,59	0,52
NOEC (0,27 g·g ⁻¹)	0,27	0,27	0,27
LOEC (0,27 g·g ⁻¹)	>0,27	>0,27	>0,27

Tabla 7. Mortalidad de *Porcellio laevis* (Crustacea: Isopoda) por la toxicidad de la fase suspendida del lodo de perforación minera a 24 h, 48 h y 72 h de exposición. ANDEVA = Análisis de Varianza. F= Estadístico de Fisher del ANDEVA. Sig = significancia. NOEC = concentración a la cual no se observa efecto. LOEC = concentración más baja a la cual se observa efecto.

Concentración	Mortalidad 24 h	Mortalidad 48 h (%)	Mortalidad 72 h
Control	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00
0,10 mL·g ⁻¹	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00
0,20 mL·g ⁻¹	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00
0,40 mL·g ⁻¹	0,00a ± 0,00	2,50a ± 0,50	0,00a ± 0,00
ANDEVA (F)	*	1	*
Sig	*	0,42	*
NOEC (0,4 mL·g ⁻¹)	0,4	0,4	0,4
LOEC (0,4 mL·g ⁻¹)	>0,4	>0,4	>0,4

Nota: * No se pudo determinar el valor debido a que no existe variabilidad entre los datos.

Tabla 8. Mortalidad de *Porcellio laevis* (Crustacea: Isopoda) por la toxicidad del fluido de perforación minera a 24 h, 48 h y 72 h de exposición. ANDEVA = Análisis de Varianza. F= Estadístico de Fisher del ANDEVA. Sig = significancia. NOEC = concentración a la cual no se observa efecto. LOEC = concentración más baja a la cual se observa efecto.

Concentración	Mortalidad 24 h	Mortalidad 48 h (%)	Mortalidad 72 h
Control	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00	0,00a ± 0,00
0,10 mL·g ⁻¹	0,00a ± 0,00	7,50a ± 0,96	7,50a ± 0,96
0,20 mL·g ⁻¹	0,00a ± 0,00	2,50a ± 0,50	5,00a ± 0,58
0,40 mL·g ⁻¹	2,50a ± 0,50	5,00a ± 0,58	5,00a ± 0,58
ANDEVA (F)	1,00	0,18	0,13
Sig	0,42	0,91	0,94
NOEC (0,4 mL·g ⁻¹)	0,40	0,4	0,4
LOEC (0,4 mL·g ⁻¹)	>0,40	>0,4	>0,4

Prueba de evasión

En la Tabla 9 y 10, se presentan los resultados de la prueba de evasión del *P. laevis* realizadas con lodo de perforación minera y con fase suspendida del lodo con condiciones no controladas de humedad. En la Tabla 11 se

presentan los resultados de la prueba de evasión realizada considerando condiciones controladas de humedad tanto para el control (tierra sin lodos de perforación minera) como para la tierra con lodo (lodos de perforación minera).

Tabla 9. Prueba de evasión de *Porcellio laevis* (Crustacea: Isopoda) con el lodo de perforación minera con condiciones no controladas de humedad.

Horario	Lodo	Suelo	Ninguno*	F	Sig.
1	7,80a ± 1,30	2,20b ± 1,30	0,00c ± 0,00	71,35	<0,01
2	6,20a ± 1,79	3,60b ± 1,67	0,20c ± 0,45	21,90	<0,01
3	7,40a ± 1,67	2,60b ± 1,67	0,00c ± 0,00	37,75	<0,01
4	1,80a ± 1,64	8,20b ± 1,64	0,00c ± 0,00	51,59	<0,01
5	4,40a ± 2,70	4,80a ± 2,59	0,80b ± 1,30	4,64	0,032
6	6,40a ± 1,95	3,00b ± 2,45	0,60c ± 0,55	12,61	0,001
7	8,00a ± 2,35	1,60b ± 1,52	0,40c ± 0,89	29,12	<0,01
8	7,00a ± 2,00	3,00b ± 2,00	0,00c ± 0,00	23,13	<0,01
9	6,20a ± 2,86	3,80b ± 2,86	0,00c ± 0,00	8,94	0,004
10	6,60a ± 1,52	3,40b ± 1,52	0,00c ± 0,00	35,52	<0,01
11	6,40a ± 2,70	3,40b ± 2,61	0,20c ± 0,45	10,08	0,003

Continúa Tabla 9

Continúa Tabla 9

12	6,80a ± 1,30	3,00b ± 1,00	0,20c ± 0,45	56,76	<0,01
13	7,20a ± 2,95	2,80b ± 2,95	0,00c ± 0,00	11,36	0,002
14	6,60a ± 1,82	3,40b ± 1,82	0,00c ± 0,00	24,76	<0,01
15	6,60a ± 2,30	2,40b ± 1,14	1,00c ± 1,41	14,81	0,001
16	7,20a ± 2,28	1,80b ± 1,79	1,00c ± 1,00	18,15	<0,01
17	8,20a ± 1,30	1,20b ± 1,30	0,60c ± 0,89	63,76	<0,01
18	8,60a ± 1,14	1,00b ± 1,22	0,40c ± 0,89	87,06	<0,01
19	8,20a ± 0,84	1,80b ± 0,84	0,00c ± 0,00	199,0	<0,01
20	7,60a ± 1,14	2,40b ± 1,14	0,00c ± 0,00	87,08	<0,01
21	8,60a ± 0,89	1,20b ± 0,84	0,20c ± 0,45	185,77	<0,01
22	5,80a ± 1,92	4,20b ± 1,92	0,00c ± 0,00	18,19	<0,01
23	5,60a ± 1,34	4,00b ± 1,41	0,40c ± 0,89	23,13	<0,01
24	6,60a ± 1,14	2,60b ± 1,52	0,80c ± 1,30	24,94	<0,01

