

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS**  
**BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**PEDRO PAPINI DE ARAUJO**

**DESCARTE INCORRETO DE APARELHOS CELULARES:**  
**PERICULOSIDADE E IMPACTOS AMBIENTAIS**

**Porto Alegre**

**2018**

**PEDRO PAPINI DE ARAUJO**

**DESCARTE INCORRETO DE APARELHOS CELULARES:  
PERICULOSIDADE E IMPACTOS AMBIENTAIS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador(a): Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit

**Porto Alegre**

**2018**

*Artigo Científico*

Em preparação para submissão no periódico *Engenharia Sanitária e Ambiental*

**Descarte incorreto de aparelhos celulares: periculosidade e impactos ambientais**

**Pedro Papini de Araujo<sup>1</sup> e Hugo Marcelo Veit<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

<sup>2</sup>Professor do Departamento de Materiais, Escola de Engenharia, UFRGS.

Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR), Escola de Engenharia, Departamento de Materiais, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Prédio 43426, CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

**Resumo:** Os aparelhos celulares inovaram os meios de comunicação humana desde sua primeira geração (1G) na década de 1980, incorporando novas tecnologias nas gerações seguintes (2G, 3G e 4G), popularizando-os. Um único aparelho pode apresentar mais de 40 elementos químicos, alguns tóxicos ou valiosos. Devido à presença de metais tóxicos, esses resíduos podem se tornar ameaças ambientais. Os objetivos deste estudo foram classificar o resíduo de celulares 2G e 3G conforme a NBR 10004 e verificar alguns dos impactos associados a certos metais presentes nos aparelhos. Para a classificação, foi utilizada a NBR 10005 com posterior análise química das concentrações de chumbo, cromo, mercúrio e cádmio. Foi realizada uma revisão bibliográfica referente aos impactos ambientais relacionados aos metais analisados. A concentração de chumbo nos celulares 2G ficou acima do limite, classificando-os como perigosos (Classe I). O mesmo não ocorreu para celulares 3G. Possivelmente, aparelhos mais recentes estejam se adaptando a um mercado que exige menores concentrações de metais tóxicos, como a normativa europeia RoHS, porém mais estudos são necessários para confirmar tal hipótese. Diversas doenças e problemas fisiológicos estão relacionados à contaminação por metais tóxicos. Como são bioacumuladores, esses metais podem causar numerosos impactos ao ambiente ao transitarem ao longo da cadeia trófica. Existem evidências de impactos em populações e comunidades. Há argumentos que esses impactos podem ocorrer a níveis de ecossistemas ou globais. Assim, mostra-se necessário compreender o que há no resíduo de aparelhos celulares, além de conhecer o seu possível impacto, possibilitando um correto gerenciamento e destinação.

**Palavras-chave:** Resíduo eletrônico. Classificação. Bioacumulação. Ecotoxicologia. Poluição ambiental.

**Abstract:** The first generation of mobile phones (1G) innovated human communication around 1980. The subsequent generations (2G, 3G and 4G) incorporated new technologies, popularizing them. A single phone can contain over 40 chemical elements, some toxic, others valuable. Because it contains toxic metals, mobile phone waste may threaten the environment. The objectives of this study were to classify 2G and 3G phone waste according to NBR 10004 and to verify some of the impacts associated to some metals found in them. NBR 10005 was used for the classification, followed by a chemical analysis of the concentrations of lead, chromium, mercury and cadmium. A literature review was done to understand some of the impacts related to these metals. The concentration of lead in 2G phones was above the limit, classifying them as dangerous waste (“Classe I”). The same wasn’t verified for 3G phones. It’s possible that newer devices are adapting to a lead-free demanding market, like the european directive RoHS, although further studies are needed to confirm such claim. A number of diseases and physiological problems are associated with toxic metal contamination. By being bioaccumulators, toxic metals can cause many impacts to the environment as they travel along the trophic chain. There are evidences of impacts on populations and communities, possibly extending to ecosystem and global levels. Therefore, the need to understand what’s in this waste becomes evident, as is the necessity to know the environmental impacts associated with phone waste so that a correct management and destination is given to it.

**Keywords:** Electronic waste. Characterization. Bioaccumulation. Ecotoxicology. Environmental pollution.

## INTRODUÇÃO

Os telefones celulares representam uma revolução nos meios de comunicação humana desde a introdução da primeira geração de aparelhos (1G) na década de 1980, na época ainda operando de forma analógica (NEIRA *et al.*, 2006). As gerações subsequentes apenas contribuíram para o sucesso da telefonia móvel: a transição para um sistema digital na segunda geração (2G) permitiu a transmissão de dados como mensagens de texto (SMS) (DAN, 2014); a terceira geração (3G) trouxe a possibilidade de conexão à internet através de uma transmissão de dados muito mais rápida (KASPER e VEIT, 2011); a quarta geração (4G), que vivenciamos no presente, aprimorou a conexão à internet, permitindo transmissões de áudio e vídeo em alta qualidade (BHALLA e BHALLA, 2010).

Um aparelho celular é composto, basicamente, por cinco partes: a carcaça, o teclado, a bateria, a placa de circuito impresso (PCI) e a tela de cristal líquido (KASPER e VEIT, 2011). A carcaça é feita de termoplásticos como polipropileno, poliestireno de alto impacto, policarbonato e outros (PALMIERI, BONIFAZI e SERRANTI, 2014), materiais que também compõem o teclado (KASPER e VEIT, 2011). As baterias são de íons de lítio ou de hidreto metálico de níquel, comuns em diversos aparelhos eletrônicos (SILVEIRA e CHANG, 2010). A PCI de celulares é do tipo multicamada, com inserção de cobre entre as camadas de resina (YAMANE *et al.*, 2011), e é composta por metais, polímeros e cerâmicas.

