



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Ana Catarina Mendes Luís

**AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE DO SOLO
URBANO EM CIDADES DE RÁPIDA
EXPANSÃO, SEM PLANEAMENTO URBANO E
COM SISTEMAS SANITÁRIOS DEFICIENTES**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências, Área de Especialização em Recursos Geológicos orientada pela Professora Doutora Maria Manuela da Vinha Guerreiro da Silva e pela Professora Doutora Paula Cristina Simões de Carvalho e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra ao Departamento de Ciências da Terra.

Julho de 2019

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Ciências da Terra

AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE DO SOLO URBANO EM CIDADES DE RÁPIDA EXPANSÃO, SEM PLANEAMENTO URBANO E COM SISTEMAS SANITÁRIOS DEFICIENTES

Ana Catarina Mendes Luís

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências, Área de Especialização em Recursos Geológicos orientada pela Professora Doutora Maria Manuela da Vinha Guerreiro da Silva e pela Professora Doutora Paula Cristina Simões de Carvalho e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra ao Departamento de Ciências da Terra.

Julho 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Resumo

O objetivo desta dissertação foi avaliar a modificação nas propriedades físico-químicas e na composição química dos solos pelos efeitos da urbanização e avaliar os riscos para a saúde humana em solos urbanos de cidades angolanas (Benguela, Lubango e Humpata) em rápida expansão, com diferentes condições climáticas e substratos geológicos.

Os solos urbanos de Benguela e Lubango apresentaram valores de pH e condutividade elétrica mais elevados do que os solos naturais. Nos solos urbanos de Benguela, a média do carbono orgânico foi superior à dos solos naturais e dos solos agrícolas.

O cálculo dos fatores de enriquecimento demonstrou que alguns solos de Benguela estavam extremamente enriquecidos em Cd e Pb, os solos de Lubango encontram-se moderadamente enriquecidos em Pb e alguns solos de Humpata possuem enriquecimento significativo em Cd e Pb. Para os solos urbanos, apenas a região de Benguela exibiu índice de carga de poluição superior a 1, o que indicou contaminação dos solos em Cd, Cu, Mn, Mo, Pb, Sb, Sn e Zn.

Para os metais Cd, Cu, Pb e Zn nos solos urbanos de Benguela, o índice de risco foi inferior a 1 representando um risco não-cancerígeno insignificante. O risco cancerígeno através de ingestão para o Pb ultrapassou o limite máximo aceitável estabelecido pela USEPA para crianças, mas o Pb é apenas considerado potencialmente cancerígeno.

O solo urbano de Benguela encontrava-se poluído em Cd, Cu, Pb e Zn. Estes metais foram adicionados aos solos por atividades antrópicas e os seus teores são controlados pelo tipo de solo e pelo pH.

Apesar dos processos de urbanização serem semelhantes nas 3 cidades, os solos urbanos de Benguela apresentaram maior poluição em Cd, Cu, Pb, Sb, Sn e Zn. Tal deve-se às características geográficas, climáticas e geológicas da região de Benguela, que condicionam o tipo de solo.

Palavras-chave: Cidades em rápida expansão, solos, urbanização, contaminação, riscos para a saúde humana.

Abstract

The objective of this dissertation was to evaluate the changes in physical-chemical properties and chemical composition of soils due to the effects of urbanization and to evaluate the risks to human health in urban soils of the Angolan cities (Benguela, Lubango and Humpata) in rapid expansion, with different climatic conditions and geological substrates.

The urban soils of Benguela and Lubango have higher values of pH and electrical conductivity than natural soils. In urban Benguela soils, the average of organic carbon was higher than that of natural soils and agricultural soils.

The calculation of the enrichment factors showed that some soils of Benguela were extremely enriched in Cd and Pb, the soils of Lubango are moderately enriched in Pb and some soils of Humpata have significant enrichment in Cd and Pb. For the urban soils, only the Benguela region showed a pollution load index higher than 1, indicating soil contamination in Cd, Cu, Mn, Mo, Pb, Sb, Sn and Zn.

The risk index was less than 1 for the Cd, Cu, Pb and Zn in Benguela urban soils, representing an insignificant non-carcinogenic risk. The carcinogenic risk through ingestion for Pb exceeded the acceptable maximum set by the USEPA for children, but Pb is only considered potentially carcinogenic.

The urban soil of Benguela was polluted in Cd, Cu, Pb and Zn. These were added to soils by anthropic activities and are controlled by soil type and pH.

Although the urbanization processes are similar in the three cities, the urban soils of Benguela presented higher pollution in Cd, Cu, Pb, Sb, Sn and Zn. This is due to the geographic, climatic and geological characteristics of the Benguela region, which condition the soil type.

Keywords: Fast-growing cities, soils, urbanization, contamination, human health risks.

Agradecimentos

A realização da presente dissertação foi possível devido à contribuição direta e indireta de várias pessoas, às quais gostaria de deixar uma palavra de agradecimento.

Às minhas orientadoras, Prof. Doutora Manuela da Vinha e Prof. Doutora Paula Carvalho, pela orientação científica, pela disponibilidade, motivação, apoio e conhecimento transmitido ao longo deste trabalho.

Ao mestre Adriano António pela cedência das amostras de solos colhidas na região de Benguela.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Ciências da Terra, que contribuíram e foram imprescindíveis para a construção de competências necessárias à realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, em especial à Bárbara Matos, Mariana Martins, Joana Cunha, Mónica Silva e Vanessa Laranjeira por todos os bons momentos, e que apesar de nem sempre por perto, me apoiaram e nunca me deixaram desmotivar ou perder o ânimo. Obrigada por tudo!

Às minhas colegas e amigas, Daryl Bento e Daniela Silva que estiveram a meu lado ao longo de todo o percurso académico. Agradeço o vosso companheirismo, toda ajuda e pela força nos momentos mais difíceis. Um agradecimento também a todos os colegas que me acompanharam ao longo desta etapa da minha vida.

A toda a minha família por estarem sempre presentes e por todo o apoio e força para continuar.

E por último, um agradecimento especial aos meus pais e irmã, por serem o meu pilar em todos os momentos, pelo apoio incondicional, por toda a compreensão e por acreditarem sempre em mim.

A TODOS, MUITO OBRIGADA!!

Índice geral

| | |
|---|-----|
| Índice geral | i |
| Índice de tabelas | iii |
| Índice de figuras | v |
| Lista de abreviaturas | vii |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Fundamentação conceptual | 1 |
| 1.2. Objetivos e estrutura da tese..... | 4 |
| 2. Enquadramento das regiões estudadas | 7 |
| 2.1. Caracterização geográfica e população | 7 |
| 2.2. Enquadramento Geomorfológico e Hidrogeológico | 8 |
| 2.3. Enquadramento Geológico..... | 11 |
| 2.4. Clima..... | 14 |
| 2.5. Solos..... | 15 |
| 3. Métodos e Técnicas | 17 |
| 3.1. Amostragem de solos | 17 |
| 3.2. Preparação física das amostras | 17 |
| 3.3. Análises granulométricas e parâmetros físico-químicos | 18 |
| 3.4. Análises químicas | 19 |
| 4. Resultados e discussão | 21 |
| 4.1. Textura dos solos de Benguela | 21 |
| 4.2. Variações de pH, CE e MO | 23 |
| 4.3. Composição química (elementos maiores e traço)..... | 29 |
| 4.4. Relação entre elementos químicos | 38 |
| 4.4.1. Relação entre elementos químicos e textura dos solos..... | 46 |
| 4.5. Cálculo dos fatores de enriquecimento (FE) e do índice de carga de poluição (PLI)..... | 47 |
| 4.6. Avaliação da qualidade dos solos e comparação com a legislação..... | 54 |
| 4.7. Cálculo do risco de efeitos não cancerígenos e risco cancerígeno | 56 |
| 5. Conclusões | 65 |
| 6. Referências Bibliográficas | 67 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Valores da análise granulométrica e parâmetros estatísticos dos solos de Benguela..... | 22 |
| Tabela 2 - Valores de pH e de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) determinados por António (2016) dos solos de Benguela..... | 24 |
| Tabela 3 - Escala de Pralongo. | 25 |
| Tabela 4 - Valores de pH e de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dos solos de Lubango..... | 26 |
| Tabela 5 - Valores de carbono orgânico na fração fina (< 2 mm) nos solos de Benguela. | 28 |
| Tabela 6 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em $\mu\text{g}/\text{kg}$) e alguns valores estatísticos dos solos de Benguela. | 32 |
| Tabela 7 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em $\mu\text{g}/\text{kg}$) e alguns valores estatísticos dos solos de Lubango. | 34 |
| Tabela 8 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em $\mu\text{g}/\text{kg}$) e alguns valores estatísticos dos solos de Humpata..... | 36 |
| Tabela 9 - Matriz de correlação dos teores dos solos da região de Benguela. | 39 |
| Tabela 10 - Matriz de correlação dos teores dos solos, da região de Lubango. | 40 |
| Tabela 11 - Matriz de correlação dos teores dos solos, da região de Humpata..... | 41 |
| Tabela 12 - Classificação da qualidade dos solos (Retirado e modificado de: Barbieri <i>et al.</i> , 2015)..... | 48 |
| Tabela 13 - Fator de enriquecimento de 11 elementos nos solos de Benguela. | 49 |
| Tabela 14 - Fator de enriquecimento de 9 elementos nos solos de Lubango. | 50 |
| Tabela 15 - Fator de enriquecimento de 9 elementos nos solos de Humpata..... | 51 |
| Tabela 16 - Fator de concentração dos solos urbanos de Benguela. | 52 |
| Tabela 17 - Índices de carga de poluição dos solos urbanos de Benguela..... | 52 |
| Tabela 18 - Fator de concentração dos solos urbanos de Lubango. | 53 |
| Tabela 19 - Índices de carga de poluição dos solos urbanos de Lubango..... | 53 |
| Tabela 20 - Fator de concentração dos solos urbanos de Humpata..... | 53 |
| Tabela 21 - Índices de carga de poluição dos solos urbanos de Humpata. | 53 |
| Tabela 22 - Valores analisados para o respetivo elemento que excedem as diretrizes. .. | 55 |
| Tabela 23 - Fatores de exposição utilizados para a avaliação do risco para a saúde humana segundo DEA (2010). | 58 |
| Tabela 24 - Avaliação do risco para a saúde humana devido à exposição a elementos potencialmente tóxicos (EPT) nos solos urbanos de Benguela. | 60 |
| Tabela 25 - Fatores de exposição utilizados para a avaliação do risco para a saúde humana segundo USEPA (2011). | 61 |
| Tabela 26 - Avaliação do risco para a saúde humana devido à exposição a elementos potencialmente tóxicos (EPT) nos solos urbanos de Benguela, calculados através do <i>Regional Screening Levels calculator</i> (RSL) disponibilizado pela USEPA..... | 62 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Localização de Angola no mapa de África e das províncias de Benguela e Huíla em Angola. Dentro do círculo a vermelho, o triângulo a verde assinala o Morro do Moco, o ponto mais alto de Angola com 2 620 m de altitude. (Retirado e modificado de: <i>Google Earth</i>). | 7 |
| Figura 2 - Esboço hipsométrico de Angola. (Retirado de: Carta Geológica de Angola à escala 1/10 000 000, Araújo <i>et al.</i> , 1988). | 9 |
| Figura 3 - Bacias hidrográficas em Angola. (Retirado de: Jacinto, 2012). | 10 |
| Figura 4 - Leito do rio Cavaco durante a estação seca. O círculo a vermelho corresponde a um dique lateral. Notar o lixo disperso no leito seco do rio. | 10 |
| Figura 5 - Excerto da Carta Geológica de Angola. (Retirado e modificado de: Araújo <i>et al.</i> , 1988). | 12 |
| Figura 6 - Carta geológica da região de Lubango – Humpata. (Retirado de: Pereira <i>et al.</i> , 2013). | 13 |
| Figura 7 - Classificação climática de Köppen-Geiger em África. (Retirado e modificado de: Peel <i>et al.</i> , 2007). | 15 |
| Figura 8 - Cartografia do tipo de solos de Angola. (Retirado e modificado de: Jones <i>et al.</i> , 2013). | 16 |
| Figura 9 - a), b), d), e): Amostragem da camada superficial de solos urbanos; c), f) amostragem em solo natural (amostra compósita). | 17 |
| Figura 10 - Sobreposição da projeção das amostras de Benguela com o diagrama triangular para a classificação da textura do solo. | 23 |
| Figura 11 - Variação de Ti versus Al (a), K versus Mg (b), Rb versus Mg (c) e Rb versus Ni (d) nos solos da região de Benguela. Legenda: ◆Natural; ■Urbano; ▲Agrícola | 42 |
| Figura 12 - Variação de U versus Be (a), Y versus Ga (b) e Cs versus Rb (c) nos solos da região de Lubango. Legenda: ◆Natural; ■Urbano | 42 |
| Figura 13 - Variação de Y versus Li nos solos da região de Humpata. Legenda: ◆Natural; ■Urbano | 43 |
| Figura 14 - Variação de Zn versus Cu (a), Sn versus Cu (b), Pb versus Cu (c), Sn versus Zn (d), Pb versus Zn (e), Pb versus Sn (f), Pb versus Sb (g) e Hg versus Pb (h) nos solos da região de Benguela. Legenda: ◆Natural; ■Urbano; ▲Agrícola | 44 |
| Figura 15 - Variação de Sn versus Zn (a) e Pb versus Zn (b) nos solos da região de Lubango. Legenda: ◆Natural; ■Urbano; | 45 |
| Figura 16 - Variação de Zn versus Cu (a), Sn versus Cu (b), Sn versus Zn (c), Pb versus Sb (d), Pb versus Cd (e) e Hg versus Cd (f) nos solos da região de Humpata. Legenda: ◆Natural; ■Urbano; | 45 |
| Figura 17 - Gráficos representativos de elementos geogénicos (Rb e Tl) e antropogénicos (Zn e Sn) dos solos da região de Benguela. Legenda: ◆Natural; ■Urbano; ▲Agrícola | 47 |

Lista de abreviaturas

ABS – Fração de Absorção Dérmica

AF – Fator de Adesão

AT – Esperança Média de Vida

BW – Peso Corporal

CCKP – Climate Change Knowledge Portal

CCS – Crusta Continental Superior

CDI – Exposição Diária Crónica

CE – Condutividade elétrica

CF – Fator de Concentração

CO – Carbono orgânico

CR – Risco cancerígeno

CS – Concentração média dos metais presentes nos solos

ED – Duração da Exposição

EF – Frequência de Exposição

EPT – Elementos Potencialmente Tóxicos

ESAC – Escola Superior Agrária de Coimbra

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FE – Fator de enriquecimento

HClO₄ – Ácido perclórico

HF – Ácido fluorídrico

HI – Índice de risco

HNO₃ – Ácido nítrico

HQ – Quociente de risco

IARC - International Agency for Research on Cancer

ICP-OES – Plasma indutivamente acoplado a espectrometria de emissão ótica

ICP-MS – Plasma indutivamente acoplado a espectrometria de massa

INE – Instituto Nacional de Estatística (Angola)

IRing – Taxa de ingestão do solo

IRinh – Taxa de inalação do solo

MO – Matéria orgânica

PEF – Fator de Emissão de Partículas

PLI – Índice de carga de poluição

RfD – Dose de referência

RSL – Regional Screening Levels

SA – Área de Superfície

SF – Fatores de inclinação

UCL – Limite de Confiança Superior

USEPA – United States Environmental Protection Agency

WBP – Weather Base Portal

1. Introdução

1.1. Fundamentação conceptual

O solo é um componente essencial dos ecossistemas e participa em processos ecológicos vitais para os seres vivos e para a sociedade. O solo funciona como meio de suporte para a produção de biomassa, é um regulador ambiental, uma reserva de biodiversidade, um suporte de infraestruturas e fonte de matérias-primas e também um suporte de património natural e cultural (Sampaio, 2011; Alexandre, 2012). O solo é um recurso natural renovável que serve de suporte às plantas do qual toda a vida na superfície terrestre depende. Este forma-se lentamente através de processos biológicos, físicos e químicos (Andrews *et al.*, 2003).

Geralmente o solo é definido como a camada superficial da crosta terrestre, constituída por matéria inorgânica, matéria orgânica (MO), água ou solução do solo, gases ou atmosfera do solo e seres vivos, micro e macroscópicos. A matéria inorgânica presente nos solos é composta pelos minerais refratários à meteorização e pelos novos minerais e fases minerais que resultam dos processos de meteorização. Os processos de meteorização das rochas conduzem a uma desagregação e transformação gradual das rochas em partículas de diferentes tamanhos, desde as mais grosseiras (como o cascalho e o saibro) às de dimensões mais pequenas (como a areia, o limo e a argila). Por sua vez, os compostos orgânicos são provenientes da decomposição dos restos de animais e vegetais devido à ação de microrganismos, como bactérias e fungos. Relativamente à componente líquida de um solo, esta é formada por soluções aquosas originárias da dissolução dos compostos orgânicos e inorgânicos do solo na água da chuva que se infiltra no solo.

