

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

**AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO
DO SOLO EM ÁREAS ADJACENTES À RODOVIA
BR-040 NO MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA - MG**

Nelson Guzella Carvalho

Juiz de Fora

2018

**AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO
DO SOLO EM ÁREAS ADJACENTES À RODOVIA
BR-040 NO MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA - MG**

Nelson Guzella Carvalho

Nelson Guzella Carvalho

**AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO
DO SOLO EM ÁREAS ADJACENTES À RODOVIA
BR-040 NO MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA - MG**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Geotecnia Ambiental

Orientadora: Júlia Righi de Almeida

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2018

**“AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS
ADJACENTES À RODOVIA BR-040 NO MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA – MG.”**

NELSON GUZELLA CARVALHO

Trabalho Final de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com o artigo 9º da Resolução CCESA 4, de 9 de abril de 2012, estabelecida pelo Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 12 de março de 2018.

Por:

Profª. DSc. Júlia Righi de Almeida – Orientadora

Prof. DSc. Jonathas Batista Gonçalves Silva

Prof. DSc. Otávio Eurico de Aquino Branco

Prof. DSc. Marconi Fonseca de Moraes

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, aos meus pais, Izabel e Nelson, por todo o amparo durante minha jornada acadêmica, aos meus irmãos, Rafael e Lucas por estarem por perto nos momentos complicados e terem tornado essa caminhada um pouco mais leve.

Aos meus orientadores Júlia Righi e Jonathas Batista pela disponibilidade e contribuições essenciais para produção deste trabalho. Aos professores Otávio Eurico e Tatiana Rodriguez pelas sugestões e auxílio fundamentais ao longo do curso e agora neste trabalho.

Aos demais professores que me forneceram predicados suficientes para produzir este trabalho e conhecimento técnico para me preparar para os próximos desafios profissionais.

Agradeço também ao amigo Antônio Xavier pelos conselhos e por sempre me receber muito bem nas idas a Viçosa e ao técnico Geovani Copati do Laboratório de Solos da UFV pela disponibilidade e ser tão solícito.

Aos amigos do NAGEA, da Atlética da Faculdade de Engenharia e a todos os amigos do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Diretório Acadêmico e aos demais amigos, sempre presentes e que compartilharam momentos inesquecíveis.

Muito obrigado a todos que de alguma forma fizeram parte desse, vocês tornaram tudo mais fácil.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Metais Pesados	10
1.2 Fontes de contaminação	11
1.3 Ocorrência de metais pesados em plantas	12
1.4 Metais pesados e saúde	12
2 METODOLOGIA	14
2.1 Área de estudo	14
2.2 Amostragem dos solos	15
2.3 Análises da concentração de metais nos solos	18
2.4 IGeo (<i>Geoaccumulation Index</i>) e PI (<i>Pollution Index</i>)	18
2.5 Análise estatística	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	30
REFERÊNCIAS	32

AValiação DO NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS ADJACENTES A RODOVIA BR-040 NO MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA - MG

RESUMO: As rodovias desempenham um papel fundamental para diversas atividades sociais e econômicas em uma nação, sendo um fator determinante para o progresso do país. No entanto, poluentes orgânicos e inorgânicos emitidos pelo escapamento dos veículos, desgaste da carroceria, pastilhas e lonas de freio e atrito dos pneus com a pista, dispersam-se no ambiente principalmente através da deposição atmosférica e águas de escoamento superficial. Os metais pesados provenientes dessas fontes de poluição podem gerar preocupação devido a sua alta toxicidade a microrganismos, plantas, animais e seres humanos e o seu acúmulo e transferência entre os níveis tróficos da cadeia alimentar. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a concentração de metais pesados no solo em pontos adjacentes à rodovia BR-040 e, através do IGeo (Geoaccumulation Index) e do PI (Pollution Index), determinar o nível de contaminação do solo em questão, utilizando dois backgrounds distintos. Para tanto, foram coletadas amostras em seis pontos escolhidos aleatoriamente em duas profundidades diferentes, 0-15 cm e 15-30 cm. A fim de obter as concentrações dos elementos Fe, Zn, Mn, Cu, Cd, Pb, Ni e Cr, foi utilizada solução extratora Mehlich-1 (0,05 mol/L de HCl + 0,0125 mol/L de H₂SO₄) e posteriormente determinou-se os valores das concentrações utilizando-se espectrofotômetro de absorção atômica. Ao comparar os resultados obtidos com a Resolução CONAMA 420/2009, observou-se que a maioria dos elementos se encontra dentro do limite dos valores estabelecidos para “Prevenção”. As exceções foram os elementos Zn, no ponto 3 e no ponto 4 e o elemento Cd, o qual apresentou valores acima do critério de “Investigação” estabelecido para uso agrícola nas amostras do ponto 3. Após a obtenção dos valores de IGeo, PI e com auxílio de ferramenta estatística, pôde-se inferir que alguns metais como, Zn, Cd, Pb apresentaram alterações consideráveis em relação aos critérios adotados, com valores de IGeo compreendidos entre o intervalo de “moderadamente poluído” a “fortemente poluído” e PI com valores compreendidos entre “nível médio de poluição” e “nível alto de poluição”. A partir disso, comparando-se os valores de IGeo e PI com os coeficientes de correlação obtidos estatisticamente e a bibliografia pertinente, avaliou-se as possíveis fontes de contaminação dos solos adjacentes à BR-040.

Palavras-chave: solos de rodovias; contaminação por metais pesados; igeo e pi.

EVALUATION OF SOIL CONTAMINATION INDICES IN ADJACENT AREAS OF BR-040 IN THE CITY OF JUIZ DE FORA-MG, BRAZIL.

ABSTRACT: Roads play a key role in many economic and social activities in a nation, being a determining factor for the country's progress. However, organic and mineral pollutants emitted by vehicle exhaust systems, body wear, brake linings and pads and tire friction with the road, disperse into the environment mainly through atmospheric deposition and runoff water from the. The most relevant heavy metals of these sources of pollution are Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg and Co, and they can cause concern due to their high toxicity to microorganisms, plants, animals and humans and their accumulation and transfer along the trophic levels of the food chain. In this sense, the objective of the present work was to evaluate the concentration of heavy metals in the soil at points adjacent to BR-040 and, through IGeo (Geoaccumulation Index) and PI (Pollution Index), to evaluate the contamination level of the soil in question. In order to evaluate possible sources of contamination, with the highway being the focus of the discussion. For that, samples were collected at three randomly chosen points at two different depths, 0-15 cm and 15-30 cm. In order to obtain the concentration levels of the elements Fe, Zn, Mn, Cu, Cd, Pb, Ni and Cr, it was used a Mehlich-1 extractor solution (0.05 mol/L HCl + 0.0125 mol /L H₂SO₄) in a ratio soil:extractant of 1:10 and later the values of the concentrations were determined using atomic absorption spectrophotometer. When comparing the results obtained with CONAMA Resolution 420/2009, it was observed that most of the elements are within the limits of the values established for "Prevention". After obtaining the values of IGeo, PI, using a statistical tool, it was possible to infer that some metals such as, Zn, Cd, Pb presented considerable changes in relation to the adopted criteria, with IGeo values ranging from the "moderately polluted" to "heavily polluted" and PI with values between "average level of pollution" and "high level of pollution". Comparing the IGeo and PI values with the correlation coefficients obtained statistically and the relevant bibliography, the possible sources of contamination of the soils adjacent to BR-040 were evaluated.

Keywords: road soils; heavy metal contamination; igeo and pi.

1 INTRODUÇÃO

As rodovias desempenham um papel crucial para diversas atividades sociais e econômicas em uma nação, compondo um fator determinante para o progresso do país, em especial o Brasil. Entretanto, o tráfego rodoviário e atividades relacionadas, como obras de manutenção da pista, são responsáveis pela deposição de diversos poluentes perigosos nos solos e corpos de água no entorno das rodovias, ocasionando alterações nos atributos dos solos (Christoforidis e Stamatis, 2009; Carrero *et al.*, 2013; Kluge *et al.*, 2014). Destaca-se a contribuição de carros e rodovias para as emissões globais de poluentes atmosféricos tem aumentado regularmente (Viardet *et al.*, 2004). Os metais pesados mais relevantes dessas fontes são Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg e Co (Munch, 1993; Hjortenkrans, 2006).

A investigação quanto à presença de poluentes em solos adjacentes à rodovias é um assunto de grande interesse devido ao rápido desenvolvimento do sistema rodoviário e o aumento do tráfego, especialmente de veículos pesados, em todo o país.

Conforme o parágrafo 3º da Resolução CONAMA 420/2009, a qual dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas, são principais funções do solo: servir como meio básico para a sustentação da vida e de habitat para pessoas, animais, plantas e outros organismos vivos; manter o ciclo da água e dos nutrientes; servir como meio para a produção de alimentos e outros bens primários de consumo; agir como filtro natural, tampão e meio de adsorção, degradação e transformação de substâncias químicas e organismos; proteger as águas superficiais e subterrâneas; servir como fonte de informação quanto ao patrimônio natural, histórico e cultural; constituir fonte de recursos minerais; e servir como meio básico para ocupação territorial, práticas recreacionais e propiciar outros usos públicos e econômicos.