As placas de circuito impresso são caracterizadas pela espessura fina, presença elevada de processadores e componentes e baixa quantidade de capacitores (PALMIERI, BONIFAZI e SERRANTI, 2014). Segundo Schlupe e colaboradores (2009), um único aparelho pode apresentar mais de 40 elementos químicos diferentes. Estes estão presentes principalmente nas PCIs: os capacitores são de tântalo, nos outros componentes e semicondutores é possível encontrar gálio, silício, selênio, germânio, titânio, índio, entre outros, e as soldas podem conter chumbo, estanho, prata e cádmio (KASPER e VEIT, 2011). Ainda é possível encontrar chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, bromo, alumínio e antimônio na composição dos polímeros, sendo utilizados como pigmentos, retardantes de chamas e outros (NNOROM e OSIBANJO, 2009). Além disso, é possível encontrar alguns metais de interesse econômico, como ouro, prata, cobre e paládio (PALMIERI, BONIFAZI e SERRANTI, 2014).

O avanço tecnológico dos telefones celulares, aliado a alterações nos tamanhos e preços dos aparelhos, levou à popularização desse meio de comunicação. Segundo dados da ANATEL (2018), no Brasil há cerca de 235 milhões de linhas de telefonia móvel ativas, número maior do que o de habitantes no país. A troca desses aparelhos por modelos mais novos é rápida, levando, em média, três anos (ECHEGARAY, 2015), e estima-se que no Brasil cerca de 10 a 20% dos celulares produzidos a cada ano são descartados (MAWAKDIYE, 2007 *apud* KASPER e VEIT, 2011) muitas vezes junto ao resíduo domiciliar (MMA, 2012).

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), caracterizados como sendo qualquer produto elétrico ou eletrônico descartado pelo usuário sem a intenção de reutilização (STEP, 2014), são o tipo de resíduo cuja geração mais cresce no mundo (CUCCHIELLA *et al.*, 2015). A reciclagem desses materiais possui elevado interesse econômico e ambiental: dos vários elementos encontrados em um eletrônico, alguns possuem alto valor de mercado, como prata, ouro e paládio, e outros são metais tóxicos, como chumbo, cádmio ou mercúrio, podendo representar graves ameaças ao meio ambiente quando não tratados corretamente (DIAS *et al.*, 2018).

A geração global de REEE está entre 30 a 50 milhões de toneladas ao ano, com uma taxa de crescimento anual entre 3 a 5% (MOHAN *et al.*, 2008 *apud* AFROZ *et al.*, 2013). Cucchiella e colaboradores (2015) afirmam, ainda, que a tendência é essa taxa aumentar no futuro próximo. Segundo dados da ONU (BALDÉ *et al.*, 2017), em 2016 foram geradas 44,7 milhões de toneladas de REEE, sendo que somente 20% foi reciclado. Os valores de geração de REEE no Brasil são difíceis de estimar, mas dados de 2014 mostram que varia entre 1,1 a 1,42 milhões de toneladas por ano (DIAS *et al.*, 2018).

Em relação a aparelhos celulares, no ano de 2016 foram geradas cerca de 435 mil toneladas deste resíduo mundialmente (BALDÉ *et al.*, 2017). No Brasil, os dados não são tão recentes: em 2009, a estimativa de geração anual era de 0,01 kg/cap (SCHLUEP *et al.*, 2009), o que equivale a cerca de 2 mil toneladas no total. Deste, apenas 2% é reciclado (NOKIA, 2009 *apud* KASPER e VEIT, 2011).

Devido à alta geração e importância econômica e ambiental dos REEE, diversos países ao redor do mundo criaram legislações específicas para lidar com eles. De acordo com a ONU (BALDÉ *et al.*, 2017), atualmente 67 países possuem algum tipo de regulamentação relacionada a equipamentos eletroeletrônicos e seu resíduo. Na União Europeia, duas

importantes leis podem ser destacadas: a RoHS e a Diretiva de REEE, adotadas em 2003 (ONGONDO, WILLIAMS e CHERRETT, 2011). A primeira, *Restriction of Certain Hazardous Substances* (Restrição de Certas Substâncias Perigosas), proíbe que sejam comercializados produtos eletrônicos com concentrações acima do limite estabelecido para chumbo, cádmio, mercúrio, cromo e retardantes de chamas. A segunda estabelece a logística reversa, ou seja, a obrigação de produtores e importadores de dar uma destinação ambientalmente adequada aos seus produtos após o uso pelo consumidor. No Japão, a HARL - *Home Appliance Recycling Law* (Lei de Reciclagem para Eletrodomésticos) -, de 2001, institui a obrigatoriedade de logística reversa para alguns eletrônicos como geladeiras, televisores e máquinas de lavar (ONGONDO, WILLIAMS e CHERRETT, 2011). Nos EUA não há uma legislação nacional, mas 20 estados já possuem legislação regional sobre REEE (ONGONDO, WILLIAMS e CHERRETT, 2011). No Brasil, o principal marco legislativo relacionado ao tema é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), que aborda todos os tipos de resíduos. Sobre REEE, a PNRS institui a logística reversa, estabelecendo, também, a responsabilidade compartilhada sobre o resíduo, que deve ser corretamente encaminhado pelo consumidor, recebido pelos comerciantes até chegar aos produtores e importadores.

Anterior à PNRS, a norma técnica NBR 10004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos de acordo com a sua periculosidade. A partir de parâmetros estabelecidos pela norma, é possível classificar um resíduo como Classe I - Perigoso, se apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade ou toxicidade; Classe II A - Não Inerte, se não apresentar as características anteriores, nem se encaixar na classe seguinte; e Classe II B - Inerte, se, ao passar por um ensaio e condições estabelecidas pela norma, mantiver os seus constituintes solubilizados dentro dos padrões de potabilidade de água, com algumas exceções. A classificação dos resíduos é uma ferramenta importante para seu correto gerenciamento e destinação final.