A água existente nos poros do solo, transporta macro e micronutrientes essenciais às plantas, que são depois passados aos animais e ao homem, pela cadeia alimentar. As variações na composição química do solo e da água podem causar alterações metabólicas nos seres vivos, favorecendo a ocorrência de doenças endémicas, relacionadas com a ingestão insuficiente ou excessiva de componentes existentes nesses solos (Pinto *et al.*, 2017a). Os solos são um dos maiores reservatórios de carbono, água continental e nutrientes e intercetam a passagem de contaminantes originados a partir de atividades humanas (Effland & Pouyat, 1997). Este recurso controla a segurança alimentar, a emissão de gases com efeito de estufa, a preservação da biodiversidade e por último a vida humana (Batjes *et al.*, 2013). Os solos são

considerados biorreatores e filtros naturais de potenciais poluentes, que controlam a qualidade das águas subterrâneas (Soil Atlas of Europe, 2005).

A abundância de elementos químicos na crosta terrestre, desde que existe vida humana na Terra, não sofreu alterações drásticas. Porém, surgiram mudanças significativas na distribuição dos elementos químicos. Entre os principais fatores envolvidos nestas mudanças geoquímicas estão a urbanização, a industrialização e a agricultura, associadas às atividades humanas, sendo os processos que mais afetam o meio ambiente (Alekseenko & Alekseenko, 2014). A urbanização influencia os processos geoquímicos no que diz respeito à qualidade da água, solo, ar, biodiversidade, recursos e por fim, à qualidade dos ecossistemas e da saúde humana (Gardner *et al.*, 2017). As atividades humanas podem manifestar-se através da mudança das propriedades físicas e químicas dos solos modificando assim as suas funções. A resposta de cada solo a alterações nas suas funções é muito variável e complexa (Pouyat *et al.*, 2010).

O aumento da população mundial leva a modificações importantes no uso do solo. Na classificação dos solos de África (Jones *et al.*, 2013), é considerado que existiram mudanças significativas nos solos devido à atividade agrícola, por longos períodos de tempo, e estes solos são designados por antrossolos. A formação destes solos é devida à adição de fertilizantes, matéria orgânica ou mineral, carvão, lixos domésticos, ou irrigação. Assim, as alterações efetuadas pelo homem nestes solos tiveram o intuito de aumentar a fertilidade dos solos e melhorar a agricultura (Jones *et al.*, 2013).

O processo de urbanização altera a estrutura do solo e pode provocar a sua compactação, o que faz com que haja uma diminuição da porosidade e da capacidade de infiltração e aumentando assim a possibilidade de ocorrência de cheias (Pedron *et al.*, 2004). Os processos de urbanização também causam alterações no pH, CE (António, 2016) e temperatura, intervindo nas atividades dos organismos que vivem nos solos e chegam a interromper o ciclo de nutrientes, para além de originar a sua contaminação. Portanto, os solos em zonas urbanas têm características distintas dos solos de zonas naturais e agrícolas. Geralmente, os solos urbanos quando comparados aos solos agrícolas e naturais têm valores de pH superiores, baixos teores em matéria orgânica e contêm importantes concentrações de contaminantes que resultam de uma maior atividade antrópica (Kabata-Pendias & Pendias, 2001; Davison *et al.*, 2006).

Em zonas urbanas, o solo é sujeito à acumulação contínua de contaminantes através de fontes pontuais ou difusas. Os contaminantes incluem poluentes tóxicos persistentes, como elementos traço e poluentes orgânicos. As descargas industriais, as

emissões do tráfego e os resíduos das atividades são as principais fontes desses poluentes (Luo *et al.*, 2012). A indústria de modo pontual ou difuso provoca a contaminação e a poluição dos solos e as emissões de veículos efetuam a transferência de poluição atmosférica para a poluição dos solos. Muitos destes poluentes permanecem por longos períodos de tempo nos solos urbanos e podem afetar a saúde pública, principalmente a das crianças, através da ingestão direta do solo ou de poeiras (Andersson *et al.*, 2010) ou por absorção dérmica ou inalação (Mehr *et al.*, 2017), podendo vir a causar problemas a nível dos sistemas nervoso, endócrino e imunitário (Mehr *et al.*, 2017) ou causar problemas cancerígenos (Carvalho *et al.*, 2017; Mehr *et al.*, 2017; Pinto *et al.*, 2017b).

O efeito da urbanização descontrolada em países subdesenvolvidos resulta na degradação dos solos (Foster, 2001; Pedron *et al.*, 2004; Brevik & Burgess, 2014) e a contaminação dos solos urbanos por elementos potencialmente tóxicos (EPT) é um problema registado em muitas partes do mundo (e.g. Andersson *et al.*, 2010; Xia *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2012; Škrbić & Mladenović, 2013; Buttafuoco *et al.*, 2017; Gaberšek & Gosar, 2017; Nezat *et al.*, 2017; Jia *et al.*, 2018). A utilização destes solos pela sociedade para vários fins, tais como urbanizações, jardins, espaços agrícolas e espaços recreativos traduz-se num risco ambiental e num risco para a saúde pública. A avaliação dos riscos resultantes da exposição aos metais, baseada na sua concentração total, é uma ferramenta importante para ponderação das medidas de mitigação desses riscos (Laneiro, 2012; Mehr *et al.*, 2017).

Nas cidades em rápida expansão, em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, são comuns os problemas de falta de sistemas de abastecimento de água, de recolha dos efluentes domésticos e industriais, sólidos e líquidos, sendo estes livremente depositados nos solos. É por isso, pertinente fazer uma avaliação das modificações introduzidas nos solos em cidades em rápida expansão, com falta de planeamento urbano e de sistemas recolectores de efluentes domésticos e industriais e em que a pressão no uso do solo e da água é enorme. A degradação do solo devido à urbanização rápida e desregulada é um dos problemas atuais enfrentados pelo homem e tem vindo a merecer cada vez mais a atenção de cientistas em todo o mundo (e.g. Foster, 2001; Andersson *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2012; Buttafuoco *et al.*, 2017; Gabersek & Gosar, 2017; Jia *et al.*, 2018).

Os solos das cidades angolanas Benguela, Lubango e Humpata, em rápida e caótica expansão foram escolhidos como objeto de estudo nesta tese. Benguela está

localizada na costa enquanto Lubango e Humpata estão localizadas no Planalto Central de Angola, a altitudes de 1700-1900 m. Estas cidades têm tido uma expansão rápida devido à Guerra Civil e depois dela, expandindo-se para campos que eram agrícolas ou de pastoreio, devido ao êxodo rural. Tal causou uma urbanização caótica e um aumento de tráfego automóvel. Em todas estas cidades a indústria está pouco desenvolvida. Há oficinas de serralharia, oficinas de automóveis, indústrias alimentares, fábricas de bebidas e de cerveja. Estas atividades são potencialmente perigosas para o ambiente (Islam *et al.*, 2015a).

Devido à urbanização caótica, estas cidades são caracterizadas por sistemas muito deficitários de recolha de efluentes domésticos e industriais, tanto líquidos como sólidos. Os sistemas existentes apenas cobrem o núcleo central das cidades e de modo intermitente. Nas áreas periféricas onde se localizam os novos bairros, os lixos domésticos industriais e comerciais são depositados livremente nos solos e os efluentes líquidos ou são depositados livremente ou recolhidos em fossas rotas (Silva *et al.*, 2017, 2018) e estes lixos domésticos e industriais, muitos deles com materiais eletrónicos e pilhas, adicionam grandes quantidades de elementos potencialmente perigosos (PTE) aos solos (Nabulo *et al.*, 2008).

Além disso o sistema de abastecimento de energia elétrica também apresenta muitas deficiências, forçando a população a usar carvão para a preparação de alimentos e aquecimento e a usar gasóleo para a produção de eletricidade, o que faz aumentar o número de bombas de combustível. O aumento exponencial no tráfego automóvel faz aumentar a poluição atmosférica, transferindo-se para o solo esses poluentes e fazendo também aumentar o número de bombas de combustível.

1.2. Objetivos e estrutura da tese

O presente trabalho pretende demonstrar de que forma a urbanização, em cidades em rápida expansão, provoca a modificação das propriedades físico-químicas e da composição química dos solos, fazendo também a avaliação do potencial toxicológico em solos urbanos de cidades angolanas em rápida urbanização e com diferentes substratos litológicos.

Serão identificados os elementos químicos que contaminam os solos urbanos, por comparação com solos não impactados pela urbanização das mesmas regiões, e posteriormente determinado o risco para a saúde desses elementos químicos.

Neste trabalho irá ser feita uma avaliação das mudanças nos teores da matéria orgânica (MO), na textura, nos parâmetros físico-químicos e.g. pH e CE, estes determinados por António (2016) e na composição química dos solos urbanos em relação aos solos não urbanos, nas cidades de Benguela Lubango e Humpata (Angola).

Será feito o cálculo do fator de enriquecimento (FE), e nas amostras com valores significativamente maiores (avaliadas estatisticamente) será feita a avaliação de risco não cancerígeno e risco cancerígeno, seguindo a metodologia proposta pela USEPA (2011).

A tese tem a seguinte estrutura:

No capítulo 1 (o atual) é feito enquadramento conceptual, abordando a importância e atualidade do tema e são apresentados os objetivos e a estrutura da tese.

No capítulo 2 descreve-se o enquadramento das regiões de Benguela, Lubango e Humpata, onde foram colhidas as amostras analisadas.

No capítulo 3 descreve-se os métodos e técnicas utilizadas na realização deste trabalho.

Os resultados e discussão dos mesmos são apresentados no capítulo 4, onde se mostram os resultados obtidos nas várias análises efetuadas das amostras colhidas nas três regiões em estudo, se discutem esses resultados e onde se faz também uma comparação com os resultados obtidos nas três regiões.

E por fim, no capítulo 5 mostram-se as conclusões tiradas neste trabalho.

2. Enquadramento das regiões estudadas

2.1. Caracterização geográfica e população

Benguela, uma das cidades em estudo, é a cidade capital da província de Benguela e localiza-se na parte setentrional e ocidental de África e no extremo centro-oeste da República de Angola (figura 1) a 12°35'S e 13°25'E.

A província de Benguela ocupa uma área territorial de 39 826,83 km², sendo que o Município de Benguela tem uma extensão de 2 100 km². As outras cidades em estudo, são o Lubango (14°55'S e 13°30'E) que é capital da província de Huíla e Humpata (15°0'S e 13°20'E), localizada a 15 km a SW de Lubango. Localizam-se no sector Sudoeste de Angola, na província da Huíla (figura 1).



Figura 1 - Localização de Angola no mapa de África e das províncias de Benguela e Huíla em Angola. Dentro do círculo a vermelho, o triângulo a verde assinala o Morro do Moco, o ponto mais alto de Angola com 2 620 m de altitude. (Retirado e modificado de: *Google Earth*).

De acordo com os dados do INE (2014) na província de Benguela 62,8% do total de população (2 036 662 habitantes) é urbana e o município de Benguela possui 25,2 % da população da província. A cidade Benguela tem 513,441 habitantes, com uma densidade populacional de 244 hab/km² (CENSO, 2014) e a população estimada para a

província de Benguela para 2018 é de 2,477,595 habitantes (INE, 2018). A província de Huíla com 2 354 398 habitantes possui 33,2 % de população urbana, sendo que o município do Lubango possui 31,1 % da população da província. Lubango é a segunda cidade mais populosa de Angola (CENSO, 2014). E o município de Humpata possui 3,5 % da população da província (INE, 2014).

2.2. Enquadramento Geomorfológico e Hidrogeológico

O território de Angola exhibe uma geomorfologia bastante diversificada, dada a sua dimensão, localização, diversidade geológica e climática. O centro de Angola é ocupado pelo Planalto Central de Angola, que é uma superfície muito antiga, com 1200-1800 m, aplanada no Cretácico e soerguida durante várias fases desde o Neocomiano ao Senoniano e Eocénico a Miocénico tardio (Guiraud *et al.*, 2010). A zona vasta de planaltos e montanhas do Planalto Central cobre quase a totalidade do país (figura 2).

A Orla Litoral é uma faixa estreita, alargando-se na direção norte, localizada na costa oeste de Angola e cujas altitudes variam entre os 0 e os 400 metros (figura 2). As rochas que a constituem são sedimentares, Meso-Cenozóicas. Entre a Orla Litoral e o Planalto Central, na região central de Angola, localiza-se uma zona com relevo montanhoso, muito acidentada, designada por Cadeia Marginal de Montanhas (Marques, 1977), onde se localiza o ponto mais alto de Angola, que possui 2 620 metros de altitude sendo designado por Morro do Moco (figura 1).

Angola possui uma extensa e complexa rede hidrográfica. As bacias hidrográficas principais de Angola estão representadas na figura 3, onde se pode ver que a grande maioria dos rios de Angola nascem no Planalto Central.

A maioria do território da província de Benguela fica localizada na Orla Litoral e a sua geomorfologia apresenta uma complexa combinação de planaltos escalonados, cortados por vales de rios. A maioria destes rios só possui água superficial quando há precipitação. Os principais cursos de água confinam-se nas bacias hidrográficas Cubal, Hanha, Catumbela, Coporolo e Cavaco, que limitam vales importantes para a atividade agrícola, na faixa litoral.

Avaliação da perigosidade do solo urbano em cidades de rápida expansão, sem planeamento urbano e com sistemas sanitários deficientes

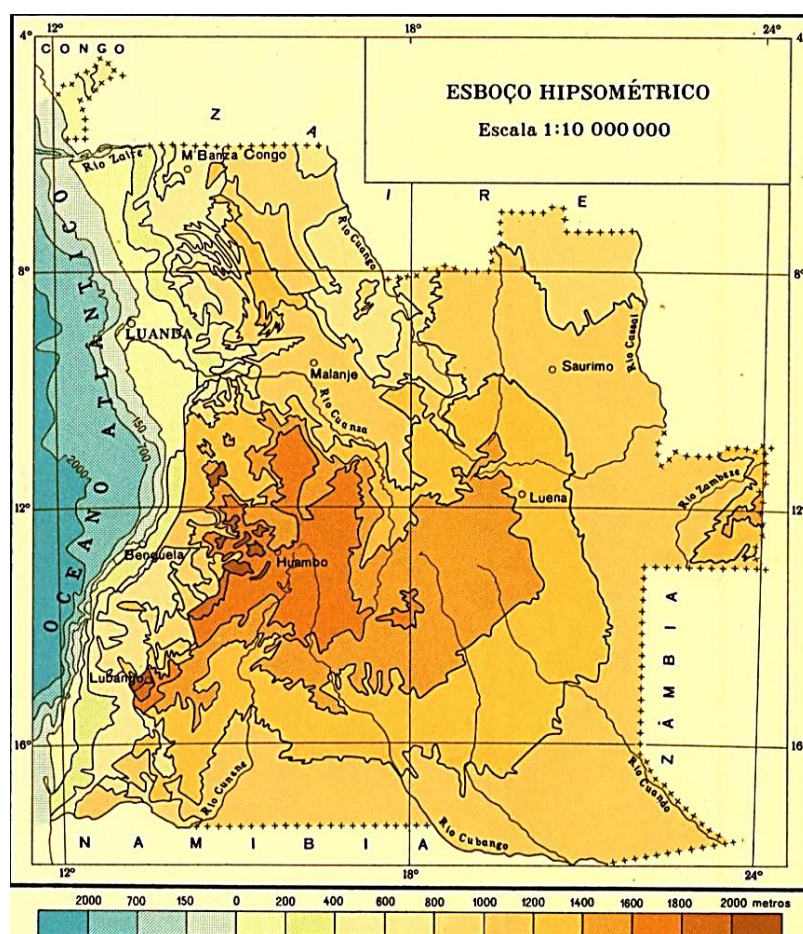


Figura 2 - Esboço hipsométrico de Angola. (Retirado de: Carta Geológica de Angola à escala 1/10 000 000, Araújo *et al.*, 1988).

A cidade de Benguela é atravessada pelo rio Cavaco de direção SE-NW, que se localiza na transição entre as Bacias do Sudoeste Angolano e as Bacias do Centro-Oeste Angolano (figura 3). O rio Cavaco é um rio temporário, com um regime caudaloso durante a estação das chuvas, provocando grandes inundações na cidade de Benguela, mas na maior parte do ano não tem água superficial corrente. Presentemente na cidade de Benguela o seu curso está confinado por diques laterais (figura 4) e as suas aluviões são ainda usadas para a agricultura, mas na proximidade da cidade começam a ser ocupadas por novos bairros.

