



Metais tóxicos e seus efeitos sobre a reprodução dos animais. Revisão

Toxic metals and their effects on animal reproduction.

Aristóteles Gomes Costa¹, Alan Maia Borges², Benito Soto-Blanco^{3*}

Revisão

Resumo: No Brasil, em decorrência dos seguidos crimes ambientais envolvendo mineradoras, aumentou-se a preocupação sobre o perigo à saúde humana e animal pela exposição aos metais tóxicos. Esta revisão tem como objetivo fazer levantamento bibliográfico sobre as alterações reprodutivas em animais promovidas por metais tóxicos contaminantes do ambiente, incluindo possíveis danos permanentes ao banco genético da fauna das regiões afetadas. Os metais tóxicos, erroneamente denominados “metais pesados”, se referem a um grupo de elementos que não possuem funções fisiológicas conhecidas nos organismos vivos. Portanto, podem produzir efeitos prejudiciais para funções metabólicas, mesmo em quantidades muito pequenas. A bioacumulação e a alta reatividade de metais como mercúrio, chumbo e cádmio, entre outros, faz com que as intoxicações sejam um problema de saúde pública. O impacto da ocorrência da intoxicação por metais tóxicos no sistema produtivo brasileiro ainda é de difícil mensuração, devido à falta de informações estatísticas. Ainda, também contribuem com a destruição do banco genético animal, principalmente da fauna silvestre, uma vez que tais animais são expostos aos metais tóxicos devido à proximidade com as áreas contaminadas com seu habitat natural.

Palavras chave: metais pesados, água de dessedentação, perdas reprodutivas animal, eixo hipotálamo-hipofisário-gonadal, intoxicação.

Abstract: In Brazil, as a result of the ongoing environmental crimes involving mining companies, concern was raised about the risk to human and animal health from exposure to toxic metals. This review aims to make a bibliographical survey about the reproductive changes in animals promoted by toxic metals contaminating the environment, including possible permanent damages to the genetic bank of the fauna of the affected regions. Toxic metals, inaccurately named "heavy metals", refer to a group of elements that have no known physiological functions in living organisms. Therefore, they can produce damaging effects on metabolic functions, even in very small amounts. Bioaccumulation and high reactivity of metals such as mercury, lead and cadmium, among others, makes poisonings a public health concern. The impact of the occurrence of toxic metals poisoning in the Brazilian livestock production is still difficult to measure, due to lack of statistical data. These metals also contribute to the destruction of the animal genetic pool, especially wildlife, since such animals are exposed to toxic metals due to contaminated areas close to their natural habitat.

Keywords: heavy metals, drinking water, animal reproductive losses, hypolamic-pituitary-gonadal axis, poisoning.

Autor para correspondência. E.Mail: * benito@ufmg.br

Recebido em 10.02.2020. Aceito em 30.05.2020

<http://dx.doi.org/10.5935/1981-2965.20200010>

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG. E-mail: aristotelesvetufmg@gmail.com

² Professor Doutor da Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG. E-mail: alanmborges@ufmg.br

³ Professor Doutor da Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG. E-mail: benito@ufmg.br

Introdução

O termo metais tóxicos (MT) se refere a um grupo de elementos que não possui funções fisiológicas benéficas nem essenciais aos organismos vivos. Portanto, produzem efeitos prejudiciais ao funcionamento metabólico, mesmo em quantidades muito pequenas. Esses elementos são genericamente conhecidos como “metais pesados”, por possuírem alto peso específico. Como os primeiros metais identificados como tóxicos e bioacumulativos, por exemplo, o mercúrio, o chumbo e o cádmio, todos com alto peso específico, fez com que os demais elementos com o mesmo comportamento passassem a ser englobados dentro da terminologia genérica de metais pesados (DUFFUS, 2002; ALKMIM FILHO, 2011).

Os metais podem provocar diversas patologias nos animais, seja pela falta, presença ou excesso. Neste sentido, os metais e os minerais são classificados em: [1] macroatomitos essenciais (sódio, potássio, cálcio, cobre, níquel e magnésio); [2] microatomitos essenciais (cromo, zinco, ferro, cobalto, manganês e níquel); [3] microcontaminantes ambientais não essenciais (arsênio, chumbo, cádmio, mercúrio, alumínio, titânio, estanho e tungstênio). O nível de toxicidade dos

metais depende da dose, do tempo de exposição e da via de exposição. Portanto, sua presença em concentrações suficientemente baixas no organismo geralmente não resulta em alterações clínicas. Ao contrário, quando sua concentração no organismo aumenta, seja de forma aguda ou crônica, provocam efeitos tóxicos, com reflexo nos sistemas reprodutivo, endócrino, neurológico e enzimático (SILVA et al., 2007).

No caso dos animais, em especial nas espécies de produção, existem alguns fatores predisponentes para o aumento da exposição aos MT em comparação aos pets. O tratamento humanizado dispensado aos últimos funciona como um mitigador de risco, enquanto os primeiros isentos desse amparo sentimental são negligenciados (CASTIEL, 1999).

A pecuária brasileira é baseada em sistemas extensivo, semi-intensivo e intensivo (confinamento) de produção, os quais diferem basicamente no nível de tecnologia empregado e na taxa de lotação animal, sendo mais expressivas nos dois últimos (OLIVEIRA, 2014). Não cabe aqui discutirmos qual é o melhor sistema para a pecuária brasileira, mas sim suas particularidades que proporcionam aos animais um possível contato com os MT. No sistema extensivo há predominância da

exploração das pastagens e ocupação de grandes áreas com menos controle e intervenção humana. Deste modo, os animais geralmente buscam seu alimento selecionando de acordo com a disponibilidade. Já nos sistemas semi-intensivo e intensivo, reconhecidos por serem mais especializados, há a concentração da produção em espaços menores e um maior controle humano sobre as variáveis de produção. No entanto, se não houver mitigação de risco de exposição a contaminantes químicos por um rigoroso processo de controle de qualidade da água para dessedentação e da dieta total dos animais, os diferentes sistemas de produção se equiparam em relação ao potencial de exposição.