* Ninguno, refiere a que los individuos de *P. laevis*, se quedaron en el centro del recipiente es decir no prefirieron estar en ninguno de los dos sustratos.

Tabla 10. Prueba de evasión de *Porcellio laevis* (Crustacea: Isopoda) con la fase suspendida del lodo con condiciones no controladas de humedad.

Horario	Lodo	Suelo	Ninguno*	F	Sig.
1	7,40a ± 1,52	2,40b ± 1,82	0,20c ± 0,45	35,21	<0,01
2	5,60a ± 1,14	3,80b ± 0,84	0,60c ± 0,89	34,36	<0,01
3	6,60a ± 2,51	2,00b ± 1,00	1,40c ± 1,67	12,02	0,001
4	6,40a ± 1,52	2,40b ± 1,34	1,20c ± 1,10	20,98	<0,01
5	6,60a ± 1,14	2,80b ± 0,84	0,60c ± 0,89	49,36	<0,01
6	5,60a ± 1,82	3,20b ± 1,30	1,20c ± 1,79	8,88	0,004
7	6,80a ± 2,59	2,20b ± 1,79	1,00c ± 1,00	12,89	0,001
8	7,00a ± 2,83	2,80b ± 2,95	0,20c ± 0,45	10,45	0,002
9	6,80a ± 1,30	3,00b ± 1,22	0,20c ± 0,45	48,41	<0,01
10	7,00a ± 1,58	2,40b ± 1,67	0,60c ± 1,34	23,01	<0,01
11	6,80a ± 1,48	2,80b ± 1,79	0,40c ± 0,89	25,29	<0,01
12	6,20a ± 1,92	3,40b ± 2,30	0,40c ± 0,89	12,88	0,001
13	7,60a ± 0,55	1,80b ± 0,45	0,60c ± 0,55	262,75	<0,01
14	7,80a ± 1,92	0,80b ± 0,84	1,40c ± 1,14	39,61	<0,01
15	7,40a ± 1,14	1,40b ± 1,14	1,20c ± 1,30	43,30	<0,01
16	8,40a ± 2,07	1,00b ± 1,22	0,60c ± 0,89	43,85	<0,01
17	8,00a ± 2,35	1,40b ± 1,67	0,60c ± 1,34	24,49	<0,01
18	7,80a ± 2,17	1,60b ± 1,52	0,60c ± 1,34	25,93	<0,01

Continúa Tabla 10

Continúa Tabla 10

19	7,40a ± 1,52	1,80b ± 1,30	0,80c ± 1,10	36,50	<0,01
20	7,80a ± 2,39	1,80b ± 1,64	0,40c ± 0,89	25,19	<0,01
21	6,60a ± 2,19	2,40b ± 1,67	1,00c ± 1,00	14,81	0,001
22	6,40a ± 1,52	2,20b ± 0,84	1,40c ± 1,34	22,54	<0,01
23	7,80a ± 1,79	1,60b ± 1,34	0,60c ± 0,55	43,06	<0,01
24	7,60a ± 1,14	1,80b ± 1,48	0,60c ± 0,89	48,88	<0,01

* Ninguno, refiere a que los individuos de *P. laevis*, se quedaron en el centro del recipiente es decir no prefirieron estar en ninguno de los dos sustratos.

Tabla 11. Prueba de evasión de *Porcellio laevis* (Crustacea: Isopoda) con el lodo de perforación minera con condiciones controladas de humedad.