O solo é composto por constituintes minerais, matéria orgânica (húmus), organismos vivos, ar e água. Os materiais antropogênicos que o compõem são devido a atividades mineradoras, industriais e ocupação inadequada de áreas preservadas. No caso das rodovias destacam-se partículas do escapamento de veículos, resíduos de óleos lubrificantes e partículas provenientes do desgaste de pneus. Já os materiais biogênicos

naturais correspondem a folhas de árvores e outros materiais vegetais que são pulverizados devido ao tráfego de veículos (Shiet *et al.*, 2008).

Os poluentes orgânicos e minerais são emitidos pelo escapamento dos veículos, desgaste da carroceria, pastilhas de freio, lonas de freio e atrito dos pneus com a pista, dispersando-se no ambiente principalmente através da deposição atmosférica e águas de escoamento superficial da rodovia (Birmili *et al.*, 2006; Hjortenkrans *et al.*, 2007; Zereini *et al.*, 2007; Kadi, 2009; Zhang *et al.*, 2013; Gill *et al.*, 2014; Werkenthin *et al.*, 2014). Este assunto tem sido alvo de investigação intensa por pesquisadores e órgãos ambientais de muitos países, mas no Brasil ainda é um tema pouco recorrente no meio científico.

1.1 Metais Pesados

Metais pesados, elementos traço ou metais tóxicos são algumas das nomenclaturas para definir os metais cuja concentração no solo é normalmente menor que 1000 mg.kg^{-1} . Assim sendo, os metais pesados podem ter origem litogênica, quando os metais existentes nos solos são provenientes do intemperismo do material de origem (Baize; Sterckeman, 2001). Os diferentes tipos de materiais de origem poderão formar solos com teores distintos de metais pesados, por exemplo, rochas ígneas ultramáficas (basaltos e andesitos) dão origens a solos com maiores níveis de metais poluentes quando comparados a solos desenvolvidos de rochas sedimentares (Alloway, 1995).

Os metais pesados são poluentes que geram grande preocupação devido a sua alta toxicidade a microrganismos, plantas, animais e seres humanos e o seu acúmulo e transferência entre os níveis tróficos da cadeia alimentar. Hamers *et al.* (2002), observaram o aumento da concentração de metais em mamíferos de acordo com a proximidade de rodovias.

Altas concentrações de metais em rodovias podem causar graves problemas ambientais, principalmente em rodovias antigas, como por exemplo, a poluição de mananciais subterrâneos. A melhoria das estradas já existentes e a construção de novas rodovias podem causar alta lixiviação de metais pesados além de provocar alterações no pH e da capacidade de sorção dos solos (Kluge *et al.*, 2011).

Os metais pesados ocorrem naturalmente no solo em baixas concentrações e em alguns casos em níveis considerados como tóxicos (Romero *et al.*, 2003; Voutsas *et al.*, 1996). Metais como Cu e Zn em pequenas quantidades, são benéficos a saúde, porém outros

como Pb, As, Hg e Cd, mesmo em concentrações extremamente baixas, são tóxicos e iniciadores ou promotores de muitas doenças (Peralta-Videa *et al.*, 2006).

Devido à elevada toxicidade e persistência no ambiente, o Pb tem despertado grande preocupação entre os metais pesados, sendo classificado como o segundo elemento mais perigoso, atrás do arsênio, conforme lista de prioridades da agência de proteção ambiental americana (ATSDR, 2009; Torri, 2009). A acumulação de elementos no solo provoca um aumento das concentrações que são naturalmente encontradas no meio, modificando seu estado químico e alterando sua composição natural. Desta forma, a avaliação da presença de metais pesados em solos se torna fundamental para melhor compreensão do impacto do tráfego em rodovias e a contaminação do ambiente.

1.2 Fontes de contaminação

Numerosos estudos revelaram que as duas principais fontes de contaminação por metais pesados, especialmente Cd, Cu, Pb e Zn em solos urbanos, podem ser atribuídas a descargas industriais e emissões de tráfego (Luo, *et al.*, 2012; Malkoc *et al.*, 2010; Cachada *et al.*, 2012; Lu e Bai, 2010). Muitos pesquisadores relataram a influência da carga de tráfego nos teores de metais pesados nas superfícies em relação a sua dimensão (Ward *et al.*, 1977; Rodriguez J., 1985; Bai B. *et al.*, 2007).

A queima de carvão, incineração de resíduos sólidos municipais, indústrias de produtos eletrônicos, de papel e farmacêuticas, foram identificadas como principais fontes de emissão antropogênica de Hg. Biester *et al.* (2002); Tack *et al.* (2005) e Liang *et al.* (1996), identificaram que diversas amostras de gasolina possuem mercúrio em sua composição.

Arsênico pode estar presente na composição de pastilhas de freio, pneus e combustíveis fósseis (Luilo *et al.*, 2014). Emissões de metais pesados no ambiente por lonas de freio e pneus foram significativas e altamente variáveis em Estocolmo, Suécia, segundo Hjorenkrans *et al.* (2007). Apegyei *et al.* (2011) encontraram valores médios de Cu e concentrações de Zn de 65,579 e 11 mg.kg⁻¹ em pastilhas de freio e de 46 e 17,467 mg.kg⁻¹ em pneus. Segundo Carrero *et al.* (2013), Cr e Ni estão mais associados a corrosão dos veículos e suas peças de cromo.

Os metais também podem ser encontrados em fumaça emitida por veículos, partículas fruto do desgaste do pavimento da rodovia, atividades industriais e, naturalmente, dos minerais que compõem o solo (Guanawardana *et al.*, 2012; Gope *et al.*, 2017).

1.3 Ocorrência de metais pesados em plantas

As concentrações de metais nos solos de rodovias são influenciadas pelo tipo de solo do local, pelas condições meteorológicas locais (Othman *et al.*, 1997; Sezgin *et al.*, 2003; Nabuloa *et al.*, 2006), a densidade do tráfego (Garcia e Milla'n, 1998; Nabuloa *et al.*, 2006) e o tipo de veículo que trafega pela rodovia (Sezgin *et al.*, 2003; Nabuloa *et al.*, 2006) e em alguns estudos os parâmetros do solo também influenciaram nas concentrações de metais (Viard *et al.*, 2004). As concentrações de poluentes diminuem com a distância à estrada, a profundidade do solo e com a diminuição da intensidade do tráfego (Dierkes e Geiger, 1999; Turer e Maynard, 2003; Li, 2005).

As plantas que crescem às margens das rodovias podem se tornar tóxicas devido a ação dos metais nas estruturas das plantas cultivadas em suas adjacências. Nabuloa *et al.*, (2006), relataram que folhas de culturas nas estradas podem acumular metais em altas concentrações causando sérios danos à saúde dos consumidores. Desta forma, pode-se dizer que as plantas atuam como um indicador da concentração biológica e acumulação de metais no ecossistema (Wiseman *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014). Diversas espécies de plantas são utilizadas como bioindicadores de níveis metálicos no solo, devido a sua absorção pela raiz e posterior acúmulo em suas células, bem como a deposição em suas estruturas foliares.

Zanello *et al.* (2017), observou que a presença de altas concentrações nas estruturas radiculares da espécie *Brachiaria* em áreas adjacentes à rodovia BR-376, pode estar associada às emissões do tráfego rodoviário por meio de deposição atmosférica. Shereck *et al.* (2012), demonstraram que após a deposição de partículas contaminadas por metais, houve absorção foliar em diferentes espécies de plantas, através da penetração por meio das estruturas dos estômatos.

1.4 Metais pesados e saúde

Cada vez mais as partículas emitidas ao ar a partir de diferentes matrizes ameaçam a saúde humana e o meio ambiente. A contaminação e a exposição humana à poluição, aumentaram drasticamente nos últimos cem anos (Figuerola *et al.*, 2007). A ingestão de partículas de poeira com alta concentração de metais pesados tem implicação em efeitos potencialmente deletérios à saúde dos seres humanos. Elementos essenciais em concentrações elevadas também podem ter efeitos tóxicos aos organismos.

Os metais pesados se acumulam nos órgãos internos e tecidos gordurosos do corpo humano. Eles podem afetar o sistema nervoso central e atuar como precursores de outras doenças (Rabitsch, 2009). As crianças estão particularmente mais vulneráveis ao envenenamento por metais, uma vez que nesta fase da vida o cérebro e o sistema nervoso ainda estão em formação e, por estarem mais vulneráveis a ingestão de materiais perigosos devido ao seu comportamento. Além disso, as crianças têm uma maior taxa de absorção e sensibilidade da hemoglobina aos metais pesados em relação aos adultos (Hammond, 1982).

O envenenamento por metais pesados pode acontecer a longo prazo se o organismo estiver exposto a baixas concentrações de metais por um longo período. Neste caso, em geral, o envenenamento ocorre de forma assintomática e está associado a distúrbios metabólicos e cognitivos, como: redução do desempenho escolar, dificuldade de aprendizado, déficits neuropsicológicos, problemas comportamentais e distúrbios no crescimento (Elik, 2003). O acúmulo de partículas contaminadas em lojas e mercados adjacentes a rodovias também podem ser uma via de contaminação por metais pesados aos seres humanos (Faiz, 2009).