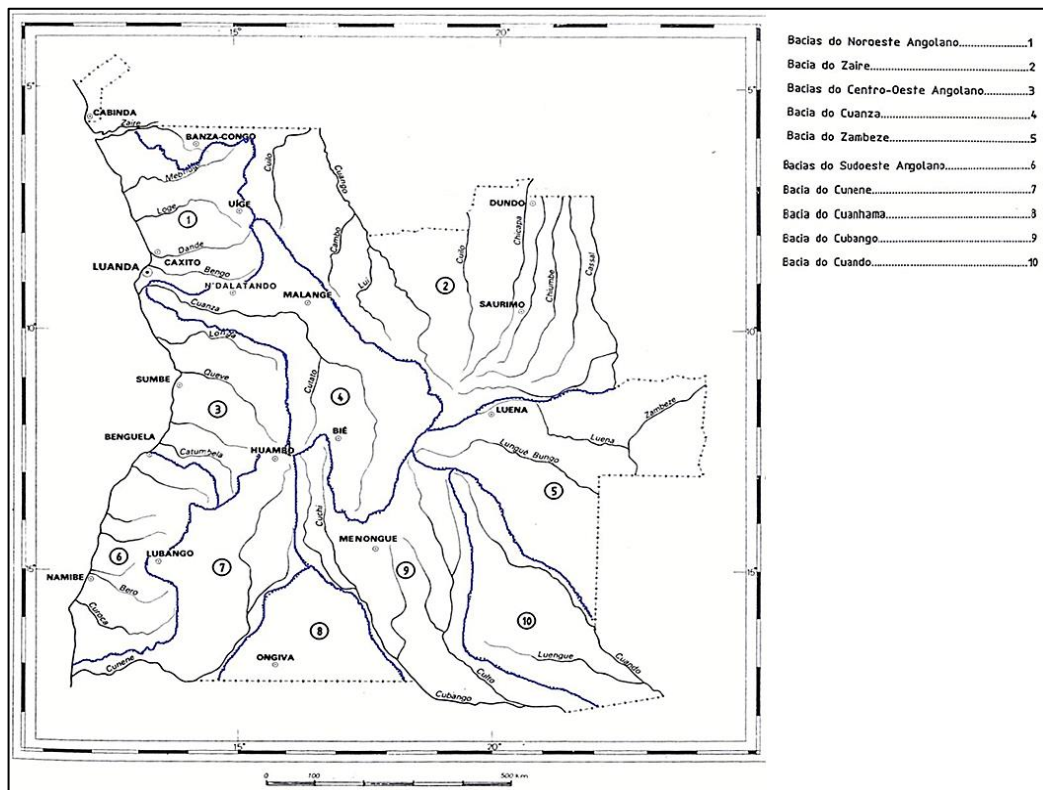


Figura 3 - Bacias hidrográficas em Angola. (Retirado de: Jacinto, 2012).



Figura 4 - Leito do rio Cavaco durante a estação seca. O círculo a vermelho corresponde a um dique lateral. Notar o lixo disperso no leito seco do rio.

Feio (1981) diferenciou a região do Lubango – Humpata, em três superfícies geomorfológicas: a) o Planalto de Humpata-Bimbe, com altitudes na ordem de 2 300 m; b) o Planalto Principal, com altitudes na ordem de 1 700 m, que se encontram delimitados a Oeste pela c) Escarpa de Chela (com mais de 1 000 metros de desnível) e a Sul os planaltos são delimitados por uma superfície com altitudes que rondam os 1 300 metros. Na região ocidental, as superfícies de altitudes mais elevadas (entre os 1 900 e 2 300 metros) pertencem ao Planalto de Humpata, sendo de destacar a do Bimbe, que constitui a mais elevada aplanagem do Sudoeste Angolano.

No que diz respeito ao aspecto hidrográfico, a região do Lubango-Humpata integra-se na vasta bacia hidrográfica do rio Cunene. Por sua vez, a rede hidrográfica desta mesma região é marcada pela presença de um afluente importante da margem direita do rio Cunene, o rio Caculuar. A cidade de Lubango é atravessada por vários rios, sendo a maioria de regime temporário. O rio Mapunda, que é uma cabeceira do rio Caculuar, tem um regime permanente mas com muitas variações (Silva *et al.*, 2017) e começa o seu curso no Planalto de Humpata-Bimbe. Pode dizer-se, que esta rede hidrográfica teve uma grande importância na ocupação humana nesta região da Huíla porque originava terrenos férteis para a agricultura (Chisingui, 2017).

2.3. Enquadramento Geológico

A região de Benguela fica localizada na Bacia de Benguela, que é um prolongamento para Sul da Bacia do Kwanza. Durante o Cretácico Inferior, os sedimentos que integram a Bacia de Benguela, começaram a ser depositados em zonas continentais depressionárias, sobre rochas metamórficas e graníticas de idade Arcaica, que pertencem ao Complexo Gnaiss-Migmatito-Granito (figura 5).

Os sedimentos mais antigos são as areias e os fanglomerados que foram depositados em ambiente continental. Os fanglomerados são materiais de cones aluvionais, onde os fragmentos de rocha são ligeiramente desgastados pela água e podem ter diversos tamanhos, desde argila até blocos. Sobrejacente a este material mais antigo e grosseiro, encontram-se outras formações detríticas, carbonatadas e margosas do Cretácico Inferior (Aptiano) que possuem evaporitos. No Cretácico Superior existem conglomerados e os sedimentos mais recentes depositados no Cretácico Superior são *shales* (Guiraud *et al.*, 2010).

As formações paleogénicas são compostas por margas e calcários margosos com concreções argilo-calcárias e as formações quaternárias incluem sedimentos de planície aluvionar e de areias costeiras constituídos por areias, conglomerados e *shales*. A cidade de Benguela está localizada sobre as formações quaternárias referidas anteriormente (figura 5).

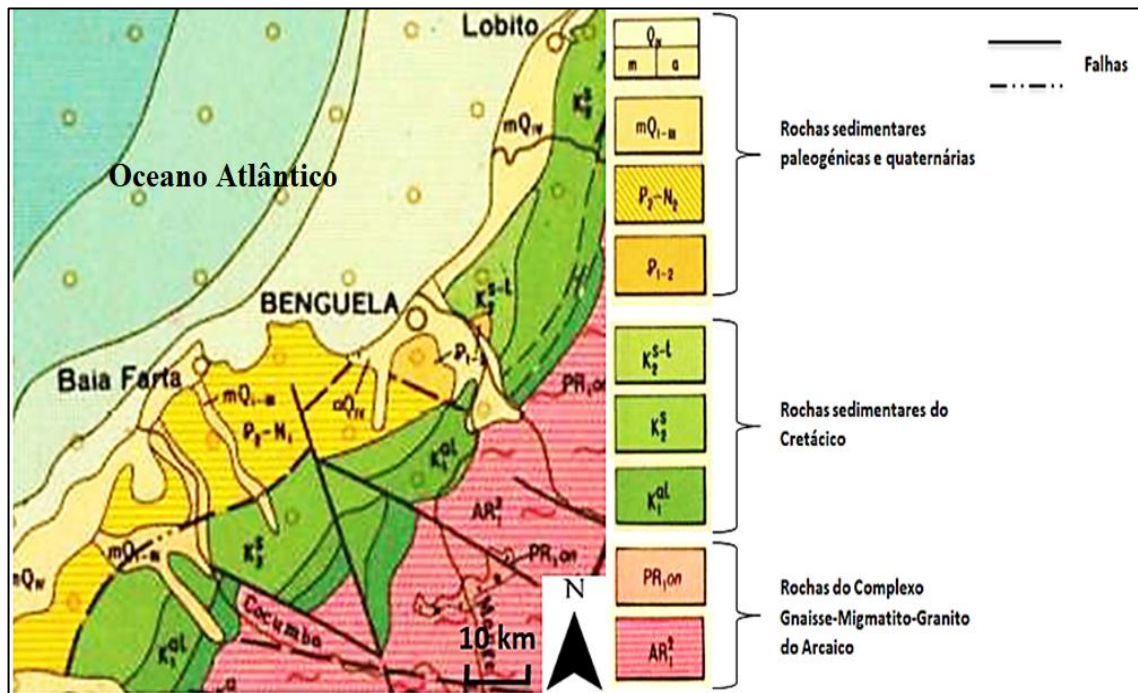


Figura 5 - Excerto da Carta Geológica de Angola. (Retirado e modificado de: Araújo *et al.*, 1988).

A cidade do Lubango assenta essencialmente sobre granitóides biotíticos do Paleoproterozoico (granitóides da orogenia Eburneana), mas está em expansão, ocupando áreas onde afloram as rochas sedimentares do Grupo da Chela (figura 6). Os granitos biotíticos possuem grande extensão areal no SW de Angola, sendo designados por Carvalho (1982) como granito regional. Neste granito foi distinguida por Pereira *et al.* (2013) uma fácies metaluminosa, com biotite e hornblenda cuja idade U-Pb foi de 1947 ± 5 Ma (figura 6). McCourt *et al.* (2013) dataram dois granitos na região de Lubango e obtiveram as idades de $1953,8 \pm 6,4$ Ma e 2038 ± 28 Ma.

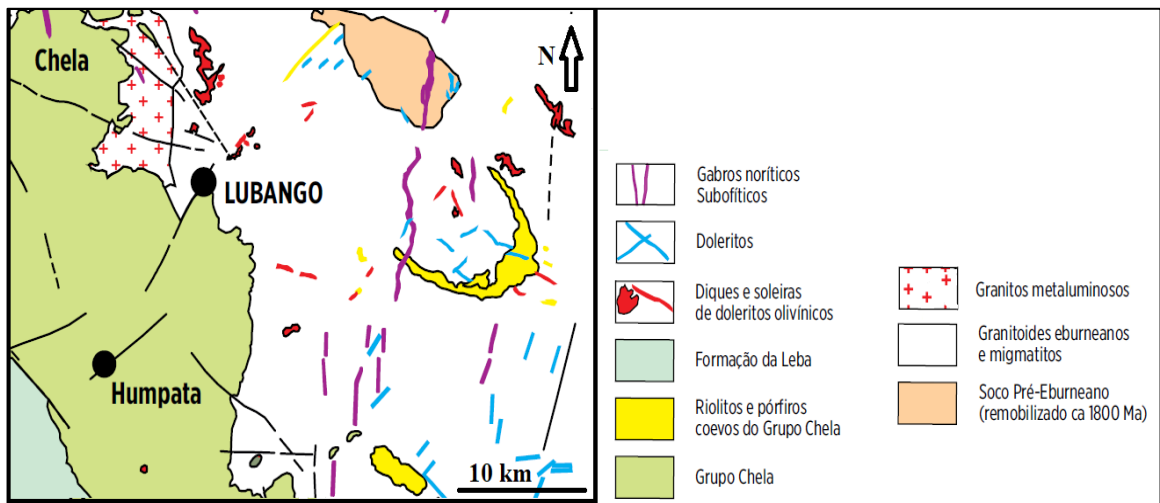


Figura 6 - Carta geológica da região de Lubango – Humpata. (Retirado de: Pereira *et al.*, 2013).

Os granitos eburneanos são intrusivos numa crusta arcaica, que constitui o soco Pré-Eburneano, polimetamórfico, remobilizado na orogenia Eburneana, com relíquias de 2,6 Ga. Estas rochas do soco são micaxistos, gnaisses e migmatitos, formados por metamorfismo regional e também granitos de anatexia. Na carta Geológica de Angola, Folha 3, à escala 1:1 000 000 são designadas por Complexo Gnaissico-Migmatítico e Granítico (Carvalho, 1982).

O Grupo da Chela forma o Planalto de Humpata e sobrepõe-se aos granitos por discordância, sendo o contacto erosivo. A cidade de Humpata está assente em rochas deste grupo. O Grupo da Chela, com 600 m de espessura tem origem vulcano-sedimentar. É formado por rochas sedimentares depositadas numa bacia epicratónica fluvio-marinha, com cineritos e rocha vulcanoclásticas intercaladas (Pereira *et al.*, 2011). Um riólito intrusivo na base da sequência sedimentar deu uma idade U-Pb de 1814 ± 7 Ma (Pereira *et al.*, 2011) e um ignimbrito, datado por McCourt *et al.* (2013), tem uma idade de 1798 ± 11 Ma. No topo do Grupo da Chela ocorrem arenitos, *shales* vermelhos e com carbonatos no topo (Pereira *et al.*, 2011).

Sobre o Grupo da Chela ocorrem calcários dolomíticos, com estromatólitos da Formação da Leba, que já não pertence ao Grupo da Chela (figura 6). Diques e soleiras de doleritos olivínicos, doleritos e filões de gabros noríticos cortam os granitos e o Complexo Gnaissico-Migmatítico e Granítico. A idade U-Pb de uma destas soleiras no Planalto de Humpata é de 1502 ± 5 Ma, obtida por Ernst *et al.* (2013). Correspondem a estágios iniciais de distensão crustal que levou à fragmentação da Rodínia.

2.4. Clima

O clima é o conjunto das condições atmosféricas (temperatura, humidade, pressão atmosférica, ventos e precipitação) num determinado espaço/região e período de tempo longo, sendo um dos fatores importantes na evolução e desenvolvimento dos diferentes tipos de solos (Saque, 2013). A classificação de Köppen-Geiger é um sistema de classificação climática frequentemente utilizado em geografia, climatologia e ecologia. Para determinar os tipos de clima de Köppen-Geiger é necessário ter em consideração a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação. Cada tipo climático é indicado por um código, formado por letras maiúsculas e minúsculas, cuja combinação indica os tipos e subtipos considerados.

Na região de Benguela, durante o período de tempo de 112 anos o portal Weatherbase (WBP, 2018) indicou que a temperatura média anual foi de 23,5 °C, variando entre 19,6 em julho a 26,7 °C em março; que a precipitação anual foi de 252,6 mm, variando de zero em julho a 93,9 mm em março e que a humidade relativa foi de 79,7 % variando entre 76,3 em fevereiro a 8,6% em outubro. Pode assim classificar-se o clima de Benguela como um clima quente, árido (clima desértico) do tipo BWh no sistema Köppen–Geiger de classificação climática (Peel *et al.*, 2007), como também se pode ver na figura 7.

Na região de Lubango-Humpata o clima é tropical, mas condicionado à altitude, sendo esta região uma das mais frias de Angola. Há uma estação quente e chuvosa desde o fim de setembro até maio e uma estação seca e fria desde o fim de maio até setembro. O Portal do Conhecimento das Alterações Climáticas (Climate Change Knowledge Portal) (CCKP, 2017) indicou que no período entre 1900 e 2012 as temperaturas médias anuais no Lubango variaram de 16,04 °C em junho a 21,14 °C em outubro e que a precipitação média anual foi de 762,5 mm, sendo março o mês mais chuvoso com 157,26 mm. De acordo com Weatherbase (2017) para o período de 13 anos antecedentes, a média das temperaturas mais altas foi de 28 °C e a média das temperaturas mais baixas foi de 6 °C. O clima é do tipo subtropical de terras altas (Cwb) (figura 7). Não se teve acesso a dados climáticos de Humpata, mas estes não diferem muito dos de Lubango.

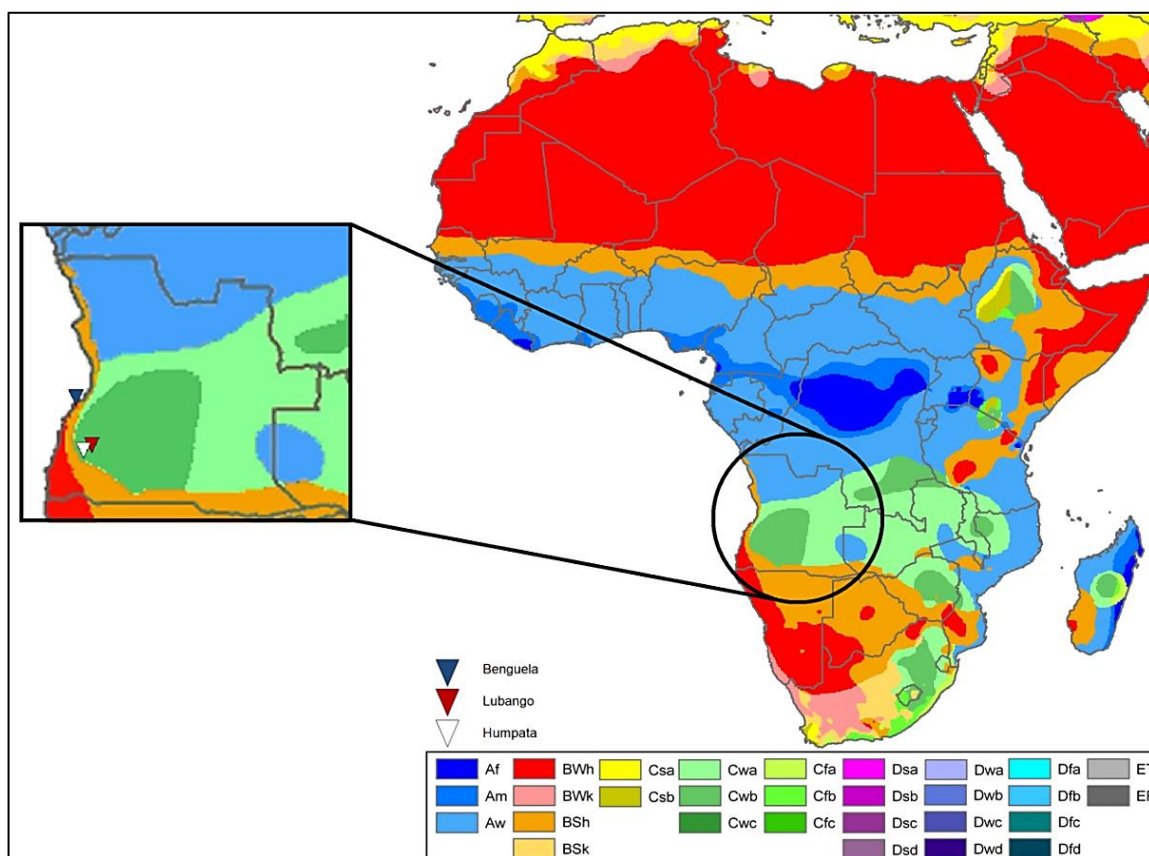


Figura 7 - Classificação climática de Köppen-Geiger em África. (Retirado e modificado de: Peel *et al.*, 2007).