Horario	Lodo	Suelo	Ninguno*	F	Sig.
1	1,80a ± 1,79	8,20b ± 1,79	0,00c ± 0,00	43,53	<0,01
2	2,60a ± 1,14	7,40b ± 1,14	0,00c ± 0,00	81,31	<0,01
3	3,80a ± 1,92	6,20b ± 1,92	0,00c ± 0,00	19,81	<0,01
4	5,20a ± 0,84	4,60b ± 1,14	0,00c ± 0,00	60,70	<0,01
5	5,20a ± 2,49	4,80b ± 2,49	0,00c ± 0,00	10,13	0,003
6	5,20a ± 1,30	4,80b ± 1,30	0,00c ± 0,00	36,94	<0,01
7	4,20a ± 2,39	5,80b ± 2,39	0,00c ± 0,00	11,81	0,001
8	4,00a ± 2,00	6,00b ± 2,00	0,00c ± 0,00	17,50	<0,01
9	6,20a ± 2,17	3,80b ± 2,17	0,00c ± 0,00	15,59	<0,01
10	6,60a ± 0,55	3,40b ± 0,55	0,00c ± 0,00	272,33	<0,01
11	6,80a ± 1,30	3,20b ± 1,30	0,00c ± 0,00	51,06	<0,01
12	3,20a ± 0,84	6,80b ± 0,84	0,00c ± 0,00	124,00	<0,01
13	4,80a ± 2,68	5,20b ± 2,68	0,00c ± 0,00	8,77	0,005
14	5,40a ± 3,29	4,60b ± 3,29	0,00c ± 0,00	5,89	0,016
15	5,80a ± 1,79	4,20b ± 1,79	0,00c ± 0,00	21,30	<0,01
16	7,60a ± 1,82	2,40b ± 1,82	0,00c ± 0,00	34,30	<0,01
17	6,20a ± 2,49	3,80b ± 2,49	0,00c ± 0,00	11,82	0,001
18	5,20a ± 3,03	4,80b ± 3,03	0,00c ± 0,00	6,83	0,010
19	4,60a ± 3,36	5,40b ± 3,36	0,00c ± 0,00	5,64	0,019
20	4,40a ± 2,61	5,60b ± 2,61	0,00c ± 0,00	9,59	0,003
21	5,80a ± 1,48	4,20b ± 1,48	0,00c ± 0,00	30,59	<0,01
22	6,00a ± 2,35	4,00b ± 2,35	0,00c ± 0,00	12,73	0,001
23	5,40a ± 1,52	4,60b ± 1,52	0,00c ± 0,00	27,69	<0,01
24	5,20a ± 1,30	4,80b ± 1,30	0,00c ± 0,00	36,94	<0,01

* Ninguno, refiere a que los individuos de *P. laevis*, se quedaron en el centro del recipiente es decir no prefirieron estar en ninguno de los dos sustratos.

Al realizar las pruebas de evasión sin considerar condiciones controladas de humedad, los resultados mostraron que para el lodo de perforación minera, el 91,67% de los individuos de *P. laevis* prefirieron la tierra con lodo a las 24 h, solo el 8,33% de las horas evaluadas mostraron evasión hacia la tierra con lodo. Los resultados para la fase suspendida del lodo indicaron que a las 24 h de evaluación, el 100% de los individuos presentaron una

preferencia hacia el suelo con lodo.

Al realizar las pruebas de evasión considerando condiciones controladas de humedad para la tierra (control) y para la tierra con lodo, se observó que los individuos mostraron un comportamiento de atracción o preferencia por la tierra con lodo (15 lecturas) (62,5%) a las 24 h de evaluación, y el 37,5% de los individuos evadieron la tierra con lodo (9 lecturas) a las 24 h de evaluación.

Tabla 12. Prueba de evasión (%) de *Porcellio laevis* (Crustacea: Isopoda) bajo tres escenarios: (1) al lodo de perforación minera en condiciones no controladas de humedad, (2) a la fase suspendida del lodo de perforaciones mineras en condiciones de humedad no controladas y al lodo de perforación minera en condiciones controladas de humedad. La evasión es indicada como una respuesta positiva y la atracción o sin respuesta como una respuesta negativa.

Horario (am)	Evasión (% promedio \pm DE) (1)	Evasión (% promedio \pm DE) (2)	Evasión (% promedio \pm DE) (3)
1	-56% \pm 0,26	-50% \pm 0,33	64% \pm 0,36
2	-26% \pm 0,34	-18% \pm 0,18	48% \pm 0,23
3	-48% \pm 0,33	-46% \pm 0,34	24% \pm 0,38
4	64% \pm 0,33	-40% \pm 0,26	-6% \pm 0,19
5	4% \pm 0,51	-38% \pm 0,18	-4% \pm 0,50
6	-34% \pm 0,44	-24% \pm 0,26	-4% \pm 0,26
7	-64% \pm 0,38	-46% \pm 0,43	16% \pm 0,48
8	-40% \pm 0,40	-42% \pm 0,58	20% \pm 0,40
9	-24% \pm 0,57	-38% \pm 0,25	-24% \pm 0,43
10	-32% \pm 0,30	-46% \pm 0,30	-32% \pm 0,11
11	-30% \pm 0,53	-40% \pm 0,32	-36% \pm 0,26
12	-38% \pm 0,23	-28% \pm 0,41	36% \pm 0,17
13	-44% \pm 0,59	-58% \pm 0,08	4% \pm 0,54
14	-32% \pm 0,36	-70% \pm 0,27	-8% \pm 0,66
15	-42% \pm 0,33	-60% \pm 0,19	-16% \pm 0,36
16	-54% \pm 0,40	-74% \pm 0,33	-52% \pm 0,36
17	-70% \pm 0,24	-66% \pm 0,38	-24% \pm 0,50

Continúa Tabla 12

Continúa Tabla 12

18	-76% ± 0,22	-62% ± 0,35	4% ± 0,61
19	-64% ± 0,17	-56% ± 0,26	8% ± 0,67
20	-52% ± 0,23	-60% ± 0,40	12% ± 0,52
21	-74% ± 0,17	-42% ± 0,38	-16% ± 0,30
22	-16% ± 0,38	-42% ± 0,20	-20% ± 0,47
23	-16% ± 0,26	-62% ± 0,31	-8% ± 0,30
24	-40% ± 0,23	-58% ± 0,25	-4% ± 0,26

DISCUSIÓN

De acuerdo a los bioensayos realizados con el lodo de perforación, con la fase suspendida del lodo de perforación y con fluido de perforación minera se observó que estos no presentaron un efecto tóxico respecto a la mortalidad de *P. laevis*, debido a que no hubo diferencias significativas con respecto al control.