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar a concentração de metais pesados no solo em pontos adjacentes à rodovia BR-040 e através do IGeo (Geoaccumulation Index) e do PI (Pollution Index), avaliar o nível de contaminação do solo em questão, a fim de avaliar possíveis fontes de contaminação, sendo a rodovia o foco da discussão.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Juiz de Fora é um município brasileiro localizado na mesorregião da Zona da Mata, no estado de Minas Gerais. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o município possuía no ano de 2017 uma população estimada de 563.769 habitantes, sendo assim o quarto município mais populoso do estado (IBGE, 2018).

De acordo com dados do Instituto de Geoinformação e Tecnologia (IGTEC), Minas Gerais tem a maior malha rodoviária do Brasil, equivalente a 16% do total. No estado, são 269.546 km de rodovias. Deste total, 7.689 km são de rodovias federais, 23.663 km de rodovias estaduais, e 238.191 km, de rodovias municipais. As duas principais rodovias que cruzam o município de Juiz de Fora são a BR-267 e a BR-040 (IGTEC, 2014). A figura 1 a seguir mostra o mapa do estado de Minas Gerais com as rodovias que compreendem seu território.

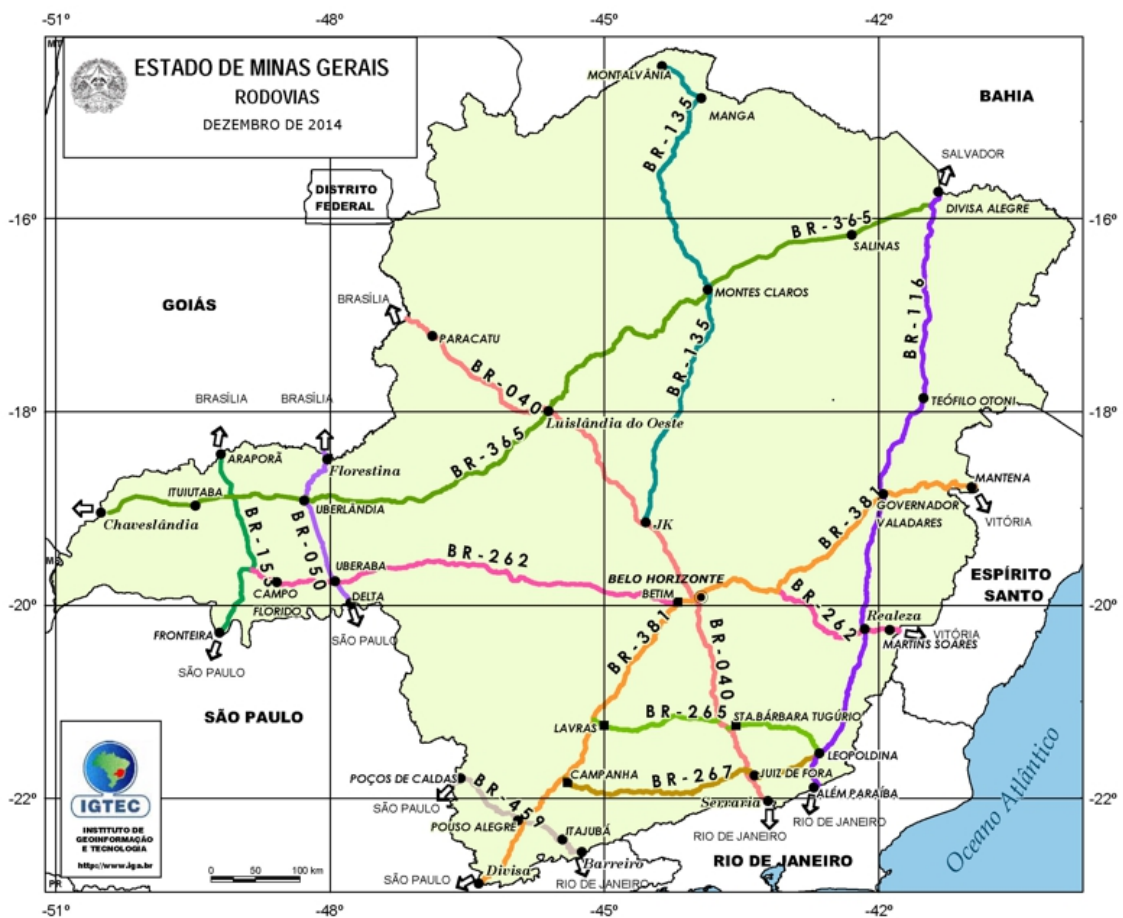


Figura 1: Estado de Minas Gerais e suas principais rodovias. (IGTEC, 2014).

A rodovia BR-040 é uma das principais vias radiais de transporte do Brasil. Segundo dados do Departamento Nacional de Trânsito – DNIT (2016), passam por ela cerca de 10.435 veículos diariamente.

Para o presente estudo foram escolhidos quatro pontos no canteiro da BR-040 (P1, P2, P3 e P4), no sentido BH - Juiz de Fora, mais dois pontos de controle (P5 e P6), distando respectivamente 300 m e 1500 m da rodovia, de forma aleatória, a fim de avaliar a concentração de metais pesados presentes nos solos coletados, bem como o grau de contaminação em cada um deles, conforme mostrado na figura 2.

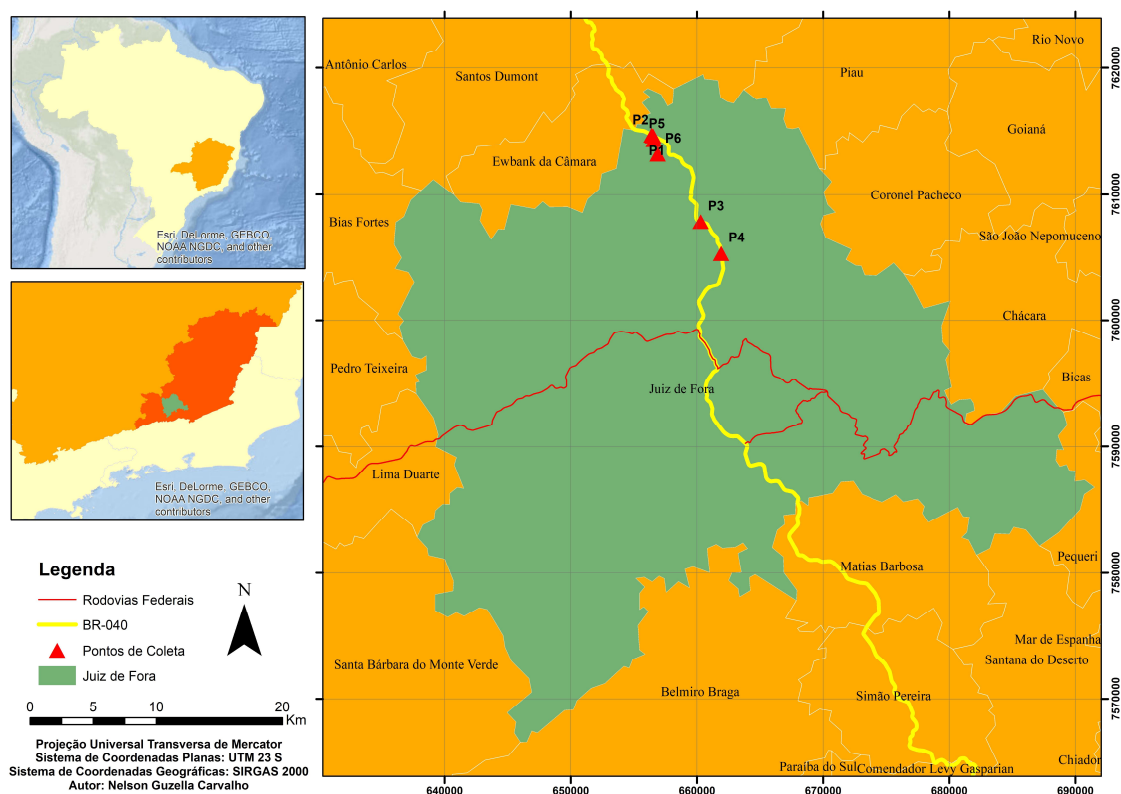


Figura 2: Mapa da região de estudo. (Fonte: Acervo do autor).

2.2 Amostragem dos solos

As amostras de solos foram coletadas em canteiros adjacentes a rodovia BR-040 e em duas camadas (0-15 e 15-30 cm) com auxílio de um trado concha. Em seguida, 12 amostras foram encaminhadas para análises químicas no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

Na tabela 1 são mostrados os pontos de coleta e os valores de suas respectivas coordenadas geográficas. Os pontos podem ser observados conforme mostrado na imagem de satélite da figura 3 e nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8.

Tabela 1: Coordenadas geográficas dos pontos de coleta. (Fonte: Acervo do autor).