No Brasil, grande parte das propriedades pecuárias utilizam mananciais superficiais como fonte de água, tanto para animais quanto para irrigação. Além disso, sistemas intensificados utilizam grandes quantidades de suplementos nutricionais, principalmente minerais, para suprir a demanda produtiva dos animais, situação muito frequente na produção de leite (SILVA et al., 2008). Existem também alternativas alimentares a base de produtos, coprodutos e resíduos agroindustriais, utilizados para substituírem as pastagens de gramíneas, na forma de silagens e

concentrados (BRANCO et al., 2002). Os suplementos alimentares, obtidos das industriais sem qualquer análise bromatológica ou físico-química, podem estar com altas concentrações de MT (SILVA et al., 2007) que afetam diretamente o metabolismo, os ovários e, conseqüentemente, o desempenho produtivo e reprodutivo dos animais.

Os riscos referentes à presença de MT como contaminantes são inerentes em uma sociedade com elevada renovação tecnológica, demandando quantidades crescentes de matérias-primas oriundas da mineração. Entretanto, o aumento da preocupação sobre o perigo a saúde pública dos MT no Brasil ocorreu apenas após a contaminação ambiental em grandes proporções em diversas regiões decorrentes das inadequadas práticas de mineração envolvendo, entre outras, as Mineradoras Samarco, Hydro Alunorte e Vale do Rio Doce. Esta revisão tem como objetivo fazer levantamento bibliográfico sobre as alterações reprodutivas em animais promovidas por MT contaminantes do ambiente, incluindo possíveis danos permanentes ao banco genético da fauna das regiões afetadas.

Fontes de metais tóxicos para animais

Entre as diversas fontes de metais tóxicos, as principais são oriundas de ações antrópicas que envolvem a mineração,

práticas industriais e agropecuárias. O estado de Minas Gerais, desde a colonização do Brasil, vem sofrendo com a exploração de minério, o que gera intensos embates entre produção mineral e conservação ambiental, uma vez que a extração do minério gera desmatamento, deslocamento de fauna e outros impactos ambientais e de saúde pública nas cidades que abrigam as minas (REZENDE, 2016). Atualmente, a mineração no Brasil tem proporcionado impactos ambientais cujos efeitos permanecerão por gerações. Exemplo de catástrofe ambiental por negligência ou ação criminosa ocorreu em 2015, na cidade de Mariana/MG, com o rompimento de uma lagoa de dejetos de mineração, a Barragem de Fundão, da Mineradora Samarco, que vitimou dezenas de pessoas e animais principalmente no subdistrito de Bento Rodrigues. Além disso, provocou danos irreparáveis ao ecossistema de diversos municípios dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, pela contaminação das águas e do solo da bacia do Rio Doce, e também danos indiretos a outros estados pela contaminação de águas marítimas que impactou diversos bancos de corais (OLIVEIRA et al., 2015; MIRANDA et al., 2017).

Em 2017, no município de Barcarena, estado do Pará, a mineradora

Hydro Alunorte foi novamente acusada de crime ambiental pelo transbordamento de uma das barragens da refinaria, que inundou comunidades ribeirinhas e quilombolas, contaminando poços artesianos, rios e igarapés (BARROS et al., 2019). Já em 2006, resultados das análises físico-químicas das águas do rio Murucupi demonstraram altos níveis de alumínio e ferro, além de pH ácido e baixos valores de oxigênio dissolvido (PEREIRA et al., 2007). Em 2009, esta mesma empresa já havia sido responsabilizada pelo órgão de fiscalização, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), por outro crime ambiental, referente à contaminação das águas do rio Murucupi e aproximadamente mais outros 35 crimes ambientais somente no município de Barcarena (HENRIQUES & PORTO, 2013). Além disso, o Relatório Final da Comissão Parlamentar de Inquérito “Danos Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Pará”, da Assembleia Legislativa do Estado do Pará, apontou fortes indícios de lançamento intencional e criminoso de efluentes não tratados nos córregos e rios por adutoras clandestinas agravando ainda mais o impacto ambiental, sendo que tal crime foi interrompido após embargo pelo Ministério Público (SABINO, 2018). Estudos sobre a exposição humana a metais tóxicos por

meio da água de consumo no município de Barcarena detectaram a presença de metais na água e no cabelo das pessoas que residem nesse município. Posteriormente, foi verificado que estas pessoas com tais metais no corpo apresentaram sintomas como, coceira, gastrite, anemia, dor de cabeça, irritabilidade e problemas respiratórios (CARNEIRO, 2014). Já em relação ao bioma e aos animais de produção, ainda não foram realizados estudos que possam mensurar o tamanho do impacto.

Em 2019, o estado de Minas Gerais novamente se viu perplexo com mais um crime ambiental, causado pela mineradora Vale do Rio Doce, com o rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão, no município de Brumadinho. A contaminação pelos metais atingiu quilômetros de rios que cortam áreas tradicionais do estado mineiro. Boa parte do rio Paraopeba está considerada morta devido à grande quantidade de lama e substâncias tóxicas que inviabilizam a existência dos organismos que ali coabitavam. Outro ponto que agrava a situação é a importância desse rio que desagua na bacia do São Francisco, bacia mais importante do estado. Além disso, o rio Paraopeba atravessa regiões como a do município de Pompéu, que tem alta concentração de propriedades

agropecuárias especializadas na produção de animais, leite, milho, cana de açúcar e diversos outros produtos agrícolas. Ademais, existe na região famílias dedicadas à produção de subsistência, principalmente famílias oriundas de políticas de acesso a terras e assentamentos quilombolas, todos diretamente afetados com sobrevivência no campo ameaçada (IBAMA, 2019).

