

ANOMALÍAS MACROSCÓPICAS EN LARVAS DE ANFIBIOS ANUROS

MACROSCOPIC ANOMALIES IN ANURAN LARVAE

DAVID RAMIRO AGUILLÓN GUTIÉRREZ*

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, Av. Universidad S/N, Fracc. Filadelfia, 35010 Gómez Palacio, Durango, México

**Correspondence author: davidrag@gmail.com*

Abstract.— This is a review paper that addresses the issue of macroscopic anomalies in anuran amphibian larvae. Currently, the cause of many anomalies in amphibians is known totally or partially, such as those caused by genetic factors (mutations, albinism and cauda bifida), by infectious agents (viruses, bacteria, fungi, protozoa and helminth parasites), by environmental factors (ultraviolet radiation, magnetism, temperature and predation) and by exposure to pollutants (endocrine disruptors and heavy metals), however, there are also anomalies whose cause remains unknown (*p* anomaly and weak limbs syndrome). Among the macroscopic anomalies mentioned in this article are the curvature of the spine, abnormalities in extremities, edema, skin and pigmentation problems, eye abnormalities and delayed growth. In the larval stage, the spectrum of anomalies is greater than in the adult stage, because in this stage the anuran amphibians are more vulnerable to different environmental and anthropogenic factors, and many of them will not reach the adult stage. The presence of macroscopic anomalies in larvae of anuran amphibians can give us information about the health status of a population or species, finding out the cause of these anomalies could help to generate conservation strategies for this biological group and minimize the loss of its biodiversity.

Keywords.— Macroscopic anomalies, tadpoles, population health, amphibians.

Resumen.— Este es un artículo de revisión donde se aborda el tema de las anomalías macroscópicas en larvas de anfibios anuros. Actualmente se conoce total o parcialmente la causa de muchas anomalías en anfibios, como por ejemplo las causadas por factores genéticos (mutaciones, el albinismo y la cola bífida), por agentes infecciosos (virus, bacterias, hongos, protozoarios y parásitos helmintos), por factores ambientales (radiación ultravioleta, magnetismo, temperatura y depredación) y por exposición a contaminantes (interruptores endócrinos y metales pesados), sin embargo, también existen anomalías cuya causa permanece desconocida (anomalía *p* y síndrome de miembros débiles). Entre las anomalías macroscópicas mencionadas en este artículo se encuentran la curvatura de la espina, anomalías en extremidades, edema, problemas cutáneos y de la pigmentación, anomalías en ojos y crecimiento retardado. En la etapa larvaria, el espectro de anomalías es mayor que en la etapa adulta, debido a que en esta etapa los anfibios anuros son más vulnerables a diferentes factores ambientales y antropogénicos, y muchos de ellos no llegarán a la etapa adulta. La presencia de anomalías macroscópicas en larvas de anfibios anuros nos puede dar información acerca del estado de salud de una población o especie, averiguar la causa de estas anomalías podría ayudar a generar estrategias de conservación para este grupo biológico y minimizar la pérdida de su biodiversidad.

Palabras clave.— Anomalías macroscópicas, larvas, salud de la población, anfibios.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los anfibios son el grupo de vertebrados más amenazados a nivel mundial, algunos autores consideran que de un 30 a un 40% de especies están en riesgo de extinción, lo que sugiere que el problema es multifactorial y global (Blaustein y Wake, 1995; Young et al., 2001; Stuart et al., 2004; Allentoft

y O'Brien, 2010). Algunos de los factores que causan el declive poblacional de anfibios como la contaminación o la radiación ultravioleta están relacionados con la incidencia de anomalías macroscópicas, las cuales se definen como aquellas que se pueden observar a simple vista en la parte externa del organismo y en general, se considera que no más de un 5% de una población de anfibios debe presentar una anomalía (Blaustein y Johnson,

2003), sin embargo, hay reportes de poblaciones que superan ese porcentaje (Vershinin 1989, Severtsova et al., 2012b). Sin embargo, la mayoría de las publicaciones se hace en individuos adultos, lo que reduce el espectro de tipos de anomalías encontrados, ya que, en etapa larvaria, muchos de los individuos con anomalías no llegarán a la etapa adulta, además las larvas son más difíciles de encontrar, de identificar y de investigar (McDiarmid y Altig, 1999; Johnson et al., 2001; Blaustein y Johnson, 2003).

LOS ANFIBIOS ANUROS

El orden Anura se conforma por ranas y sapos. Anura significa “sin cola”, lo cual es una característica de este grupo en la fase adulta. Las larvas son fitófagos y los adultos son carnívoros. La longitud hocico-cloaca en adultos va de menos de 1 a 35 cm según la especie. En cuanto a la reproducción, la mayoría presenta fertilización externa, colocando los huevecillos en el agua, aunque algunos los colocan en tierra. Actualmente se conocen 6856 especies de anuros (Frost, 2017), siendo el orden de anfibios más numeroso. Se distribuyen en todos los continentes exceptuando la Antártida (Halliday y Adler, 2007).

Etapas ontogenéticas de anuros

Para determinar el estadio de desarrollo de un anfibio anuro se utilizan las Tablas de Desarrollo Normal, por ejemplo, la de Nieuwkoop y Farber (1956) basada en *Xenopus laevis*, la de Gosner (1960) basada en *Bufo valliceps* o la de Dabagyan-Sleptzova (1975) basada en *Rana temporaria*. En general, pueden considerarse las siguientes etapas de desarrollo en anuros (Balinsky, 1978; McDiarmid y Altig, 1999; Gilbert, 2000):

Etapas embrionaria: La etapa embrionaria va desde la fertilización hasta la organogénesis. Durante esta etapa ocurre la segmentación, la mórula, la blástula y la gástrula.

Organogénesis: En esta etapa se empiezan a formar los órganos, el cuerpo se alarga, se forma la cola y se hace notoria la subdivisión del cuerpo en cabeza y tronco.

Etapas larvaria: Se desarrollan las extremidades posteriores, separándose los dedos, y se hacen visibles las extremidades anteriores.

Metamorfosis: Durante esta etapa emergen las extremidades anteriores, se reabsorbe la cola y crece el tamaño de la boca.

Etapas juvenil: Se presenta desde las últimas etapas de la metamorfosis, en las que en la mayoría de las especies el renacuajo debe salir del agua, pues la respiración ya es totalmente

pulmonar y cutánea.

Etapas adulta: El individuo presenta actividad tanto en el ambiente terrestre como en el acuático y alcanza la madurez sexual.

Cabe destacar que las distintas etapas, aquí muy brevemente descritas, tienen base en la presencia, tamaño o ausencia de ciertas estructuras morfológicas, pero que no tienen un límite totalmente distinguible entre ellas, por lo que el uso de las tablas de desarrollo normal como las anteriormente mencionadas, son bastante útiles para ubicarnos en una etapa o “momento” particular del desarrollo.

Etapas ontogenéticas de anuros

El término “larva” es muy general, en español también se le puede llamar renacuajo, y abarca desde algunas etapas de la organogénesis hasta el inicio de la metamorfosis. Dentro de los vertebrados, los anfibios son los únicos que tienen una etapa larvaria como tal (no todas las especies presentan etapa larvaria), y en consecuencia una metamorfosis (exceptuando las especies neotónicas). Anatómicamente hay cambios importantes en la boca, pues en esta etapa comienza la alimentación activa (herbívoros en un inicio y después omnívoros), la cola se desarrolla para permitir el nado, las branquias se internalizan quedando cubiertas por el opérculo y se aprecia el espiráculo, y se desarrollan las extremidades posteriores en las cuales se separan los dedos. Fisiológicamente están activos, con sus respectivas limitantes, el sistema digestivo, el respiratorio, el circulatorio, el nervioso, el excretor y el musculoesquelético (presencia de condrocraqueo). Ecológicamente la supervivencia de la larva depende de muchos factores, puesto que esta etapa se lleva a cabo en el agua, y dependerá del tipo de cuerpo de agua (permanente o temporal, agua corriente o estancada), así mismo como de la presencia de alimento, la interacción con depredadores, la competencia intra e interespecífica y de condiciones ambientales, climáticas, demográficas y antropogénicas (Cogger y Zweifel, 1992; McDiarmid y Altig, 1999; Halliday y Adler, 2007).