2.5. Solos

Na região de Benguela ocorrem leptossolos e fluvisolos (Figura 8). Os leptossolos são solos de pouca profundidade e desenvolvem-se sobre rochas duras, rochas cascalhentas ou depósitos calcários. Em Benguela estes solos desenvolvem-se sobre margas e calcários. Em África, este tipo de solos aparece em regiões montanhosas e desérticas, onde os afloramentos de rochas duras estão expostos ou próximos da superfície. Este tipo de solos cobre cerca de 17% do continente africano (Jones *et al.*, 2013).

Os fluvisolos são solos jovens que surgem em rios, lagos, deltas ou depósitos marinhos, em zonas que são periodicamente inundadas. Se o curso de água tiver uma velocidade elevada, os solos podem ser cascalhentos ou arenosos, enquanto que se a velocidade da corrente for baixa, os solos podem ser argilosos e neste último caso

possuem uma quantidade significativa de matéria orgânica. Este tipo de solos cobre cerca de 3% do continente africano (Jones *et al.*, 2013). Os fluvisolos ocorrem na costa NE, arenosa, de baixa altitude de Benguela e ao longo do rio Cavaco, onde são usados para agricultura intensa. A cidade de Benguela está localizada essencialmente nestes solos.

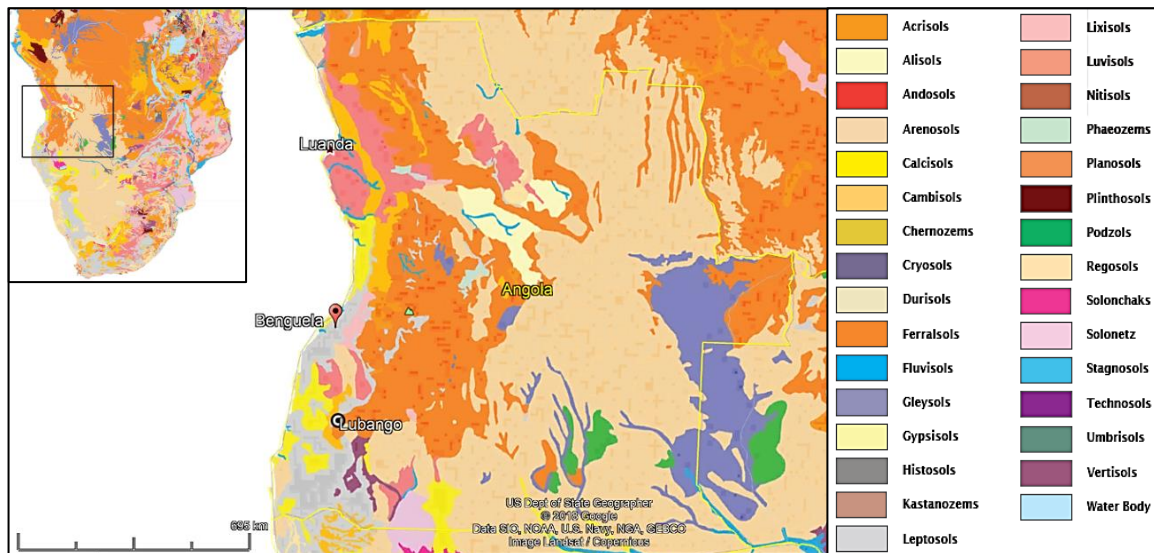


Figura 8 - Cartografia do tipo de solos de Angola. (Retirado e modificado de: Jones *et al.*, 2013).

Já a sul de Angola, onde se situa a região do Lubango, os principais tipos de solo são: ferrassolos, leptossolos e arenossolos (figura 8) (Jones *et al.*, 2013). Na região de Humpata ocorrem leptossolos e ferrassolos.

Os ferrassolos são fortemente lixiviados e possuem baixa capacidade de retenção de nutrientes e são associados a áreas de alta pluviosidade. São solos que perderam, ao longo do tempo, quase todos os seus minerais resistentes. Este tipo de solos cobre cerca de 10% do continente africano (Jones *et al.*, 2013). Na região de Lubango estes solos resultam da meteorização de laterites.

Os arenossolos são solos facilmente erodidos e possuem baixa capacidade de retenção de água e nutrientes. Estes solos resultam da meteorização *in situ* de material rico em quartzo ou de areias depositadas recentemente. Este tipo de solos pode estar propenso à erosão eólica, se não existir vegetação. É o tipo de solo dominante na África e cobre cerca de 22% deste continente (Jones *et al.*, 2013).

3. Métodos e Técnicas

3.1. Amostragem de solos

As amostras de solo urbano foram colhidas no interior das cidades (figura 9a, 9b, 9d e 9e), onde o acesso foi possível e foi amostrada a parte superficial do perfil, pois a contaminação antrópica é recente e portanto limitada à parte mais superficial do perfil, se comparada com o tempo de desenvolvimento de um solo (Horváth *et al.*, 2014).

Os solos naturais foram amostrados onde se detetou pouca influência antrópica. Foi feita uma pequena escavação e amostrada a parte superficial do *topsoil* depois de se ter retirado o horizonte rico em matéria vegetal pouco decomposta (manta-morta). As amostras com 2-3 kg foram compósitas, resultantes de 5 subamostras colhidas numa área com cerca de 1 m² (figura 9c e 9f).

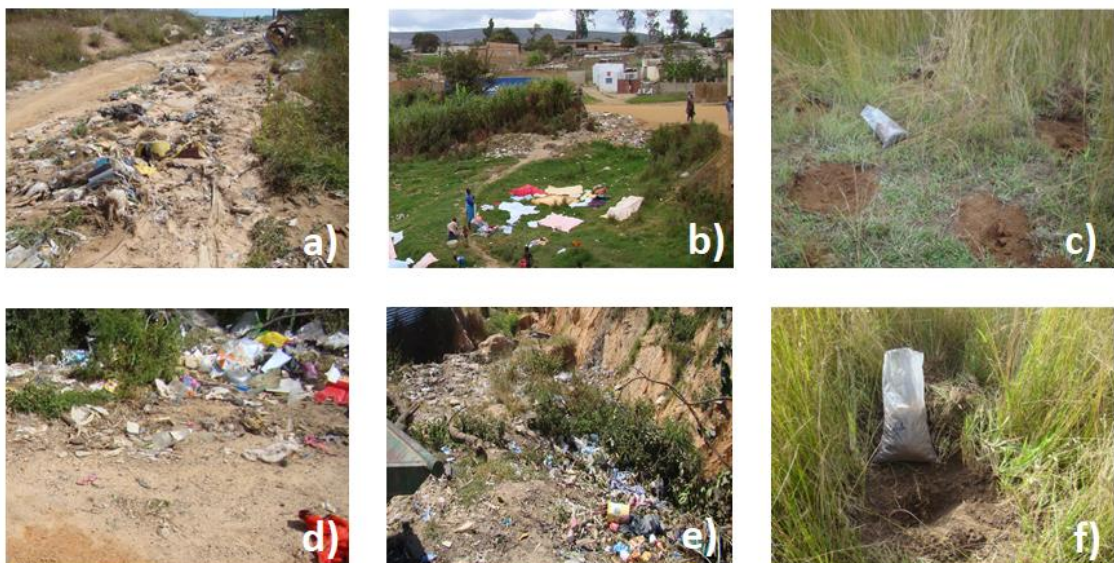


Figura 9 - a), b), d), e): Amostragem da camada superficial de solos urbanos; c), f) amostragem em solo natural (amostra compósita).

3.2. Preparação física das amostras

Todas as amostras foram secas ao ar livre (mas tapadas com papel), desagregadas com um rolo de plástico, crivadas a <2 mm, homogeneizadas e transportadas para Portugal. A preparação das amostras para as análises posteriores foi

realizada no Laboratório Santander - Preparação de Amostras e Separação de Minerais no Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (Portugal).

Dois quartos opostos da amostra foram arquivados em cartuchos feitos com papel devidamente referenciados e guardados como testemunho. Os outros dois quartos foram utilizados para a análise química, a análise granulométrica, para a determinação da condutividade elétrica (CE), do pH e para determinar o conteúdo de matéria orgânica (MO). Destes, foram pesadas as quantidades necessárias para cada parâmetro, tendo sido guardadas em cartuchos feitos com papel devidamente referenciados.

A porção correspondente à análise química foi crivada pelo crivo de 125 μm e a parte que não passar neste mesmo crivo (ou seja, a fração $< 2 \text{ mm}$ e $> 125 \mu\text{m}$) é colocada num saco de plástico corretamente referenciado e guardada. A fracção $< 125 \mu\text{m}$ foi usada para a análise química.

3.3. Análises granulométricas e parâmetros físico-químicos

As análises granulométricas da fração fina ($< 2\text{mm}$) foram realizadas através de difração a laser, utilizando o granulómetro Beckman-Coulter LS230 e a precisão da análise granulométrica neste equipamento é até 10%. Estas análises foram realizadas no Laboratório de Sedimentologia, do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, Portugal.

A determinação do pH, foi feita através do medidor de bancada HANNA. Antes de iniciar as leituras, o medidor foi previamente calibrado com soluções de $\text{pH} = 7$ e $\text{pH} = 10$. Foram efetuadas suspensões com 5 g de amostra de solo crivado $< 2 \text{ mm}$ e com 5 mg de água desmineralizada, sendo estas posteriormente colocadas em copos de precipitação e agitadas durante 15 segundos e deixadas a repousar 30 minutos.

Para a determinação da CE, foi utilizado um condutímetro (HANNA HI9828). Foram efetuadas suspensões com 30 g de amostra de solo e com 150 mL de água desmineralizada, que foram agitadas lentamente com uma vareta de vidro. Após 24 horas de repouso, realizou-se a decantação das mesmas de forma a obter uma solução mais transparente para se proceder à leitura. Tanto na determinação do pH como da condutividade elétrica, foram feitas duas medições por cada amostra, sendo depois tido em conta o valor médio. De modo a não haver contaminação nas amostras, entre cada leitura o eléctrodo foi lavado com água desmineralizada e seco com papel de filtro.

A determinação do carbono orgânico nas amostras de solos de Benguela foi feita na ESAC (Escola Superior Agrária de Coimbra). As amostras foram oxidadas por combustão seca a 550 °C e o carbono (C) libertado foi doseado por infravermelhos (ISO 10694:1995).

3.4. Análises químicas

Os solos de Benguela foram digeridos por *aqua-regia* e analisadas por ICP-OES e ICP-MS. A *aqua-regia* consiste numa mistura de ácidos nítrico e clorídrico concentrados, geralmente na proporção de uma para três partes. A amostra é atacada com esta solução a 80-95 °C durante 1 a 3 horas, é depois filtrada por filtro < 0,45 µm para ser analisada por ICP-OES e ICP-MS. As amostras de solos de Lubango e Humpata foram digeridas por mistura ácida (ácidos nítrico, perclórico e fluorídrico concentrados), levadas à secura, sendo o resíduo retomado com ácido clorídrico e analisadas por ICP-OES e ICP-MS.

As análises químicas foram adquiridas a um laboratório comercial acreditado (*Actlabs* - Canadá), de acordo com os seus procedimentos e métodos analíticos e segundo os seus protocolos de averiguação de erro e controlo de qualidade. O erro analítico é inferior a 10%, foram analisados brancos e amostras de referência certificadas.

4. Resultados e discussão

4.1. Textura dos solos de Benguela

Uma das propriedades físicas dos solos é a sua textura ou distribuição da granulometria das partículas que o constituem e esta é determinada pela proporção em que as diferentes classes de tamanhos das partículas (areia, silte e argila) se encontram no solo. Quanto maior for a proporção de partículas com o tamanho de argila ($< 2 \mu\text{m}$) mais argiloso será o solo e quanto maior a proporção de partículas com tamanho de areia (entre $63 \mu\text{m}$ e 2mm) mais arenoso será o solo. Se a areia, o silte (tamanhos de partículas 2 a $63 \mu\text{m}$) e a argila estiverem presentes em proporções aproximadamente iguais, o solo é classificado como franco.

Os valores obtidos na análise granulométrica de 20 amostras dos solos de Benguela e os respetivos parâmetros estatísticos para cada tipo de solo, encontram-se representados na tabela 1. Os resultados mostram que nos solos de Benguela a média das proporções relativas de argila é $8,3 \%$, a de silte é $41,9 \%$ e a de areia é $49,8 \%$, sendo este “solo médio”, classificado como franco-arenoso.

Em relação a cada tipo de solo, nos solos naturais, a proporção média de argila é de $9,0\%$, variando de $4,0$ (BG4) a $18,9\%$ (BG15), enquanto no que diz respeito aos solos urbanos, a proporção de argila varia de $2,2\%$ (BG8) a $8,6\%$ (BG6), sendo a média de $5,2\%$. E por fim, relativamente aos solos agrícolas, a proporção de argila varia de $2,3\%$ (BG17) a $19,7\%$ (BG12), sendo a média de $10,4\%$ (tabela 1). No que diz respeito aos solos naturais, a proporção média de silte é de $50,5\%$, variando de $25,6\%$ (BG4) a $73,3\%$ (BG15), enquanto no que diz respeito aos solos urbanos, a proporção de silte varia de $9,2\%$ (BG8) a $46,9\%$ (BG6), sendo a média de $24,9\%$. E por fim, relativamente aos solos agrícolas, a proporção de silte varia de $11,3\%$ (BG17) a $69,3\%$ (BG13), sendo a média de $47,4\%$ (tabela 1). Nos solos naturais, a proporção média de areia é de $40,5\%$, variando de $7,8\%$ (BG15) a $70,4\%$ (BG4), enquanto no que diz respeito aos solos urbanos, a proporção de areia varia de $44,5\%$ (BG6) a $88,6\%$ (BG8), sendo a média de $69,9\%$. Nos solos agrícolas, a proporção de areia varia de $13,3\%$ (BG12) a $86,5\%$ (BG17), sendo a média de $42,2\%$ (tabela 1).

Tabela 1 - Valores da análise granulométrica e parâmetros estatísticos dos solos de Benguela.

| | Argila % | Silte % | Areia % | | Argila % | Silte % | Areia % |
|---------------------------------------|-------------|------------|------------|-----------|-------------|------------|------------|
| Solo natural | | | | | | | |
| BG-1 | 7,6 | 36,3 | 56,2 | \bar{x} | 9,0 | 50,5 | 40,5 |
| BG-2 | 7,3 | 38,7 | 54 | s | 4,94 | 20,91 | 24,99 |
| BG-3 | 4,7 | 26,1 | 69,2 | Máximo | 18,9 | 73,3 | 70,4 |
| BG-4 | 4 | 25,6 | 70,4 | Mínimo | 4,0 | 25,6 | 7,8 |
| BG-5 | 13,7 | 73,2 | 13,2 | | | | |
| BG-15 | 18,9 | 73,3 | 7,8 | | | | |
| BG-19 | 7,6 | 62,8 | 29,6 | | | | |
| BG-20 | 8,3 | 68,3 | 23,4 | | | | |
| Solo urbano | | | | | | | |
| BG-6 | 8,6 | 46,9 | 44,5 | | Argila % | Silte % | Areia % |
| BG-7 | 3 | 13,9 | 83,1 | \bar{x} | 5,2 | 24,9 | 69,9 |
| BG-8 | 2,2 | 9,2 | 88,6 | s | 2,35 | 13,37 | 15,67 |
| BG-9 | 5,4 | 21,6 | 73 | Máximo | 8,6 | 46,9 | 88,6 |
| BG-10 | 6,5 | 29,6 | 64 | Mínimo | 2,2 | 9,2 | 44,5 |
| BG-18 | 5,5 | 28,2 | 66,4 | | | | |
| Solo agrícola | | | | | | | |
| BG-11 | 6,1 | 47,5 | 46,4 | | Argila % | Silte % | Areia % |
| BG-12 | 19,7 | 67,1 | 13,3 | \bar{x} | 10,4 | 47,4 | 42,2 |
| BG-13 | 15,3 | 69,3 | 15,4 | s | 6,33 | 21,2 | 27,03 |
| BG-14 | 8,1 | 39,3 | 52,7 | Máximo | 19,7 | 69,3 | 86,5 |
| BG-16 | 10,8 | 50 | 39,2 | Mínimo | 2,3 | 11,3 | 13,3 |
| BG-17 | 2,3 | 11,3 | 86,5 | | | | |
| Parâmetros estatísticos gerais | | | | | | | |
| \bar{x} | 8,3 | 41,9 | 49,8 | | | | |
| s | 5,1 | 21,4 | 25,9 | | | | |
| Máximo | 19,7 | 73,3 | 88,6 | | | | |
| Mínimo | 2,2 | 9,2 | 7,8 | | | | |

\bar{x} : valor médio; s: desvio padrão dos valores

A classificação textural do solo fez-se através do uso do diagrama recomendado pela FAO (2014), sendo que este está representado na figura 10. Nessa mesma figura encontra-se a projeção das amostras da região de Benguela em relação à quantidade de areia, silte e argila. Com base na projeção das amostras, os solos naturais são classificados como franco-arenosos a franco-siltosos; os solos urbanos são classificados como francos a arenosos e os solos agrícolas apresentam a maior variabilidade sendo arenosos a franco-siltosos.