Os processos industriais também representam importante fonte de contaminação do ambiente com MT. De fato, em estudo feito com amostras de água do rio São Francisco para avaliar o impacto de indústrias têxteis e metalúrgicas, foram realizadas mensurações das concentrações de alumínio, bário, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, níquel e zinco em quatro pontos de amostragem em duas Estações Climáticas (RIBEIRO et al., 2012). A evidência de altas concentrações de MT demonstra a necessidade da implantação de um programa de monitoramento e fiscalização, com o objetivo de acompanhar a evolução da diminuição dos teores dos metais na água, assim como no sedimento e comunidades aquáticas; desenvolver instrumentos de ação para recuperação e preservação e definir uma relação específica entre as atividades poluidoras e os riscos para a sociedade. De fato, o rio

São Francisco banha cinco estados e 521 municípios, além de ser o provedor direto de água para irrigar o maior polo industrial de produção de frutas para exportação do Brasil.

Em relação à agropecuária, setor que tradicionalmente sofre duras críticas em relação aos possíveis impactos ambientais, principalmente por estar muitas vezes erroneamente relacionada ao desmatamento e ao aquecimento global (ORTIGOZA & CORTEZ, 2009), porém quanto aos metais tóxicos não é diferente. Parte dos concentrados e suplementos nutricionais, tais como os sais minerais fornecidos diariamente para os animais, principalmente aqueles submetidos à pecuária intensiva, são subprodutos e resíduos de agroindústrias que podem apresentar elevados índices de metais (ABDALLA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2013). Indústrias sucroalcooleiras fornecem bagaço de cana, melaço, vinhaço e levedura seca, a indústria graneleira fornece maior variedade de subprodutos de uso animal, representados pelos farelos, tortas e óleos, e por fim a indústria de processamento de frutas gera como principais resíduos e coprodutos as polpas, silagens, tortas e sulcos (OLIVEIRA et al., 2013).

Alkmim Filho (2011) avaliou a presença de arsênio, cádmio e chumbo em

amostras de fígado, rim e músculo de bovinos, aves, suínos e equinos provenientes de 20 estados brasileiros. Observou que práticas agrícolas com uso de produtos químicos, incluindo fungicidas, praguicidas e herbicidas que contêm cobre, zinco, ferro, manganês e arsênio, além da correção do solo e da produção de fertilizantes com rochas fosfatadas com presença de cádmio, são as maiores fontes de contaminação para solos agrícolas. Apesar da observada tendência de incremento na contaminação pelas substâncias avaliadas ao longo dos anos, os produtos cárneos brasileiros não representam risco para o consumidor, pois atendem aos requisitos nacionais e internacionais de inocuidade alimentar.

Lima (2013), ao avaliar sangue, leite e pelo dos animais de propriedades leiteiras no estado de Goiás, verificou que tais amostras continham elevadas concentrações de MT. A provável contaminação foi pelo consumo de volumosos, gramíneas cultivadas próximo de aglomerações urbanas e industriais; os altos índices de metais eram decorrentes de fuligens e aerossóis produtos da combustão de carvão, óleos, assim como emissões veiculares, mineração, fundição, refinamento e incineração de resíduos urbanos e industriais.

Desta forma, a exposição dos animais domésticos aos MT se dá principalmente pela via digestória, pelo consumo de pastagens ou forragens cultivadas em solo contaminado, ou de concentrados e rações no caso dos animais de companhia (ALKMIM FILHO, 2011). Da mesma forma que os animais domésticos, os animais selvagens, em especial os herbívoros, são vulneráveis aos efeitos tóxicos dos metais, seja pela ingestão de forrageiras, gramíneas ou água de ambientes contaminados por práticas agrícolas desordenadas (CASTRO, 2006) ou em regiões contaminadas por rejeitos de mineração.

Alterações endócrinas ligadas à reprodução e como os metais tóxicos interferem no sistema reprodutivo

Na fisiologia da reprodução da fêmea, o hipotálamo, a hipófise e outras glândulas controlam os eventos reprodutivos em diversas espécies por meio de seus hormônios, tais como o hormônio folículo estimulante (FSH), o hormônio luteinizante (LH), o hormônio do crescimento (GH) e o hormônio tireotrófico (TSH), que podem atuar de forma direta ou indireta no desenvolvimento e na maturação dos folículos ovarianos (ADAMS et al., 1992; BUCHOLTZ, et al., 1996). Por meio de

ações coordenadas, estes hormônios, entre outros, controlam as ondas de crescimento folicular do estágio pré-antral até o folículo pré-ovulatório (SIROIS & FORTUNE, 1988; FORTUNE et al., 2004; WEBB et al., 2004).

A partir do estímulo inicial do FSH, ocorre o recrutamento de um grupo de folículos da onda (ADAMS et al., 1992). A partir daí, a ação do FSH e do LH, principalmente desse último, leva à seleção do folículo que será dominante e que controlará ativamente o crescimento dos subordinados, por meio da secreção de estradiol e inibina (FORTUNE, 1994; GINTHER et al., 1996). Com a redução nas concentrações de progesterona, o folículo dominante produz grandes quantidades de estradiol, desencadeador da manifestação comportamental do estro e da onda ovulatória do LH. Como resultado, haverá formação de um corpo lúteo responsável pela produção de progesterona, hormônio responsável pela manutenção da gestação (BORGES et al., 2003).