Coordenadas Geográficas dos Pontos de Coleta			
Ponto	Camada (cm)	Latitude (UTM)	Longitude (UTM)
Ponto 1 (P1)	0-15	7614688	656409
	15-30		
Ponto 2 (P2)	0-15	7614623	656526
	15-30		
Ponto 3 (P3)	0-15	7607802	660297
	15-30		
Ponto 4 (P4)	0-15	7605279	661920
	15-30		
Ponto 5 (P5)	0-15	7614328	656588
	15-30		
Ponto 6 (P6)	0-15	7613188	656895
	15-30		

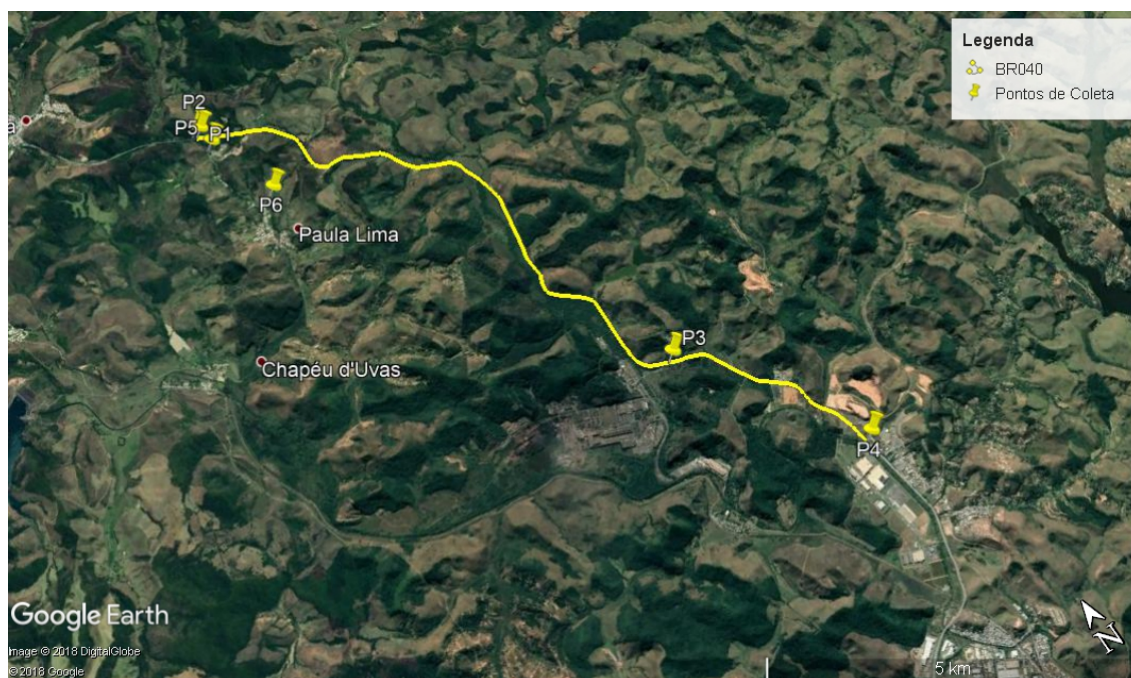


Figura 3: Imagem de satélite dos pontos de coleta. (Fonte: Google Earth Pro).



Figura 4: Pontos 1 e 2 no canteiro da BR-040. (Fonte: Acervo do autor)



Figura 5: Ponto 3 na canteiro da BR-040. (Fonte: Acervo do autor).



Figura 6: Ponto 4 na canteiro da BR-040. (Fonte: Acervo do autor).



Figura 8: Ponto 5 na estrada de Paula Lima. (Fonte: Acervo do autor.)



Figura 7: Ponto 6, localizado em Paula Lima. (Fonte: Acervo do autor).

2.3 Análises da concentração de metais nos solos

As análises das amostras de solo foram realizadas no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Viçosa. A determinação das concentrações de metais biodisponíveis nas amostras de solo foi feita conforme o Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da EMBRAPA (1999).

Após serem destorroadas e passadas em peneira 2 mm, transferiu-se a TFSE (terra fina seca em estufa) para um recipiente apropriado e devidamente identificado.

A fim de obter as concentrações dos elementos Fe, Zn, Mn, Cu, Cd, Pb, Ni e Cr foi utilizada solução extratora Mehlich-1 (0,05 mol/L de HCl + 0,0125 mol/L de H₂SO₄) numa proporção solo:extrator de 1:10 e posteriormente determinou-se o valor das concentrações através de espectrofotômetro de absorção atômica (Marca: VARIAN, Modelo: 220 FS).

2.4 IGeo (*Geoaccumulation Index*) e PI (*Pollution Index*)

O grau de contaminação dos solos pode ser avaliado através de índices como IGeo (*Geoaccumulation Index*) e PI (*Pollution Index*) que são baseados na relação relativa da concentração real de cada traço de metal em uma mostra de solo em comparação com um valor de referência de qualidade local (*background*). Esses índices são utilizados para avaliar a presença e intensidade da deposição de contaminantes antropogênicos em solo superficial.

Segundo a *Natural Resources and Environmental Protection Cabinet* (2004), *background* corresponde à concentração de determinada substância em níveis naturais ao meio ambiente, isenta de fontes antropogênicas de poluição.

No presente estudo foram utilizados dois valores diferentes de *background* a fim de determinar os índices IGeo e PI para os elementos estudados e comparar a influência do *background* nos resultados encontrados.

Os valores de *background* utilizados no presente estudo foram baseados na Deliberação Normativa COPAM nº 166 de 2011, a qual altera o anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº2 de 6 de setembro de 2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos para o estado de Minas Gerais e nos valores determinados por Caires (2009), o qual determinou os teores naturais de metais pesados

em solos do Estado de Minas Gerais como subsídio ao estabelecimento de valores de referência de qualidade.

O índice de geoacumulação (IGeo) foi originalmente definido por Muller (1979) para concentrações de metal, sendo expresso pela equação 1.

$$IGeo = \log_2 \frac{C_n}{B_n} \quad (1)$$

Outro parâmetro importante para identificar o nível de poluição no meio ambiente é o PI (Malkoc *et al.*, 2010; Faiz *et al.*, 2009; LU *et al.*, 2009), expresso conforme a equação 2.

$$PI = \frac{C_n}{B_n} \quad (2)$$

Para as duas equações:

. C_n (mg/Kg.solo) é a concentração mensurada do elemento n no solo;

. B_n (mg/Kg.solo) é a concentração de referência (*background value*) do elemento n no solo.

A classificação dos solos a partir do IGeo e PI estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2: Nível de poluição conforme a metodologia IGeo.

Classes Igeo		
0	IGEO < 0	Não poluído
1	0 < IGEO < 1	Não poluído para moderadamente poluído
2	1 < IGEO < 2	Moderadamente poluído.
3	2 < IGEO < 3	Moderadamente para fortemente poluído
4	3 < IGEO < 4	Fortemente poluído
5	4 < IGEO < 5	Fortemente poluído para extremamente poluído
6	5 < IGEO < 6	Extremamente poluído.

Tabela 3: Nível de poluição conforme a metodologia PI.

Classes PI		
	$PI \leq 1$	Nível baixo de poluição
	$1 \leq PI \leq 3$	Nível médio de poluição
	$PI > 3$	Nível alto de poluição

2.5 Análise estatística

No presente trabalho, a fim de se fazer uma análise comparativa entre as concentrações dos poluentes e estabelecer uma correlação entre os valores obtidos, foi construída uma

matriz de correlação de Pearson, a qual mede a intensidade e a direção de relações lineares entre duas variáveis. O objetivo desta análise é estimar a fonte de contaminação dos metais que apresentarem valores superiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009 e os índices utilizados para avaliar o grau de contaminação do solo. A intensidade corresponde ao grau de relacionamento entre duas variáveis. Quanto mais próximo dos extremos (-1 e +1), mais forte é a correlação. Quanto mais próximo de 0, mais fraca é a correlação linear. A direção diz respeito ao tipo de correlação. Correlação positiva ou direta, representa que os valores altos de uma variável correspondem a valores altos da outra variável. Correlação negativa ou inversa representa que valores altos de uma das variáveis correspondem a valores baixos de outra.

Para o estudo em questão, as variáveis que foram correlacionadas são as concentrações de metais obtidas através das análises laboratoriais e a partir dos coeficientes de correlação de Pearson obtidos, serão determinadas as forças de correlação entre os metais estudados e estimadas suas possíveis fontes de contaminação.

Na tabela 4 são mostrados os valores de correlação de Pearson e o grau de correlação entre as variáveis.

Tabela 4: Coeficientes de correlação de Pearson. (Santos, 2007).

Coeficientes de correlação de Pearson	
$r = 1$	Perfeita positiva
$0,8 \leq r < 1$	Forte positiva
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada positiva
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca positiva
$0 < r < 0,1$	Íntima positiva
0	Nula
$-0,1 < r < 0$	Íntima negativa
$-0,5 < r \leq -0,1$	Fraca negativa
$-0,8 < r \leq -0,5$	Moderada negativa
$-1 < r < -0,8$	Forte negativa
$r = -1$	Perfeita negativa

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após serem feitas as análises laboratoriais, foram determinadas as concentrações para os metais estudados, conforme a tabela 5.