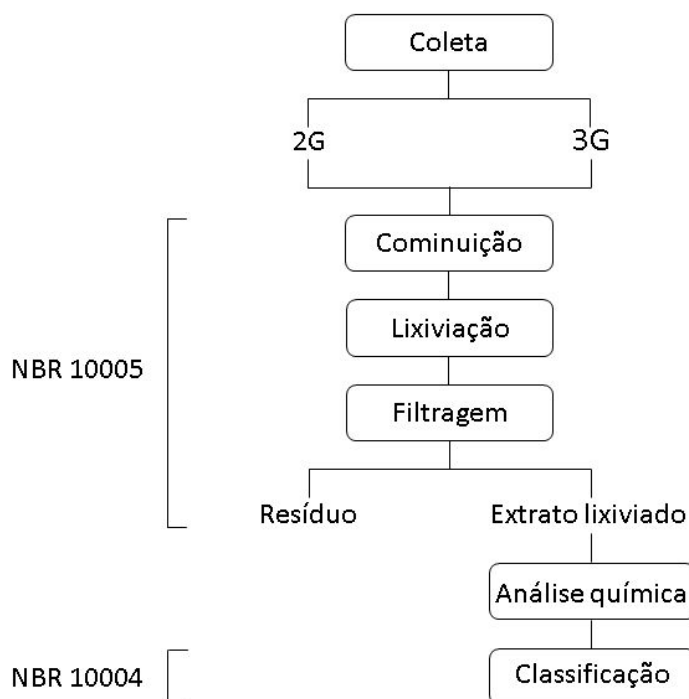
Quando não recebe um tratamento correto, um resíduo - especialmente os perigosos - pode apresentar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Se descartados incorretamente, os REEE, com sua diversa composição química, podem poluir o solo, a água ou o ar, inclusive se depositados em um aterro sanitário (SILVEIRA e CHANG, 2010). Essa poluição pode levar a impactos ambientais que podem comprometer a estrutura de comunidades e ecossistemas (NEWMAN, 2015).



Dessa forma, torna-se importante conhecer as concentrações de elementos com potencial tóxico presentes nos telefones celulares e classificar os aparelhos de acordo com a sua periculosidade. Também é necessário saber quais os possíveis impactos para o meio ambiente e à saúde humana que tais elementos podem causar, de forma a embasar políticas de incentivo ao descarte correto e à reciclagem desses materiais. Assim, o objetivo do presente estudo foi classificar quanto à periculosidade os resíduos de aparelhos celulares de geração 2G e 3G, de acordo com a NBR 10004. Além disso, foi efetuada uma revisão bibliográfica dos impactos ambientais causados por alguns dos metais tóxicos que podem ser encontrados em um celular.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado em duas etapas: na primeira, foram utilizadas a NBR 10004 e a NBR 10005 (ABNT, 2004b), além de uma análise química, para classificar o tipo de resíduo de aparelhos celulares (Figura 1); na segunda, foi feita uma pesquisa na literatura dos possíveis impactos ambientais relacionados aos metais tóxicos presentes nos celulares.



**Figura 1.** Fluxograma apresentando os processos realizados durante a primeira etapa do estudo. Em destaque, processos realizados de acordo com as referidas normas técnicas.

## **Classificação da periculosidade**

Para a primeira etapa, foram coletados celulares estragados e/ou obsoletos, separando-os de acordo com a sua tecnologia (2G ou 3G). Marca, ano de fabricação e peso de cada aparelho sem bateria (quando possível) também foram registrados. A partir de então, seguiu-se o procedimento disposto na NBR 10005, que permite classificar, ou não, um resíduo como perigoso a partir da obtenção de um extrato lixiviado do mesmo.

Para a cominuição dos aparelhos foi utilizado um triturador de facas Rone SRB 2305, que moeu os celulares em partículas de até 9 mm de diâmetro (Fig. 2). Sempre que possível, as baterias dos aparelhos foram removidas. Foi medido o peso total de celulares 2G e 3G antes e após a cominuição para quantificar o material perdido durante o processo. Os procedimentos seguintes foram realizados em duplicatas para cada geração de aparelhos, totalizando quatro amostras (2GI, 2GII, 3GI e 3GII). O processo de lixiviação foi feito com a utilização de um Agitador de Wagner da marca Marconi a 30rpm durante 18 horas. Após a lixiviação, foi realizada a filtração com bomba de vácuo Primatec modelo 131 para permitir a separação entre extrato lixiviado e resíduo.



**Figura 2.** Celulares 2G após a cominuição.

Para a análise química do extrato lixiviado foi utilizado o espectrômetro de emissão óptica Agilent 5110 (ICP-OES) em função axial. O aparelho foi calibrado para verificar as concentrações de chumbo ( $\lambda=220.353\text{nm}$ ), cádmio ( $\lambda=228.802\text{nm}$ ), mercúrio ( $\lambda=184.887\text{nm}$ ) e cromo ( $\lambda=357.868\text{nm}$ ) a partir curvas de calibração com nível de confiança de 99,9%. As amostras foram analisadas logo após a filtragem em triplicatas e a concentração de cada elemento em cada amostra foi definida como a média entre as análises.

Os resultados foram confrontados com os valores presentes no Anexo F da NBR 10004, que explicita os limites de concentração desses elementos em resíduos sólidos. Valores acima do limite classificam o resíduo como Classe I - Perigoso.

### **Avaliação de impactos ambientais**

A segunda etapa consistiu em uma revisão bibliográfica do possível impacto ambiental dos metais tóxicos mais comumente encontrados em equipamentos eletroeletrônicos, especialmente o chumbo, mas também o cádmio, mercúrio e cromo. A revisão teve como objetivo elucidar os possíveis impactos desses metais quando em contato com a fauna e a flora. As palavras-chave utilizadas levaram em conta os elementos tóxicos analisados associados a impactos ambientais, como, por exemplo, “toxicidade cádmio”, “contaminação chumbo”, “impacto ambiental mercúrio”, “bioacumulação metais tóxicos” e equivalentes em inglês.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Classificação da periculosidade**

Ao todo, foram coletados 13 celulares 2G e três 3G. Os anos de fabricação variaram entre 2000 e 2013 para 2G e 2009 e 2014 para 3G. Após a cominuição, verificou-se uma massa final de aparelhos 2G e 3G de 617,31g e 286,22g, respectivamente.