Os casos de intoxicação por MT estão relacionados a prejuízos na reprodução, pois alterações no sistema endócrino prejudicam a saúde ovariana dos animais e, por isso, qualquer interferência nos mecanismos de controle hormonal,

principalmente no eixo hipotalâmico-hipofisário, terá consequências negativas para o potencial reprodutivo. Ademais, estudos têm demonstrado que o simples acúmulo de metais ou substâncias com poder oxidativo compromete a função reprodutiva da fêmea (NICODEMO et al., 2008). Os aspectos clínicos e a severidade das alterações ovarianas são variáveis dependentes de tempo de exposição ao metal e da dose, além da idade, fase reprodutiva e produtiva em que o animal se encontra. Neste contexto, as alterações podem incluir puberdade precoce, disfunção anovulatória com infertilidade durante a vida reprodutiva, síndrome metabólica e virilização (DUARTE et al., 2011).

Os MT são de difícil eliminação pelo organismo, e estudos tem verificado a ocorrência da modificação de neurotransmissores do sistema nervoso central, interferindo na liberação hipotalâmica do Hormônio Liberador de Gonadotrofina (GnRH). Um bom exemplo é o mercúrio; se armazenado na hipófise, afeta a produção de gonadotrofinas com a consequente interferência no controle gonadal, tanto na função ovariana quanto testicular, proporcionando uma modificação na cascata ovulatória nas fêmeas e na produção de espermatozoides

nos machos (PACHECO-FERREIRA, 2008).

Na glândula adrenal, o mercúrio depositado na região cortical, rica em lipídios, causa o bloqueio de várias enzimas necessárias ao funcionamento normal do organismo. Nos machos, é frequente a ocorrência do hiperandrogenismo, e nas fêmeas, a síndrome do ovário policístico. Já o chumbo e o cádmio geralmente estão relacionados com alterações tireoidianas (PINHEIRO & SOUZA, 2017).

Nos ovários, o acúmulo de MT altera a produção de estradiol e de progesterona. Isso pode interferir no desenvolvimento normal do oócito, causando alterações cromossômicas embrionárias (VARGAS, 2014). O hiperandrogenismo nas fêmeas ocorre por diversas etiologias, dentre elas, os MT bioacumulados nas adrenais ocasionam um quadro funcional de desequilíbrio hormonal, possibilitando a ocorrência da síndrome do ovário policístico, hiperplasia adrenal congênita e/ou até câncer de ovários e adrenais (REHME et al., 2013). O eixo hipotalâmico-hipofisário-ovariano também é afetado por MT de forma direta ou indireta, modificando a secreção de prolactina, hormônios adrenocorticais e tireoidianos (SOARES et al., 2009).

O cádmio é um metal tóxico abundante no meio ambiente, apresentando grande aplicação industrial. Este metal possui meia-vida longa, cerca de 20 a 30 anos em humanos, acumulando-se em diversos tecidos e, em especial, nos sistemas nervoso, reprodutor e músculos. Diversos estudos indicam que as espécies reativas de oxigênio estão envolvidas nas patologias teciduais e ovarianas na intoxicação pelo cádmio, causando principalmente estresse oxidativo. No ambiente rural, o cádmio é encontrado como contaminante em alta concentração nos fertilizantes de fosfato, amplamente utilizados na agricultura e pastagens. Fato esse fundamental para refutar as evidências que relacionam a exposição a esse metal com a redução da fertilidade em ruminantes submetidos a sistemas intensivos de produção (SOARES et al., 2009).

Soares et al. (2009) demonstraram que camundongos que receberam cloreto de cádmio (2,5 e 5,0 mg/kg de peso vivo) apresentaram aumento da peroxidação lipídica no tecido ovariano, além de inibição significativa na atividade da enzima delta aminolevulinato desidratase (d-ALA-D). Foi verificada significativa diminuição das concentrações desse antioxidante nos ovários dos animais expostos, evidenciada pela alteração dos

parâmetros indicativos de estresse oxidativo, o que pode ser considerado um dos principais mecanismos da toxicidade do cádmio sobre o tecido ovariano.

O chumbo é um metal pesado naturalmente encontrado na natureza, principalmente sob a forma de galena. Suas concentrações, consideradas toleráveis, são suplantadas por sua ação antropogênica, associada à exploração agropecuária inadequada e a deposição de resíduos químicos gerados por indústrias e liberados desordenadamente no ambiente. Este elemento pode ser veiculado aos animais que utilizam dos recursos presentes no meio ambiente ou veiculado por meios antrópicos (PERES, 2009). Assim, o chumbo pode estar presente na água de bebida e em complexos minerais utilizados na suplementação alimentar dos animais, além do solo, pastagens e produtos químicos usados na aspersão de animais para o combate de ectoparasitas (SERRA-MAJEM et al., 2003; QUADROS & MARR, 2010).

O chumbo possui atividade teratogênica. Quando a gestação ocorre na presença de altas concentrações de chumbo, há risco de perdas gestacionais (abortamentos), malformações fetais, atrasos do desenvolvimento e danos neurológicos, insuficiência placentária e nascimento prematuro e baixo peso ao

nascimento (SERRA-MAJEM et al., 2003; QUADROS & MARR, 2010). Segundo Leidens (2013), estudos sugerem que a contaminação por chumbo modifica o equilíbrio pró-oxidante/antioxidante e pode afetar os sistemas de defesa antioxidante, diminuindo a integridade das membranas e do DNA espermático. De fato, o aumento de espécies reativas de oxigênio foi observado após exposição do espermatozoide e dos órgãos do sistema reprodutivo ao chumbo, em ratos (ACHARYA et al., 2003a,b; MARCHLEWICZ et al., 2007) e em humanos (KASPERCZYK et al., 2008). Este aumento foi associado à diminuição da concentração e à queda da motilidade espermática (KASPERCZYK et al., 2008), além de ter elevado o percentual de patologias espermáticas (ACHARYA et al., 2003 a,b; MISHRA & ACHARYA, 2004).