Não se observa uma grande diferença na classificação destes solos, sendo classificados de arenosos a franco-arenosos (figura 10), pois possuem sempre baixa quantidade de argila. Na cidade do Kuito (Angola), assim como acontece neste caso de Benguela, os solos urbanos também exibiram teores muito baixos de argila (Silva *et al.*, 2019), e daí os solos também terem uma classificação textural idêntica. É possível concluir que, a maioria dos solos urbanos são mais arenosos (Vodyanitskii, 2014; Yang & Zhang, 2015) e os solos agrícolas são os mais argilosos.

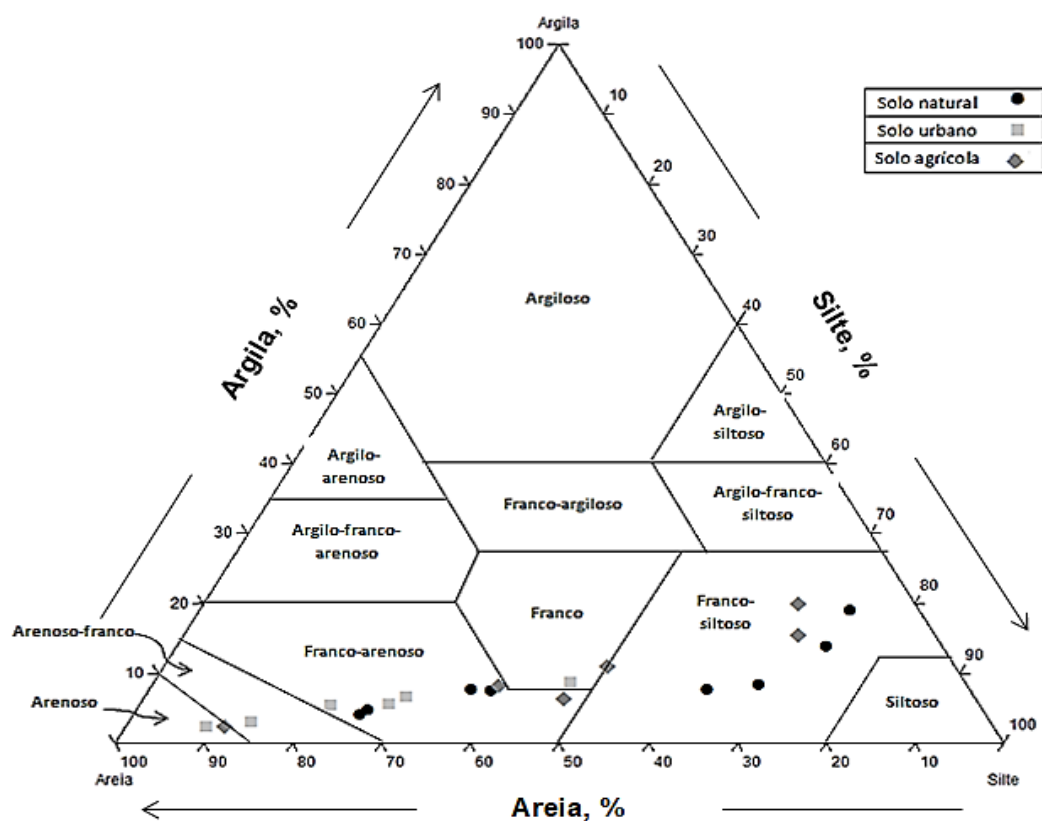


Figura 10 - Sobreposição da projeção das amostras de Benguela com o diagrama triangular para a classificação da textura do solo.

4.2. Variações de pH, CE e MO

Na tabela 2 são apresentados a média, o desvio padrão, o máximo e o mínimo dos parâmetros físico-químicos pH e CE, dos solos de Benguela, obtidos em António (2016).

Tabela 2 - Valores de pH e de condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) determinados por António (2016) dos solos de Benguela.

| Solo natural | | | | | |
|----------------------|-----|------------------------|-----------|------|------------------------|
| | pH | CE $\mu\text{S/cm}$ | | pH | CE $\mu\text{S/cm}$ |
| BG-1 | 8,0 | 2015 | \bar{x} | 8,1 | 1277 |
| BG-2 | 8,0 | 3293 | s | 0,43 | 1099 |
| BG-3 | 8,5 | 117 | Máximo | 8,9 | 3293 |
| BG-4 | 8,9 | 68 | Mínimo | 7,6 | 68 |
| BG-5 | 7,7 | 1926 | | | |
| BG-15 | 7,6 | 716 | | | |
| BG-19 | 7,8 | 730 | | | |
| BG-20 | 8,0 | 1354 | | | |
| Solo urbano | | | | | |
| | pH | CE $\mu\text{S/cm}$ | | pH | CE $\mu\text{S/cm}$ |
| BG-6 | 8,2 | 856 | \bar{x} | 8,3 | 2677 |
| BG-7 | 8,1 | 1824 | s | 0,26 | 2224 |
| BG-8 | 8,6 | 5063 | Máximo | 8,6 | 5920 |
| BG-9 | 8,0 | 5920 | Mínimo | 8,0 | 856 |
| BG-10 | 8,6 | 1431 | | | |
| BG-18 | 8,2 | 967 | | | |
| Solo agrícola | | | | | |
| | pH | CE $\mu\text{S/cm}$ | | pH | CE $\mu\text{S/cm}$ |
| BG-11 | 7,8 | 222 | \bar{x} | 8,0 | 361 |
| BG-12 | 8,0 | 729 | s | 0,12 | 258 |
| BG-13 | 8,1 | | Máximo | 8,1 | 729 |
| BG-14 | 7,9 | 527 | Mínimo | 7,8 | 116 |
| BG-16 | 7,9 | 209 | | | |
| BG-17 | 8,1 | 116 | | | |

\bar{x} : valor médio; s: desvio padrão dos valores

O pH, uma das propriedades mais importantes dos solos, indica-nos a concentração do ião H^+ na solução do solo. O pH controla a quantidade de matéria orgânica, a capacidade de troca iónica assim como a capacidade de retenção de metais num solo. Outra propriedade da solução dos solos é a sua condutividade eléctrica (CE), designada como a capacidade que os materiais têm para conduzirem ou transmitirem corrente eléctrica e que reflete a quantidade de sais solúveis em água contidos nos solos.

O valor médio de pH nos solos naturais de Benguela é de 8,1 (tabela 2). De acordo com os valores de pH determinados e baseados na escala de Pratolongo (tabela 3), estes indicam que os solos naturais são na maioria subalcalinos, existindo apenas uma amostra cujo valor a classifica como solo alcalino. Relativamente aos solos urbanos,

estes são classificados desde subalcalinos a alcalinos e o valor médio de pH é de 8,3. As amostras de solo agrícola possuem pH médio de 8,0, sendo por isso, classificados como subalcalinos (tabela 2).

Tabela 3 - Escala de Pralongo.

| pH do solo | Designação |
|-------------------|-------------------|
| <4,5 | Hiperácido |
| 4,6 – 5,5 | Ácido |
| 5,6 – 6,5 | Subácido |
| 6,6 – 7,5 | Neutro |
| 7,6 – 8,5 | Subalcalino |
| 8,6 – 9,5 | Alcalino |
| > 9,6 | Hiperalkalino |

Existe uma grande variabilidade nos valores de CE dos 3 diferentes tipos de solos. Os valores médios são 1277 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no solo natural, 2677 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no solo urbano e 361 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no solo agrícola (tabela 2), indicando que o solo urbano possui uma grande quantidade de sais que são facilmente solúveis em água. Os valores mais baixos de condutividade elétrica nos solos agrícolas devem-se ao facto de serem fluvisolos, desenvolvidos sobre sedimentos detríticos, mais ricos em silicatos e mais pobres em carbonatos do que os solos naturais.

Na tabela 4 são dados os valores de pH e de CE obtidos nas amostras dos solos de Lubango. O valor médio de pH nos solos naturais é de 6,3 (tabela 4). De acordo com os valores de pH e baseados na escala de Pralongo (tabela 3), estes indicam que os solos naturais são na maioria subácidos e neutros, existindo apenas duas amostras cujos valores são ácidos. Relativamente aos solos urbanos, estes são classificados na maioria de subácidos e subalcalinos, existindo duas amostras que diferem, sendo uma neutra e a outra alcalina. O valor médio de pH nos solos urbanos é de 7,4 (tabela 4).

Comparando os valores de pH nos solos naturais e urbanos das duas cidades, pode observar-se que os solos urbanos possuem valores de pH mais elevados do que os solos naturais.

Tabela 4 - Valores de pH e de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dos solos de Lubango.

| Solo natural | | pH | CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ | | pH | CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ |
|---------------------|-----|--------|-------------------------------|-----------|-----|---------------------------------|
| LUB-1 | 5,7 | 29,4 | | \bar{x} | 6,3 | 29,3 |
| LUB-2 | 6 | 35,4 | | s | 0,9 | 12,2 |
| LUB-3 | 5,1 | 40,1 | | Máximo | 7,4 | 47,8 |
| LUB-4 | 7,4 | 43,6 | | Mínimo | 5,1 | 12,9 |
| LUB-5 | 6,5 | 12,9 | | | | |
| LUB-8 | 7,3 | 28,1 | | | | |
| LUB-6 | 6,6 | 13,6 | | | | |
| LUB-18 | 5,6 | 22,6 | | | | |
| LUB-19 | 7,2 | 20 | | | | |
| LUB-20 | 5,2 | 47,8 | | | | |
| Solo urbano | | | | | | |
| LUB-7 | 8,8 | 87,8 | | | pH | C,E, $\mu\text{S}/\text{cm}$ |
| LUB-9 | 8,4 | 1027 | | | | |
| LUB-10 | 8,4 | 2291 | | \bar{x} | 7,4 | 881,9 |
| LUB-11 | 8,5 | 1256 | | s | 1,2 | 615,5 |
| LUB-12 | 7,2 | 825,9 | | Máximo | 8,8 | 2291 |
| LUB-13 | 7,6 | 322,5 | | Mínimo | 5,7 | 87,8 |
| LUB-14 | 5,8 | 663 | | | | |
| LUB-15 | 7,6 | 400,7 | | | | |
| LUB-16 | 5,7 | 870,5 | | | | |
| LUB-17 | 6,3 | 1074,5 | | | | |

\bar{x} : valor médio, s: desvio padrão dos valores

Segundo os valores determinados para a CE, nos solos de Lubango existe uma grande diferença nos valores dos 2 diferentes tipos de solos. Os valores médios são 29,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no solo natural e 881,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no solo urbano (tabela 4). Esta característica dos solos urbanos possuem CE mais elevadas do que os solos naturais, também se verificou em Benguela.

Os solos da região de Benguela são subalcalinos a alcalinos por causa da litologia (neste caso, as margas e calcários margosos) e do clima da região (desértico). Ao sofrerem meteorização, as rochas carbonatadas desta região vão originar solos alcalinos. No entanto, o clima desértico, com elevadas taxas de evaporação na região, também proporciona a concentração de sais nos solos ficando estes alcalinos.

Nas amostras de solos urbanos e agrícolas da região de Benguela, os valores de pH também oscilaram entre subalcalinos a alcalinos, o que pode indicar que as causas naturais poderão ser a principal causa nos valores de pH. Todavia, e tal como Argyraki *et al.* (2018) obteve no estudo relativo a Ática na Grécia, os valores de pH nos solos urbanos são superiores aos valores de pH obtidos nos solos agrícolas.

O processo de urbanização contribui para o aumento dos valores de pH, uma vez que em ambas as cidades a recolha de lixos domésticos é muito deficitária e não existe um sistema eficiente de recolha dos efluentes domésticos líquidos, sendo estes livremente depositados nos solos e os sais resultantes da sua decomposição acumulados nos solos. Porém, devido à adição de estrumes e conseqüentemente ao aumento da MO, os solos agrícolas são mais propícios a ter valores de pH mais baixos.

Relativamente aos valores de CE, estes são mais elevados nas amostras de solos urbanos e podem ser explicados através da dissolução dos sais provenientes dos efluentes domésticos e industriais, líquidos e sólidos, que são descarregados nos solos. Ao passo que, nos solos agrícolas os valores de CE são mais baixos o que pode ter origem no facto de estes terem valores de pH mais baixos.

Estas diferenças nos valores de pH e CE entre os solos urbanos e os solos não urbanos (naturais e agrícolas) também foram verificadas por Khorshid & Thiele-Bruhn (2016) na região do Sulaimani, no Kurdistão (Iraqe). De acordo com Vodyanitskii (2014), Costa (2015) e Yang & Zhang (2015) os valores de pH são mais elevados em solos urbanos.

Os solos naturais do Lubango apresentaram valores de pH mais baixos ($\bar{x} = 6,3$), do que os dos solos naturais de Benguela ($\bar{x} = 8,1$). Esta diferença pode ser explicada através da litologia e do clima. Os solos da região de Lubango são classificados, no geral de subácidos a subalcalinos devido à litologia e ao clima da região (subtropical). Segundo Andrews *et al.* (2003), a acidez nos solos tende a aumentar devido às elevadas taxas de precipitação, à litologia ácida da rocha-mãe, à existência de cobertura vegetal espessa e às grandes altitudes. Neste caso, a rocha-mãe da região de Lubango são rochas graníticas, as altitudes rondam os 1700 metros, a precipitação e a cobertura vegetal são mais abundantes no Lubango do que em Benguela.

É importante salientar, que os solos naturais de Benguela apresentam maiores valores de CE ($\bar{x} = 1277 \mu\text{S}/\text{cm}$), do que os solos naturais de Lubango ($\bar{x} = 29,3 \mu\text{S}/\text{cm}$). Isto deve-se ao facto de Benguela se encontrar nas proximidades do mar e das altas temperaturas que se fazem sentir na região, o que faz com que haja precipitação de sais.

Um dos constituintes mais importantes do solo é a matéria orgânica (MO), pois desempenha um papel fundamental na manutenção das funções do solo influenciando a sua estrutura, a capacidade de troca catiónica e de retenção de água (Simões, 2012). Este constituinte tem sido considerado um dos indicadores-chave para a qualidade do solo, uma vez que influencia os componentes do solo para que este desempenhe as suas

funções. Na tabela 5 encontram-se os valores de carbono orgânico (CO) (%) nas amostras de solo natural, urbano e agrícola da região de Benguela.

O valor médio dos valores de carbono orgânico na fração fina (< 2mm) é de 0,64%, o desvio padrão é de 0,61%, o máximo é de 2,55% (que corresponde à amostra de solo urbano BG7) e o mínimo é de 0,06% (que corresponde à amostra de solo natural BG4). Na tabela 5 é possível observar que as amostras com maiores percentagens de carbono orgânico, correspondem a solos urbanos (BG7 e BG6).

Em relação a cada tipo de solo, nos solos naturais, a proporção de carbono orgânico varia de 0,06% (BG4) a 1,20% (BG15), sendo a média de 0,32% (tabela 5). No que diz respeito aos solos urbanos, a proporção de carbono orgânico varia de 0,19% (BG18) a 2,55% (BG7), sendo a média de 1,11% (tabela 5). E por fim, relativamente aos solos agrícolas, a proporção de carbono orgânico varia de 0,24% (BG17) a 1,03% (BG12), sendo a média de 0,60% (tabela 5).

Tabela 5 - Valores de carbono orgânico na fração fina (< 2 mm) nos solos de Benguela.

| Solo natural | | CO % | | CO % |
|----------------------|------|---------|-----------|---------|
| BG-1 | 0,19 | | \bar{x} | 0,32 |
| BG-2 | 0,23 | | s | 0,36 |
| BG-3 | 0,12 | | Máximo | 1,20 |
| BG-4 | 0,06 | | Mínimo | 0,06 |
| BG-5 | 0,27 | | | |
| BG-15 | 1,2 | | | |
| BG-19 | 0,23 | | | |
| BG-20 | 0,24 | | | |
| Solo urbano | | | | CO % |
| BG-6 | 1,66 | | \bar{x} | 1,11 |
| BG-7 | 2,55 | | s | 0,86 |
| BG-8 | 0,63 | | Máximo | 2,55 |
| BG-9 | 0,68 | | Mínimo | 0,19 |
| BG-10 | 0,96 | | | |
| BG-18 | 0,19 | | | |
| Solo agrícola | | | | CO % |
| BG-11 | 0,42 | | \bar{x} | 0,60 |
| BG-12 | 1,03 | | s | 0,27 |
| BG-13 | 0,54 | | Máximo | 1,03 |
| BG-14 | 0,71 | | Mínimo | 0,24 |
| BG-16 | 0,69 | | | |
| BG-17 | 0,24 | | | |

\bar{x} : valor médio; s: desvio padrão dos valores

É de realçar que a média do CO nos solos urbanos ($\bar{x} = 1,11$) é superior à média dos solos naturais ($\bar{x} = 0,32$), possivelmente devido à concentração de materiais não degradáveis e de lixos orgânicos e inorgânicos nos solos urbanos (Asabere *et al.*, 2018). Contudo uma das principais razões deve ser a existência de carvão nos solos urbanos. Este carvão é produzido em fogueiras e deitado para os solos. Segundo Golden *et al.* (2015), as fogueiras são um dos principais focos de poluição nos solos urbanos, neste caso a população de Benguela utiliza as fogueiras para cozinhar e depois o carvão é deitado para o solo. Nos países mais desenvolvidos, ao contrário do que se passa na região de Benguela, os valores de CO são mais elevados nos solos naturais.