Conservación de Anfibios

Los anfibios son el grupo de vertebrados con más especies amenazadas de extinción en la actualidad. Desde la década de los ochentas se han registrado declives poblacionales y extinciones en este grupo biológico en distintas partes del planeta (Blaustein y Wake 1995, Young et al. 2001, Stuart et al. 2004, Allentoft y O'Brien 2010). Las razones por las que los anfibios son más vulnerables que otros grupos biológicos son las siguientes (Crump y Rodríguez, 2001; Vosjoli, 2004; Wells 2007; Cruz-Elizalde et al., 2017; Aguillón-Gutiérrez, 2018):

- a) Tienen una piel “desnuda”, lisa y permeable, por la que absorben contaminantes o bien son susceptibles de infecciones.
- b) Presentan respiración branquial, pulmonar y cutánea, por lo que, si el agua o el aire están contaminados, los anfibios padecerán las consecuencias.
- c) Las estrategias de conservación in situ no siempre tiene éxito, ya que muchos anfibios tienen requerimientos de hábitat muy específicos, por ejemplo, cierta humedad, temperatura, dieta, entre otros.
- d) La fragmentación de hábitat también pone en riesgo a algunas poblaciones de anfibios, ya que a veces interrumpe procesos metapoblacionales, ocasionando depresión endogámica.

ANOMALÍAS MACROSCÓPICAS EN LARVAS DE ANFIBIOS ANUROS

Anomalías por factores genéticos

Existe una gran cantidad de anomalías de las cuales no se conoce la causa o etiología, y no parecen estar relacionadas con agentes infecciosos, alteraciones ambientales o contaminantes. Sin embargo, en muchos casos pudiera haber una combinación de factores tanto ambientales como genéticos que den origen a estos padecimientos (Gilbert y Epel, 2009). En esta sección se consideran anomalías cuyo origen pudiera ser atribuido a alteraciones genéticas durante el desarrollo.

Mutaciones

Una mutación es cualquier cambio que provoque una variación en un nucleótido o alelo (Griffiths et al., 1998), si este cambio afecta la cantidad o función de un polipéptido, altera una proteína esencial o causa daños en el ADN o ARN, se produce una enfermedad genética y en consecuencia el fenotipo se modifica (Thompson et al., 1996).

La rana *Bombina orientalis* presenta un gen recesivo mutante (*Pale*), que en los individuos homocigotos produce una coloración más clara y defectos en la retina que pueden ser apreciados desde la etapa larvaria (Ellinger, 1980). Los melanóforos tienen un número reducido de melanosomas, y otros cromatóforos como los xantóforos y los iridóforos presentan poca intensidad de pigmentación. Histológicamente se aprecia un adelgazamiento del epitelio pigmentado de los ojos, desorganización celular de las capas nucleares y plexiformes de la retina, y acortamiento y número reducido de conos y bastones (Ellinger, 1980).

Albinismo

El albinismo es la ausencia congénita de la pigmentación corporal normal (Blood y Studdert, 1993) debida a una mutación en la cual se inhibe la vía de biosíntesis de melanina (Kamaraj y Purohit, 2014). El albinismo suele comportarse como un carácter mendeliano sencillo, recesivo respecto a la pigmentación normal (Sinnott et al., 1961) y se ha detectado en una gran cantidad de especies, incluyendo las larvas del anfibio anuro *Bufo viridis* (Henle et al., 2017).

Cola bifida

La cola bifida (*cauda bifida*) es una condición en que la cola tiene dos terminaciones. La causa de esta anomalía no está clara, sin embargo, en experimentos en laboratorio se ha obtenido esta anomalía cuando partes de la corda dorsal es destruida, cuando se inyecta alquitrán en la cola o cuando se irradia la región lumbar. Esta condición se ha reportado en *Hyla arborea* (Henle et al., 2012, 2017).

Anomalías causadas por agentes infecciosos

En México existen algunos trabajos acerca de la microbiota presente en herpetofauna, estos estudios son muy importantes desde el punto de vista ecológico, biomédico, veterinario y de la medicina de la conservación. Uno de estos trabajos es el realizado por Aguillón-Gutiérrez et al. (2007), en el cual se hizo una evaluación del estado físico y un aislamiento e identificación de bacterias cloacales en herpetofauna del Parque Ecológico Chipinque, en el municipio de San Pedro Garza García, Nuevo León, México. En esta investigación se utilizó la microbiota de reptiles y anfibios como herramienta diagnóstica de salud ambiental, ya que estos animales pueden ser portadores de bacterias zoonóticas como la *Salmonella*, sin embargo, se concluyó que la sanidad del hábitat es adecuada, puesto que los reptiles y anfibios están en buen estado corporal y existe poco riesgo de que sean potenciales transmisores de enfermedades zoonóticas bacterianas.

Evidentemente, hace falta realizar más investigaciones en México referentes a la microbiota (virus, bacterias, hongos, protozoarios y helmintos) en reptiles y anfibios, ya que actualmente algunas enfermedades emergentes han puesto en riesgo a diversas especies de estos grupos biológicos (Daszak et al., 1999). A continuación, se muestran algunos ejemplos de agentes infecciosos que causan anomalías macroscópicas en larvas de anfibios anuros.

Virus

Los virus son agentes submicroscópicos que contienen ácido nucleico, desoxirribonucleico (ADN) o ribonucleico (ARN) como

su genoma, el cual está incluido en una envoltura de proteína, y además algunos virus contienen lípidos, carbohidratos y enzimas (Gratzek, 1980; Mohanty y Dutta, 1988). Los anfibios pueden ser afectados por un grupo de virus con doble cadena de ADN llamado *Ranavirus*, de la familia Iridoviridae, el cual ocasiona una respuesta inmunológica caracterizada por hinchazón de extremidades y del cuerpo, eritema (enrojecimiento de la piel debido a un aumento de irrigación sanguínea por vasodilatación), equimosis (hematomas), petequias (lesiones pequeñas de color rojo, formadas por extravasación de eritrocitos cuando se daña un capilar), hemorragias y decoloración cutánea en larvas de *Lithobates catesbeianus*, *Spea bombiformis* e *Hyla chrysoscelis* (Gray et al., 2009; Miller et al., 2011; Gray y Chinchar, 2015). Igualmente, un *Ranavirus* es el Virus del Edema del Renacuajo, que ocasiona edema, además de hemorragias difusas en extremidades, necrosis en dedos, úlceras cutáneas y muerte. Los efectos de este virus se han descrito en *Spea hammondi*, *Anaxyrus americanus*, *Anaxyrus woodhousii*, *Lithobates catesbeianus*, *Rana temporaria* y *Rhinella marina* (Williams, 1997; Daszak et al., 1999).

Bacterias

Las bacterias son microorganismos procariotas, unicelulares, que no forman tejidos especializados, con una pared celular de peptidoglicano y carentes de núcleo. Exhiben formas esféricas, filamentosas o de bastones rectos, curvos o espirales (Merchant y Packer, 1980; Carter y Chengappa, 1994). Los anfibios anuros durante su etapa larvaria pueden ser afectados por diversas bacterias, sin embargo, no todas causan patologías macroscópicas. Desde finales del siglo XIX se ha reportado que la bacteria *Bacillus hydrophilus*, posteriormente *Aeromonas hydrophila* causa la enfermedad de las piernas rojas (presencia de úlceras y lesiones focales hiperémicas y hemorrágicas en la piel de las extremidades) en anfibios (Emerson y Norris, 1905; Williams, 1999). Esta bacteria ha sido aislada de larvas de *Lithobates pipiens*, *Rana muscosa* y de *Rana temporaria*, ocasionando en esta última petequias, equimosis y eritema en el cuerpo, cola y piernas, y en el caso de *R. muscosa* causando mortalidades cercanas al 100% (Hird et al., 1981; 1983; Bradford, 1991; Tiberti, 2011).