O mercúrio, o arsênio e o cádmio também aumentam os riscos de abortamentos e de natimortos (OZMEN et al., 2005). Estudos em humanos mostraram que o cádmio induz a formação de miomas uterinos, abortamentos, danos à placenta e reduz o peso da criança ao nascimento, além de ser responsável por malformações congênitas. Nos homens, especificamente, causa infertilidade por diminuição do número de espermatozoides (PINHEIRO

& SOUZA, 2017). Nos pequenos animais, o cádmio provoca principalmente insuficiência renal aguda, além de diversas outras patologias relacionadas a alterações hematológicas e bioquímicas (NELSON & COUTO, 2015).

Influência dos MT na determinação sexual e reprodução dos animais aquáticos

A fisiologia da reprodução é um conjunto de processos fisiológicos modulados diretamente por fatores ambientais, exemplo, disponibilidade de nutrientes, luminosidade, temperatura, concentração de oxigênio, taxa de lotação, pressão atmosférica (GOMEZ et al., 2005). No entanto, existe uma variedade de compostos, como medicamentos, produtos químicos, hormônios e metais tóxicos, que dispersados de maneira desordenada no ambiente, principalmente o aquático, pode direta ou indiretamente determinar o sucesso reprodutivo de uma espécie (DUARTE et al., 2011).

A determinação sexual está relacionada ao genótipo (sexo genético), enquanto a diferenciação sexual é responsável pelo desenvolvimento das gônadas (sexo gonadal ou fenotípico) (DUARTE et al., 2011). Naturalmente, em um dado momento específico de cada espécie, um mediador químico originado de um gene ou de um conjunto de genes

informa às células totipotentes em que direção se desenvolver. Uma vez que isso ocorre, o tecido pré-gonadal completa seu desenvolvimento fisiológico, determinando o sexo gonadal.

Já a expressão do sexo genotípico depende de dois eventos: a determinação sexual e a diferenciação sexual. A interação desses dois eventos resulta em dois fenótipos, macho ou fêmea, seja morfológico, comportamental ou funcional (CESAR et al., 2004).

Há diversas espécies de peixes em que as gônadas desenvolvem-se inicialmente em estruturas semelhantes a ovários, porém indiferenciadas. Nessa condição, geralmente metade dos indivíduos possivelmente possam se tornar machos ou fêmeas se as pressões de origem externas e internas ocorrerem de forma aleatória e natural. Enquanto nas espécies diferenciadas, o genótipo determina se as gônadas diferenciam-se diretamente em testículos ou ovários. Estas gônadas semelhantes a ovários, mas indiferenciadas, possibilitam a ocorrência do fenômeno da reversão sexual devido à presença de andrógenos, como a testosterona, ou inúmeros outros fatores ambientais a depender da espécie relacionada (TURNER & ROBINSON, 2000; PIFERRER, 2001). A técnica da

reversão é utilizada na aquicultura para o cultivo de larvas de tilápia com objetivo comercial, pela incorporação do hormônio masculinizante em dietas e/ou água de permanência dos animais (BOMBARDELLI & CARMINO, 2005).

Em alguns casos, a expressão ou supressão de genes em um determinado organismo pode ser influenciada pelo meio ambiente externo, exemplo de algumas espécies de peixes, em que o organismo se encontra ou se desenvolve, bem como, o ambiente interno do organismo, neste caso, podemos incluir fatores ligados ao metabolismo e a influência de hormônios. Uma grande influência ambiental interna é aquela que afeta a expressão de genes ligados ao gênero, como é o caso dos fenótipos influenciados pelo sexo e os limitados ao sexo. Temperatura, luz, medicamentos e produtos químicos são exemplos de alguns dos fatores ambientais externos que podem determinar quais genes são ligados e desligados, influenciando assim a forma como um organismo desenvolve (DAMIANI et al., 2000).

Segundo Amaral e Krebs (2011), a poluição dos mananciais por MT oriundos da mineração de carvão no estado de Santa Catarina, mesmo num processo industrial controlado não deixa de causar perdas em um ecossistema equilibrado. Desta

maneira, situações de desastre como os provocados pela Mineradora Samarco, Hydro Alunorte e Vale em vários estados brasileiros podem, de maneira drástica e precoce, determinar o futuro de muitas espécies, principalmente aquelas com distribuição restrita aos diversos mananciais afetados (BLAZON, 2018). Como exemplo do potencial impacto, em algumas espécies de quelônios das famílias Emydidae (*Deirochelys reticulata*, *Emydoidea blandingii*, *Pseudemys concina*, *P. floridana*, *P. nelsoni*, *P. texana*, *Terrapene carolina*) e Geomydidae (*Chinemys nigricans*, *C. reevesii*, *Mauremys annamansis*, *Rhinoclemmys areolata*, *R. pulcherrina*), encontradas na região amazônica, principalmente do estado do Pará, a pouca ocorrência de fêmeas durante a eclosão dos ovos e diferenciação tardia dos indivíduos comprometem o futuro desses animais (FERREIRA JÚNIOR, 2009).

Outro exemplo do quão danoso é a interferência no equilíbrio químico do ambiente aquático ocorre com uma espécie de peixe encontrada na Califórnia (*sheepshead*), os quais vivem em cardumes com cerca de 20 indivíduos, mas com apenas um macho reprodutor. No caso do líder desaparecer, a segunda maior fêmea sofre uma modificação da sua gônada, que se transforma de ovários para testículos.

Após esta transformação, também há a expressão das características fenotípicas de macho, que assumirá o comando do cardume (DAMIANI et al., 2000). A presença de compostos que impeçam a reversão sexual irá comprometer a fertilidade do cardume.