A análise das concentrações de chumbo, cádmio, mercúrio e cromo resultou nos valores dispostos na Tabela 1. Esses resultados permitem classificar o resíduo de aparelhos celulares de tecnologia 2G como Classe I - Perigoso, devido ao fato do elemento chumbo estar acima, ou muito próximo, do limite da NBR 10004. Por outro lado, os aparelhos 3G não

apresentaram concentrações de metais tóxicos acima do limite, não sendo classificados como perigosos. Entretanto, isso não significa que sejam inertes, para esta classificação, deveriam ser avaliados de acordo com a NBR 10006 (ABNT 2004c), que classifica resíduos em Classe II-A ou B. Provavelmente, os celulares 3G seriam classificados como Classe II-A (não inertes) devendo ser descartados de forma correta em relação a sua classe.

**Tabela 1.** Resultados da análise do extrato lixiviado em comparação com os limites dispostos na NBR 10004. Em destaque, valores acima ou próximos do limite da norma. Pb: chumbo; Cd: cádmio; Hg: mercúrio; Cr: cromo; LD: limite de detecção do aparelho.

Lixiviação de aparelhos celulares (mg·L <sup>-1</sup> )					
Geração	Amostra	Pb	Cd	Hg	Cr
2G	I	<b>1,38 ± 0,03</b>	0,20 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,04 ± 0,00
	II	<b>0,94 ± 0,02</b>	0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,04 ± 0,00
3G	I	0,34 ± 0,00	<LD	<LD	0,08 ± 0,00
	II	0,25 ± 0,01	<LD	<LD	0,11 ± 0,00
NBR 10004	-	1,00	0,50	0,10	5,00

Em um ensaio utilizando a NBR 10005, Sant’ana, Moura e Veit (2013) também analisaram a concentração de metais tóxicos em aparelhos celulares. Os autores separaram os aparelhos em dois lotes: com ano de fabricação até 2001 e outro posterior a 2002. O primeiro apresentou valores de chumbo 35 vezes superiores ao limite e o segundo 25,6 vezes acima. Kasper e colaboradores (2011) também fizeram uso dos procedimentos da norma técnica para caracterizar celulares, e, assim como no estudo anterior, encontraram concentrações de chumbo acima do limite. Nesse caso, os celulares foram separados em “antes de 2005” e “depois de 2005”, com concentrações de chumbo de 9,94 mg·L<sup>-1</sup> e 2,19 mg·L<sup>-1</sup>, respectivamente. Em dados apresentados por Cucchiella *et al.* (2015), celulares do tipo *smartphones*, tipicamente 3G ou 4G, possuem menor quantidade de chumbo em sua composição quando comparados com aparelhos mais antigos. Esses dados parecem confirmar a toxicidade que caracteriza este tipo de resíduo como perigoso, estando de acordo com o encontrado para celulares 2G.

Em contrapartida, celulares de tecnologia 3G apresentaram concentrações de chumbo bem abaixo do limite, aparentemente não concordando com a literatura. Contudo, as análises de Sant'ana, Moura e Veit (2013) e Kasper *et al.* (2011) não levaram em conta a tecnologia dos aparelhos, e sim o ano de fabricação. Nesse cenário, celulares mais recentes apresentaram menor concentração de chumbo. A única comparação entre tecnologias, apresentada por Cucchiella *et al.* (2015), coloca aparelhos 3G ou 4G (*smartphones*) com menor quantidade do elemento. É possível que isso mostre uma tendência de celulares mais recentes e de tecnologias 3G e 4G apresentarem menor concentração deste material em sua composição, como mostrado também no presente estudo. A geração 3G só começou a ser adotada no Brasil no final de 2009, chegando a um pico de acessos em 2015, enquanto os celulares 2G dominaram os acessos até o final de 2014 (ANATEL, 2016). Ou seja, quando estes estudos foram feitos os celulares 3G ainda não estavam nas mãos da maioria dos brasileiros, de forma que, provavelmente, a maior parte dos celulares avaliados tenham sido da geração anterior.

A razão para uma diminuição na quantidade de chumbo em celulares mais recentes pode estar ligada a uma adaptação do mercado a leis como a RoHS e a uma maior demanda dos consumidores por produtos ambientalmente corretos. O que pode estar ocorrendo, também, é uma melhoria na engenharia das PCIs, de forma a não utilizar tantas soldas, ou, ainda, a substituição da solda de chumbo por outros elementos, como estanho ou prata. Aplicações de soldas sem chumbo existem, embora estas ainda precisem de melhorias, já que não se igualam, em qualidade, às soldas com o metal tóxico (CHENG, HUANG e PECHT, 2016; FREAR, 2007).

### **Avaliação de impactos ambientais**

Chumbo, cádmio, mercúrio e cromo, assim como outros metais tóxicos e alguns compostos orgânicos, são elementos bioacumuladores (NEWMAN, 2015). Isso quer dizer que esses contaminantes possuem a capacidade de se acumular em organismos quando entram em contato através de ingestão de alimentos, água e inalação, principalmente.

A bioacumulação permite o transporte de contaminantes ao longo da teia alimentar, perpassando vários níveis tróficos (NASCIMENTO, HYPOLITO e RIBEIRO, 2006), num processo chamado de “transferência trófica”. Esse processo pode ser um dos meios mais importantes de exposição a contaminantes para predadores (KEHRIG *et al.*, 2009). À medida

que avança na cadeia trófica, um elemento tóxico pode biomagnificar ou sofrer diluição trófica. Biomagnificação ocorre quando o contaminante aumenta progressivamente ao longo da cadeia (MATHEWS e FISHER, 2008), e é o caso do mercúrio e certos compostos orgânicos (KEHRIG *et al.*, 2009; NEWMAN, 2015; SUEDEL *et al.*, 1994).