Hongos

Los hongos son organismos eucariotas, desprovistos de clorofila, presentan órganos como las hifas y el micelio, tienen existencia saprófita o parásita (Muller y Loeffler, 1976; Carter y Chengappa, 1994). Dos de los hongos más estudiados que afectan a los anfibios son *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*) y *Batrachochytrium salamandrivorans* (que afecta salamandras), que ocasionan la enfermedad quitridiomycosis, a la cual se le han atribuido el declive poblacional y el surgimiento de anomalías en algunas especies de anfibios. *Bd* puede causar alteraciones del

comportamiento, posturas anormales, anomalías en partes de la boca, anorexia y muerte en larvas de *Rana cascadae*, *Lithobates catesbeianus*, *Hyla regilla* y *Anaxyrus boreas* (Blaustein et al., 2005).

Otras enfermedades micóticas reportadas en anfibios son la chromomycosis causada por hongos como *Cladosporium*, *Fonsecaea*, *Phialophora*, *Ochroconis*, *Rhinochlosporium* y *Wangiella*, y zygomycosis, causada por hongos del grupo Zygomycetes como *Mucor*, *Basidiobolus*, y *Rhizopus*. Estas enfermedades se han reportado en anfibios como *Anaxyrus boreas* y causan lesiones granulomatosas, úlceras, nódulos y neoplasias en piel, letargia, enfermedades neurológicas, pérdida de peso y muerte (Wright y Whitaker, 2001; Scherff-Norris et al., 2002).

Protozoarios

Los protozoarios son organismos microscópicos, unicelulares eucariotas, con una morfología muy diversa, habitan en ambientes húmedos y acuáticos y pueden parasitar a otros seres vivos (Vázquez-Cervantes, 1999). En esta sección se habla de los efectos de *Saprolegnia ferax* y *S. declina* en anfibios en desarrollo. Cabe destacar que *Saprolegnia* históricamente ha sido considerado un hongo perteneciente a la división Oomycota, pues presenta hifas (Muller y Loeffler, 1976), sin embargo, debido a las dificultades en su clasificación taxonómica, algunos autores la clasifican dentro del reino Chromista y otros dentro del reino Protista (Hulvey et al., 2007; Ke et al., 2009; Sandoval-Sierra et al., 2014). Para fines de este capítulo, *Saprolegnia* se considera un protozoario.

La infección por *Saprolegnia* es causa de muerte en etapas embrionarias y larvarias en anfibios. Este microorganismo invade las puestas de anfibios, formando una masa algodonosa alrededor de los huevecillos. Una vez en contacto con la puesta, este protozoario afecta la membrana vitelina y posteriormente el embrión o larva del anfibio en periodo de organogénesis, retrasando su desarrollo, induciendo la eclosión temprana y finalmente matándolo en la mayoría de los casos. Algunos anfibios afectados por este organismo son *Anaxyrus boreas*, *Pleurodema thaul*, *Rana cascadae*, *Rana aurora* y *Pseudacris regilla* (Blaustein et al., 1994; Kiesecker y Blaustein, 1999; Romansic et al., 2009; Perotti et al., 2013).

Parásitos

Los parásitos son organismos que viven encima o dentro de otro ser vivo (hospedero), a cuyas expensas obtiene ciertos privilegios y pueden clasificarse en accidentales, facultativos, incidentales, obligados, periódicos, sanguíneos y temporales. En general, la parasitología se enfoca en el estudio de protozoarios, helmintos y artrópodos y su relación con el hospedero, considerando

aspectos ecológicos, biomédicos, epidemiológicos y de salud pública (Becerril-Flores, 2014).

Desde el punto de vista de la conservación, los parásitos en anfibios deben ser ampliamente estudiados, ya que controlan poblaciones de estos animales, además de ser parte en procesos de coevolución, sin embargo, cuando existen factores antropogénicos que alteran los ciclos de vida del parásito, éstos pueden llevar a la extinción local de algunas especies. Se sugiere que la interacción anfibio-parásito debe ser abordada a través de un análisis de factor de riesgo, de la epidemiología espacial y molecular, de la medicina, biología y ecología experimental y de los modelos de transmisión y de dinámica de las enfermedades (Garner et al., 2012).

Un parásito asociado a anomalías macroscópicas en larvas de anfibios anuros es el trematodo *Ribeiroia ondatrae* (Johnson et al., 2002), el cual ocasiona una cantidad importante de anomalías (Tabla 1) (Johnson et al., 1999, 2001, 2002). Existen otras especies

de *Ribeiroia* (*congolensis* y *marini*), sin embargo, no hay estudios sobre su patogenicidad (Johnson et al., 1999).

Anomalías por factores ambientales

Radiación ultravioleta

Los rayos ultravioleta son aquellos que tienen una longitud de onda que va de los 100 a los 400 nm. La exposición crónica a esta radiación puede ocasionar daños a la salud (OMS, 2003). Larvas de *Lithobates pipiens* expuestas a diferentes magnitudes de radiación UV presentaron anomalías en dedos y extremidades completas, en algunos casos de forma bilateral y simétrica. También se han reportado lesiones en piel, ojos, cuerpo y extremidades en *Lithobates pipiens*, *L. clamitans*, *L. septentrionalis* y *L. catesbeianus* (Blaustein et al., 1997; Burkhart et al., 2000; Blaustein y Johnson, 2003).

Magnetismo

En 1969, Levengood expuso embriones de *Lithobates sylvaticus*

Anomalia:	Definición*:
Anoftalmia	Ausencia de uno o de ambos ojos
Hipoplasia mandibular	Mandíbula incompleta o subdesarrollada
Displasia mandibular	Detención localizada del desarrollo
Herida abierta	Lesión producida en los tejidos exteriores del cuerpo
Hemimelia	Deficiencia longitudinal de una extremidad, caracterizada por la ausencia total o parcial de un hueso
Micromelia/Braquimelia	Extremidad más corta de lo normal
Ectromelia	Ausencia o subdesarrollo de extremidades
Polimelia	Presencia de un número de extremidades mayor al normal
Taumelia	Anomalia en el plano óseo
Braquidactilia	Dedos desproporcionadamente cortos
Ectrodactilia	Ausencia de partes o de dedos completos
Polidactilia	Presencia de dedos extra o supernumerarios
Sindactilia	Fusión de dos o más dedos entre sí
Apodia	Ausencia congénita de uno o ambos pies
Polipodia	Presencia de pies supernumerarios
Hiperextensión de la extremidad	Extensión de un miembro o parte más allá de su límite normal
Proyección femoral	Apéndice parecido a un dedo que crece del tejido dorsal del fémur

Tabla 1. Anomalías macroscópicas ocasionadas por *Ribeiroia ondatrae* en larvas de *Pseudacris regilla*, *Anaxyrus boreas* y *Lithobates catesbeianus* *(Runnells et al., 1977; Smith y Jones, 1980; Blood y Studdert, 1993; Trigo-Tavera y Mateos-Poumián, 1993; Trigo-Tavera, 2006; Kumar et al., 2007; Pérez-Tamayo y López-Corella, 2007).

Table 1. Macroscopic anomalies caused by *Ribeiroia ondatrae* in larvae of *Pseudacris regilla*, *Anaxyrus boreas* and *Lithobates catesbeianus* *(Runnells et al., 1977; Smith y Jones, 1980; Blood y Studdert, 1993; Trigo-Tavera y Mateos-Poumián, 1993; Trigo-Tavera, 2006; Kumar et al., 2007; Pérez-Tamayo y López-Corella, 2007).

a dispositivos de sonda magnética (magnetismo), obteniendo como resultado individuos que al llegar a la etapa larvaria presentaron las siguientes anomalías: escoliosis (curvatura lateral de la columna), bradigenesis (crecimiento retardado), extremidades supernumerarias, anoftalmia (ausencia de un ojo), edema (acumulación de líquido en el cuerpo), abrasión (herida causada por fricción) y espina bífida (malformación congénita del tubo neural, en el cual hay un cierre defectuoso de los arcos vertebrales, a través del cual la médula espinal y las meninges pueden sobresalir [Blood y Studdert, 1993]). Según la OMS, las fuentes antropogénicas de radiaciones electromagnéticas las constituyen las antenas utilizadas para la transmisión de señales de televisión, de radio y de telefonía celular, por lo tanto, poblaciones de anfibios que habiten cerca de este tipo de estructuras, podrían verse afectadas.