A ação dos MT no meio aquático ainda não é muito clara, porém por analogia ao ambiente fisiológico, também abundante em água, faz com que as substâncias com alto poder de reatividade tenham suas reações facilitadas. Ademais, no caso dos peixes, anfíbios e inúmeros outros animais, por viverem num ambiente de contato contínuo com mananciais ou pelo hábito alimentar, acabam se tornando um excelente modelo de pesquisa para biomagnificação trófica, por acumularem altas concentrações de metais ao longo da vida (CIPRO et al., 2018).

Considerações finais

As alterações no sistema reprodutivo por metais estão relacionadas não apenas à interferência nas reações enzimáticas em células deste sistema, mas também das glândulas endócrinas. De fato, a função reprodutiva nos indivíduos é totalmente dependente das glândulas endócrinas, as quais tem a capacidade de secretar, quando requerido, alguns dos principais hormônios da reprodução (GnRH, FSH e FH) na corrente sanguínea.

Uma vez circulantes, os hormônios atingem células-alvo distantes devido à existência de receptores específicos com alta afinidade, localizados na superfície da membrana plasmática da célula, ou no núcleo celular, procedimento que em situação de homeostase ocorre naturalmente, diferente de organismos com elevadas concentrações de MT.

Para os profissionais veterinários que avaliam casos de distúrbios reprodutivos, é importante que os MT sejam incluídos como possíveis responsáveis por casos de alterações reprodutivas por falha no eixo hipotalâmico-hipofisário-gonadal. A falha neste diagnóstico resulta em animais descartados do sistema de produção mas que poderiam ser adequadamente tratados, além da falta de implantação de medidas que visem impedir a ocorrência de novos casos.

Referências Bibliográficas

1. ABDALLA, A.L.; SILVA, J.C.F.; GODOI, A.R.; CARMO, C.A.; EDUARDO, J.L.P. Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.37, n.2, p.260-268, 2008.
2. ACHARYA, U.R.; ACHARYA, S.; MISHRA, M. Lead acetate induced cytotoxicity in male germinal cells of Swiss mice. **Industrial Health**, Kawasaki, v.41, n.3, p.291-294, 2003a.
3. ACHARYA, U.R.; RATHORE, R.M.; MISHRA, M. Role of vitamin C on lead acetate induced spermatogenesis in Swiss mice. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, Amsterdam, v.13, n.1, p.9-14, 2003b.
4. ADAMS, G.P.; MATTERI, R.L.; KASTELIC, J.P.; KO, J.C.; GINTHER, O.J. Association between surges of follicle stimulating hormone and the emergence of follicular waves in heifers. **Journal of Reproduction and Fertility**, Colchester, v.94, n.1, p.177-188, 1992.
5. ALKMIM FILHO, J.F. **Ocorrência de arsênio, cádmio e chumbo em tecidos de aves, suínos, bovinos de corte e equinos no Brasil**. 2011. 146f. Tese. (Doutorado em Ciência Animal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011.
6. AMARAL, J. E; KREBS, A. S. J. Drenagem ácida da mineração de carvão e sua interrelação com metais pesados e recarga de aquíferos na bacia carbonífera do estado de Santa Catarina. **XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**. 2011. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_PAP002685.pdf acesso 27 de abril de 2019.
7. BARROS, A.T.; ROCHA, I.J. Comunicando riscos ambientais e tecnológicos na região Amazônica: uma análise de caso do vazamento da mineradora Hydro Alunorte. **Temática**, João Pessoa, v.15, n.1, p.143-160, 2019.
8. BIAZON, T. Impactos ambientais. In: CALDAS, G. (Ed.). **Vozes e Silenciamentos em Mariana: crime ou desastre ambiental?** 2. ed. Campinas: BCCL/UNICAMP, 2018. p.158-172.
9. BOMBARDELLI, R.A; CARMINO, H. Masculinização de larvas de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus* L.) a partir de banhos de imersão com 17alfa-metiltestosterona. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.34, n.2, p.365-372, 2005.