Tabela 5: Concentração dos metais. (Fonte: Acervo do autor)

Pontos de Amostragem	Concentrações de Metais (mg.Kg-1.solo)								
	Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
Ponto 1 . 0 - 15 cm	0	3,12	50,10	101,30	31,70	0,74	1,14	0,46	2,27
Ponto 1 . 15 - 30 cm	0	2,94	78,00	101,90	21,08	1,31	1,57	0,45	4,52
Ponto 2 . 0 - 15 cm	0	3,07	79,35	99,79	31,23	0,73	1,12	0,45	2,24
Ponto 2 . 15 - 30 cm	0	2,76	73,31	95,78	19,81	1,23	1,48	0,42	4,25
Ponto 3 . 0 - 15 cm	0	27,62	318,78	176,72	464,83	1,31	3,21	2,02	9,06
Ponto 3 . 15 - 30 cm	0	27,96	308,40	181,48	475,47	1,31	3,60	2,38	9,25
Ponto 4 . 0 - 15 cm	0	5,34	124,24	138,74	53,66	0,31	1,71	0,50	1,26
Ponto 4 . 15 - 30 cm	0	4,90	181,85	294,26	453,89	1,25	1,74	0,48	2,17
Ponto 5 . 0 - 15 cm	0	2,28	66,00	233,60	7,22	0,68	0,97	0,31	0,76
Ponto 5 . 15 - 30 cm	0	3,54	122,50	320,00	22,53	1,22	1,73	0,40	1,10
Ponto 6 . 0 - 15 cm	0	4,66	89,30	46,80	7,83	0,59	1,12	0,38	4,58
Ponto 6 . 15 - 30 cm	0	4,76	48,50	35,20	3,71	0,64	0,73	0,37	6,07
CONAMA 420/2009 (Prevenção)	-	60	-	-	300	75	30	1,3	72

Tabela 6: Limites de concentração de metais por classe de uso (Fonte: Resolução CONAMA 420/2009).

Classe	CONAMA 420/2009								
	Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
Prevenção	-	60	-	-	300	75	30	1,3	72
Agrícola	-	200	-	-	450	150	70	3	180
Residencial	-	400	-	-	1000	300	100	8	300
Industrial	-	600	-	-	2000	400	130	20	900
Águas Subterrâneas	3500**	2000*	400**	2450**	1050**	50*	20	5*	10*

*Padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde definidos na Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

** Valores calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo da Resolução CONAMA 420/2009.Obs.: Valores em mg.Kg⁻¹.

Considerando-se os critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, mostrados na Tabela 6, observou-se que a maioria dos elementos se encontra dentro do

limite dos valores estabelecidos para “Prevenção”, o qual corresponde a concentração dentro da qual o solo é capaz de sustentar suas funções principais.

As exceções foram os elementos Zn, o qual apresentou valores acima do critério de “Investigação” estabelecido para uso agrícola em três amostras, no ponto 3, nas profundidades de 0-15 e 15-30 cm e no ponto 4 na profundidade de 15-30 cm, apresentando as respectivas concentrações: 464,83 mg.Kg⁻¹, 475,47 mg.Kg⁻¹ e 453,89 mg.Kg⁻¹, quando o limite estabelecido pela norma é de 450 mg.Kg⁻¹ e o elemento Cd, o qual apresentou valores também acima do critério de “Investigação” estabelecido para uso agrícola nas amostras do ponto 3, com os respectivos valores de 2,02 mg.Kg⁻¹ e 2,38 mg.Kg⁻¹, quando o limite estabelecido pela norma para este uso é de 3 mg.Kg⁻¹.

A fim de avaliar a influência dos valores de *background* adotados no presente estudo nos resultados encontrados para IGeo e PI, são apresentados a seguir os valores para estes índices segundo os dois backgrounds escolhidos

De acordo com os valores de *background* relativos à Resolução DN COPAM 166/2011 apresentados na Tabela 7, pôde-se obter os valores IGeo, mostrados na Tabela 8 e os valores de PI, conforme a Tabela 9.

Tabela 7: Valores de background. (Fonte: DN COPAM nº166/2011).

Background (Bn) (mg.Kg-1.solo)								
Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
-	49	-	-	46,5	75	21,5	0,4	19,5

Tabela 8: Valores de IGeo segundo o Background da DN COPAM 166/2011. (Fonte: Acervo do autor).

Pontos de Amostragem	IGeo								
	Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
Ponto 1 . 00 - 15 cm	-	-4,56	-	-	-1,14	-7,25	-4,82	-0,38	-3,69
Ponto 1 . 15 - 30 cm	-	-4,64	-	-	-1,73	-6,42	-4,36	-0,42	-2,69
Ponto 2 . 00 - 15 cm	-	-4,58	-	-	-1,16	-7,27	-4,85	-0,42	-3,71
Ponto 2 . 15 - 30 cm	-	-4,74	-	-	-1,82	-6,52	-4,45	-0,51	-2,78
Ponto 3 . 00 - 15 cm	-	-1,41	-	-	2,74	-6,42	-3,33	1,75	-1,69
Ponto 3 . 15 - 30 cm	-	-1,39	-	-	2,77	-6,42	-3,16	1,99	-1,66
Ponto 4 . 00 - 15 cm	-	-3,78	-	-	-0,38	-8,50	-4,24	-0,26	-4,54
Ponto 4 . 15 - 30 cm	-	-3,91	-	-	2,70	-6,49	-4,21	-0,32	-3,75
Ponto 5 . 00 - 15 cm	-	-5,01	-	-	-3,27	-7,37	-5,06	-0,95	-5,27
Ponto 5 . 15 - 30 cm	-	-4,38	-	-	-1,63	-6,53	-4,22	-0,58	-4,73
Ponto 6 . 00 - 15 cm	-	-3,98	-	-	-3,16	-7,57	-4,85	-0,66	-2,68
Ponto 6 . 15 - 30 cm	-	-3,95	-	-	-4,23	-7,46	-5,47	-0,70	-2,27

Tabela 9: Valores de PI segundo o Background da DN COPAM 166/2011. (Fonte: Acervo do autor).

Pontos de Amostragem	PI								
	Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
Ponto 1 . 00 - 15 cm	-	0,06	-	-	0,68	0,01	0,05	1,15	0,12
Ponto 1 . 15 - 30 cm	-	0,06	-	-	0,45	0,02	0,07	1,13	0,23
Ponto 2 . 00 - 15 cm	-	0,06	-	-	0,67	0,01	0,05	1,13	0,11
Ponto 2 . 15 - 30 cm	-	0,06	-	-	0,43	0,02	0,07	1,05	0,22
Ponto 3 . 00 - 15 cm	-	0,56	-	-	10,00	0,02	0,15	5,05	0,46
Ponto 3 . 15 - 30 cm	-	0,57	-	-	10,23	0,02	0,17	5,95	0,47
Ponto 4 . 00 - 15 cm	-	0,11	-	-	1,15	0,00	0,08	1,25	0,06
Ponto 4 . 15 - 30 cm	-	0,10	-	-	9,76	0,02	0,08	1,20	0,11
Ponto 5 . 00 - 15 cm	-	0,05	-	-	0,16	0,01	0,05	0,78	0,04
Ponto 5 . 15 - 30 cm	-	0,07	-	-	0,48	0,02	0,08	1,00	0,06
Ponto 6 . 00 - 15 cm	-	0,10	-	-	0,17	0,01	0,05	0,95	0,23
Ponto 6 . 15 - 30 cm	-	0,10	-	-	0,08	0,01	0,03	0,93	0,31

Assim, através dos valores obtidos de IGeo e PI, pôde-se inferir que para o *background* da Resolução DN COPAM 166/2011, nas amostras de solo do ponto 1, considerando-se os valores de IGeo ficaram na faixa do “Não poluído”, ao passo que os valores encontrados de PI para as profundidades de 0-15 cm e 15-30 cm apresentaram valores de 1,15 e 1,13, correspondentes a “Nível médio de poluição”.

Isso ocorreu de forma similar no ponto 2, no qual o elemento Cd apresentou IGeo na faixa do “Não poluído” e PI em “Nível médio de poluição” também de 0-15 cm e 15-30 cm com valores de 1,13 e 1,05, respectivamente.

Já no ponto 3, os elementos Cd e Zn apresentaram valores acima do estabelecido como “Não poluído”. Nas profundidades de 0-15 cm e 15-30 cm os valores de IGeo encontrados para o elemento Zn foram na faixa do “Moderadamente poluído para fortemente poluído”, apresentando valores respectivos de 2,74 e 2,77; e para o elemento Cd também nas profundidades de 0-15 cm e 15-30 cm, os valores de IGeo encontrados ficaram na faixa do “Moderadamente poluído”, apresentando valores de 1,75 e 1,99, respectivamente. Ainda neste ponto, os valores de PI encontrados tanto para o Cd quanto para o Zn nas profundidades de 0-15 cm e 15-30 cm, apresentaram “Nível alto de poluição”.

No ponto 4, na profundidade de 15-30 cm o valor IGeo encontrado foi de 2,70, dentro da faixa do “Moderadamente poluído a fortemente poluído” para o elemento Zn. Já para o PI, os elementos Zn e Cd apresentaram valores acima do estabelecido como “Nível baixo de poluição”. Para o elemento Zn, na profundidade de 0-15 cm, o valor

encontrado foi de 1,15 na faixa do “Nível médio de poluição” e de 0-30 cm, o valor foi de 9,76, caracterizando “Nível alto de poluição”. No caso do elemento Cd, os valores apresentaram “Nível médio de poluição” nas faixas de 0-15 cm e 15-30 cm com valores respectivos de 1,25 e 1,20.