Méndez *et al.* (2007a) evaluaron la germinación del girasol con un fluido de perforación base agua en comparación con la fertilización química, y observaron que los fluidos de perforación base agua no influyeron negativamente en la germinación; así como no hubieron diferencias significativas en la altura de la planta, número de hojas, diámetro de tallo, y longitud de la raíz con la fertilización química. Concluyendo que el fluido de perforación no tuvo un efecto negativo en la especie estudiada. Rodríguez *et al.* (2015) evaluaron los efectos letales y subletales en lodos de perforación base agua en juveniles de *Argopecten nucleus* (Born, 1778) en pruebas agudas y crónicas, resultando ser no tóxicos o con un grado de toxicidad despreciable de acuerdo a la clasificación establecida por GESAMP (2002).

Méndez *et al.* (2007b) evaluaron la toxicidad de un fluido de perforación minera base agua sobre la germinación de las semillas del frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), los cuales fueron estadísticamente similares a la germinación por fertilización química e incluso superior al tratamiento sin fertilizar. Los resultados indicaron el uso potencial de los fluidos de perforación como posible fertilizante. Méndez *et al.* (2009) evaluaron comparativamente el efecto del fluido de perforación sobre la germinación del maíz con la fertilización química concluyendo que no hubo diferencias significativas. Contreras *et al.* (2013) determinaron la toxicidad aguda de lodos de perforación en postlarvas del crustáceo *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1993), presentando valores de CL_{50} 40 781 $mg \cdot L^{-1}$ y 308 248 $mg \cdot L^{-1}$, y concluyeron que los lodos no fueron tóxicos.

Estos estudios confirmarían que el lodo de perforación no genera toxicidad en las especies evaluadas; del mismo modo que el lodo de perforación y la minera no generaron un efecto tóxico significativo en la especie terrestre *P. laevis*.

Cerón *et al.* (2014) al evaluar la toxicidad aguda del lodo de exploración sobre la fecundación del *Lytechinus variegatus* (Lamarck, 1816), mostrando un alto grado de sensibilidad de estos organismos, afectando el índice de fecundación. En los ensayos de toxicidad en la presente investigación, la concentración de lodo más alta empleada fue de $0,27\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($270\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), un valor mucho mayor en comparación al empleado por Cerón *et al.* (2014).

La baja mortalidad de los *P. laevis* pudo deberse a que algunos invertebrados, como los isópodos terrestres tienden a acumular grandes cantidades de metales en sus tejidos como en el hepatopáncreas, y por ende mostrar cierto grado de tolerancia (Ghemari *et al.*, 2019ab; Khemaissia *et al.*, 2019; Ouni *et al.*, 2019). Iannacone *et al.* (2001) revelaron cuantitativamente acumulación de metales pesados en *P. laevis*, al ser expuestos a alimentos y suelos contaminados con plomo. En dicha investigación, los valores de DL_{50} de plomo en el *P. laevis* a 24 h, 48 h y 72 h fueron $4205,5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $2539,7\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $1807,6\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente. A las 48 h el valor de toxicidad aumento 1,65 veces en comparación con las 24 h y a las 72 h aumento 2,32 veces en comparación de las 24 h y 1,41 en relación a las 48 h de exposición (Iannacone *et al.*, 2001). De acuerdo a los resultados de laboratorio, el lodo de perforación minera y fase suspendida de los lodos contenían $80,37\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0,78\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de plomo, estos valores estuvieron muy por debajo de lo establecido en

la investigación para generar un efecto letal en el *P. laevis*.

Otra de las razones por las que no hubo efecto letal de los lodos de perforación minera en el *P. laevis* pudo ser por la propia composición de los lodos de perforación, debido a que uno de los principales componentes es la bentonita (Rueda, 2015). Este mineral es ensayado como adsorbente de varios compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales mejoran la su capacidad si se encuentran en medios alcalinos, por consiguiente se podría decir que la bentonita pudo haber adsorbido algunos compuestos que pudieron ser tóxicos para los *P. laevis*. Rueda (2015) indica que la capacidad de absorción de la bentonita mejora si se encuentra en medios alcalinos, el lodo de perforación minera presentó un valor 8,07 y fase suspendida de los lodos de 7,92, ello concluiría que las condiciones presentadas incrementaron la capacidad de absorción de compuestos orgánicos e inorgánicos en las muestras. Según Zimmer (2002), si las arcillas se ingieren junto con los alimentos, pueden mejorar las eficiencias digestivas al alterar la formación de complejos de taninos y proteínas y mejorar la producción de fenoxidasas microbiana, por lo que se concluye que la composición de los lodos de perforación, principalmente la bentonita mejoró los procesos digestivos de los *P. laevis*.