10. BORGES, A.M.; TORRES, C.A.A.; RUAS, J.R.M.; ROCHA JÚNIOR, V.R.; CARVALHO, G.R.; FONSECA, J.F.; MARCATTI NETO, A.; ASSIS, A.J. Características da dinâmica folicular e regressão luteal de vacas das raças Gir e Nelore após tratamento com cloprostenol sódico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.32, n.1, p.85-92, 2003.
11. BRANCO, A.F.; CECATO, U.; MOURO, G.F. Avaliação técnico-econômica da suplementação de vacas leiteiras em pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE SUSTENTABILIDADE DA PECUÁRIA LEITEIRA NA REGIÃO SUL DO BRASIL, 2002, Maringá. **Anais...** Maringá: UEM/CCA/DZO-NUPEL, 2002. p.123-142.
12. BUCHOLTZ, D.C.; VIDWANS, N.M.; HERBOSA, C.G.; SCHILLO, K.K.; FOSTER, D.L. Metabolic interfaces between growth and reproduction. V. Pulsatile luteinizing hormone secretion is dependent on glucose availability. **Endocrinology**, Los Angeles, v.137, n.2, p.601-607, 1996.
13. CARNEIRO, F.F. Avaliação de Impacto à Saúde – AIS: metodologia adaptada para aplicação no Brasil / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. – Brasília: **Ministério da Saúde**, 2014. 68 p.
14. CASTIEL, L.D. **A Medida do Possível, Saúde, Risco e Tecnobiociências**. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 1999. 204p.
15. CASTRO, S.V. **Efeitos de metais pesados presentes na água sobre a estrutura das comunidades bentônicas do Alto Rio das Velhas, MG**. 2006. 110f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2006.
16. CESAR, M.P.; MURGAS, L.D.S.; ARAÚJO, R.V.; DRUMMOND, C.D. Métodos para obtenção de população monosexo na piscicultura. **Boletim Agropecuário da Universidade Federal de Lavras**, Lavras, n.69, p.1-27, 2004.
17. CIPRO, C.V.Z.; CHEREL, Y.P.; BOCHER, P. CAURANT, F.; MIRAMAND, P.; BUSTAMANTE, P. Trace elements in invertebrates and fish from Kerguelen waters. **Polar Biology**, New York, v.41, n.1, p.175-191, 2018.
18. DAMIANI, D.; DICHTCHEKENIAN, V.; SETIAN, N. O enigma da determinação gonadal: o que existe além do cromossomo Y? **Arquivo Brasileiro Endocrinologia Metabolismo**, São Paulo, v.44, n.3, p.248-256, 2000.
19. DUARTE, D.L.V.; MONTEIRO, D.S.; JARDIM, R.D.; SOARES, J.C.M.; VARELA-JUNIOR, A.S. Determinação sexual e maturação gonadal de fêmeas da tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) e tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*) no extremo sul do Brasil. **Acta Biológica Paranaense**, Curitiba, v. 4, n3-4, p. 87-103, 2011.
20. DUFFUS, J.H. “Heavy metals”—a meaningless term? (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, Oxford, v.74, n.5, p.793-807, 2002.
21. FERREIRA JÚNIOR, P.D. Aspectos ecológicos da determinação sexual em tartarugas. **Acta Amazonica**, Manaus, v.39, n.1, p.139-154, 2009.
22. FORTUNE, J.E. Ovarian follicular growth and development in mammals. **Biology of Reproduction**, New York, v.50, n.2, p.225-232, 1994.
23. FORTUNE, J.E.; RIVERA, G.M.; YANG, M.Y. Follicular development: the role of the follicular microenvironment in selection of the dominant follicle. **Animal Reproduction Science**, Amsterdam, v. 82-83, p.109-126, 2004.

24. GINTHER, O.J.; WILTBANK, M.C.; FRICKE, P.M.; GIBBONS, J.R.; KOT, K. Selection of the dominant follicle in cattle. **Biology of Reproduction**, New York, v.55, n.6, p.1187-1194, 1996.
25. GOMEZ, F.; LA FLEUR, S.E.; WEINER, R.I.; DALLMAN, M.F.; EL MAJDOUBI, M. Decreased gonadotropin-releasing hormone neuronal activity is associated with decreased fertility and dysregulation of food intake in the female GPR-4 transgenic rat. **Endocrinology**, New York, v.146, n.9, p.3800-3808, 2005.
26. HENRIQUES, A.B.; PORTO, M.F.S. A insustentável leveza do alumínio: impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v.18, n.11, p.3223-3234, 2013.
27. IBAMA. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2019.
28. KASPERCZYK, A.; KASPERCZYK, S.; HORAK, S.; OSTAŁOWSKA, A.; GRUCKA-MAMCZAR, E.; ROMUK, E.; OLEJEK, A.; BIRKNER, E. Assessment of semen function and lipid peroxidation among lead exposed men. **Toxicology and Applied Pharmacology**, New York, v.228, n.3, 378-384, 2008.
29. LEIDENS, D. **Efeitos da exposição ao chumbo no sistema reprodutivo de *Chrysomus ruficapillus* (AVES: Icteridae)**. 2013. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Fisiológicas: Fisiologia Animal Comparada) - Universidade Federal do Rio Grande, RS, 2013.
30. LIMA, D.P. **Avaliação da contaminação por metais pesados na água e nos peixes da bacia do Rio Cassiporé, Estado do Amapá, Amazônia**. 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) - Universidade Federal do Amapá, AP, 2013.
31. MARCHLEWICZ, M.; WISZNIEWSKA, B.; GONET, B.; BARANOWSKA-BOSIACKA, I.; SAFRANOW, K.; KOLASA, A.; GŁABOWSKI, W.; KURZAWA, R.; JAKUBOWSKA, K.; RAĆ, M.E. Increased lipid peroxidation and ascorbic acid utilization in testis and epididymis of rats chronically exposed to lead. **Biomaterials**, Dordrecht, v.20, n.1, p.13-19, 2007
32. MIRANDA, M.G.; FRIEDE, R.; RODRIGUES, A.C.; ALMEIDA, D.S. Cadê a minha cidade, ou o impacto da tragédia da Samarco na vida dos moradores de Bento Rodrigues. **Interações**, Campo Grande, v.18, n.2, p.3-12, 2017.
33. MISHRA, M.; ACHARYA, U.R. Protective action of vitamins on the spermatogenesis in lead-treated Swiss mice. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Stuttgart, v.18, n.2, p.173-178, 2004.
34. NELSON, R.W.; COUTO, C.G. **Medicina Interna de Pequenos Animais**. 5.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 1512 p.
35. NICODEMO, M.L.F.; SERENO, J.R.B.; AMARAL, T.B. **Minerais na eficiência reprodutiva de bovinos**. Documentos 80. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008. 60p.
36. OLIVEIRA, R.L. **Bovinocultura de Corte - Desafios e Tecnologias**. Salvador: Edufba, 2014. 723p.
37. OLIVEIRA, R.L.; LEÃO, A.G.; ABREU, L.L. Alimentos alternativos na dieta de ruminantes. **Revista Científica de Produção Animal**, Areia, v.15, n.2, p.141-160, 2013.
38. OLIVEIRA, C.; CREPALDI, D.V.; PINTO SOBRINHO, F.A.; INOJOSA, F.C.P.; PAIVA, F.A.L.;