Os pontos 5 e 6 utilizados para fins de comparação dos valores de concentração conforme a distância lateral em relação a BR040 apresentaram valores dentro da faixa de “Prevenção”, estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009. Quanto ao IGeo e o PI, os pontos 5 e 6 apresentaram valores dentro das faixas do “Não poluído”, e “Nível baixo de poluição”.

O elemento Fe apresentou valores elevados em grande parte das amostras, mas dados os valores de background estabelecidos pela Resolução COPAM 166/2011 e os valores de referência de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, os níveis de Fe estão numa faixa adequada. Além disso, uma vez que o tipo de solo da região é o latossolo vermelho-amarelo, os níveis de Fe e Al tendem a ser naturalmente elevados.

De acordo com os valores de *background* relativos determinados por Caires (2009) apresentados na Tabela 10, pôde-se obter os valores IGeo, mostrados na Tabela 11 e os valores de PI, conforme a Tabela 12.

Tabela 10: Valores de background para latossolos do Estado de Minas Gerais. Fonte: (Caires, 2009).

Background (Bn) (mg.Kg-1.solo) . (Caires, 2009)								
Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
149,15	83,38	345,76	78,69	37,42	197,26	53,48	0,4	1,43

Tabela 11: Valores de IGeo segundo o background de Caires, 2009. (Fonte: Acervo do autor).

Pontos	IGeo								
	Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
P1 . 00 - 15 cm	-	-5,33	-3,37	-0,22	-0,82	-8,64	-6,14	-0,38	0,08
P1 . 15 - 30 cm	-	-5,41	-2,73	-0,21	-1,41	-7,82	-5,68	-0,42	1,08
P2 . 00 - 15 cm	-	-5,35	-2,71	-0,24	-0,85	-8,66	-6,16	-0,42	0,06
P2 . 15 - 30 cm	-	-5,50	-2,82	-0,30	-1,50	-7,91	-5,76	-0,51	0,99
P3 . 00 - 15 cm	-	-2,18	-0,70	0,58	3,05	-7,82	-4,64	1,75	2,08
P3 . 15 - 30 cm	-	-2,16	-0,75	0,62	3,08	-7,82	-4,48	1,99	2,11
P4 . 00 - 15 cm	-	-4,55	-2,06	0,23	-0,06	-9,90	-5,55	-0,26	-0,77
P4 . 15 - 30 cm	-	-4,67	-1,51	1,32	3,02	-7,89	-5,53	-0,32	0,02
P5 . 00 - 15 cm	-	-5,78	-2,97	0,98	-2,96	-8,77	-6,37	-0,95	-1,50
P5 . 15 - 30 cm	-	-5,14	-2,08	1,44	-1,32	-7,92	-5,54	-0,58	-0,96
P6 . 00 - 15 cm	-	-4,75	-2,54	-1,33	-2,84	-8,97	-6,16	-0,66	1,09
P6 . 15 - 30 cm	-	-4,72	-3,42	-1,75	-3,92	-8,85	-6,78	-0,70	1,50

Tabela 12: Valores de PI de acordo com o Background de Caires, 2009.. (Fonte: Acervo do autor).

Pontos	PI								
	Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
P1 . 00 - 15 cm	-	0,04	0,14	1,29	0,85	0,00	0,02	1,15	1,59
P1 . 15 - 30 cm	-	0,04	0,23	1,29	0,56	0,01	0,03	1,13	3,16
P2 . 00 - 15 cm	-	0,04	0,23	1,27	0,83	0,00	0,02	1,13	1,57
P2 . 15 - 30 cm	-	0,03	0,21	1,22	0,53	0,01	0,03	1,05	2,97
P3 . 00 - 15 cm	-	0,33	0,92	2,25	12,42	0,01	0,06	5,05	6,34
P3 . 15 - 30 cm	-	0,34	0,89	2,31	12,71	0,01	0,07	5,95	6,47
P4 . 00 - 15 cm	-	0,06	0,36	1,76	1,43	0,00	0,03	1,25	0,88
P4 . 15 - 30 cm	-	0,06	0,53	3,74	12,13	0,01	0,03	1,20	1,52
P5 . 00 - 15 cm	-	0,03	0,19	2,97	0,19	0,00	0,02	0,78	0,53
P5 . 15 - 30 cm	-	0,04	0,35	4,07	0,60	0,01	0,03	1,00	0,77
P6 . 00 - 15 cm	-	0,06	0,26	0,59	0,21	0,00	0,02	0,95	3,20
P6 . 15 - 30 cm	-	0,06	0,14	0,45	0,10	0,00	0,01	0,93	4,24

Considerando os valores de background determinados por Caires (2009), utilizados no cálculo do IGeo e do PI das amostras de solo em questão, pode-se dizer que para o ponto 1, apenas o elemento Pb apresentou valores IGeo referentes a poluição, considerando a profundidade de 0-15 cm este elemento se mostrou na faixa do “Não poluído a moderadamente poluído” e de 15-30 cm na faixa do “Moderadamente poluído”. Considerando o PI, o ponto 1 apresentou alterações para os elementos Fe, Cd e Pb, sendo que para a profundidade de 0-15 cm todos apresentaram “Nível médio de poluição” e para a profundidade de 15-30 cm os elementos Fe e Cd apresentaram também “Nível médio de poluição, enquanto o elemento Pb se mostrou na faixa do “Nível alto de poluição”.

Para o ponto 2, considerando o IGeo, apenas o elemento Pb apresentou alterações, na faixa do “Não poluído a moderadamente poluído” para as profundidades de 0-15 cm e 15-30 cm. Ainda para o ponto 2, considerando o PI, os elementos Fe, Cd e Pb apresentaram-se na faixa do “Nível médio de poluição” também para as faixas de 0-15 cm e 15-30 cm.

Dentro do critério do IGeo, o ponto 3, para as profundidades de 0-15 cm e de 15-30 cm foram detectadas alterações para os elementos Fe, Zn, Cd e Pb, sendo que o Fe, apresentou-se “Não poluído a moderadamente poluído”, o elemento Zn na faixa do “Fortemente poluído”, Cd “Moderadamente poluído” e Pb “Moderadamente a

fortemente poluído”. Ainda no ponto 3, para o PI, estes elementos também se mostraram alterados, sendo que o Fe apresentou “Nível médio de poluição” e os elementos Zn, Cd e Pb apresentaram “Nível alto de poluição”, todos para as profundidades de 0-15 cm e 15-30 cm.

Considerando o ponto 4, o elemento Fe apresentou alterações em ambas profundidades, sendo de 0-15 cm “Não poluído a moderadamente poluído” e de 15-30 cm “Moderadamente poluído”. Ainda para o mesmo ponto, o elemento Zn apresentou-se “Fortemente poluído” na profundidade de 15-30 cm e o elemento Pb, apresentou-se de “Não poluído a moderadamente poluído também de 15-30 cm de profundidade. Para o PI estes elementos também se mostraram alterados, sendo que de 0-15 cm de profundidade os elementos Fe, Zn e Cd apresentaram “Nível médio de poluição” e de 15-30 cm os elementos Fe e Zn apresentaram “Nível alto de poluição” e Cd e Pn “Nível médio de poluição”.

No ponto 5, considerando o IGeo, apenas o elemento Fe apresentou-se alterado em ambas profundidades, sendo de 0-15 cm “Não poluído a moderadamente poluído” e 15-30 cm “Moderadamente poluído”. Com relação ao PI, o Fe apresentou “Nível médio de poluição” de 15-30 cm e “Nível alto de poluição” de 15-30 cm. Ainda para o PI, no ponto 5 o Cd apresentou “Nível médio de poluição na profundidade de 15-30 cm.

Com relação ao ponto 6, a maioria dos elementos não apresentou alterações para os dois índices analisados, exceto o Pb que de acordo com o IGeo apresentou-se “Moderadamente poluído” nas profundidades de 0-15 cm e 15-30 cm e “Fortemente poluído”, considerando o PI, também para as duas profundidades.

Com o intuito de se fazer uma análise da correlação linear entre as concentrações dos elementos estudados e assim, estimar a fonte de poluição dos metais pesados que apresentaram valores acima dos critérios estabelecidos como normais, ou com baixo grau de contaminação, foi construída uma matriz de correlação de Pearson, mostrando a força de interação entre todos os elementos, dois a dois conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Matriz de correlação de Pearson.

Matriz de Correlação de Pearson									
	Al	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
Al	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu	0	1	0,935	0,130	0,807	0,438	0,926	0,989	0,836
Mn	0	0,935	1	0,392	0,918	0,535	0,959	0,922	0,672
Fe	0	0,130	0,392	1	0,429	0,430	0,336	0,138	-0,291
Zn	0	0,807	0,918	0,429	1	0,566	0,832	0,800	0,583
Cr	0	0,438	0,535	0,430	0,566	1	0,600	0,477	0,445
Ni	0	0,926	0,959	0,336	0,832	0,600	1	0,943	0,687
Cd	0	0,989	0,922	0,138	0,800	0,477	0,943	1	0,819
Pb	0	0,836	0,672	-0,291	0,583	0,445	0,687	0,819	1

A partir desta matriz pôde-se observar a presença de correlações nas faixas de moderada a forte positivas entre grande parte dos metais estudados, destacando-se os valores de 0,819 entre Cd e Pb, 0,943 entre Ni e Cd, 0,687 entre Ni e Pb, 0,832 entre Ni e Zn e 0,800 entre Cd e Zn.