García *et al.* (2002) señalan que la acción de los metales pesados sobre el suelo y por tanto el nivel de peligrosidad, dependerá (además de

su concentración) de las condiciones del suelo tal como el pH, contenido de carbonatos y materia orgánica (Ghemari *et al.*, 2017, 2019ab; Jelassi *et al.*, 2019). Es por ello que del mismo modo que las arcillas, la materia orgánica (carga negativa) actúa adhiriendo a su superficie a los metales pesados los cuales son iones inorgánicos con cargas positivas, por medio de fuerzas electrostáticas formando complejos de cambio y quelatos (Larios-Bayona, 2014), impidiendo que el metal siga sus reacciones químicas normales. Un porcentaje mayor a los 2,8% de materia orgánica (FAO, 2013), es considerado como un nivel alto, la muestra de tierra preparada empleada para los bioensayos presentó un porcentaje de 6,94%, por el cual se podría afirmar que la materia orgánica presente en la tierra pudiera haber formado quelatos con los metales pesados disminuyendo la toxicidad de estos metales en el *P. laevis*.

La toxicidad letal realizada con *P. laevis* a las 24 h, 48 h y 72 h de exposición indicaron que el lodo de perforación minera, la fase suspendida del lodos y el fluido de perforación minera no presentaron mortalidad significativa entre las concentraciones evaluadas y el control. En general todas las muestras evaluadas presentaron valores nulos de mortalidad para *P. laevis*. Se determinaron los parámetros NOEC y LOEC presentando un valor de 0,27 g·g⁻¹ y >0,27 g·g⁻¹ para el lodo de perforación minera, mientras que para la fase suspendida del lodo y fluido de perforación minera fue de 0,4

mL·g⁻¹ y >0,4 mL·g⁻¹, para las 24 h, 48 h y 72 h, respectivamente.

Por otro lado, las pruebas de evasión en el *P. laevis*, al no tomar en consideración el porcentaje de humedad en los suelos, debido que el control presentó un porcentaje de humedad de 7,37% y la tierra con lodo un porcentaje de 38,17%, se observaron que hubo diferencias significativas entre los grupos, es decir hubo una mayor preferencia del bioindicador por las tierras con lodo que por el control (tierras sin lodo).

Considerando la diferencia de porcentajes de humedad y los resultados derivados de ello, se realizó nuevamente el ensayo de evasión tomando en cuenta similares condiciones de humedad en el control (tierra sin lodo) y en la tierra con lodo, los resultados estadísticos indicaron que el 62,5% de las 24 horas evaluadas, los individuos mostraron un comportamiento de no evasión o preferencia por la tierra con lodo mientras que el 37,5% de las 24 h evaluadas evadieron la tierra con lodo. Las diferencias se dieron principalmente a que la *P. laevis* presenta la estrategia de agregación social (Broly *et al.*, 2014), la cual reduce la pérdida de agua y la desecación, es por ello, que los individuos de *P. laevis* prefirieron estar en grupos en alguno de los dos sustratos.

En 24 h de evaluación el 37,5% de pruebas mostraron evasión de los individuos de *P. laevis* a los suelos con presencia de lodos, confirmando mencionado por Iannacone *et al.* (2001), en el que se indica que al distinguir o evitar los contaminantes significa que

los organismos puedan poseer mecanismos para resistir o reducir los efectos de altas concentraciones de contaminantes; sin embargo se considera que depende de las concentraciones evaluadas y el tipo de tóxico (Ghemari *et al.*, 2019ab; Khemaissia *et al.*, 2019; Ouni *et al.*, 2019). La concentración de los lodos empleados en la prueba de evasión fue de 0,27 g·g⁻¹, la cual según los ensayos de toxicidad no generaron mortalidad significativa en esta especie.

Como resultado de la presente investigación se concluye que los ensayos de toxicidad realizados a las 24 h, 48 h y 72 h de exposición, no mostraron un efecto letal en el lodo de perforación, en la fase suspendida del lodo de perforación y en el fluido de perforación minera en *P. laevis*, debido a que no hubo diferencias significativas respecto al control. Por lo tanto, los lodos de perforación minera no generan un efecto tóxico en este modelo biológico para las concentraciones trabaja-

das en la presente investigación. Las pruebas de evasión con *P. laevis*, considerando condiciones de humedad no controladas mostraron que hubo una preferencia hacia la tierra con presencia de lodo de perforación. Sin embargo, considerando condiciones de humedad controladas se confirmó la preferencia de los *P. laevis* hacia la tierra con lodo. Además, se observó la estrategia agregación social de la especie, con el fin de evitar la pérdida de agua y desecación.