- MASCARENHAS, G.M.; JUCÁ, H.C.L.; MORAIS, J.C.M.; MACHADO, M.L.; KOSOSKI, R.M.; CALIXTO, R.J. **Laudo técnico preliminar - Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. 2015. Disponível em: <www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso: 23 de Junho de 2018.
39. ORTIGOZA, S.A.G.; CORTEZ, A.T.C. **Da Produção ao Consumo: impactos socioambientais no espaço urbano**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. 146p.
40. OZMEN, O, MOR, F.; SAHINDURAN, S.; UNSAL, A. Pathological and toxicological investigations of chronic nitrate poisoning in cattle. **Toxicological & Environmental Chemistry**, Abingdon, v.87, n.1, p.99-106, 2005.
41. PACHECO-FERREIRA, H. Epidemiologia das substâncias químicas neurotóxicas. In: MEDRONHO, R.A.; BLOCH, K.V.; LUIZ, R.R.; WERNECK, G.L. (Eds.). **Epidemiologia**. São Paulo: Atheneu, 2008. p.577-586.
42. PEREIRA, S.F.; LIMA, M.A.; FREITAS, K.H.; MESCOUTO, C.S.; SARAIVA, A.F. Estudo químico ambiental do rio Murucupi – Barcarena, PA, Brasil, área impactada pela produção de alumínio. **Ambi-Agua**, Taubaté, v.2, n.3, p.62-82, 2007.
43. PERES, J.A. **Bovinos como bioindicadores da poluição ambiental por chumbo na região de Guarapuava/PR**. 2009. 58f. Tese (Doutorado em Medicina Veterinária) - Universidade Estadual Paulista, SP, 2009.
44. PIFERRER, F. Endocrine sex control strategies for the feminization of teleost fish. **Aquaculture**, Amsterdam, v.197, p.229- 281, 2001.
45. PINHEIRO, M.O.; SOUZA, C.B. Efeitos teratogênicos dos metais pesados sobre a infertilidade humana e malformações congênitas. **UNILUS Ensino e Pesquisa**, Santos, v.14, n.35, p.47-58, 2017.
46. QUADROS, M.E.; MARR, L.C. Environmental and human health risks of aerosolized silver nanoparticles. **Journal of the Air & Waste Management Association**, Philadelphia, v.60, n.7, p.770-781, 2010.
47. REHME, M.F.B.; PONTES, A.G.; CORRENTE, J.E.; FRANCO JR, J.G.; PONTES, A. Contribuição do hiperandrogenismo para o desenvolvimento de síndrome metabólica em mulheres obesas com síndrome dos ovários policísticos. **Revista Brasileira de Ginecologia e Obstetrícia**, São Paulo, v.35, n.12, p.562-568, 2013.
48. REZENDE, V.L. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v.28, n.3, p.375-384, 2016.
49. RIBEIRO, E.V.; MAGALHÃES JUNIOR, A.P.; HORN, A.H.; TRINDADE, W.M. Metais pesados e qualidade da água do rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora - MG: índice de contaminação. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.20, n.1, p.49-63, 2012.
50. SABINO, C. **Relatório Final da Comissão Parlamentar de Inquérito “Danos Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Pará”**. Belém: Assembleia Legislativa do Estado do Pará, 2018. 177p.
51. SERRA-MAJEM, L.; BASSAS, L.; GARCÍA-GLOSAS, R.; RIBAS, L.; INGLÉS, C.; CASALS, I.; SAAVEDRA, P.; RENWICK, A.G. Cyclamate intake and cyclohexylamine excretion are not related to male fertility in humans. **Food Additives and Contaminants**, London, v.20, n.12, p.1097-1104, 2003.
52. SILVA, M.L.; VITTI, G.C.; TREVIZAM, A.R. Concentração de metais pesados em

grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.4, p.527-535, 2007.

Journal of Animal Science, Champaign, v.82, E-Suppl., E63-E74, 2004.

53. SILVA, H.A.; KOEHLER, H.S.; MORAES, A.; GUIMARÃES, V.A.; HACK, E.; CARVALHO, P.C.F. Análise da viabilidade econômica da produção de leite a pasto e com suplementos na região dos Campos Gerais, Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.2, p.445-450, 2008.
54. SIROIS, J.; FORTUNE, J.E. Ovarian follicular dynamics during the oestrous cycle in heifers monitored by real time ultrasonography. **Biology of Reproduction**, Champaign, v.39, n.2, p.308-317, 1988.
55. SOARES, J.; COIMBRA, A.M.; REIS-HENRIQUES, M.A.; MONTEIRO, N.M.; VIEIRA, M.N.; OLIVEIRA, J.M.; GUEDES-DIAS, P.; FONTAÍNHAS-FERNANDES, A.; PARRA, S.S.; CARVALHO, A.P.; CASTRO, L.F.; SANTOS, M.M. Disruption of zebrafish (*Danio rerio*) embryonic development after full life-cycle parental exposure to low levels of ethinylestradiol. **Aquatic Toxicology**, Amsterdam, v.95, n.4, p.330-338, 2009.
56. TURNER, G.F.; ROBINSON, R.L. Reproductive biology, mating systems and parental care. In: BEVERIDGE, M.C.M.; MCANDREW, B.J. (Eds.) **Tilapias: biology and exploitation**. Londres: Kluwer Academic Publishers, 2000. p.33-58.
57. VARGAS, L.M. **Efeito do cádmio e do seleno-furanosídeo sobre a atividade da aminolevulinato desidratase de ovário in vitro e ex vivo**. 2014. 40f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade Federal do Pampa, RS, 2014.
58. WEBB, R.; GARNSWORTHY, P.C.; GONG, J.G.; ARMSTRONG, D.G. Control of follicular growth: local interactions and nutritional influences.