Temperatura

Anfibios sometidos a estrés térmico también presentan anomalías. Por ejemplo, Elsdale et al. (1976) reportan que larvas de *Xenopus* que fueron puestas por diferentes periodos de tiempo en agua a 37°C sufrieron anomalías visibles en la segmentación de las somitas.

Depredación

Sessions y Ballengeé (2010) mencionan que los intentos de depredación por parte de larvas de libélulas hacia larvas de anfibios son también un factor que ocasiona anomalías, en este caso, la ausencia de una extremidad que fue arrancada de la larva del anfibio, dejándolo vulnerable a depredadores por la incapacidad de nadar correctamente, hecho que reportan a partir del análisis de poblaciones naturales de *Rana cascadae*.

Anomalías por exposición a contaminantes

La contaminación es la entrada, acumulación y aumento de una gran cantidad de sustancias que entran al ambiente o a un ser vivo y que sobrepasan la capacidad de éste para deshacerse de ellas, por lo que lo convierten en inseguro o en no apto para su uso (Senent, 1973; Orozco-Barrenetxea, 2003; Albert, 2008). Existen muchos tipos de contaminantes y en consecuencia muchos tipos de contaminación, por lo que también hay muchas maneras de medirla en los seres vivos. En esta sección se abordan dos tipos de contaminantes químicos, los interruptores endócrinos y los metales pesados. Dentro de las principales herramientas para medir la concentración, acumulación y efectos de contaminantes químicos en un ser vivo están la morfometría, la histoquímica y la espectroscopía. Puesto que este capítulo se enfoca en las anomalías macroscópicas, la herramienta más útil en este caso es la morfometría que puede ser de gran ayuda en estadios tempranos del desarrollo para conocer si determinado

contaminante ocasiona o no un cambio en el tamaño de una estructura anatómica o bien de todo el organismo (Severtsova et al., 2012a).

Interruptores endócrinos

Un interruptor endócrino es aquella sustancia química, ajena al organismo, capaz de alterar el equilibrio hormonal del individuo afectado, pudiendo ocasionar defectos durante el desarrollo (Gilbert y Epel, 2009). Estas sustancias pueden ser herbicidas, fungicidas, insecticidas, nematocidas o sustancias químicas de uso industrial como algunos metales, y debido a que son arrojados al ambiente se les puede encontrar en el aire, agua, suelo o alimentos (Colborn et al., 1993).

En 2003, Bevan et al, investigaron el efecto de los estrógenos ambientales a diferentes dosis en el desarrollo temprano de *Xenopus laevis*. Los autores encontraron individuos con curvatura de la espina, cola incompleta, con glándulas con forma de “pico de pollo” en la cabeza, somitas subdesarrolladas, abdomen hinchado y desprendimiento de la epidermis.

La Atrazina, 2-cloro-4-(etilamina)-6-(isopropilamina)-1,3,5-triazina, es un herbicida artificial ampliamente utilizado para controlar el crecimiento de malas hierbas en la agricultura, interfiriendo en el transporte de electrones durante el proceso de la fotosíntesis. Larvas de *X. laevis* que están en contacto con este producto químico desarrollan anomalías en las extremidades, intestinos y cabeza, además de daños en cerebro (Lenkowski et al., 2008).

El triclosán es un antibiótico y antimicótico usado en cosméticos, jabones, pastas dentales, desodorantes, enjuagues bucales y desinfectantes que actúa como interruptor endócrino y que afecta a larvas de *Pelophylax perezi* cuando entran en contacto con esta sustancia. Las larvas presentan retardo en el desarrollo ocular y en el desarrollo en general (Martins et al., 2017).

Metales pesados

No hay una definición universal de metales pesados, sin embargo, en general, se consideran metales pesados aquellos que tienen una densidad mayor a 5 g/ml, pero también aquellos que podrían causar daños en la salud de los organismos. Ejemplos de metales pesados son plomo (Pb), hierro (Fe), mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobalto (Co), arsénico (As) (metaloide), antimonio (Sb), níquel (Ni), zinc (Zn), cobre (Cu), plata (Ag), estaño (Sn), berilio (Be), bario (Ba), selenio (Se), manganeso (Mn), magnesio (Mg), talio (Tl), vanadio (V) y aluminio (Al) (Moreno-Sánchez y Devars, 1999).

Larvas de *Lithobates catesbeianus* que viven en cuerpos acuáticos contaminados con metales pesados como As, Cd, Cr, Cu y Se, además de cenizas de carbón, sufren de anomalías en la cavidad oral, impidiéndoles alimentarse adecuadamente. Las anomalías reportadas son ausencia de algunos dientes y anomalías en las papilas labiales (Rowe et al., 1996). En 1998, Burkhart et al. hicieron un estudio exhaustivo, en el cual tomaron muestras de agua de varios lagos de Minnesota, Estados Unidos, y vieron la capacidad de esta agua de generar anomalías en embriones y larvas de *X. laevis*. Los análisis químicos del agua mostraron que contenía una gran cantidad de metales pesados (Al, Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Mg, Hg, Ni, Se, Ag, Zn, Tl y V), además de otros metales como calcio (Ca), potasio (K) y sodio (Na). Registraron anomalías en ojos, cara, cerebro, notocorda, cola e intestinos, además de edema, subdesarrollo general,

hiperplasia, evisceración e hipognatia (mandíbula inferior subdesarrollada).

La contaminación por plomo es un problema mundial, ya que el plomo es un metal natural, sin rol biológico conocido, y un contaminante muy común, del cual 4 millones de toneladas métricas se usan cada año para para fabricar baterías, aleaciones, municiones, pigmentos, entre otras cosas, además, el plomo tiende a bioacumularse en el organismo causando daños en el sistema nervioso, circulatorio, renal y reproductivo (Eisler, 2000). Se ha demostrado que el contacto con plomo ocasiona anomalías esqueléticas en larvas de *Lithobates sphenoccephalus*, tales como acortamiento de huesos como el fémur y el húmero, escoliosis (desviaciones laterales de la columna), clinodactilia (dedos deformes o retorcidos), braquimelia y ectromelia

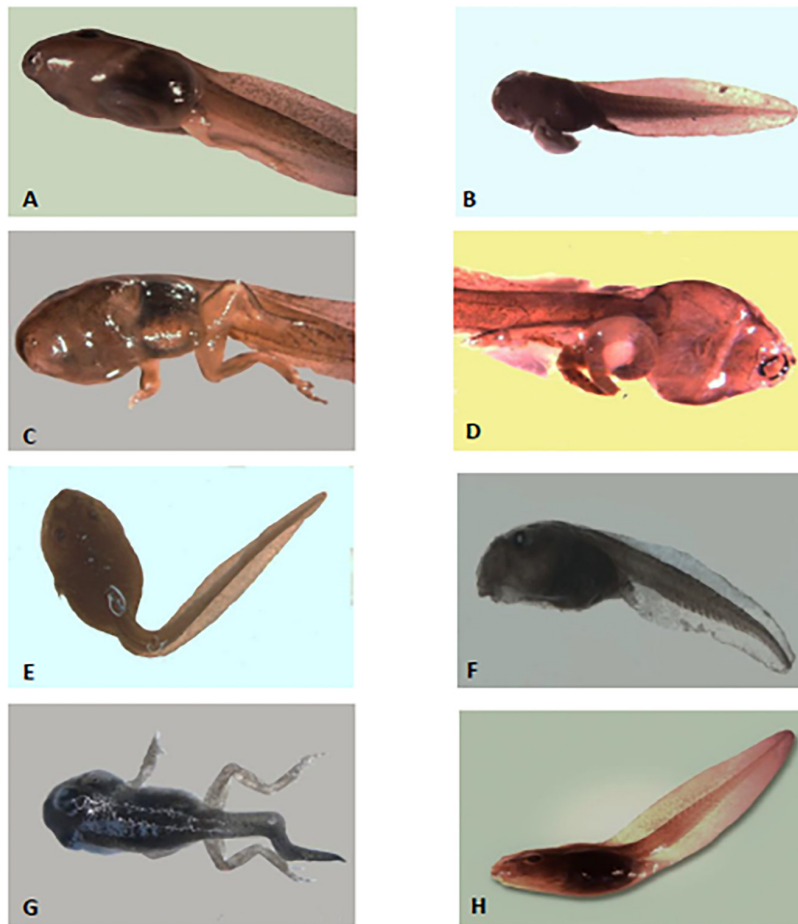


Figura 1. Anomalías en larvas de *Rana arvalis*. A, C) Ausencia de extremidades. B, D) Intestinos fuera de la cavidad abdominal. E, G) Curvatura lateral de la cola. F, H) Curvatura dorso-ventral de la espina (Tomado de Aguillón-Gutiérrez, 2012).