Los resultados de la presente investigación permitan documentar un protocolo para evaluar la toxicidad de los lodos de perforación minera y sirven como referente para futuras investigaciones en el Perú, y así ser empleados para la toma de decisiones, debido a que existen pocas investigaciones que cuantifiquen el efecto del lodo de perforación minera, siendo una limitante para proponer medidas apropiadas para su manejo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agila-Soto, C.M. 2008. *Optimización de un fluido "Drill-in" para perforar zonas hidrocarbúricas* (Tesis de grado). Guayaquil, Ecuador.
- Ajah, F.; Osuji, J.O. & Anoliefo, G.O. 2019. Genotoxicity and environmental implications of crude oil-related pollutants in Nigeria. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, 4: 1-12, Article 47233.
- Alegre, A.; Bonifaz, E.; Solange, S. & Iannacone, J. 2017. Sensibilidad de dos biocontroladores *Chrysoperla externa* y *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) frente al extracto acuoso de *Ruta graveolens* (Rutaceae). *The Biologist* (Lima), 15: 173-180.
- ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y El Caribe). 2005. *Guía para el tratamiento y eliminación de desperdicios de perforación de exploración y producción*, N° 4. Montevideo, Uruguay.
- Aslan, J.F.; Weber, L.I.; Iannacone, J.; Lugon Junior, J.; Saraiva, V.B. & Oliveira,

- M.M. 2019. Toxicity of drilling fluids in aquatic organisms: a review. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 14: 35-47.
- Baggini, A.S.P.; Frates, C., Garand, J. & Meyer, A. 2014. Sellado de fracturas: avances en el control de las pérdidas de circulación. *Oilfield Review*, 26: 5-13.
- Benmouhoub, K.H.; Moumene, M.; Sayah, C.M.; Mouloud, N.; Kadji, H.D.; Yesguer, S.; Mahdeb, M.; Salhi, A.M.; Charfi, F.; Montesanto, G. & Habold, C. 2019. Acute toxicity of two pesticides (dursban, mancozeb) and their combined mixture on the terrestrial isopod *Armadillidium vulgare* (Oniscidea, Isopoda). *Studia Universitatis "Vasile Goldiș", Seria Științele Vieții*, 29: 184-191.
- Bonell-Rosabal, S. 2009. Petróleo y biotecnología: análisis del estado del arte y tendencias. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 19: 1561-2880.
- Broly, P.; Devigne, L.; Jean-Louis, D. & Devigne, C. 2014. Effects of group size on aggregation against desiccation in woodlice (Isopoda:Oniscidea). *Physiological Entomology*, 39: 165-171.
- Castilla, J. & Herrera, J. 2012. *El Proceso de Exploración Minera mediante sondeos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Cerón, S.; Santos, M.; Gómez, A.; Ospina, G.; Imués, M. & Gómez, J. 2014. Evaluación de la toxicidad aguda de un fluido de exploración Offshore en la fecundación del erizo de mar *Lytechinus variegatus*. *Boletín de investigaciones marinas y costeras*, 43: 383-405.
- Contreras, G.; Rodríguez, S.; Castellanos, C.; Franco, A. & Serrano, M. 2013. Toxicidad aguda de lodos de perforación en postlarvas de *Litopenaeus vannamei*. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5: 127-138.
- De Silva, P.M. & Van Gestel, C.A. 2009. Comparative sensitivity of *Eisenia andrei* and *Perionyx excavatus* in earthworm avoidance tests using two soil types in the tropics. *Chemosphere*, 77: 1609-1613.
- DS-Ecuador. 2003. *Decreto N° 3.516 - Norma de Calidad Ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados* (Anexo II, Libro VI: De la Calidad Ambiental, del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente). <http://www.ambiente.gov.ec>
- Eijsackers, H.; Reinecke, A.; Reinecke, S. & Maboeta, M. 2019. Heavy metal threats to plants and soil life in Southern Africa: Present knowledge and consequences for ecological risk. *Assessment Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 249: 29-70.
- Ejiogu, I.K.; Omgbu, J.A.; Julius, F.B. & Ibenenme, U. 2020. Polymer Drilling Fluids Emulsions (PDFE): A Review. *American Journal of Applied and Industrial Chemistry*, 4: 1-7.
- Espinoza, P.A. 2015. *Recomendaciones para el fortalecimiento de la evaluación del impacto ambiental de las actividades mineras en el Perú*. Programa de Gestión Socio-Ambiental e Inversiones. (A. y Derecho, Ed.) Lima, Perú.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. *El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas*. Recuperado el 30 de 06 de 2018, de <http://www.fao.org/3/a-i3361s.pdf>
- Gaevaya, E.; Tarasova, S. & Bytsko, A. 2019. The environmental impact of drilling sludge and ways of their utilization. *Journal of Ecological Engineering*, 20: 26–30.
- García, C.; Moreno, J.L.; Hernández, T. & Polo, A. 2002. *Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo*. Segundas jornadas científicas sobre medio ambiente del CCMA-CSIC (Abril-2002) “Cambio global, ecología, contaminación, restauración, la agricultura del nuevo milenio, salud y medio ambiente, nuevas perspectivas desde la bioquímica y la biología molecular”. En: *Ciencia y Medio Ambiente*. Valladares, F. (ed.). pp. 125-138.
- García, L. 2015. Orden Isopoda: Suborden Oniscidea. *Ibero Diversidad Entomológica @ccesible*, 78: 1-12.
- GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). 2002. IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP). *The Revised GESAMP Hazard Evaluation Procedure for Chemical Substances Carried by Ships*. International Maritime Organization. London.
- Ghemari, C.; Waterlot, C.; Ayari, A.; Leclercq, J.; Douay, F. & Nasri-Ammar, K. 2017. Assessment of heavy metals in soil and terrestrial isopod *Porcellio laevis* in Tunisian industrialized areas. *Environmental Earth Sciences*, 76: 623.
- Ghemari, C.; Waterlot, C.; Ayari, A.; Doua, F. & Nasri-Ammar, K. 2019a. Effects of Heavy Metals Artificial Contamination on *Porcellio laevis* (Latreille, 1804) (Crustacea: Isopoda: Oniscidea). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 103: 416–420.
- Ghemari, C.; Waterlot, C.; Ayari, A.; Douay, F. & Nasri-Ammar, K. 2019b. Bioaccumulation of heavy metals in the terrestrial isopod *Porcellionides pruinosus* in the vicinity of Gabes-Ghannouch industrial complex, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, doi: 10.1080/10807039.2018.1564621
- Gospodarek, J.; Petryszak, P.; Kołoczek, H. & Rusin, M. 2019. The effect of soil pollution with petroleum-derived substances on *Porcellio scaber* Latr. (Crustacea, Isopoda). *Environmental Monitoring and Assessment*, 191: 38.
- Hornung, E.; Farkas, S. & Fischer, E. 1998. Tests on the Isopod *Porcellio scaber*. Chapter 13. En: *Handbook of Soil Invertebrate toxicity test*. Løkke, H. & van Gestel, C.A.M. John Wiley & Sons Ltd. NY. USA. pp. 207-226.
- Iannacone, J. 2003. Artrópoda de importancia forense en un cadáver de cerdo en el Callao, Perú. *Revista Brasileira de Zoologia*, 20: 85-90.