Posto isso, pode-se observar que os elementos Zn, Cd e Pb apresentaram valores que demandam uma análise mais aprofundada, a fim de se investigar a causa dos altos índices encontrados para estes elementos.

Fazendo uma análise do mapa geológico na área em estudo (Figura 4), pode-se afirmar que na região não há presença de minerais precursores de Zn, Cd e Pb, já que se destacam na composição litogênica da região estudada, ressaltada no quadro amarelo do mapa, a hornblenda-biotita, biotita, rocha anfíbolítica, gnaisse quartzoso e rocha calcissilicática. A maioria destes minerais possui o elemento Fe em sua composição, fator que pode explicar a alta concentração deste elemento em todas as amostras de solo coletadas, não caracterizando este metal como de origem antropogênica, mas como fruto de processos naturais.

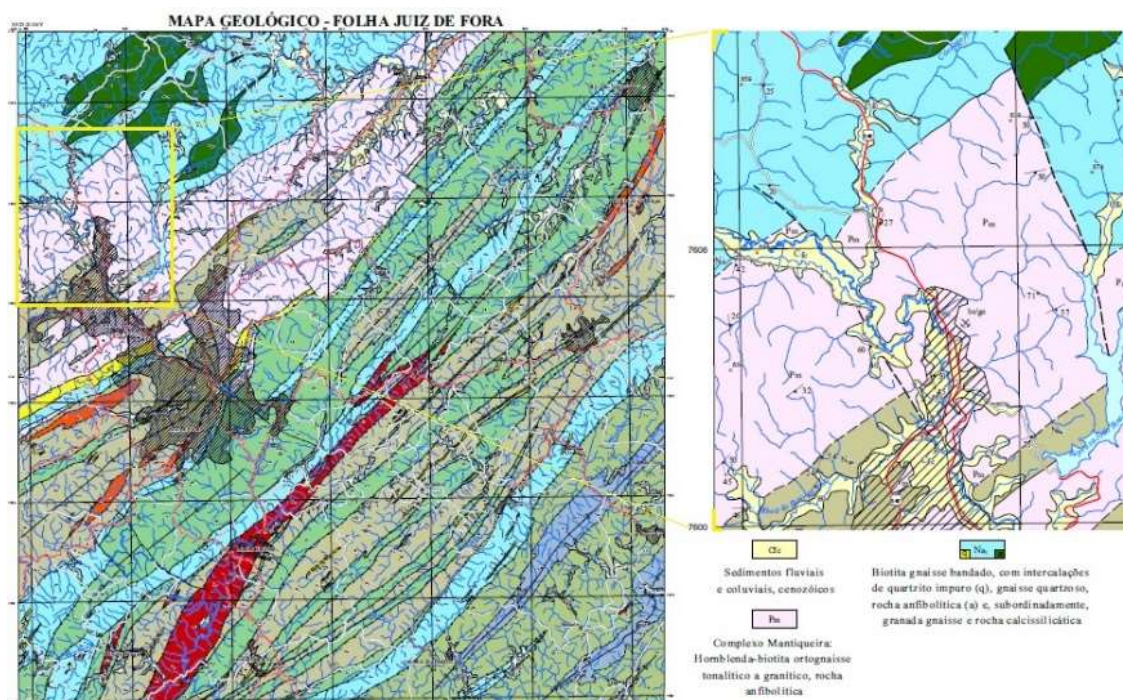


Figura 9: Mapa geológico de Juiz de Fora. (Fonte: CODEMIG - Portal da Geologia)

De acordo com a literatura, sabe-se que os elementos Zn, Ni, Cd e Pb são metais que estão presentes em fertilizantes sintéticos fosfatados. Segundo Mortvedt (1987), as rochas fosfatadas usadas na produção dos fertilizantes são as maiores fontes de contaminação com Cd em solos agrícolas. Estima-se que a União Européia adiciona a seus solos cerca de 300 t ano⁻¹ de Cd (Huton & Symon, 1986) e que a utilização de rochas fosfatadas da região oeste dos Estados Unidos resultou em adição de 100 g ha⁻¹ ano⁻¹ de Cd aos solos desse país (Mulla et al., 1980).

Apesar de na maioria dos casos estes fertilizantes apresentarem concentrações destes elementos dentro das normas estabelecidas e dos solos coletados não se encontrarem em áreas cultiváveis, há a possibilidade de ocorrer processos de dispersão de destes elementos pelo solo, devido à presença de propriedades rurais nas adjacências que, porventura estejam utilizando estes produtos em suas culturas vegetais.

O Zn é um elemento muito utilizado em processos de galvanização de ferro e aço como “metal sacrifício”, a fim de proteger a camada primária do produto da corrosão. Neste sentido, caso haja proximidade dos pontos de coleta com indústrias que utilizam este método em seus processos produtivos, as concentrações de Zn podem ser mais elevadas devido a deposição atmosférica, podendo explicar, caso seja esta a fonte de poluição, os

valores altos deste elemento encontrados nos pontos 3 e 4, bem como os valores de IGeo e PI, também elevados, conforme mostrado anteriormente.

O Cd é um elemento que existe em pequenas quantidades na crosta terrestre e suas reservas são difíceis de ser encontradas. Normalmente é obtido da mineração do sulfeto de Zinco, através de precipitação utilizando sulfatos, fatores que podem justificar as fortes correlações encontradas entre Zn e Cd na matriz de correlação de Pearson, partindo da hipótese de que as altas concentrações de Zn em algumas amostras justifiquem os valores anômalos encontrados para IGeo e PI destes elementos.

O Cd é um elemento também encontrado no petróleo e em muitos de seus derivados, destacando-se o betume e a gasolina, os quais são, respectivamente, matéria prima para produção de asfalto e um dos principais combustíveis fósseis utilizados por veículos automotores. Com isso, pode-se supor que as altas correlações encontradas entre Pb e Cd estejam relacionadas a estas fontes de poluição devido à proximidade com a rodovia BR-040, a qual possui um fluxo alto e constante de veículos, bem como o desgaste do asfalto pelo seu uso e intemperismo; e ao entrar no ciclo hidro geoquímico estes metais podem ser drenados pelos solos adjacentes junto com a água da chuva.

Além disso, o Pb pode ser encontrado em aditivos antidetonantes, como o tetraetilchumbo (PbC_2H_5)₄, responsáveis por aumentar a octanagem da gasolina. Este fator pode explicar as altas faixas IGeo e PI encontradas para este elemento, já que após a combustão, o Pb, pode se concentrar no solo devido a deposição atmosférica.

Apesar dos valores anômalos encontrados para o metal Zn, bem como os valores IGeo e PI que caracterizam contaminação por Zn, Cd e Pb nos canteiros da rodovia BR-040, observou-se uma diminuição da concentração destes elementos conforme o afastamento lateral da rodovia, mostrados pelos pontos de controle P5 e P6, que distam respectivamente 300 e 1500 m da rodovia, podendo supor que as atividades inerentes à BR-040 são as principais fontes de contaminação dos pontos estudados.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Comparando-se as concentrações dos metais com a Resolução CONAMA 420/2009, através dos índices IGeo e PI determinados e as análises estatísticas feitas com auxílio da matriz de correlação, foram levantadas diversas hipóteses plausíveis para justificar a contaminação por Zn, Cd e Pb, constatadas.

Dentre as possíveis fontes, pode-se destacar uma possível dispersão atmosférica de Zn devido a processos de galvanização provenientes de indústrias próximas aos pontos estudados; associações de Cd com o Zn devido à forte correlação entre eles, já que são metais de mesma origem mineralógica; derivados do petróleo, como o betume utilizado no asfalto e Pb presente em aditivos utilizados para aumentar a octanagem da gasolina; e fertilizantes fosfatados, ricos em Zn, Ni, Cd e Pb, que ao serem utilizados em grandes volumes, pode gerar um grande passivo em propriedades com áreas agricultáveis.

Contudo, não se pode afirmar com precisão a real origem da contaminação detectada pelos métodos utilizados, mas acredita-se que o tráfego na BR-040 é responsável pelo agravamento das concentrações de metais pesados, mais especificamente Cd e Pb, dadas as inúmeras variáveis e possíveis fontes de poluição presentes neste local.

O estudo utilizando dois conjuntos de valores de *background* distintos foi interessante haja vista a diferença nos resultados obtidos para os dois índices analisados. Assim, é importante ressaltar que há a necessidade de se escolher um *background* adequado e que caracterize bem a área estudada, afim de obter resultados mais precisos e próximos da realidade, garantindo a validade do método utilizado.

Neste sentido, para que se possa compreender melhor as fontes de poluição provenientes da BR-040, bem como obter resultados mais precisos quanto as reais fontes de contaminação dos canteiros das rodovias, pode-se sugerir que em trabalhos futuros:

.Seja feita uma avaliação mais precisa da influência dos parâmetros físico-químicos na concentração dos poluentes e a influência destes com a biodisponibilidade dos metais estudados;

.Se faça um estudo de *background* específico para a região estudada;

.Sejam estudados mais pontos da rodovia que contemplem o município de Juiz de Fora para obter resultados mais contundentes sobre a influência da BR-040 no grau de contaminação do solo adjacente.