A média do CO nos solos agrícolas ($\bar{x} = 0,60$) é muito superior quando comparada com a dos solos naturais ($\bar{x} = 0,32$), devido à utilização de adubos orgânicos nos solos agrícolas, mas é inferior à dos solos urbanos ($\bar{x} = 1,11$). Edmondson *et al.* (2012), Yang & Zhang (2015) e Asabere *et al.* (2018) também verificaram que os solos urbanos obtiveram valores de CO significativamente maiores do que nos solos agrícolas.

4.3. Composição química (elementos maiores e traço)

Nas tabelas 6, 7 e 8 são apresentados os resultados obtidos nas análises químicas dos solos de Benguela, Lubango e Humpata respetivamente. Foram doseados os seguintes elementos: Al, Ti, Fe, Mg, Ca, Na, K, P, S (todos em %), Ag, As, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Hf, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Re, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr (em mg/kg) e o Hg (em $\mu\text{g/kg}$).

Os valores dos somatórios das análises dos elementos Al, Ti, Fe, Mg, Ca, Na, K, P e Mn dos solos de Benguela são baixos e tal pode dever-se ao facto de a dissolução das amostras ter sido feita com *aqua regia*, que não dissolve nem o quartzo nem os feldspatos, os silicatos principais de um solo e o SiO_2 não foi doseado. Os solos de Lubango e Humpata foram digeridos com mistura de ácidos (HF , HNO_3 , HClO_4), que dissolve a maioria dos silicatos, contudo os totais são também baixos, pois o SiO_2 também não pode ser doseado por esta metodologia. Os solos de Humpata são os que apresentam menores totais, devido à litologia da rocha-mãe destes solos, quartzarenitos e rochas vulcânicas ácidas, serem muito ricas em SiO_2 .

A aplicação do teste-t aos solos de Benguela, no sentido de determinar se haveria ou não diferença estatisticamente significativa, entre os solos naturais e os solos urbanos, indicou que os solos urbanos são mais pobres em Al, Ti, Fe e Mg e mais ricos

em P do que os solos naturais (tabela 6). Relativamente aos elementos traço os solos urbanos são mais ricos em Be, Cu, Nb, Sb, Sn, Zn e mais pobres em As, Cr, Cs, Ga, Li, Ni, Rb, Sc, Th, Tl, V, Y e Zr do que os solos naturais. Os solos urbanos também possuem valores médios e medianos de Cd, Hg e Pb mais altos que os solos naturais, mas as diferenças não são significativas (tabela 6).

Os elementos Cd, Cu, Hg, Pb, Sb, Sn e Zn são utilizados em ligas metálicas, alguns em baterias e na indústria, para além de alguns destes estarem relacionados com o trânsito automóvel, devido ao desgaste das peças. Os elementos referidos anteriormente são metais relacionados com a poluição urbana (e.g. Xia et al., 2011; Yuan et al., 2014; Costa, 2015; Islam et al., 2015a; Yang & Zhang, 2015; Buttafuoco et al., 2017; Argyraki et al., 2018; Jafari et al., 2018).

No que diz respeito à aplicação do teste-t aos solos de Lubango, no sentido de determinar se haveria ou não diferença estatisticamente significativa, entre os solos naturais e os solos urbanos, indicou que não há diferença significativa entre os dois tipos de solos (tabela 7), pois os valores do desvio padrão, em cada um dos tipos de solo, são muito altos (tabela 7), devido à existência de *outliers*. Comparando os valores da mediana entre os dois tipos de solos, observa-se que os solos urbanos são mais ricos em Ca, Na, P, S, Ba, Cr, Cu, Mo, Nb, Pb, Sr, V e Zn e mais pobres em Co, Cs, Hf, Li, Mn, Ni, Rb, Sc, U e Zr do que os solos naturais (tabela 7). O facto de serem mais ricos em Ca e S pode dever-se aos resíduos das construções (cimento, cal, gesso) e lixiviação dos muros. O enriquecimento em Sr, deve-se ao facto deste elemento substituir o Ca. O enriquecimento em Na e P deve-se provavelmente às adições de águas domésticas, ricas em sais derivados dos detergentes e lixívias.

Os elementos Cu, Mo, Pb e Zn são normalmente utilizados em ligas metálicas, pelo que podem ser adicionados aos solos urbanos pelos lixos relacionados com serralharias ou oficinas automóveis, além de serem também libertados pelo trânsito automóvel, devido ao desgaste, sendo metais relacionados com a poluição urbana (e.g. Xia et al., 2011; Yuan et al., 2014; Costa, 2015; Islam et al., 2015a; Yang & Zhang, 2015; Buttafuoco et al., 2017; Argyraki et al., 2018; Jafari et al., 2018).

E por fim, a aplicação do teste-t aos solos de Humpata, no sentido de determinar se haveria ou não diferença estatisticamente significativa, entre os solos naturais e os solos urbanos, indicou que os dois tipos de solos possuem teores de Ca, P, Hg e Sr significativamente diferentes (tabela 8), sendo que os solos urbanos são mais ricos nestes elementos. Comparando os valores da mediana entre os dois tipos de solos,

observa-se que os solos urbanos são mais ricos em Ti, Na, Ag, Ba, Cd, Cs, Cu, Mn, Mo, Pb, Sb, Sn, V, W, Zn e mais pobres em Fe, K, Hf, Li, Rb, Th, U, Y e Zr do que os solos naturais (tabela 8). Os elementos relacionados com a poluição urbana e.g. Cd, Cu, Hg, Mn, Pb, Sb, Sn, W e Zn possuem maiores teores nos solos urbanos do que nos solos naturais de Humpata.

Comparando as medianas dos teores de elementos nos solos das três cidades, conclui-se que os elementos Na, P, Ba, Cu, Pb e Zn possuem sempre teores superiores nos solos urbanos, enquanto os elementos Li, Rb, U e Zr, elementos que são geogénicos possuem sempre teores inferiores. Também Hg, Sb e Sn possuem teores superiores nos solos urbanos de Benguela e Humpata em relação aos solos naturais, e Ca e Sr possuem teores superiores nos solos urbanos de Lubango e Humpata, em relação aos solos naturais destas cidades.

O enriquecimento em Na e P nos solos urbanos das três cidades pode ser explicado pelas adições de lixos domésticos e águas resultantes das atividades domésticas, que são dispersas livremente pelos solos. O enriquecimento em Ca e Sr, que o substitui, nos solos urbanos de Lubango e Humpata pode ser explicado pela adição de desperdícios da construção, nomeadamente cal, gesso e cimento. Em Benguela não se observa este enriquecimento porque os teores de cálcio nos solos são muito mais elevados, o que tamponiza a concentração de Ca no solo urbano.

Tabela 6 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em µg/kg) e alguns valores estatísticos dos solos de Benguela.

| Solo natural | Al | Ti | Fe | Mg | Ca | Na | K | P | Ag | As | Ba | Be | Bi | Cd | Co | Cr | Cs | Cu | Ga |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| BG-1 | 1,44 | 0,06 | 1,74 | 0,60 | 4,64 | 0,04 | 0,28 | 0,05 | 0,15 | 6,9 | 10,9 | 0,6 | 0,11 | 0,23 | 4,9 | 21 | 1 | 10,5 | 5,7 |
| BG-2 | 1,97 | 0,09 | 2,20 | 0,61 | 1,60 | 0,36 | 0,37 | 0,07 | 0,12 | 5,3 | 56 | 0,8 | 0,16 | 0,29 | 6 | 24 | 1,44 | 9,83 | 7,89 |
| BG-3 | 1,89 | 0,09 | 2,40 | 0,73 | 5,38 | 0,03 | 0,37 | 0,06 | 0,06 | 4,6 | 126 | 0,8 | 0,1 | 0,3 | 8,2 | 26 | 0,9 | 14,7 | 7,45 |
| BG-4 | 1,78 | 0,08 | 2,28 | 0,56 | 2,51 | 0,02 | 0,36 | 0,06 | 0,05 | 4,4 | 109 | 0,8 | 0,1 | 0,22 | 7,5 | 24 | 0,81 | 12,8 | 6,83 |
| BG-5 | 2,47 | 0,08 | 2,63 | 0,59 | 5,04 | 0,04 | 0,29 | 0,04 | 0,01 | 7 | 33,5 | 0,9 | 0,16 | 0,22 | 6,1 | 27 | 1,73 | 11,8 | 9,57 |
| BG-15 | 2,98 | 0,13 | 3,34 | 1,05 | 1,53 | 0,04 | 0,79 | 0,12 | 0,09 | 3,3 | 181 | 1,1 | 0,1 | 0,13 | 15,2 | 24 | 1,4 | 31,3 | 12,3 |
| BG-19 | 2,11 | 0,09 | 2,40 | 0,79 | 2,83 | 0,10 | 0,41 | 0,09 | 0,12 | 5,8 | 139 | 0,9 | 0,17 | 0,79 | 7,4 | 42 | 1,98 | 17,1 | 8,79 |
| BG-20 | 2,46 | 0,10 | 2,84 | 0,86 | 4,52 | 0,07 | 0,41 | 0,07 | 0,07 | 5,6 | 34,8 | 1 | 0,22 | 1,73 | 7,3 | 39 | 2,26 | 12,8 | 10,2 |
| \bar{x} | 2,14 | 0,09 | 2,48 | 0,72 | 3,51 | 0,09 | 0,41 | 0,07 | 0,08 | 5,36 | 86,28 | 0,86 | 0,14 | 0,49 | 7,83 | 28,38 | 1,44 | 15,10 | 8,59 |
| med. | 2,04 | 0,09 | 2,40 | 0,67 | 3,68 | 0,04 | 0,37 | 0,07 | 0,08 | 5,45 | 82,50 | 0,85 | 0,14 | 0,26 | 7,35 | 25,00 | 1,42 | 12,80 | 8,34 |
| s | 0,48 | 0,02 | 0,47 | 0,17 | 1,57 | 0,11 | 0,16 | 0,02 | 0,04 | 1,26 | 60,80 | 0,15 | 0,04 | 0,54 | 3,16 | 7,73 | 0,53 | 6,94 | 2,09 |
| máx. | 2,98 | 0,13 | 3,34 | 1,05 | 5,38 | 0,36 | 0,79 | 0,12 | 0,15 | 7 | 181 | 1,1 | 0,22 | 1,73 | 15,2 | 42 | 2,26 | 31,3 | 12,3 |
| min. | 1,44 | 0,06 | 1,74 | 0,56 | 1,53 | 0,02 | 0,28 | 0,04 | 0,01 | 3,3 | 10,9 | 0,6 | 0,1 | 0,13 | 4,9 | 21 | 0,81 | 9,83 | 5,7 |
| Solo urbano | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BG-6 | 1,46 | 0,06 | 2,15 | 0,76 | 5,42 | 0,12 | 0,38 | 0,22 | 0,09 | 5,4 | 148 | 0,7 | 0,28 | 0,45 | 6,6 | 26 | 1,11 | 25,6 | 6,32 |
| BG-7 | 0,69 | 0,06 | 1,21 | 0,37 | 2,47 | 0,32 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 3,9 | 103 | 0,3 | 0,21 | 0,2 | 3,4 | 12 | 0,38 | 20,1 | 3,29 |
| BG-8 | 0,58 | 0,05 | 1,33 | 0,42 | 3,76 | 1,31 | 0,24 | 0,16 | 0,08 | 4,2 | 19,6 | 0,3 | 0,25 | 0,34 | 3,5 | 14 | 0,4 | 24,4 | 2,8 |
| BG-9 | 0,67 | 0,06 | 1,50 | 0,64 | 7,08 | 1,16 | 0,28 | 0,09 | 0,06 | 4,7 | 41,7 | 0,3 | 0,1 | 5,36 | 6 | 16 | 0,47 | 51,2 | 3,23 |
| BG-10 | 1,25 | 0,07 | 1,78 | 0,50 | 3,25 | 0,27 | 0,35 | 0,18 | 0,10 | 3,6 | 142 | 0,5 | 0,2 | 0,33 | 6,6 | 16 | 0,71 | 22 | 5,6 |
| BG-18 | 1,79 | 0,10 | 2,58 | 0,49 | 1,02 | 0,04 | 0,34 | 0,16 | 0,15 | 2,9 | 153 | 0,7 | 0,14 | 0,16 | 9,1 | 22 | 0,82 | 19,2 | 8,08 |
| P-1 | 1,02 | 0,08 | 1,74 | 0,67 | 3,75 | 0,25 | 0,25 | 0,14 | 0,10 | 4,3 | 117 | 0,4 | 0,1 | 0,25 | 5,9 | 19 | 0,54 | 30 | 4,78 |
| P-2 | 1,38 | 0,05 | 2,47 | 0,45 | 2,55 | 0,21 | 0,34 | 0,18 | 0,12 | 4,5 | 138 | 0,6 | 0,2 | 2,02 | 8,4 | 26 | 0,65 | 76,1 | 6,02 |
| P-5 | 0,99 | 0,07 | 1,85 | 0,49 | 3,92 | 0,18 | 0,28 | 0,22 | 0,22 | 3,5 | 131 | 0,4 | 0,12 | 0,2 | 6,2 | 25 | 0,48 | 38,8 | 4,91 |
| \bar{x} | 1,09 | 0,07 | 1,85 | 0,53 | 3,69 | 0,43 | 0,30 | 0,16 | 0,11 | 4,11 | 110,37 | 0,47 | 0,18 | 1,03 | 6,19 | 19,56 | 0,62 | 34,16 | 5,00 |
| med. | 1,02 | 0,06 | 1,78 | 0,49 | 3,75 | 0,25 | 0,28 | 0,16 | 0,10 | 4,20 | 131,00 | 0,40 | 0,20 | 0,33 | 6,20 | 19,00 | 0,54 | 25,60 | 4,91 |
| s | 0,41 | 0,02 | 0,48 | 0,13 | 1,76 | 0,47 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,74 | 48,06 | 0,17 | 0,07 | 1,72 | 1,90 | 5,39 | 0,24 | 18,80 | 1,72 |
| máx. | 1,79 | 0,10 | 2,58 | 0,76 | 7,08 | 1,31 | 0,38 | 0,22 | 0,22 | 5,4 | 153 | 0,7 | 0,28 | 5,36 | 9,1 | 26 | 1,11 | 76,1 | 8,08 |
| min. | 0,58 | 0,05 | 1,21 | 0,37 | 1,02 | 0,04 | 0,20 | 0,09 | 0,06 | 2,9 | 19,6 | 0,3 | 0,1 | 0,16 | 3,4 | 12 | 0,38 | 19,2 | 2,8 |
| teste-t | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,82 | 0,06 | 0,09 | 0,00 | 0,19 | 0,03 | 0,38 | 0,00 | 0,18 | 0,39 | 0,23 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| Solo agrícola | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BG-11 | 1,13 | 0,08 | 1,49 | 0,31 | 0,58 | 0,02 | 0,21 | 0,05 | 0,10 | 2,6 | 82,4 | 0,5 | 0,09 | 0,05 | 7 | 10 | 0,6 | 9,73 | 5,22 |
| BG-12 | 2,54 | 0,11 | 2,99 | 1,00 | 1,66 | 0,08 | 0,83 | 0,14 | 0,12 | 3,1 | 186 | 0,9 | 0,07 | 0,18 | 13,6 | 22 | 1,31 | 31,1 | 10,5 |
| BG-13 | 2,63 | 0,12 | 2,95 | 0,97 | 2,16 | 0,09 | 0,77 | 0,11 | 0,10 | 4,1 | 128 | 0,9 | 0,11 | 0,44 | 12,7 | 27 | 1,55 | 27,3 | 10,6 |
| BG-14 | 2,88 | 0,12 | 3,19 | 0,72 | 1,78 | 0,05 | 0,55 | 0,13 | 0,09 | 3,1 | 183 | 1,2 | 0,17 | 0,19 | 14,7 | 24 | 1,37 | 24,8 | 12,2 |
| BG-16 | 2,79 | 0,12 | 3,13 | 0,70 | 1,68 | 0,04 | 0,46 | 0,12 | 0,23 | 4,6 | 194 | 1 | 0,17 | 0,13 | 14,1 | 21 | 1,22 | 26,3 | 11,7 |
| BG-17 | 1,75 | 0,11 | 2,52 | 0,47 | 1,01 | 0,03 | 0,34 | 0,15 | 0,09 | 3,1 | 147 | 0,7 | 0,12 | 0,18 | 9,7 | 23 | 0,88 | 19,3 | 8,05 |
| R-10 | 1,63 | 0,08 | 1,88 | 0,41 | 0,85 | 0,07 | 0,34 | 0,09 | 0,12 | 2,9 | 108 | 0,6 | 0,11 | 0,08 | 8,7 | 14 | 0,75 | 18,7 | 6,99 |
| \bar{x} | 2,19 | 0,11 | 2,59 | 0,65 | 1,39 | 0,05 | 0,50 | 0,11 | 0,12 | 3,36 | 146,91 | 0,83 | 0,12 | 0,18 | 11,50 | 20,14 | 1,10 | 22,46 | 9,32 |
| med. | 2,54 | 0,11 | 2,95 | 0,70 | 1,66 | 0,05 | 0,46 | 0,12 | 0,10 | 3,10 | 147,00 | 0,90 | 0,11 | 0,18 | 12,70 | 22,00 | 1,22 | 24,80 | 10,50 |
| s | 0,68 | 0,02 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,03 | 0,23 | 0,04 | 0,05 | 0,72 | 42,98 | 0,24 | 0,04 | 0,13 | 3,00 | 5,98 | 0,35 | 7,12 | 2,61 |
| máx. | 2,88 | 0,12 | 3,19 | 1,00 | 2,16 | 0,09 | 0,83 | 0,15 | 0,23 | 4,6 | 194 | 1,2 | 0,17 | 0,44 | 14,7 | 27 | 1,55 | 31,1 | 12,2 |
| min. | 1,13 | 0,08 | 1,49 | 0,31 | 0,58 | 0,02 | 0,21 | 0,05 | 0,09 | 2,6 | 82,4 | 0,5 | 0,07 | 0,05 | 7 | 10 | 0,6 | 9,73 | 5,22 |

\bar{x} : valor médio; med: valor da mediana; s: desvio padrão; máx: valor máximo; min: valor mínimo.