A diluição trófica, por outro lado, é a diminuição da concentração de um contaminante ao longo da cadeia trófica, sendo a situação mais comum entre os contaminantes (NEWMAN, 2015). É o que ocorre com o chumbo, cádmio e cromo (MATHEWS e FISHER, 2008; SOTO-JIMÉNEZ *et al.*, 2011; SUEDEL *et al.*, 1994). Excetuando-se o cromo, nutriente essencial em alguns processos bioquímicos e fisiológicos, os metais citados não possuem função nos organismos (BENAVIDES, GALLEGO e TOMARO, 2005; TCHOUNWOU *et al.*, 2012).

No início da teia alimentar, as plantas e fitoplâncton acumulam contaminantes a partir da sua disponibilidade no ambiente; vegetais através das raízes e fitoplâncton por difusão (BENAVIDES, GALLEGO e TOMARO, 2005; JÄRUP, 2003; MASON, REINFELDER e MOREL, 1996; NAGAJYOTI, LEE e SREEKANTH, 2010). Efeitos descritos da bioacumulação de mercúrio em plantas envolvem desordens fisiológicas, alteração no fluxo da água, interferência em atividades mitocondriais e estresse oxidativo (NAGAJYOTI, LEE e SREEKANTH, 2010). Para o chumbo, um dos mais abundantes elementos tóxicos encontrados no solo, se conhecem efeitos de inibição da germinação, anormalidades morfológicas e problemas na fotossíntese (NAGAJYOTI, LEE e SREEKANTH, 2010). Bioacumulação de cádmio pode afetar o desenvolvimento e crescimento vegetal, causar alterações na absorção de cálcio, manganês, fósforo, potássio e água, clorose e distúrbios no metabolismo de cloroplastos, entre outros efeitos (BENAVIDES, GALLEGO e TOMARO, 2005; NAGAJYOTI, LEE e SREEKANTH, 2010). Efeitos conhecidos da bioacumulação de cromo envolvem problemas no crescimento e desenvolvimento vegetal, inibição da fotossíntese e inibição da germinação (NAGAJYOTI, LEE e SREEKANTH, 2010).

Também na base da cadeia trófica, os animais filtradores são fortemente impactados pela presença de contaminantes (MACHADO *et al.*, 2002). Moluscos bivalves, por exemplo, são capazes de remover substâncias tóxicas presentes na água e bioacumular em seus tecidos (MARENGONI *et al.*, 2013). Assim como vegetais, diversas espécies de bivalves são alimento para humanos, representando um meio direto de contaminação por substâncias tóxicas.

Nos níveis tróficos seguintes, a contaminação ocorre principalmente pela alimentação, mas também pode ocorrer pelo ar ou água (FRIBERG, PISCATOR e NORDBERG, 1971; JÄRUP, 2003; SUEDEL *et al.*, 1994). A exceção é o mercúrio em meio aquático, que é obtido pelos organismos majoritariamente através da água (SUEDEL *et al.*, 1994). De forma geral, alguns dos efeitos conhecidos da bioacumulação de metais tóxicos são danos no DNA (podendo levar à carcinogênese ou apoptose), interação negativa com enzimas e proteínas e danos a organelas celulares (TCHOUNWOU *et al.*, 2012). Gill (1994) mostra alguns impactos de contaminantes em vertebrados, exemplificando com estudos de populações de gaivotas da América do Norte que mostraram incidências de feminização, mortalidade de machos, deformidades morfológicas e alterações comportamentais, entre outros efeitos.

A maior parte da literatura consultada apresenta consequências da contaminação em humanos, mas é possível que boa parte desses efeitos, se não todos, sejam comuns aos mamíferos, devido à proximidade filogenética, e, talvez, se estendam a vertebrados em geral. Além disso, vários dos experimentos utilizados para justificar efeitos em humanos fizeram uso de outros animais.

Alguns dos efeitos descritos para contaminação por mercúrio são problemas neurológicos, cardíacos, nos pulmões e nos rins (JÄRUP, 2003). Zhang e Wong (2007) relatam uma possível ligação entre o consumo de peixes contaminados por mercúrio com casos de subfertilidade em homens, doenças de pele e autismo em crianças na China. Uma relação similar é apresentada por Bradstreet e colaboradores (2003). Peixes são uma das principais fontes de contaminação por mercúrio em humanos (JÄRUP, 2003; KEHRIG *et al.*, 2009;).

O chumbo é danoso em humanos até em baixas concentrações, apresentando efeitos deletérios (SOTO-JIMÉNEZ *et al.*, 2011). Outros efeitos da exposição ao chumbo são danos no desenvolvimento neural (principalmente em fetos, bebês e crianças), levando a problemas como deficiência intelectual, surdez e cegueira (GOYER, 1993; SOTO-JIMÉNEZ *et al.*, 2011). Também há registros de deficiências ósseas, esterilidade, morte perinatal e complicações renais (GOYER, 1993; JÄRUP, 2003). Além disso, o chumbo é carcinogênico (GOYER, 1993; JÄRUP, 2003) e teratogênico (DURUIBE, OGWUEGBU e EGWURUGWU, 2007).

Assim como o chumbo, o cádmio é tóxico a humanos em concentrações bastante baixas (DURUIBE, OGWUEGBU e EGWURUGWU, 2007). Contato com esse metal pode

levar à insuficiência renal e problemas ósseos (DURUIBE, OGWUEGBU e EGWURUGWU, 2007; JÄRUP, 2003). Também é carcinogênico (FRIBERG, PISCATOR e NORDBERG, 1971; TCHOUNWOU *et al.*, 2012). De acordo com Friberg, Piscator e Nordberg (1971), elevadas concentrações de cádmio podem destruir a barreira imposta pela placenta e contaminar o feto.