Figure 1. Anomalies in larvae of *Rana arvalis*. A, C) Absence of limbs. B, D) Bowels outside the abdominal cavity (gastrochisis). E, G) Lateral curvature of the tail. F, H) Dorso-ventral curvature of the spine (Taken from Aguillón-Gutiérrez, 2012).

(Sparling et al., 2006).

Aguillón-Gutiérrez (2012) reporta diversas anomalías en larvas de *Rana arvalis* que fueron expuestas a plomo y hierro (6 g/l cada metal). Las anomalías registradas fueron la ausencia de la extremidad posterior izquierda (Fig. 1A), la ausencia de la extremidad anterior izquierda (Fig. 1C), intestinos fuera de la cavidad abdominal (vista lateral) (Fig. 1B), intestinos fuera de la cavidad abdominal (vista ventral) (Fig. 1D), curvatura en la base de la cola (Fig. 1E), curvatura en la parte media de la cola (Fig. 1G), curvatura de la espina en dirección ventral (Fig. 1F) y curvatura de la espina en dirección dorsal (Fig. 1H).

En la ciudad de Moscú, Rusia, y en sus alrededores se analizaron larvas de *Rana temporaria* y de *R. arvalis* que se desarrollaron en ambientes contaminados por metales pesados. En ellas se encontraron una gama muy diversa de anomalías y diferentes combinaciones de éstas. Estas larvas presentaron curvatura de la espina, desarrollo lento, daños en la piel, edema, desordenes de la pigmentación y anomalías en agallas. Cabe

mencionar que algunos individuos tuvieron varias anomalías, y en ocasiones no era posible distinguir cada una de ellas (Severtsova et al., 2012b). Larvas de *Bufo bufo* y de *R. temporaria* que fueron puestas en contacto con plomo y hierro, mostraron una coloración gris y rojiza respectivamente de las vísceras, en particular del intestino, condición que puede ser observada macromorfológicamente (Severtsova et al., 2013). En el caso de larvas de *R. temporaria*, *R. arvalis* y *B. bufo* que igualmente fueron puestas en contacto con plomo y hierro, se observó que algunos individuos mostraron un desarrollo lento y en promedio alcanzaron un menor tamaño a los individuos del grupo control (Severtsova y Aguillón-Gutiérrez, 2013).

Aguillón-Gutiérrez y Ramírez-Bautista (2015) realizaron un bioensayo en el cual colocaron larvas de *Dryophytes plicatus* en contacto con agua sin metales pesados (grupo control), donde la mayoría de los individuos resultaron sin anomalía alguna (Fig. 2A), y en contacto con agua con metales pesados (plomo y hierro a una concentración de 3.7 g/l cada metal) (grupos experimentales), donde se observaron las siguientes anomalías

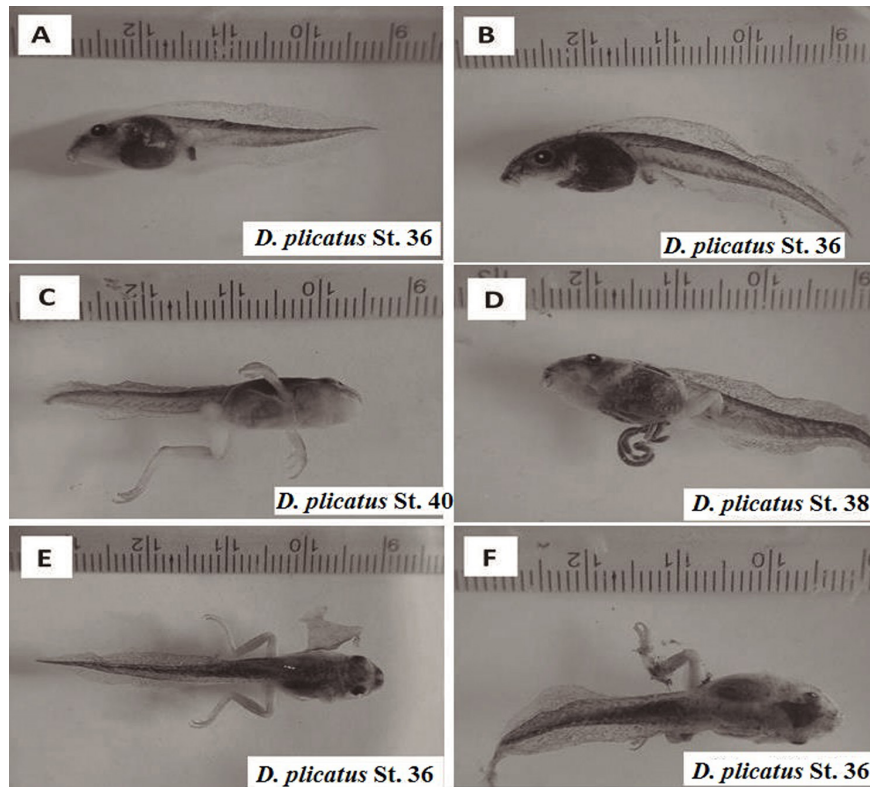


Figura 2. Larvas de *Dryophytes plicatus* A) Individuo normal, B) Curvatura de la espina, C) Ausencia de la extremidad posterior derecha, D) Intestinos fuera de la cavidad abdominal, E) Anomalía cutánea, desprendimiento de piel, F) Anomalía en la pigmentación. Tomado de Aguillón-Gutiérrez y Ramírez-Bautista (2015).

Figure 2. Larvae of *Dryophytes plicatus* A) Normal individual, B) Curvature of the spine, C) Absence of the right hind limb, D) Intestines outside the abdominal cavity, E) Cutaneous anomaly, skin detachment, F) Abnormality in pigmentation. Taken from Aguillón-Gutiérrez and Ramírez-Bautista (2015).

en algunos de los individuos: curvatura de la espina (Fig. 2B), ausencia de extremidades (Fig. 2C), intestinos fuera de la cavidad abdominal (Fig. 2D), así como anomalías cutáneas (Fig. 2E) y de la pigmentación (Fig. 2F).

El cromo es un metal pesado tóxico usado en la industria de la peletería, del cemento, de los pigmentos y de los preservadores de madera. Los efectos del cromo en animales incluyen retraso en el crecimiento y en el desarrollo, efectos hematológicos, histológicos, genotóxicos y la muerte. Larvas del sapo común asiático *Duttaphrynus melanostictus* que fueron expuestas a cromo presentaron retraso en el crecimiento, cifosis (curvatura de la columna en un plano dorso-ventral) y escoliosis (Fernando et al., 2016).

Anomalías por exposición a factores desconocidos

Anomalía P

Rostand y Tetry (1972) investigaron larvas de anfibios con una anomalía a la cual llamaron "P". Esta anomalía es un síndrome polimórfico que afecta ranas paleárticas del género *Pelophylax*. Esta condición es en realidad un conjunto de anomalías entre las cuales se encuentran la polidactilia, la braquimelia, tumores inguinales, excrecencias óseas y polimelia. Al parecer no existen factores genéticos involucrados en esta anomalía, ni ha sido comprobado que la cause un organismo infeccioso o algún factor ambiental (Rostand y Tetry, 1972; Dubois, 2017).

Síndrome de miembros débiles

Aguilar et al. (2005) reportaron un síndrome llamado "Síndrome de los miembros débiles" en larvas de anuros de las familias Dendrobatidae e Hylidae criadas en cautiverio. En este síndrome las extremidades son muy delgadas, por lo que no son funcionales y limitan el movimiento de los renacuajos. Los autores mencionan que la probable etiología son factores nutricionales.