S só detetado em duas amostras de solo natural. Hf, Re, Ta e W não representados porque têm teores inferiores ao limite de deteção.

Avaliação da perigosidade do solo urbano em cidades de rápida expansão, sem planeamento urbano e com sistemas sanitários deficientes

Tabela 6 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em µg/kg) e alguns valores estatísticos dos solos de Benguela (continuação).

| Solo natural | Hg* | Li | Mn | Mo | Nb | Ni | Pb | Rb | Sb | Sc | Sn | Sr | Th | Tl | U | V | Y | Zn | Zr |
|----------------------|-------|-------|--------|------|------|-------|-------|-------|--------|------|-------|--------|-------|------|------|-------|-------|--------|-------|
| BG-1 | < 10 | 18,1 | 179 | 2,3 | 0,3 | 10,9 | 13,1 | 21 | 0,16 | 4 | 0,86 | 1160 | 5,5 | 0,15 | 1,7 | 35 | 8,04 | 42,8 | 5,6 |
| BG-2 | 70 | 23,4 | 201 | 1,68 | 0,5 | 10,8 | 8,95 | 27 | 0,14 | 5,9 | 0,98 | 118 | 11,5 | 0,21 | 2 | 40 | 13,2 | 43,9 | 6,2 |
| BG-3 | 40 | 13,9 | 353 | 0,89 | 0,2 | 12,8 | 9,69 | 23,7 | 0,06 | 5 | 0,73 | 83,4 | 8,2 | 0,19 | 1 | 57 | 11,5 | 40,4 | 2,9 |
| BG-4 | 30 | 12,1 | 302 | 0,7 | 0,4 | 10,7 | 9,34 | 22,2 | 0,06 | 4,4 | 0,84 | 57,6 | 8,2 | 0,17 | 0,9 | 47 | 10,8 | 38,4 | 2,6 |
| BG-5 | 40 | 35,8 | 152 | 1,82 | 0,3 | 10,9 | 10,7 | 30,2 | 0,17 | 6,7 | 1,13 | 725 | 10,9 | 0,25 | 2,6 | 44 | 11,5 | 47 | 10,4 |
| BG-15 | 20 | 19,2 | 613 | 0,47 | 1 | 15,7 | 15,7 | 49,2 | < 0,02 | 7,3 | 1,17 | 85,7 | 10,8 | 0,29 | 1,6 | 59 | 15,1 | 85 | 1,9 |
| BG-19 | 50 | 20,7 | 229 | 1,84 | 0,2 | 17 | 9,74 | 34,6 | 0,28 | 6,3 | 1,37 | 191 | 12,2 | 0,28 | 3 | 60 | 17,6 | 75,5 | 7,6 |
| BG-20 | 40 | 27,7 | 208 | 3,33 | 0,3 | 14,1 | 11,1 | 40 | 0,27 | 8,2 | 1,54 | 463 | 12,9 | 0,35 | 3,3 | 59 | 17,8 | 66,4 | 11,2 |
| \bar{x} | 41,43 | 21,36 | 279,63 | 1,63 | 0,40 | 12,86 | 11,04 | 30,99 | 0,16 | 5,98 | 1,08 | 360,46 | 10,03 | 0,24 | 2,01 | 50,13 | 13,19 | 54,93 | 6,05 |
| med. | 40,00 | 19,95 | 218,50 | 1,75 | 0,30 | 11,85 | 10,22 | 28,60 | 0,16 | 6,10 | 1,06 | 154,50 | 10,85 | 0,23 | 1,85 | 52,00 | 12,35 | 45,45 | 5,90 |
| s | 15,74 | 7,65 | 149,91 | 0,94 | 0,26 | 2,49 | 2,29 | 9,80 | 0,09 | 1,45 | 0,28 | 398,95 | 2,50 | 0,07 | 0,89 | 9,86 | 3,43 | 18,03 | 3,53 |
| máx. | 70 | 35,80 | 613 | 3,33 | 1 | 17 | 15,7 | 49,2 | 0,28 | 8,2 | 1,54 | 1160 | 12,9 | 0,35 | 3,3 | 60 | 17,8 | 85 | 11,2 |
| min. | 20 | 12,10 | 152 | 0,47 | 0,2 | 10,70 | 8,95 | 21 | 0,06 | 4 | 0,73 | 57,6 | 5,5 | 0,15 | 0,9 | 35 | 8,04 | 38,4 | 1,9 |
| Solo urbano | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BG-6 | 40 | 15,7 | 364 | 1,52 | 0,7 | 12,8 | 43,4 | 25,8 | 0,65 | 3,3 | 5,16 | 149 | 3,7 | 0,16 | 1,6 | 40 | 10,1 | 222 | 0,4 |
| BG-7 | 20 | 5,8 | 212 | 1,22 | 1,1 | 6 | 32,3 | 11 | 0,57 | 2,1 | 5,02 | 88,9 | 4,8 | 0,05 | 1 | 23 | 6,3 | 100 | 1 |
| BG-8 | 10 | 5,2 | 197 | 1,56 | 0,9 | 7,1 | 44,2 | 10,7 | 0,93 | 1,8 | 4,67 | 98,6 | 4,9 | 0,05 | 1,1 | 25 | 6,18 | 117 | 0,6 |
| BG-9 | 30 | 6,4 | 224 | 2,25 | 0,8 | 6,1 | 46,9 | 14,2 | 0,71 | 2 | 2,51 | 136 | 4,2 | 0,07 | 1,5 | 29 | 5,52 | 172 | 3,2 |
| BG-10 | 20 | 8,9 | 434 | 0,79 | 0,6 | 9,9 | 97,8 | 22,5 | 0,72 | 3 | 4,13 | 134 | 6,3 | 0,1 | 1,8 | 34 | 9,02 | 281 | 0,5 |
| BG-18 | 80 | 11 | 561 | 0,66 | 1 | 9,1 | 15,7 | 24,3 | 0,07 | 4,8 | 1,87 | 80,5 | 15,3 | 0,14 | 2,3 | 54 | 13,4 | 75,1 | 1,1 |
| P-1 | 80 | 6,7 | 296 | 0,99 | 0,5 | 7,7 | 24,9 | 15,6 | 0,38 | 3 | 4,02 | 98,8 | 7,8 | 0,08 | 1,9 | 43 | 8,19 | 96 | 0,5 |
| P-2 | 150 | 8,7 | 415 | 1,17 | 0,4 | 13,6 | 249 | 21,4 | 0,9 | 3,3 | 10,7 | 123 | 4,2 | 0,09 | 1,3 | 33 | 8,49 | 398 | 0,2 |
| P-5 | 40 | 6,7 | 348 | 0,71 | 0,3 | 9,3 | 38,9 | 16,6 | 0,33 | 3 | 4,81 | 220 | 8,8 | 0,06 | 1,8 | 38 | 8,9 | 143 | < 0,1 |
| \bar{x} | 52,22 | 8,34 | 339,00 | 1,21 | 0,70 | 9,07 | 65,90 | 18,01 | 0,58 | 2,92 | 4,77 | 125,42 | 6,67 | 0,09 | 1,59 | 35,44 | 8,46 | 178,23 | 0,94 |
| med. | 40,00 | 6,70 | 348,00 | 1,17 | 0,70 | 9,10 | 43,40 | 16,60 | 0,65 | 3,00 | 4,67 | 123,00 | 4,90 | 0,08 | 1,60 | 34,00 | 8,49 | 143,00 | 0,55 |
| s | 44,38 | 3,30 | 120,50 | 0,51 | 0,27 | 2,72 | 72,41 | 5,67 | 0,28 | 0,91 | 2,50 | 42,53 | 3,68 | 0,04 | 0,41 | 9,63 | 2,40 | 105,67 | 0,96 |
| máx. | 150 | 15,70 | 561 | 2,25 | 1,1 | 13,6 | 249 | 25,8 | 0,93 | 4,8 | 10,70 | 220 | 15,3 | 0,16 | 2,3 | 54 | 13,4 | 398 | 3,2 |
| min. | 10 | 5,20 | 197 | 0,66 | 0,3 | 6 | 15,7 | 10,7 | 0,07 | 1,8 | 1,87 | 80,5 | 3,7 | 0,05 | 1 | 23 | 5,52 | 75,1 | 0,2 |
| teste-t | 0,51 | 0,00 | 0,39 | 0,28 | 0,04 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,04 | 0,00 | 0,25 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| Solo agrícola | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BG-11 | 70 | 7,2 | 258 | 0,35 | 0,4 | 5,1 | 8,22 | 17,5 | < 0,02 | 3,5 | 0,6 | 49,6 | 7,8 | 0,1 | 1,2 | 31 | 8,09 | 28,4 | 0,9 |
| BG-12 | 40 | 17,4 | 682 | 0,96 | 0,9 | 13,5 | 16 | 49,6 | 0,02 | 6,6 | 1,1 | 101 | 10,3 | 0,3 | 1,7 | 52 | 13,4 | 77,7 | 1,3 |
| BG-13 | 30 | 18,9 | 522 | 1,12 | 0,8 | 14,4 | 18,2 | 48,1 | 0,07 | 6,8 | 1,16 | 145 | 11 | 0,31 | 2 | 56 | 15,1 | 74,2 | 1,7 |
| BG-14 | 30 | 17,8 | 620 | 0,75 | 0,9 | 14,3 | 16,6 | 37,5 | 0,03 | 7,7 | 1,47 | 102 | 13,8 | 0,21 | 2,4 | 61 | 16,9 | 74 | 1,8 |
| BG-16 | 10 | 17 | 572 | 0,66 | 0,8 | 13,5 | 19,4 | 36 | 0,59 | 7,3 | 3,65 | 107 | 11,9 | 0,2 | 1,8 | 60 | 15,8 | 97,9 | 1,8 |
| BG-17 | 20 | 10,9 | 546 | 0,58 | 1 | 9,2 | 15,4 | 24,1 | 0,06 | 5,2 | 1,86 | 82,6 | 14,5 | 0,14 | 2,2 | 52 | 13,1 | 73,1 | 1 |
| R-10 | 70 | 9,8 | 395 | 0,88 | 0,4 | 7,6 | 105 | 23,4 | 1,17 | 4,1 | 1,41 | 62,2 | 9,6 | 0,13 | 1,4 | 38 | 10,1 | 78,6 | 0,6 |
| \bar{x} | 38,57 | 14,14 | 513,57 | 0,76 | 0,74 | 11,09 | 28,40 | 33,74 | 0,32 | 5,89 | 1,61 | 92,77 | 11,27 | 0,20 | 1,81 | 50,00 | 13,21 | 71,99 | 1,30 |
| med. | 30,00 | 17,00 | 546,00 | 0,75 | 0,80 | 13,50 | 16,60 | 36,00 | 0,07 | 6,60 | 1,41 | 101,00 | 11,00 | 0,20 | 1,80 | 52,00 | 13,40 | 74,20 | 1,30 |
| s | 23,40 | 4,70 | 143,53 | 0,26 | 0,24 | 3,75 | 33,97 | 12,52 | 0,47 | 1,63 | 0,98 | 31,58 | 2,35 | 0,08 | 0,43 | 11,33 | 3,16 | 21,05 | 0,48 |
| máx. | 70 | 18,90 | 682 | 1,12 | 1 | 14,4 | 105 | 49,6 | 1,17 | 7,7 | 3,65 | 145 | 14,5 | 0,31 | 2,4 | 61 | 16,9 | 97,9 | 1,8 |
| min. | 10 | 7,20 | 258 | 0,35 | 0,4 | 5,1 | 8,22 | 17,50 | 0,02 | 3,5 | 0,60 | 49,6 | 7,8 | 0,1 | 1,2 | 31 | 8,09 | 28,4 | 0,6 |

\bar{x} : valor médio; med: valor da mediana; s: desvio padrão; máx: valor máximo; min: valor mínimo.

S só detetado em duas amostras de solo natural. Hf, Re, Ta e W não representados porque têm teores inferiores ao limite de deteção.

Tabela 7 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em µg/kg) e alguns valores estatísticos dos solos de Lubango.

| Solo natural | Al | Ti | Fe | Mg | Ca | Na | K | P | S | Ag | Ba | Be | Bi | Co | Cr | Cs | Cu | Ga |
|---------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|--------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| LUB-1 | 5,22 | 0,15 | 0,96 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 1,77 | 0,02 | 0,01 | 0,26 | 160 | 1,3 | 0,13 | 4,1 | 15,3 | 2,23 | 9,3 | 9,8 |
| LUB-2 | 5,99 | 0,16 | 3,13 | 0,12 | 0,1 | 0,69 | 2,81 | 0,02 | < 0,01 | 0,23 | 412 | 3,9 | 0,13 | 13,2 | 50,8 | 5,7 | 8,1 | 12,4 |
| LUB-3 | > 10,0 | 0,33 | 5,07 | 0,27 | 0,21 | 0,88 | 1,94 | 0,05 | 0,03 | 0,23 | 263 | 3,5 | 0,16 | 13,2 | 28,3 | 4,18 | 13,5 | 22,1 |
| LUB-4 | 7,73 | 0,15 | 5,42 | 0,15 | 0,13 | 0,42 | 2,43 | 0,01 | < 0,01 | 0,16 | 438 | 2,3 | 0,2 | 30,2 | 20,5 | 3,95 | 12,5 | 8,6 |
| LUB-5 | 3,04 | 0,27 | 0,53 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 1,68 | 0,01 | < 0,01 | 0,14 | 326 | 0,5 | 0,07 | 1,8 | 15,6 | 0,82 | 4,6 | < 0,1 |
| LUB-6 | 5,15 | 0,29 | 0,94 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 1,74 | 0,03 | 0,01 | 0,14 | 159 | 1,2 | 0,12 | 4,2 | 15,8 | 2,24 | 7,6 | 10 |
| \bar{x} | 5,43 | 0,22 | 2,68 | 0,12 | 0,10 | 0,36 | 2,06 | 0,02 | 0,02 | 0,19 | 293,00 | 2,10 | 0,14 | 11,10 | 24,40 | 3,19 | 9,27 | 12,60 |
| med. | 5,22 | 0,22 | 2,05 | 0,11 | 0,08 | 0,26 | 1,86 | 0,02 | 0,01 | 0,20 | 295,00 | 1,80 | 0,13 | 8,70 | 18,20 | 3,10 | 8,70 | 10,00 |
| s | 1,69 | 0,08 | 2,19 | 0,08 | 0,06 | 0,36 | 0,46 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 121,00 | 1,40 | 0,04 | 10,60 | 13,90 | 1,75 | 3,30 | 5,50 |
| máx | 7,73 | 0,33 | 5,42 | 0,27 | 0,21 | 0,88 | 2,81 | 0,05 | 0,03 | 0,26 | 438 | 3,9 | 0,2 | 30,2 | 50,8 | 5,7 | 13,5 | 22,1 |
| min | 3,04 | 0,15 | 0,53 | 0,03 | 0,06 | 0,05 | 1,68 | 0,01 | 0,01 | 0,14 | 159 | 0,5 | 0,07 | 1,8 | 15,3 | 0,82 | 4,6 | 8,6 |
| Solo urbano | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LUB-7 | 6,21 | 0,1 | 1,53 | 0,06 | 0,23 | 0,2 | 1,84 | 0,01 | < 0,01 | 0,11 | 175 | 1,5 | 0,24 | 3,7 | 16,8 | 2,58 | 10,2 | 10,3 |
| LUB-8 | > 10,0 | 0,24 | 3,29 | 0,08 | 0,18 | 0,31 | 1,91 | 0,04 | 0,02 | 0,48 | 263 | 3 | 0,64 | 4,2 | 26,2 | 4,91 | 6,3 | 21,2 |
| LUB-9 | 5,26 | 0,34 | 1,27 | 0,11 | 0,93 | 0,56 | 1,8 | 0,04 | 0,04 | 0,34 | 551 | 1,1 | 0,14 | 2,2 | 21 | 1,54 | 11,4 | < 0,1 |
| LUB-10 | 4,82 | 0,28 | 1,81 | 0,11 | 0,58 | 0,48 | 1,87 | 0,06 | 0,03 | 0,24 | 393 | 0,7 | 0,1 | 2,4 | 21,3 | 1,15 | 42 | 1,1 |
| LUB-11 | 6,21 | 0,31 | 2,72 | 0,26 | 1,47 | 1,13 | 1,95 | 0,13 | 0,05 | 0,27 | 510 | 1,3 | 0,1 | 6,6 | 23,5 | 1,02 | 21,7 | 1,9 |
| \bar{x} | 5,63 | 0,25 | 2,12 | 0,12 | 0,68 | 0,54 | 1,87 | 0,06 | 0,04 | 0,29 | 378,00 | 1,50 | 0,24 | 3,80 | 21,80 | 2,24 | 18,30 | 8,60 |
| med. | 5,74 | 0,28 | 1,81 | 0,11 | 0,58 | 0,48 | 1,87 | 0,04 | 0,04 | 0,27 | 393,00 | 1,30 | 0,14 | 3,70 | 21,30 | 1,54 | 11,40 | 6,10 |
| s | 0,70 | 0,09 | 0,85 | 0,08 | 0,54 | 0,36 | 0,06 | 0,04 | 0,01 | 0,14 | 160,00 | 0,90 | 0,23 | 1,80 | 3,50 | 1,61 | 14,40 | 9,40 |
| máx | 6,21 | 0,34 | 3,29 | 0,26 | 1,47 | 1,13 | 1,95 | 0,13 | 0,05 | 0,48 | 551 | 3 | 0,64 | 6,6 | 26,2 | 4,91 | 42 | 21,2 |
| min | 4,82 | 0,1 | 1,27 | 0,06 | 0,18 | 0,2 | 1,8 | 0,01 | 0,02 | 0,11 | 175 | 0,7 | 0,1 | 2,2 | 16,8 | 1,02 | 6,3 | 1,1 |
| teste- t | 0,82 | 0,62 | 0,59 | 0,99 | 0,07 | 0,45 | 0,36 | 0,16 | 0,11 | 0,20 | 0,36 | 0,40 | 0,35 | 0,15 | 0,67 | 0,38 | 0,24 | 0,49 |

\bar{x} : valor médio; med: valor da mediana; s: desvio padrão; máx: valor máximo; min: valor mínimo.