Segundo Gad (1989), a exposição a níveis perigosos de cromo se dá, principalmente, por inalação e contato com a pele. Contato com esse metal em doses elevadas pode causar doenças dérmicas, irritações, problemas respiratórios e renais (DAYAN e PAINE, 2001; GAD, 1989). Cromo, assim como o chumbo e o cádmio, possui evidências de ser carcinogênico (DAYAN e PAINE, 2001).

Assim, existem diversas maneiras de uma contaminação por metais tóxicos afetar um indivíduo e prejudicar a sua sobrevivência ou sua capacidade reprodutiva. Além disso, há evidências de alterações gênicas deletérias devido ao contato com contaminantes (LIU *et al.*, 2009; NEWMAN, 2015). Esses fatores podem comprometer a adaptação média de uma população, o que pode significar sua extinção.

Os impactos causados pela presença de contaminantes também afetam os seres vivos a nível de comunidade. Jones e colaboradores (2013), mostram como contaminantes podem levar a efeitos *bottom-up* ou *top-down* de cascata trófica. Alguns estudos apresentados por Newman (2015) mostram que concentrações de cádmio ou mercúrio abaixo de níveis letais em uma espécie de peixe pode levar a mudanças em seu comportamento perante um predador, afetando a relação predador-presa. Esse desbalanço também causa um efeito *top-down* de cascata trófica. Segundo o mesmo autor, um contaminante pode levar ao desaparecimento de uma espécie-chave, comprometendo toda a comunidade; além disso, ele também afirma que a competição interespecífica pode ser afetada pela presença de substâncias tóxicas. Para Odum (1985), as consequências para comunidades e ecossistemas podem ser um aumento no número de espécies r-estrategistas (ênfase na eficiência reprodutiva), diminuição no tamanho dos indivíduos, menor diversidade de espécies, retorno a um estágio sucessional anterior, diminuição de interações positivas (mutualismo, cooperação) e aumento de interações negativas (parasitismo). Newman (2015) argumenta, ainda, que os impactos causados por contaminantes podem se estender além dos ecossistemas para um nível global.

Os impactos ambientais causados pela contaminação por metais tóxicos podem ir muito além das consequências a indivíduos. Em situações críticas, como as aqui apresentadas,



podem levar a danos na estrutura de comunidades e ecossistemas. Evidentemente, a contaminação por resíduos eletrônicos não é o único, nem o principal, meio de contaminação dos ambientes, também ocorrendo através do uso de agrotóxicos, poluição industrial, entre outros (NEWMAN, 2015). Mesmo assim, toda a precaução é necessária ao lidar com REEE, já que estes são poluentes mesmo quando descartados em aterros sanitários.

A cidade de Guiyu, na China, proporciona exemplos reais de contaminação humana por metais tóxicos devido à má interação com REEE. O local é um dos maiores centros de reciclagem informal do mundo. Robinson (2009) apresenta estudos que mostram que os níveis de contaminação do ar, solo e água estão muito acima dos padrões normais e os impactos dessa contaminação já afetam a população local. Os níveis de chumbo e cádmio nas crianças é bastante elevado quando comparado a crianças de cidades próximas que não têm contato com REEE (HUO *et al.*, 2007; ZHENG *et al.*, 2008). Um estudo feito por Li e colaboradores (2008a) mostra que os níveis de chumbo em recém-nascidos na cidade é superior ao encontrado em cidades vizinhas, comprometendo o desenvolvimento neurocomportamental. Altos níveis de cádmio em neonatos também foram encontrados (LI *et al.*, 2011), assim como cromo, estando este relacionado a danos no DNA dos indivíduos (LI *et al.*, 2008b). Um caso similar foi estudado por Liu e colaboradores (2009), que verificaram um aumento na incidência de aberrações cromossômicas em pessoas expostas à reciclagem informal de eletrônicos em Jinghai, também na China. Já em Bangalore, Índia, Ha *et al.* (2009) analisaram a concentração de elementos traço no cabelo de pessoas envolvidas com reciclagem informal de REEE e verificaram contaminação por esses elementos, especialmente índio, antimônio e bismuto.

## **CONCLUSÕES**

No presente estudo, foi verificada a periculosidade de celulares de tecnologia 2G. Os níveis de chumbo nesses aparelhos foram superiores ou muito próximos ao limite disposto na NBR 10004, o que os classifica como resíduos Classe-I. Celulares 3G, por outro lado, não apresentaram periculosidade. É possível que celulares mais recentes sejam produzidos com soldas sem chumbo para estarem de acordo com leis como a RoHS. Há a possibilidade, também, de celulares 3G contarem com uma engenharia de PCIs diferente, que não demande tantas soldas, levando a uma utilização menor de chumbo.

Os impactos ambientais de metais tóxicos podem ser extensos. Tendo em vista que são elementos bioacumuladores, a presença de mercúrio, chumbo, cádmio e cromo nos organismos pode levar a diversas complicações, inclusive à morte. O impacto de uma contaminação por metais tóxicos não se limita ao indivíduo, podendo se estender para populações, comunidades e ecossistemas.

Consequências reais da interação humana com REEE já estão sendo demonstrados. Dessa forma, torna-se essencial dar o destino correto para esses resíduos, que é a reciclagem. É necessário conhecer a concentração de metais tóxicos em equipamentos eletrônicos para que saibamos o quão perigosos ao meio ambiente e à saúde humana eles podem ser, e, desse modo, proporcionar o seu adequado gerenciamento.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 10004*: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 10005*: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 10006*: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.
- AFROZ, R.; MASUD, M.M.; AKHTAR, R.; DUASA, J.B. Survey and analysis of public knowledge, awareness and willingness to pay in Kuala Lumpur, Malaysia e a case study on household WEEE management. *Journal of Cleaner Production*, v. 52, 2013, p. 185-93.
- ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações). *Relatório de acompanhamento do setor de telecomunicações*. Brasília, DF: ANATEL, 2016, 44 p.
- ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações). Brasil registra redução de 2,88% no número de acessos em operação na telefonia móvel em 12 meses. *ANATEL*, 30 abr. 2018. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/dados/destaque-1/283-brasil-tem-236-2-milhoes-de-linhas-moveis-em-janeiro-de-2018>>. Acesso em: 4 ago. 2018.
- BALDÉ, C.P.; FORTI, V.; GRAY, V.; KUEHR, R.; STEGMANN, P. *The Global E-waste Monitor*. Bonn/Genebra/Viena: United Nations University, International Telecommunication Union e International Solid Waste Association, 2017, 116 p.