CONCLUSIONES

Como se pudo apreciar a lo largo del presente artículo, las anomalías macroscópicas en larvas de anuros tienen diversas etiologías y son muy variadas en cuanto su efecto en el individuo y en cuanto a la estructura morfológica que afectan. Algunas anomalías probablemente no tienen solamente una etiología, sino una combinación de factores que las propicia, por ejemplo, factores genéticos, ambientales, infecciosos o antrópicos (contaminación). También existen anomalías cuya etiología es desconocida, por lo que se debe hacer un esfuerzo por investigar sus causas. Son aun relativamente pocas especies

de anuros las estudiadas desde este aspecto que combina áreas como la herpetología, ecología, embriología (biología del desarrollo), morfología, ecotoxicología y patología. Conocer las anomalías que presentan los anuros en etapas tempranas del desarrollo, puede ser de ayuda significativa en los programas de conservación para estas especies, pues gran parte de la mortalidad en este grupo biológico se da precisamente en estas etapas. Es importante mencionar también la relevancia que tiene lo anfibios como bioindicadores de la calidad y salud ambiental, pues por sus características biológicas, son particularmente vulnerables a alteraciones en su medio. Otro aspecto a destacar es el uso que se le da a los anfibios como modelos de investigación biomédica y ecotoxicológica, pues al ser vertebrados permiten un conocimiento más profundo de anomalías y patologías del desarrollo, sin la necesidad de experimentar con vertebrados superiores. Sin duda, un entendimiento mejor de las anomalías en anfibios, sus causas y sus efectos, nos ayudará a tener un panorama más amplio de la naturaleza de estos organismos, de sus historias de vida, de sus dinámicas poblacionales, de su interacción con otros seres vivos, y del impacto, que nosotros como seres humanos hemos tenido sobre ellos.

Acknowledgements.— Al Laboratorio de Ontogénesis Evolutiva del Departamento de Biología Evolutiva de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Estatal de Moscú M. V. Lomonosov. Al Dr. Aurelio Ramírez Bautista y a todo su equipo de trabajo del Laboratorio de Ecología de Poblaciones del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Al CONACYT por la beca otorgada durante el postdoctorado.

El número de permiso de colecta para el caso de *Hyla plicata* (*Dryphytes plicatus*) es el siguiente: SGPA/DGVS/02419/13.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, R., S.M. Hernández-Divers, y S.J. Hernández-Divers. 2005. Atlas de medicina, terapéutica y patología de animales exóticos. Intermédica. Buenos Aires, Argentina.
- Aguillón-Gutiérrez, D. R. 2012. Investigación sobre la influencia de contaminación antropogénica en cuerpos acuáticos de desove en el desarrollo postembrionario de tres especies de anfibios anuros. Tesis de doctorado. Universidad Estatal de Moscú M. V. Lomonosov, Moscú, Rusia.
- Aguillón-Gutiérrez, D.R. 2018. Anfibios en ambientes antropizados.

- Pp: 373–390. En: A. Ramírez-Bautista y R. Pineda-López (Eds.), *Ecología y conservación de fauna en ambientes antropizados*. REFAMA. Querétaro, México.
- Aguillón-Gutiérrez, D.R., D. Lazcano-Villarreal, R. Ramírez-Romero, A. Aguirre-Ramos, J.J. Zarate-Ramos, y A. Wong-González. 2007. Bacterias cloacales y evaluación física de la herpetofauna del Parque Ecológico Chipinque. *Ciencia UANL* 10:168–174.
- Aguillón-Gutiérrez, D.R. y A. Ramírez-Bautista. 2015. Anomalías frecuentes en una población de *Hyla plicata* (Anura: Hylidae) expuesta a plomo y fierro durante el desarrollo postembrionario. *Biocyt* 8:515–529.
- Albert, L.A. 2008. *Curso básico de toxicología ambiental*. Limusa. Ciudad de México, México.
- Allentoft, M.E. y J. O'Brien. 2010. Global amphibian declines, loss of genetic diversity and fitness: a review. *Diversity* 2:47–71.
- Balinsky, B.I. 1978. *Introducción a la embriología*. Omega. Barcelona, España.
- Becerril-Flores, M.A. 2014. *Parasitología médica*. 4ª edición. McGrawHill. Ciudad de México, México.
- Bevan, C.L., D.M. Porter, A. Prasad, M.J. Howard, y L.P. Henderson. 2003. Environmental estrogens alter early development in *Xenopus laevis*. *Environmental Health Perspectives* 111:488–496.
- Blaustein, A.R., D.G. Hokit, y R.K. O'Hara. 1994. Pathogenic fungus contributes to amphibian losses in the Pacific Northwest. *Biological Conservation* 67:251–254.
- Blaustein, A.R., y P.T.J. Johnson. 2003. The complexity of deformed amphibians. *Frontiers in Ecology and Environment* 1:87–94.
- Blaustein, A.R., J.M. Kiesecker, D.P. Chivers, y R.G. Anthony. 1997. Ambient UV-B radiation causes deformities in amphibian embryos. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 94:13735–13737.
- Blaustein, A.R., J.M. Romansic, E.A. Scheessele, B.A. Han, A.P. Pessier, y J.E. Longcore. 2005. Interspecific variation in susceptibility of frog tadpoles to the pathogenic fungus *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Conservation Biology* 19:1–9.
- Blaustein, A.R. y D.B. Wake. 1995. The puzzle of declining amphibian populations. *Scientific American* 272:52–57.
- Blood, D.C. y V.P. Studdert. 1993. *Diccionario de veterinaria*. Interamericana-McGraw-Hill. Madrid, España.
- Bradford, D.F. 1991. Mass mortality and extinction in a high-elevation population of *Rana muscosa*. *Journal of Herpetology* 25:174–177.
- Burkhart, J.G., G. Ankley, H. Bell, H. Carpenter, D. Fort, D. Gardiner, H. Gardner, R. Hale, J.C. Helgen, P. Jepson, D. Johnson, M. Lannoo, D. Lee, J. Lary, R. Levey, J. Magner, C. Meteyer, M.D. Shelby, y G. Lucier. 2000. Strategies for assessing the implications of malformed frogs for environmental health. *Environmental Health Perspectives* 108:83–90.
- Burkhart, J.G., J.C. Helgen, D.J. Fort, K. Gallagher, D. Bowers, T.L. Propst, M. Gernes, J. Magner, M.D. Shelby, y G. Lucier. 1998. Induction of mortality and malformation in *Xenopus laevis* embryos by water sources, associated with field frog deformities. *Environmental Health Perspectives* 106:841–848.
- Carter, G.R., y M.M. Chengappa. 1994. *Bacteriología y micología veterinarias: Aspectos esenciales*. 2ª edición. Manual Moderno. Ciudad de México, México.
- Cogger, H.G. y R.G. Zweifel. 1992. *Reptiles y anfibios*. Lunweg. Barcelona, España.
- Colborn T., F.S. Saal y Soto A.M. 1993. Developmental effects of endocrine disrupting chemicals in wildlife and humans. *Environmental Health Perspectives*. 101:378–394.
- Crump, M.L. y L.O. Rodríguez. 2001. Los anfibios están desapareciendo de América Latina. Pp. 170–171. En R. Primack, R. Rozzi, P. Feinsinger, R. Dirzo y F. Massardo (Eds.), *Fundamentos de conservación biológica. Perspectivas latinoamericanas*. Fondo de Cultura Económica. Ciudad de México, México.
- Cruz-Elizalde, R., A. Ramírez-Bautista, D.R. Aguillón-Gutiérrez, I. Magno-Benítez, y R. Hernández-Austria. 2017. Principales amenazas para la biodiversidad y perspectivas para su manejo y conservación en el estado de Hidalgo: El caso de los anfibios y reptiles. Pp. 577–590. En: A. Ramírez-Bautista, A. Sánchez-González, G. Sánchez-Rojas, y C. Cuevas-Cardona. *Biodiversidad del Estado de Hidalgo Tomo II*. UAEH. Hidalgo, México.
- Dabagyan, N.V. y L.A. Sleptzova. 1975. Common frog (*Rana temporaria* L.). Pp. 442–462. En Astaurov B.L. (Ed.), *Modelos en*