- Iannacone, J. & Alvarino, L. 2002. Evaluación del riesgo ambiental del insecticida Cartap en bioensayos con tres invertebrados. *Agricultura Técnica*, 62: 366-374.
- Iannacone, J. & Alvarino, L. 2007. Influencia de la aclimatación en la tolerancia a altas temperaturas del chanchito de la humedad *Porcellio laevis* (Isopoda: Porcellionidae). *The Biologist* (Lima), 5: 60-64
- Iannacone, J.; Alayo, M.; Abanto, M.; Sánchez, J. & Zapata, E. 2001. *Porcellio laevis* Latreille, 1804 (Isopoda: Porcellionidae) como bioindicador para evaluación de plomo. *Revista Peruana de Entomología*, 42: 175-183.
- Iannacone, J.; Alvarino, L.; Murrugarra, Y.; Arrascue, A.; Alayo, M. & Salazar, N. 2008. Selectividad del insecticida metamidfos en ocho organismos terrestres no destinatarios. *Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology*, 3: 23-34.
- Jelassi, R.; Hammami, W.; Ghemari, C. & Nasri-Ammar, K. 2019. Avoidance and locomotor behaviours of *Armadillidium granulatum* (Crustacea, Oniscidea) towards trace elements contaminated soils. *Biological Rhythm Research*, doi:10.1080/09291016.2019.1642668
- Khemaissia, H.; Jelassi, R.; Ghemari, C.; Raimond, M.; Souty-Grosset, C. & Nasri-Ammar, K. 2019. Effects of trace metal elements on ultrastructural features of hepatopancreas of *Armadillidium granulatum* Brandt, 1833 (Crustacea, Isopoda). *Microscopy Research and Technique*, 2019: 1-13.
- Larios-Bayona, M. 2014. *Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los suelos de Rivera de la Cuenca del Rio Turia*. (Tesis de Maestría). Universitat de Lleida. Barcelona, España.
- Loureiro, S.; Soares, A. & Nogueira, A. 2005. Terrestrial avoidance behaviour test as screening tool to assess soil contamination. *Environmental Pollution*, 138: 121-131.
- Marcano, R.; Morales, H.; Molero, B.; Pérez, P.; Pirela, J. & Nava, E. 2011. *Fluidos de perforación*. 9. Universidad del Zulia. Cabimas, Venezuela.
- Madžarić, D.; Kos, M.; Drobne, D.; Hočevár, M. & Kokalj, A.J. 2018. Integration of behavioral tests and biochemical biomarkers of terrestrial isopod *Porcellio scaber* (Isopoda, Crustacea) is a promising methodology for testing environmental safety of chars. *Environmental Pollution*, 234: 804e811
- Méndez, J.; Otahola, V.; Rodríguez, M., Simosa, J.; Tellis, L. & Zabala, E. 2007a. Comparación del desecho de un fluido de perforación base agua no disperso con la fertilización química en el cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L.). *Revista UDO Agrícola*, 7: 195-203.
- Méndez, J.; Otahola, V.; Pereira, R.; Simosa, J. Tellis, L. & Zabala, E. 2007b. Comparación del desecho de un fluido de perforación base agua no disperso con la fertilización química en el cultivo del Frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Idesia* (Chile), 25: 7-20.