. Utilizar modelos de dispersão de poluentes que auxiliem na detecção da direção das plumas de contaminação, tanto no solo quanto na atmosfera, para verificar o grau de influência das possíveis fontes no solo em questão, refutando hipóteses que sejam menos prováveis.

REFERÊNCIAS

1. Alloway, B. J. The origins of heavy metals in soils. In: B.J. Alloway (Ed.). Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional Publ., New York, 1995. p. 38–57.
2. Apegyei E, Bank MS, Spengler JD (2011) Distribution of heavy metals in Road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. Atmos Environ 45:2310–2323.
3. Bai J, Cui B, Deng W, Wang Q, Ding Q (2007) Plant Pb contents in elevation zones of the Changbai Mountain National Nature Reserve. Pedosphere 17:229–234.
4. Baize, D., Sterckeman, T. Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. Science of the total Environment, v. 264, p.127– 139. 2001.
5. Biester, H., Mueller, G., Schoeler, H.F., 2002. Estimating distribution and retention of mercury in three different soils contaminated by emission from chlor-alkali plants: Part I. The Science of the Total Environment 284, 177–189.
6. Birmili, W.; Allen, A.; Bary, F.; Harrison, R. Trace metal concentrations and water solubility in size-fractionated atmospheric particles and influence of road traffic. Environmental Science and Technology, 14(4):1144-53, 2006.
7. Carrero JA, Arrizabalaga I, Bustamante J, Goienaga N, Arana G, Madariaga JM (2013). Diagnosing the traffic impact on roadside soils through a multi analytical data analysis of the concentration profiles of traffic-related elements. Sci Total Environ 458-460:427–434.

8. Christoforidis A, Stamatis N (2009). Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece. *Geoderma* 151:257–263.
9. CONAMA (2009) Resolução 420 do Conselho Nacional de Meio Ambiente. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>. Acesso: 26 de janeiro de 2018.
10. Dierkes C, Geiger WF. 1999. Pollution retention capabilities of roadside soils. *Water Science and Technology* 39: 201-208.
11. Elik, A. and Akçay, M. 2000. Spatio-temporal change of heavy metal pollution in Sivas City. *Tr. J. Eng. Environ. Sci.*, 24: 15–24.
12. Faiz, Y., Tufail, M., Tayyeb M. J., Chaudhry, M. M., Siddique-Naila. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan. *Microchemical Journal* 92:186-192.
13. G.T. Shi, Z.L. Chen, S.Y. Xu, J. Zhang, L. Wang, C.J. Bi, J.Y. Teng. Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China, *Environ. Pollut.* 156 (2008) 251–260.
14. Garcia, R., Millan, E., 1998. Assessment of Cd, Pb and Zn contamination in roadside soils and grasses from Gipuzkoa (Spain). *Chemosphere* 37, 1615e1625.
15. Gill W, Ring P, Higgins NMP, Johnston PM (2014) Accumulation of heavy metals in a constructed wetland treating roadrunoff Laurence. *EcolEng* 70:133–139.
16. Gope W, Masto RE, George J, Hoque RR, Balachandran S (2017) Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street dust of Asansol, India. *Ecotoxicol Environ Safe* 138:231–241.

17. Gunawardana C, Goonetilleke A, Egodawatta P, Dawes L, Kokot S (2012) Source characterization of Road dust base donchemical and mineralogical composition. *Chemosphere* 87:163–170.
18. Hammond, P. C.: 1982, 'Metabolism of Lead', in J. J. Chisolm Jr. And D. M. O'Hara (Eds), *Lead Absorption in Children: Management, Clinical, and Environmental Aspects*, Urban and Schwarzenberg, Baltimore, Munich.
19. Hjortenkrans, D. S. T., Bergbäck, B. G., & Häggerud, A. V. (2006). New metal emission patterns in Road traffic environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117, 85–98.
20. Hjortenkrans, D.S.T., Bergbäck, B.G., Häggerud, A.V., 2007. Metal emissions from brakelining sand tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005. *Environ. Sci. Technol.* 41, 5224-5230.
21. Huton, M.; symon, C. The quantities of cadmium, lead, mercury and arsenic entering the UK environment from human activities. *Science of the Total Environment*, v.57, p.129-150, 1986.
22. Kadi, M. W. "Soil Pollution Hazardous to Environment": A case study on the chemical composition and correlation to automobile traffic of the roadside soil of Jeddahcity, Saudi Arabia. *Journal of Hazardous Materials*, 168: 1280–1283, 2009.
23. KlugeB, WerkenthinM, Wessolek G (2014). Metal leaching in a highway embankment on Field and laboratory scale. *Sci Total Environ* 493:495–504.
24. Li, L. Y. (2005). Retention capacity and enviromental mobility of Pb in soils along highway corridor. *Water, Air, and Soil Pollution*, 170, 211–227.
25. Liang, L., Horvat, M., Danilchik, P., 1996. A novel analytical method for determination of picogram levels of total mercury in gasoline and other petroleum products. *The Science of the Total Environment* 187, 57–64.

26. Luilo GB, Othman OC, Mrutu A (2014) Arsenic: a toxic trace element of public health concern in urban roadside soils in Dares Salaam City. *J Mater Environ Sci* 56:1742–1749.
27. Luo XS, Yu S, Zhu YG, Li XD (2012) Trace metal contamination in urban soil of China. *Sci Total Environ* 421–422:17–30.
28. Mortvedt, J.J. Cadmium levels in soils and plants from some long-term soil fertility experiments in United States of America. *Journal of Environmental Quality*, v.16, p.137-142, 1987.
29. Mulla, D.J.; Page, A.L.; Gange, T.J. Cadmium accumulations and bioavailability in soils from long-term phosphorus fertilization. *Journal of Environmental Quality*, v.9, p.408-412, 1980.
30. Munch, D. (1993). Concentration profiles of arsenic, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel, zinc, vanadium and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) in Forest soil beside na urban road. *Science of Total Environment*, 138, 47–55.
31. Nabuloa G, Oryem-Origa H, Diamond M (2006) Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda. *Environ Res* 101:42–52.
32. Othman I, Al-Oudat M, Al-Masri MS (1997) Lead levels in roadside soils and vegetation of Damascus city. *Sci Total Environ* 207:43–48.
33. Peralta-Videa, J.R.; Lopez, L.M.; Narayan, M.; Saupe, G. & Gardea-Torresdey, J. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 41:1665-1677, 2009.

34. Rodriguez M, Rodriguez E (1982) Lead and cadmium levels in soils and plants near highways and their correlations with traffic density. *Environ Pollut Ser B4*:281–290.
35. Schreck, E., Foucault, Y., Sarret, G., Sobanska, S., Cécillon, L., Castrec-Rouelle, M., Uzu, G., Dumat, C., 2012a. Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: mechanisms involved for lead. *Science of the Total Environment* 427e428, 253e262.
36. Sezgin, N., Ozcan, H.K., Demir, G., Nemlioglu, S., and Bayat, C., 2003. Determination of Heavy Metal Concentrations in Street Dusts in Istanbul E-5 Highway. *Environment International* 29: 979–985.
37. Shi G, Chen Z, Xu S, Zhang J, Wang L, Bi C, Teng J (2008) Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China. *Environ Pollut* 156:251–260.
38. Santos, C. (2007) *Estatística Descritiva – Manual de Auto-aprendizagem*, Lisboa, Edições Sílabo.
39. Tack, F.M.G., Vanhaesebroeck, T., Verloo, M.G., Rompaey, K.V., Rannst, E.V., 2005. Mercury baseline levels in Flemish soils (Belgium). *Environmental Pollution* 134, 173–179.
40. Torri, L., Fate of cadmium, copper, lead and zinc on soils after the application of different treated sewage sludge in soils of the Pampas region. In: *Sewage Treatment: Uses, Processes and Impact*. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY 11788. ISBN: 978-1-60692-959-9. 95-123. 394 p.
41. Turer, d. G., and B. J. Maynard. (2003) Heavy metal contamination in highway soils. Comparison of Corpus Christi, Texas and Cincinnati Ohio shows organic matter is key to mobility. *Clean Technologies and Environmental Policy* 4:235-245.

42. Viard B, Pihan F, Promeyrat S, Pihan JC (2004) Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: bioaccumulation in soil, Graminaceae and land snails. *Chemosphere* 55:1349–1359.
43. Ward N, Brooks RR, Roberts E, Boswell CR (1977) Heavy metal pollution from automotive emissions and its effect on roadside soil and pasture species in New Zealand. *Environ Sci Technol* 11:917–920.
44. Werkentin M, Kluge B, Wessolek G (2014) Metals in European roadside soil and soil solution - a review. *Environ Pollut* 189:98–110.
45. Wiseman CLS, Zereini F, Püttmann W (2013) Traffic-related trace element fate and uptake by plants cultivated in roadside soils in Toronto, Canada. *Sci Total Environ*.
46. Zanello, S.; Melo, V. F.; Nagata, Noemi. Study of different environmental matrices to assess the extension of metal contamination along highways. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 01, p. 01-11, 2017.
47. Zereini, F.; Wiseman, C.L.S.; Püttmann, W. Changes in palladium, platinum, and rhodium concentrations, and their spatial distribution in soils along a major highway in Germany from 1994 to 2004. *Environmental Science & Technology*, 41:451–6, 2007.