- biología del desarrollo. Nauka. Moscú, Rusia. (En ruso).
- Daszak, P., L. Berger, A.A. Cunningham, A.D. Hyatt, D.E. Green, y R. Speare. 1999. Emerging infectious diseases and amphibian population declines. *Emerging Infectious Diseases* 5:735–748
- Dubois, A. 2017. Rostand's anomaly P in Palaearctic green frogs (Pelophylax) and similar anomalies in amphibians. Pp. 49–56. En: K. Henle, y A. Dubois (Eds.), *Studies on anomalies in natural populations of amphibians*. *Mertensiella* 25: 9–48. Frankfurt, Alemania.
- Ellinger, M.S. 1980. Genetic and experimental studies on a pigment mutation, Pale (Pa), in the frog, *Bombina orientalis*. *Journal of Embryology and Experimental Morphology* 56:125–137.
- Elsdale, T., M. Pearson, y M. Whitehead. 1976. Abnormalities in somite segmentation following heat shock to *Xenopus* embryos. *Journal of Embryology and Experimental Morphology* 35:625–635.
- Emerson, H. y C. Norris. 1905. Red leg, an infectious disease of frogs. *Journal of Experimental Medicine* 7:32–58.
- Eisler R. 2000. Handbook of chemical risk assessment health hazards to humans, plants and animals. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 51:458–466.
- Fernando, V.A., J. Weerasena, G.P. Lakrai, I.C. Perera, C.D. Dangalle, S. handunnetti, S. Premawansa, M.R. Wijesinghe. 2016. Lethal and sub-lethal effects on the Asian common toad *Duttaphrynus melanostictus* from exposure to hexavalent chromium. *Aquatic Toxicology* 177:98–105.
- Frost, D.R. 2017. *Amphibian Species of the World: an Online Reference*. Version 6.0. <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>. American Museum of Natural History, New York, USA. [Consultado el 31 de enero de 2018].
- Garner, T.W.J., C.J. Briggs, J. Bielby, y M.C. Fisher. 2012. Determining when parasites of amphibians are conservation threats to their hosts: Methods and perspectives. Pp. 521–537. En: A.A. Aguirre, R.S. Ostfeld, y P. Daszak (Eds.) *New directions in conservation medicine. Applied cases of ecological health in practice*. Oxford. New York, USA.
- Gilbert, S.F. 2000. *Developmental biology*, 6th edition. Sinauer. Massachusetts, USA.
- Gilbert, S.F. y D. Epel. 2009. *Ecological developmental biology: Integrating epigenetics, medicine and evolution*. Sinauer. Massachusetts, USA.
- Gosner, K.L. 1960. A Simplified Table for Staging Anuran Embryos and Larvae with Notes on Identification. *Herpetologica* 16:183–190.
- Gratzek, J.B. 1980. Características generales de los virus. Pp. 585–598. En: I.A. Merchant, y R.A. Packer (Eds.) *Bacteriología y virología veterinarias*. Editorial Acribia. 3ª edición. Zaragoza, España.
- Gray M.J. y V.G Chinchar. 2015. *Ranaviruses. Lethal pathogens of ectothermic vertebrates*. Springer. Heidelberg, Alemania.
- Gray, M.J., D.L. Miller, y J.T. Hoverman. 2009. Ecology and pathology of amphibian Ranaviruses. *Diseases of Aquatic Organisms* 87:243–266.
- Griffiths, A.J.F., J.H. Miller, D.T. Suzuki, R.C. Lewontin, y W.M. Gelbart. 1998. *Genética*. 5ª edición. McGrawHill-Interamericana. 1998. Madrid, España.
- Halliday, T. y K. Adler. 2007. *La gran enciclopedia de los anfibios y reptiles*. Libsa. Madrid, España.
- Henle, K., A. Dubois, y V. Verzhinin. 2017. Commented glossary, terminology and synonymies of anomalies in natural populations of amphibians. Pp. 9–48. En: K. Henle, y A. Dubois (Eds.), *Studies on anomalies in natural populations of amphibians*. *Mertensiella* 25: 9–48. Frankfurt, Alemania.
- Henle, K., B. Mester, S. Lengyel y M. Puky. 2012. A review of a rare type of anomaly in amphibians, tail duplication and bifurcation, with description of three new cases in European species (*Triturus dobrogicus*, *Triturus carnifex* and *Hyla arborea*). *Journal of Herpetology* 46:451–455.
- Hird, D.W., S.L. Diesch, R.G. McKinnell, E. Gorham, F.B. Martin, S.W. Kurtz, y C. Dubrovlny. 1981. *Aeromonas hydrophila* in wild-caught frogs and tadpoles (*Rana pipiens*) in Minnesota. *Laboratory Animal Science* 31:166–169.
- Hird, D.W., S.L. Diesch, R.G. McKinnell, E. Gorham, F.B. Martin, C.A. Meadows, y M. Gasiorowski. 1983. *Enterobacteriaceae and Aeromonas hydrophila* in Minnesota frogs and tadpoles (*Rana pipiens*). *Applied and Environmental Microbiology* 46:1423–1425.

- Hulvey, J.P., D.E. Padgett, y J.C. Bailey. 2007. Species boundaries within *Saprolegnia* (Saprolegniales, Oomycota) based on morphological and DNA sequence data. *Mycologia* 99:421–429.
- Johnson, P.T.J., K.B. Lunde, E.G. Ritchie, y A.E. Launer. 1999. The effect of trematode infection on amphibian limb development and survivorship. *Science* 284:802–804.
- Johnson, P.T.J., K.B. Lunde, E.G. Ritchie, J.K. Reaser y A.E. Launer. 2001. Morphological abnormality patterns in a California amphibian community. *Herpetologica* 57:336–352.
- Johnson, P.T.J., K.B. Lunde, M. Thurman, E.G. Ritchie, S.N. Wray, D.R. Sutherland, J.M. Kapfer, T.J. Frest, J. Bowerman y A.R. Blaustein. 2002. Parasite (*Ribeiroia ondatrae*) infection linked to amphibian malformations in the western United States. *Ecological Monographs* 72:151–168.
- Kamaraj B. y R. Purohit. 2014. Mutational analysis of oculocutaneous albinism: A compact review. *Bio Med research International* 1–10.
- Ke, X.L., J.G. Wang, Z.M. Gu., M. Li, y X.N. Gong. 2009. Morphological and molecular phylogenetic analysis of two *Saprolegnia* sp. (Oomycetes) isolated from silver crucian carp and zebra fish. *Mycological Research* 113:637–644.
- Kiesecker, J.M. y A.R. Blaustein. 1999. Pathogen reverses competition between larval amphibians. *Ecology* 80:2442–2448.
- Kumar, V., A.K. Abbas, y N. Fausto. 2007. *Robbins y Cotran Patología estructural y funcional*. 7ª edición. Elsevier. Madrid, España.
- Langman, J. 1976. *Embriología médica*. Interamericana. Ciudad de México, México.
- Lenkowski, J.R., J.M. Reed, L. Deininger, y K.A. McLaughlin. 2008. Perturbation of organogenesis by the herbicide atrazine in the amphibian *Xenopus laevis*. *Environmental Health Perspectives* 116:223–230.
- Levengood, W.C. 1969. A new teratogenic agent applied to amphibian embryos. *Journal of Embryology and Experimental Morphology* 21:23–31.
- Martins, D., M.S. Monteiro, A.M.V.M. Soares, y C. Quintaneiro. 2017. Effects of 4-MBC and triclosan in embryos of the frog *Pelophylax perezi*. *Chemosphere* 178:325–332.
- McDiarmid, R.W. y R. Altig. 1999. *Tadpoles: The biology of anuran larvae*. The University of Chicago press. Chicago, USA.
- Merchant, y R.A. Packer (Eds.) *Bacteriología y virología veterinarias*. Editorial Acribia. 3ª edición. Zaragoza, España.
- Miller, D., M. Gray, y A. Storfer. 2011. Ecopathology of Ranaviruses infecting amphibians. *Viruses* 3:2351–2373.
- Mohanty, S.B. y S.K. Dutta. 1988. *Virología veterinaria*. Interamericana. Ciudad de México, México.
- Moore, K.L. y T.V.N. Persaud. 1999. *Embriología clínica*. 6a edición. Mgraw Hill-Interamericana. Ciudad de México, México.
- Moreno-Sánchez, R. y S. Devars. 1999. Abundancia de los metales pesados en la biosfera. Pp. 1–10. En: C. Cervantes, y R. Moreno-Sánchez (Eds). *Contaminación ambiental por metales pesados: Impacto en los seres vivos*. AGT. Ciudad de México, México.
- Muller, E. y W. Loeffler. 1976. *Micología, manual para naturalistas y médicos*. Omega. Barcelona, España.
- Nieuwkoop, P.D. y J. Faber. 1956. Normal table of *Xenopus laevis* (Daudin): A systematical and chronological survey of the development from the fertilized egg till the end of metamorphosis. North-Holland, Amsterdam.
- Organización Mundial de la Salud. 2003. Índice UV solar mundial: Guía práctica. Documento PDF.
- Organización Mundial de la Salud. Página de internet: <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatIsEMF/en/>. Consultada en mayo de 2018.
- Orozco-Barrenetxea, C., A. Pérez-Serrano, M.N. González-Delgado., F.J. Rodríguez-Vidal, y J.M. Alfayate-Blanco. 2003. *Contaminación ambiental: Una visión desde la química*. Thomson. Madrid, España.
- Pérez-Tamayo, R. y E. López-Corella. 2007. *Principios de patología*. 4ª edición. Panamericana. Ciudad de México, México.
- Perotti, M.G., Basanta M.D., Steciow M.M., Sandoval-Sierra J.V., y Diéguez-Urbeondo J. 2013. Early beeding protects anuran eggs from *Saprolegnia* infection. *Austral Ecology* 38:672–679.
- Romansic, J.M., K.A. Diez., E.M. Higashil, J.E. Johnson, y A.R. Blaustein. 2009. Effects of the pathogenic water mold *Saprolegnia ferax* on survival of amphibian larvae. *Diseases of Aquatic Organisms* 83:187–193.