- Méndez, J.; Otahola, V.; Rodríguez, M.; Simosa, J.; Tellis, L. & Zabala, E. 2009. Comparación de un fluido de perforación con la fertilización química en el cultivo de Maíz (*Zea mays* L.). *Revista tecnológica Espol*, 22: 29-35.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2010. Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM Aprueban límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgica <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-010-2010-minam/>
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2017. Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. <http://sinia.minam.gob.pe/>. Recuperado el octubre de 2018, de http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/ds_012-2017-minam.pdf
- Murialdo, R. 2016. *Ecología, ecosistemas y ecotoxicología: Conceptos fundamentales*. (1^{ra} Ed.). Argentina: Ed. Brujas.
- Pachas, D. 2015. La exploración Minera en el Perú: Un breve alcace sobre las principales autorizaciones para el desarrollo de un proyecto de exploración en el Perú. *Revista Derecho & Sociedad*, 42: 1-2.
- Paoletti, M. & Hassall, M. 1999. Woodlice (Isopoda:Oniscidea). their potencial for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and environment*, 73: 157-165.
- Pérez-Schultheiss, J. 2010. Familias de isópodos terrestres (Crustacea: Isopoda: Oniscidea) de Chile: sinopsis y clave de identificación. *Boletín de Biodiversidad de Chile*, 4: 63-82.
- Rice, E.W.; Baird, R.B. & Eaton, A.D. (eds). 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, USA. 1545 pp.
- Rodríguez, S.; Castellanos, C.; Contreras, G.; Franco, A. & Serrano, M. 2015. Efectos letales y subletales en juveniles de *Argopecten nucleus* expuestos a los lodos de perforación. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 44: 11-68.
- Rueda, M.L. 2015. *Retención de Zn, Cd y Pb por sólidos arcillosos*. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- Selonen, S.; Dolar, A.; Kokalj, A.J.; Skalar, T.; Dolcet, L.P.; Hurley, R. & van Gestel, C.A.M. 2020. Exploring the impacts of plastics in soil – The effects of polyester textile fibers on soil invertebrates. *Science of the Total Environment*, 700: 134451.
- SGM (Secretaría de Gobernación de México). 1998. *Diario oficial de la federación*. Recuperado el 26 de enero de 2017, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4900046&fecha=19/11/1998
- Silva-Zea, G. 2001. *Optimización del uso de polímeros en la perforación de pozo de campos marginales en el oriente Ecuatoriano (Caso Bermejo)* (Tesis de grado). Guayaquil, Ecuador.

- Szlavec, K.; Vilisics, F.; Tóth, Z. & Hornung, E. 2018. Terrestrial isopods in urban environments: an overview. *ZooKeys*, 801: 97–126.
- Souty-Grosset, C. & Faberi, A. 2018. Effect of agricultural practices on terrestrial isopods a review. *Zookeys*, 801: 63-96.
- TRT (Tecnologías y Recursos de la Tierra). 1991. *Aplicación de Técnicas Especiales al Estudio Hidrológico de Zonas de Baja Permeabilidad*. Recuperado el Enero de 2019, de http://info.igme.es/SidPDF%5C021000%5C843%5C-Dise%C3%B1o%20de%20sondeos%5C21843_0001.pdf
- Ouni, A.; Ghemari, C.; Said, A.B.; Pruvot, C.; Douay, F. & Nasri-Ammar, K. 2019. Monitoring of heavy metal contamination in soils and terrestrial isopods sampled from the industrialized areas of Sfax (southeastern Tunisia). *Environmental Earth Sciences*, 78:440.
- van Gestel, C.A.M. Loureiro, S. & Zidar, P. 2018. Terrestrial isopods as model organisms in soil ecotoxicology: a review. *ZooKeys* 801: 127–162.
- Waller-Panzardi, A. 2012. *Composición taxonómica y estructura poblacional de los isópodos terrestres (Crustacea, Isopoda, Oniscidea) en un ambiente natural y en un ambiente laboreado* (Tesis Magíster en Ciencias Biológicas - Zoología). Universidad de la República (Uruguay). Montevideo.
- Wojtanowicz, A.K. 2016. *Environmental control of drilling fluids and Produced Water*. Chapter 4. In: *Environmental Technology in the Oil Industry*. Orszulik, S. (ed.). Springer Netherlands. NY. USA. pp. 101-165.
- Zidar, P.; Kos, M.; Ilič, E.; Marolt, G.; Drobne, D.; Kokalj, A.J. 2019. Avoidance behaviour of isopods (*Porcellio scaber*) exposed to food or soil contaminated with Ag- and CeO₂- nanoparticles. *Applied Soil Ecology*, 141: 69–78.
- Zimmer, M. 2002. Nutrition in terrestrial isopods (Isopoda:Oniscidea): an evolutionary-ecological approach. *Biological reviews*, 77: 455-493.
- Žurek, R.; Jamrozik, A. & Gonet, A. 2017. toxicity evaluation of spent drilling mud and drilling waste. *Akademia Górniczo-Hutnicza Drilling, Oil, Gas*, 34: 243-258.

Received March 12, 2020.

Accepted April 30, 2020.