BENAVIDES, M.P.; GALLEGO, S.M.; TOMARO, M.L. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 17, n. 1, 2005, p. 21-34.

BHALLA, M.R.; BHALLA, A.V. Generations of Mobile Wireless Technology: A Survey. *International Journal of Computer Applications*, v. 5, n. 4, 2010, p. 26-32.

BRADSTREET, J.; GEIER, D.A.; KARTZINEL, J.J.; ADAMS, J.B.; GEIER, M.R. A Case-Control Study of Mercury Burden in Children with Autistic Spectrum Disorders. *Journal of American Physicians and Surgeons*, v. 8, n. 3, 2003, p. 76-9.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*, Brasília, DF, 2010.

CHENG, S.; HUANG, C.M.; PECHT, M. A review of lead-free solders for electronics applications. *Microelectronics Reliability*, 2016, DOI: 10.1016/j.microrel.2017.06.016.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S.C.L.; ROSA, P. Recycling of WEEE: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, 2015, p. 263-72.

DAN, C. Review of Generations and Physics of Cellphone Technology. *International Journal of Information Science*, v. 4, n. 1, 2014, p. 1-7.

DAYAN, A.D.; PAINE, A.J. Mechanisms of chromium toxicity, carcinogenicity and allergenicity: Review of the literature from 1985 to 2000. *Human and Experimental Toxicology*, v. 20, 2001, p. 439-51.

DIAS, P.; MACHADO, A.; HUDA, N.; BERNARDES, A.M. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, 2018, p. 7-16.

DURUIBE, J.O.; OGWUEGBU, M.O.C.; EGWURUGWU, J.N. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*, v. 2, n. 5, 2007, p. 112-8.

ECHEGARAY, F. Consumers' reactions to product obsolescence in emerging markets: the case of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 2015, DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.119.

FREAR, D.R. Issues related to the implementation of Pb-free electronic solders in consumer electronics. In: SUBRAMANIAN, K.N. (ed.). *Lead-free Electronic Solders*. Springer, Nova Iorque, EUA, 2007, p. 319-30.

FRIBERG, L.; PISCATOR, M.; NORDBERG, G. *Cadmium in the Environment*. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 1971, 166 p.

- GAD, S.C. Acute and chronic systemic chromium toxicity. *The Science of the Total Environment*, v. 86, 1989, p. 149-57.
- GILL, F.B. *Ornithology*. 2 ed. Nova Iorque: W. H. Freeman and Company, 1994, 766 p.
- GOYER, R.A. Lead Toxicity: current concerns. *Environmental Health Perspectives*, v. 100, 1993, p. 177-87.
- HA, N.N.; AGUSA, T.; RAMU, K.; TU, N.P.C.; MURATA, S.; BULBULE, K.A.; PARTHASARATHY, P.; TAKAHASHI, S.; SUBRAMANIAN, A.; TANABE, S. Contamination by trace elements at e-waste recycling sites in Bangalore, India. *Chemosphere*, v. 76, 2009, p. 9-15.
- HUO, X.; PENG, L.; XU, X.; ZHENG, L.; QIU, B.; QI, Z.; ZHANG, B.; HAN, D.; PIAO, Z. Elevated Blood Lead Levels of Children in Guiyu, an Electronic Waste Recycling Town in China. *Environmental Health Perspectives*, v. 115, n. 7, 2007, p. 1113-17.
- JÄRUP, L. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, v. 68, 2003, p. 167-82.
- JONES, T.A.; CHUMCHAL, M.M.; DRENNER, R.W.; TIMMINS, G.N.; HOWLIN, W.H. Bottom-up nutrient and top-down fish impacts on insect-mediated mercury flux from aquatic ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 32, n. 3. 2013, p. 612-8.
- KASPER, A.C.; BERSELLI, G.B.T.; FREITAS, B.D.; TENÓRIO, J.A.S.; BERNARDES, A.M.; VEIT, H.M. Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. *Waste Management*, v. 31, 2011, p. 2536-45.
- KASPER, A.C.; VEIT, H.M. *Caracterização e Reciclagem de Materiais Presentes em Sucatas de Telefones Celulares*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, 120 p.
- KEHRIG, H.A.; FERNANDES, K.W.G.; MALM, O.; SEIXAS, T.G.; DI BENEDITTO, A.P.M.; SOUZA, C.M.M. Transferência trófica de mercúrio e selênio na costa norte do Rio de Janeiro. *Química Nova*, v. 32, n. 7, 2009, p. 1822-28.
- LI, Y.; HUO, X.; LIU, J.; PENG, L.; LI, W.; XU, X. Assessment of cadmium exposure for neonates in Guiyu, an electronic waste pollution site of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 177, 2011, p. 343-51.
- LI, Y.; XU, X.; LIU, J.; WU, K.; GU, C.; SHAO, G.; CHEN, S.; CHEN, G.; HUO, X. The hazard of chromium exposure to neonates in Guiyu of China. *Science of the Total Environment*, v. 403, 2008b, p. 99-104.

LI, Y.; XU, X.; WU, K.; CHEN, G.; LIU, J.; CHEN, S.; GU, C.; ZHANG, B.; ZHENG, L.; ZHENG, M.; HUO, X. Monitoring of lead load and its effect on neonatal behavioral neurological assessment scores in Guiyu, an electronic waste recycling town in China. *Journal of Environmental Monitoring*, v. 10, 2008a, p. 1233-38.