- Rostand, J. y A. Tetry. 1972. La vida. Labor. Barcelona, España.
- Rowe, C.L., O.M. Kinney., A.O. Fiori, y J.D. Congdon. 1996. Oral deformities in tadpoles (*Rana catesbeiana*) associated with coal ash deposition: effects on grazing ability and growth. *Freshwater Biology* 36:723–730.
- Runnells, R.A., W.S. Monlux, y A.W. Monlux. 1977. Principios de patología veterinaria: Anatomía patológica. CECSA. Ciudad de México, México.
- Sandoval-Sierra, J.V., M.P. Martín, y J. Diéguez-Uribeondo. 2014. Species identification in the genus *Saprolegnia* (Oomycetes): Defining DNA-based molecular operational taxonomic units. *Fungal Biology* 118:559–578.
- Senent, J. 1973. La Contaminación. Salvat. Navarra, España.
- Sessions, S.K. y B. Ballengeé. 2010. Developmental deformities in amphibians. Pp. 62–71. En: B. Ballengeé (Ed.), *Malamp: The occurrence of deformities in amphibians*. Arts catalyst. London and Yorkshire sculpture park. Wakefield, England
- Severtsova, E.A. y D.R. Aguillón-Gutiérrez. 2013. Postembryonic development of anurans in ponds littered with metal-containing refuse (simulation experiments). *Biology Bulletin* 40:738–747.
- Severtsova, E.A., D.R. Aguillón-Gutiérrez y A.S. Severtsov. 2012a. Morphometry as a method of studying adaptive regulation of embryogenesis in polluted environments. Pp. 555–572. En K.I. Sato (Ed.), *Embryogenesis*. InTech. Croacia.
- Severtsova, E.A., D.R. Aguillón-Gutiérrez, y A.S. Severtsov. 2012b. Frequent anomalies in larvae of common and moor frogs in Moscow area and in the Suburbs of Moscow, Russia. *Russian Journal of Herpetology* 19:337–348.
- Severtsova, E.A., A.I. Nikiforova, y D.R. Aguillón-Gutiérrez. 2013. Spectrochemical and histochemical analyses of tissues of grass frog and gray toad tadpoles developing under simulation of pollution by plumbum and ferrum. *Moscow University Biological Sciences Bulletin* 68:186–191.
- Scherff-Norris K.L., L.J. Livo, A. Pessier, C. Fetkavich, M. Jones, M. Kombert, A. Goebel, y B. Spencer. 2002. *Boreal toad husbandry manual*. USA.
- Sinnott E.W., L. C. Dunn y Dobzhansky T. 1961. Principios de genética. Barcelona, España.
- Smith, H.A. y T.C. Jones. 1980. Patología veterinaria. UTEHA. Ciudad de México, México.
- Sparling, D.W., S. Krest, y M. Ortiz-Santaliestra. 2006. Effects of Lead-Contaminated Sediment on *Rana sphenoccephala* Tadpoles. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 51:458–466.
- Stuart, S.N., J.S. Chanson, N.A. Cox, B.E. Young, A.S. Rodrigues, D.L. Fischman y R.W. Waller. 2004. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science* 306:1783–1786.
- Thompson M.W., McInnes R.R. y Willard H.F. 1996. Genética en medicina. Masson. Ciudad de México, México.
- Tiberti, R. 2011. Widespread bacterial infection affecting *Rana temporaria* tadpoles in mountain areas. *Acta Herpetologica* 6:1–10.
- Trigo-Tavera, F.J. 2006. Patología sistémica veterinaria. McGraw-Hill-Interamericana. Ciudad de México, México.
- Trigo-Tavera, F.J. y A. Mateos-Poumián. 1993. Patología general veterinaria. 2ª edición. Interamericana-McGraw-Hill. Ciudad de México, México.
- Vázquez-Cervantes, S. 1999. Protozoarios de importancia médica y veterinaria. Universidad Autónoma de Chapingo. Ciudad de México, México.
- Vershinin, V.L. 1989. Morphological abnormalities of amphibians of the urban environment. *Russian Journal of Ecology* 3:58–65.
- Vosjoli, P. 2004. *Popular amphibians*. Herpetocultural library. Singapore.
- Wells, K.D. 2007. The ecology and behavior of amphibians. The University of Chicago Press. Chicago, USA.
- Williams, D.L. 1997. Dermatología en anfibios. Pp. 1484–1487. En: J.D. Bonagura Kirk terapéutica veterinaria de pequeños animales XII. McGrawHill-Interamericana. Ciudad de México, México.
- Williams, D.L. 1999. Anfibios. Pp. 293–304. En: P.H. Beynon y J.E. Cooper (Eds.), *Manual de animales exóticos*. Ediciones S. Barcelona, España.
- Wright K.N. y B.R. Whitaker. 2001. *Amphibian Medicine and Captive Husbandry*. Krieger. USA.

Young, B.E., K.R. Lips, J.K. Reaser, R. Ibañez, A.W. Salas, J.R. Cedeño, L.A. Coloma, S. Ron, E.L. Marca, J.R. Meyer, A. Muñoz, F. Bolaños, G. Chavez y D. Romo. 2001. Population declines and priorities for amphibian conservation in Latin America. *Conservation Biology* 15:1213–1223.

GLOSARIO

Es importante mencionar que no existe una clasificación universal de las anomalías, que un gran número de ellas aún no tiene una causa conocida y que muchas otras se considera que tienen causas multifactoriales (Moore y Persaud, 1999).

Terminología básica (Langman, 1976; Moore y Persaud, 1999):

Teratología: Es la ciencia encargada del estudio de las causas, mecanismos y patrones del desarrollo anormal.

Dismorfología: Área de la genética clínica que se encarga del diagnóstico e interpretación de patrones de defectos estructurales.

Anomalía congénita: (Congenitus, nacido con) Anormalidad estructural macroscópica. Se dividen en malformaciones, desorganización, deformaciones y displasia.

Malformación: Defecto morfológico de un órgano, parte de éste o región mayor del cuerpo que resulta de un proceso de desarrollo intrínsecamente anormal.

Desorganización: Defecto morfológico de un órgano, parte de éste o región mayor del cuerpo, que resulta de una alteración extrínseca del proceso de desarrollo normal. No es hereditaria.

Deformación: Forma, aspecto o posición anormal de una parte del cuerpo que resulta de fuerzas mecánicas.

Displasia: Organización anormal de las células y de tejidos, y de su resultado morfológico.

Herencia multifactorial: Anomalías congénitas que dependen de factores genéticos y ambientales que actúan en conjunto.