LIU, Q.; CAO, J.; LI, K.Q.; MIAO, X.H.; LI, G.; FAN, F.Y.; ZHAO, Y.C. Chromosomal aberrations and DNA damage in human populations exposed to the processing of electronics waste. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 16, 2009, 329-38.

MACHADO, I.C.; MAIO, F.D.; KIRA, C.S.; CARVALHO, M.F.H. Estudo da ocorrência dos metais pesados Pb, Cd, Hg, Cu e Zn na ostra de mangue *Crassostrea brasiliana* do estuário de Cananéia-SP, Brasil. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, v. 61, n. 1, 2002, p. 13-8.

MARENGONI, N.G.; KLOSOWSKI, E.S.; OLIVEIRA, K.P.; CHAMBO, A.P.S.; JUNIOR, A.C.G. Bioacumulação de metais pesados e nutrientes no mexilhão dourado do reservatório da usina hidrelétrica de Itaipu Binacional. *Química Nova*, v. 36, n. 3, 2013, p. 359-63,

MASON, R.P.; REINFELDER, J.R.; MOREL, F.M.M. Uptake, Toxicity, and Trophic Transfer of Mercury in a Coastal Diatom. *Environmental Science & Technology*, v. 30, 1996, p. 1835-45.

MATHEWS, T.; FISHER, N.S. Trophic transfer of seven trace metals in a four-step marine food chain. *Marine Ecology Progress Series*, v. 367, 2008, p. 23-33.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). *O que o brasileiro pensa do meio ambiente e do consumo sustentável: Pesquisa nacional de opinião: principais resultados*. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Articulação Institucional e Cidadania Ambiental, 2012. 82 p.

NAGAJYOTI, P.C.; LEE, K.D.; SREEKANTH, T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 8, 2010, p. 199-216.

NASCIMENTO, S.C.; HYPOLITO, R.; RIBEIRO, A.A. Disponibilidade de metais pesados em aterro de indústria siderúrgica. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 3, 2006, p. 196-202.

NEIRA, J.; FAVRET, L.; FUJI, M.; MILLER, R.; MAHDAVI, S.; BLASS, V.D. *End-of-Life Management of Cell Phones in the United States*. Dissertação (Mestrado). Santa Bárbara: Universidade da Califórnia, 2006, 178 p.

NEWMAN, M.C. *Fundamentals of Ecotoxicology: The Science of Pollution*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015, 633 p.

NNOROM, I.C.; OSIBANJO, O. Toxicity characterization of waste mobile phone plastics. *Journal of Hazardous Materials*, v. 161, 2009, p. 183-8.

ODUM, E.P. Trends Expected in Stressed Ecosystems. *BioScience*, v. 35, n. 7, 1985, p. 419-22.

ONGONDO, F.O.; WILLIAMS, I.D.; CHERRETT, T.J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management*, v. 31, 2011, p. 714-30.

PALMIERI, R.; BONIFAZI, G.; SERRANTI, S. Recycling-oriented characterization of plastic frames and printed circuit boards from mobile phones by electronic and chemical imaging. *Waste Management*, v. 34, 2014, p. 2120-30.

ROBINSON, B.H. E-Waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, v. 408, 2009, p. 183-191.

SANT'ANA, H.B.S; MOURA, F.J.; VEIT, H.M. Caracterização físico-química de placas de circuito impresso de aparelhos de telefone celular. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 10, n. 3, 2013, p. 231-8.

SCHLUEP, M.; HAGELUEKEN, C.; KUEHR, R.; MAGALINI, F.; MAURER, C.; MESKERS, C.; MUELLER, E.; WANG, F. *Recycling – From E-waste to Resources*. Berlin: United Nations Environment Programme & United Nations University, 2009, 121 p.

SILVEIRA, G.T.R.; CHANG, S.Y. Cell phone recycling experiences in the United States and potential recycling options in Brazil. *Waste Management*, v. 30, 2010, p. 2278-91.

SOTO-JIMÉNEZ, M.F.; ARELLANO-FIORE, C.; ROCHA-VELARDE, R.; JARA-MARINI, M.E.; RUELAS-INZUNZA, J.; PÁES-OSUNA, F. Trophic Transfer of Lead Through a Model Marine Four-Level Food Chain: *Tetraselmis suecica*, *Artemia franciscana*, *Litopenaeus vannamei* and *Haemulon scudder*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 61, 2011, p. 280-91.

STEP (Solving the E-waste Problem). *One Global Definition of E-waste*. Bonn: United Nations University, 2014, 12 p.

SUEDEL, B.C.; BORACZEK, J.A.; PEDDICORD, R.K.; CLIFFORD, P.A.; DILLON, T.M. Trophic Transfer and Biomagnification Potential of Contaminants in Aquatic Ecosystems. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 136, 1994, p. 21-89.

TCHOUNWOU, P.B.; YEDJOU, C.G.; PATLOLLA, A.K., SUTTON, D.J. Heavy Metal Toxicity and the Environment. In: LUCH, A. (ed.). *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology: Volume 3: Environmental Toxicology*, Springer, Basileia, Suíça, 2012, p. 133-64.

YAMANE, L.H.; MORAES, V.T.; ESPINOSA, D.C.R.; TENÓRIO, J.A.S. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*, v. 31, 2011, p. 2553-58.

ZHANG, L.; WONG, M.H. Environmental mercury contamination in China: Sources and impacts. *Environment International*, v. 33, 2007, p. 108-21.

ZHENG, L.; WU, K.; LI, Y.; QI, Z.; HAN, D.; ZHANG, B.; GU, C.; CHEN, G.; LIU, J.; CHEN, S.; XU, X.; HUO, X. Blood lead and cadmium levels and relevant factors among children from an e-waste recycling town in China. *Environmental Research*, v. 108, 2008, p. 15-20.