Arsénio só detetado numa amostra de solo natural e numa de solo urbano. Cd, Sb, Ta e W só foram detetados em duas amostras de solos urbanos.

Avaliação da perigosidade do solo urbano em cidades de rápida expansão, sem planeamento urbano e com sistemas sanitários deficientes

Tabela 7 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em µg/kg) e alguns valores estatísticos dos solos de Lubango (continuação).

| Solo natural | Hf | Hg* | Li | Mn | Mo | Nb | Ni | Pb | Rb | Sc | Sn | Sr | Th | Tl | U | V | Y | Zn | Zr |
|---------------------|------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| LUB-1 | 0,8 | 40 | 19,9 | 302 | < 0,05 | < 0,1 | 7,7 | 23,4 | 101 | 7 | 2 | 23,4 | 17,5 | 0,63 | 2,8 | 10 | 14,1 | 28 | 36 |
| LUB-2 | 9,4 | 20 | 36,4 | 1150 | 0,09 | 0,1 | 28,2 | 52,2 | 168 | 11 | 2 | 48,7 | 34,6 | 2 | 9,8 | 14 | 17,6 | 56 | 238 |
| LUB-3 | 13,9 | 20 | 53,1 | 846 | 0,39 | 3,7 | 40,6 | 36,4 | 107 | 17 | 2 | 51 | 28,6 | 0,77 | 9,6 | 40 | 20,5 | 83,3 | 387 |
| LUB-4 | 1,5 | 40 | 21,6 | 2250 | < 0,05 | < 0,1 | 22 | 38,7 | 124 | 13 | 2 | 48,6 | 51,6 | 1,42 | 8,4 | 10 | 18,2 | 83,4 | 51 |
| LUB-5 | 2,5 | 30 | 7,7 | 287 | 0,2 | 0,8 | 2,5 | 16,6 | 56 | 3 | 2 | 58,4 | 16 | 0,36 | 2 | 11 | 9,2 | 13,9 | 94 |
| LUB-6 | 0,3 | 30 | 19,8 | 318 | < 0,05 | 0,3 | 7,7 | 23,4 | 101 | 7 | 2 | 23,8 | 24 | 0,64 | 2,9 | 16 | 14,2 | 28,9 | 15 |
| ̄x | 4,70 | 30,00 | 26,42 | 859,00 | 0,23 | 1,20 | 18,10 | 31,80 | 109,00 | 10,00 | 2,00 | 42,30 | 28,70 | 0,97 | 5,90 | 17,00 | 15,60 | 48,90 | 137,00 |
| med. | 2,00 | 30,00 | 20,75 | 582,00 | 0,20 | 0,60 | 14,90 | 29,90 | 104,00 | 9,00 | 2,00 | 48,70 | 26,30 | 0,71 | 5,70 | 13,00 | 15,90 | 42,50 | 73,00 |
| s | 5,60 | 9,00 | 15,95 | 768,00 | 0,15 | 1,70 | 14,70 | 13,10 | 36,00 | 5,00 | 0,00 | 14,90 | 13,20 | 0,62 | 3,70 | 12,00 | 4,00 | 30,00 | 146,00 |
| máx | 13,9 | 40 | 53,1 | 2250 | 0,39 | 3,7 | 40,6 | 52,2 | 168 | 17 | 2 | 58,4 | 51,6 | 2 | 9,8 | 40 | 20,5 | 83,4 | 387 |
| min | 0,3 | 20 | 7,7 | 287 | 0,09 | 0,1 | 2,5 | 16,6 | 56 | 3 | 2 | 23,4 | 16 | 0,36 | 2 | 10 | 9,2 | 13,9 | 15 |
| Solo urbano | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LUB-7 | 0,6 | 30 | 22,4 | 599 | < 0,05 | 0,1 | 6,4 | 46,1 | 103 | 7 | 2 | 36,7 | 26,7 | 0,76 | 6 | 8 | 14,2 | 81,9 | 23 |
| LUB-8 | 18,4 | 40 | 42 | 1740 | 0,25 | 1,5 | 8,5 | 56 | 122 | 12 | 2 | 46,4 | 55,5 | 1,34 | 10,6 | 24 | 24,8 | 56,7 | 428 |
| LUB-9 | 0,4 | 40 | 10,3 | 268 | 0,2 | 4,3 | 3,1 | 36,5 | 62 | 5 | 2 | 133 | 20,8 | 0,67 | 3,4 | 23 | 17,4 | 63,9 | 38 |
| LUB-10 | 0,4 | 30 | 7,7 | 228 | 0,78 | 0,9 | 4,1 | 33,4 | 60 | 5 | 3 | 95,9 | 13,3 | 0,36 | 1,8 | 31 | 11,1 | 83,1 | 43 |
| LUB-11 | 1,1 | 20 | 13 | 443 | 0,72 | 5,3 | 7,8 | 51 | 60 | 7 | 6 | 288 | 21,3 | 0,39 | 2,7 | 49 | 14,8 | 127 | 85 |
| ̄x | 4,20 | 32,00 | 19,10 | 656,00 | 0,49 | 2,40 | 6,00 | 44,60 | 81,00 | 7,20 | 3,00 | 120,00 | 27,50 | 0,70 | 4,90 | 27,00 | 16,50 | 82,50 | 123,00 |
| med. | 0,60 | 30,00 | 13,00 | 443,00 | 0,49 | 1,50 | 6,40 | 46,10 | 62,00 | 7,00 | 2,00 | 95,90 | 21,30 | 0,67 | 3,40 | 24,00 | 14,80 | 81,90 | 43,00 |
| s | 8,00 | 8,00 | 14,00 | 624,00 | 0,30 | 2,30 | 2,30 | 9,50 | 29,00 | 3,00 | 2,00 | 101,60 | 16,40 | 0,40 | 3,50 | 15,00 | 5,20 | 27,40 | 172,00 |
| máx | 18,4 | 40 | 42 | 1740 | 0,78 | 5,3 | 8,5 | 56 | 122 | 12 | 6 | 288 | 55,5 | 1,34 | 10,6 | 49 | 24,8 | 127 | 428 |
| min | 0,4 | 20 | 7,7 | 228 | 0,2 | 0,1 | 3,1 | 33,4 | 60 | 5 | 2 | 36,7 | 13,3 | 0,36 | 1,8 | 8 | 11,1 | 56,7 | 23 |
| teste- t | 0,90 | 0,71 | 0,44 | 0,64 | 0,20 | 0,39 | 0,10 | 0,09 | 0,19 | 0,34 | 0,27 | 0,16 | 0,90 | 0,41 | 0,65 | 0,25 | 0,78 | 0,08 | 0,89 |

̄x : valor médio; med: valor da mediana; s. desvio padrão; máx: valor máximo; min: valor mínimo.

Arsénio só detetado numa amostra de solo natural e numa de solo urbano. Cd, Sb, Ta e W só foram detetados em duas amostras de solos urbanos.

Tabela 8 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em µg/kg) e alguns valores estatísticos dos solos de Humpata.

| Solo natural | Al | Ti | Fe | Mg | Ca | Na | K | P | S | Ag | As | Ba | Be | Bi | Cd | Co | Cr | Cs | Cu | Ga |
|---------------------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| HUM-1 | 2,21 | 0,21 | 0,51 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,28 | 0,03 | 0,02 | 0,24 | 0,1 | 44 | 0,2 | 0,1 | < 0,1 | 1 | 18,4 | 0,63 | 4,4 | 4,8 |
| HUM-2 | 1,49 | 0,23 | 0,95 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,3 | 0,03 | 0,02 | 0,15 | 0,3 | 36 | 0,3 | 0,34 | < 0,1 | 0,9 | 28,4 | 0,63 | 10,3 | 3,6 |
| HUM-3 | 3,1 | 0,24 | 5,03 | 0,14 | 0,22 | 0,04 | 0,71 | 0,05 | 0,01 | 0,14 | 4 | 78 | 0,9 | 0,09 | < 0,1 | 3,1 | 54,3 | 1,31 | 8,3 | 5,3 |
| HUM-4 | 5,52 | 0,22 | 2,61 | 0,24 | 0,01 | 0,02 | 0,97 | 0,02 | < 0,01 | 0,1 | 0,5 | 61 | 0,8 | 0,08 | < 0,1 | 4,3 | 24,4 | 3,45 | 4,5 | 11 |
| HUM-11 | 5,32 | 0,28 | 2,49 | 0,22 | 0,01 | 0,02 | 0,96 | 0,03 | < 0,01 | 0,17 | 1,4 | 60 | 0,8 | 0,08 | < 0,1 | 4,2 | 29,1 | 3,47 | 3,9 | 11 |
| HUM-5 | 3,78 | 0,29 | 2,52 | 0,14 | 0,04 | 0,02 | 0,56 | 0,03 | < 0,01 | 0,33 | 0,8 | 57 | 0,7 | 0,1 | < 0,1 | 3,8 | 26,5 | 2,56 | 7,1 | 7,9 |
| ̄x | 3,57 | 0,24 | 2,35 | 0,14 | 0,06 | 0,02 | 0,63 | 0,03 | 0,02 | 0,19 | 1,18 | 56,00 | 0,62 | 0,13 | – | 2,88 | 30,18 | 2,01 | 6,42 | 7,27 |
| med. | 3,44 | 0,23 | 2,51 | 0,14 | 0,03 | 0,02 | 0,64 | 0,03 | 0,02 | 0,16 | 0,65 | 58,50 | 0,75 | 0,10 | – | 3,45 | 27,45 | 1,94 | 5,80 | 6,60 |
| s | 1,63 | 0,03 | 1,59 | 0,08 | 0,08 | 0,01 | 0,31 | 0,01 | 0,01 | 0,08 | 1,45 | 14,63 | 0,29 | 0,10 | – | 1,56 | 12,42 | 1,33 | 2,58 | 3,21 |
| máx | 5,52 | 0,29 | 5,03 | 0,24 | 0,22 | 0,04 | 0,97 | 0,05 | 0,02 | 0,33 | 4,0 | 78 | 0,9 | 0,34 | – | 4,3 | 54,3 | 3,47 | 10,3 | 11 |
| min | 1,49 | 0,21 | 0,51 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,28 | 0,017 | 0,01 | 0,1 | 0,1 | 36 | 0,2 | 0,08 | – | 0,9 | 18,4 | 0,63 | 3,9 | 3,6 |
| Solo urbano | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HUM-6 | 1,82 | 0,19 | 1,4 | 0,08 | 0,09 | 0,05 | 0,51 | 0,03 | 0,01 | 0,22 | 0,4 | 65 | 0,4 | 0,07 | < 0,1 | 1,3 | 17 | 1,33 | 5,4 | 3 |
| HUM-7 | 3,33 | 0,27 | 3,28 | 0,17 | 0,59 | 0,06 | 0,69 | 0,13 | 0,05 | 0,23 | 2,6 | 112 | 0,7 | 0,15 | 0,2 | 3,5 | 30,2 | 1,59 | 23 | 4,9 |
| HUM-8 | 4,14 | 0,29 | 1,48 | 0,13 | 0,65 | 0,03 | 0,29 | 0,08 | 0,02 | 0,22 | 1 | 58 | 0,3 | 0,23 | 0,1 | 3,4 | 23,7 | 1,61 | 31,1 | 7,9 |
| HUM-9 | 6,49 | 0,37 | 2,83 | 0,17 | 1,11 | 0,05 | 0,33 | 0,11 | 0,02 | 0,18 | 4,3 | 74 | 0,6 | 0,38 | 0,2 | 5,6 | 41 | 2,41 | 96,8 | 12,6 |
| HUM-10 | 2,71 | 0,19 | 2,14 | 0,19 | 0,6 | 0,16 | 0,92 | 0,12 | 0,02 | 0,13 | 0,4 | 119 | 0,6 | 0,07 | 0,1 | 8,2 | 17,3 | 1,4 | 18,1 | 3,3 |
| ̄x | 3,70 | 0,26 | 2,23 | 0,15 | 0,61 | 0,07 | 0,55 | 0,09 | 0,02 | 0,20 | 1,74 | 85,60 | 0,52 | 0,18 | 0,15 | 4,40 | 25,84 | 1,67 | 34,88 | 6,34 |
| med. | 3,33 | 0,27 | 2,14 | 0,17 | 0,60 | 0,05 | 0,51 | 0,11 | 0,02 | 0,22 | 1,00 | 74,00 | 0,60 | 0,15 | 0,15 | 3,50 | 23,70 | 1,59 | 23,00 | 4,90 |
| s | 1,78 | 0,08 | 0,82 | 0,04 | 0,36 | 0,05 | 0,26 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 1,69 | 27,99 | 0,16 | 0,13 | 0,06 | 2,61 | 10,06 | 0,43 | 35,85 | 4,00 |
| máx | 6,49 | 0,372 | 3,28 | 0,19 | 1,11 | 0,16 | 0,92 | 0,13 | 0,05 | 0,23 | 4,3 | 119 | 0,7 | 0,38 | 0,2 | 8,2 | 41 | 2,41 | 96,8 | 12,6 |
| min | 1,82 | 0,19 | 1,4 | 0,08 | 0,09 | 0,03 | 0,29 | 0,027 | 0,01 | 0,13 | 0,4 | 58 | 0,3 | 0,07 | 0,1 | 1,3 | 17 | 1,33 | 5,4 | 3 |
| teste- t | 0,90 | 0,62 | 0,87 | 0,87 | 0,03 | 0,11 | 0,64 | 0,03 | 0,37 | 0,85 | 0,58 | 0,08 | 0,51 | 0,52 | – | 0,30 | 0,54 | 0,57 | 0,15 | 0,69 |

̄x : valor médio; med: valor da mediana; s: desvio padrão; máx: valor máximo; min: valor mínimo.

Re e Ta não representados porque têm teores inferiores ao limite de detecção.

Avaliação da perigosidade do solo urbano em cidades de rápida expansão, sem planejamento urbano e com sistemas sanitários deficientes

Tabela 8 - Elementos maiores (% peso), elementos traço (mg/kg, Hg* em µg/kg) e alguns valores estatísticos dos solos de Humpata (continuação).

| Solo natural | Hf | Hg* | Li | Mn | Mo | Nb | Ni | Pb | Rb | Sb | Sc | Sn | Sr | Th | Tl | U | V | W | Y | Zn | Zr |
|---------------------|-------|------|------|------|--------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|
| HUM-1 | 0,6 | 30 | 5,9 | 77 | 0,16 | 1,4 | 5,7 | 6,6 | 9,8 | < 0,1 | 2 | 2 | 9,2 | 5,9 | 0,07 | 1,1 | 16 | < 0,1 | 5,6 | 4 | 18 |
| HUM-2 | 0,3 | 30 | 8,5 | 83 | 0,52 | 0,9 | 4,1 | 5,3 | 11,9 | < 0,1 | 3 | 2 | 8,3 | 5,3 | 0,07 | 1,2 | 27 | < 0,1 | 8,9 | 5,5 | 9 |
| HUM-3 | < 0,1 | 20 | 19,1 | 131 | 1,62 | 4,8 | 6,5 | 11,3 | 30,1 | 0,1 | 7 | 2 | 19 | 8,8 | 0,12 | 1,9 | 62 | 0,4 | 9,1 | 23,6 | 6 |
| HUM-4 | 0,5 | 20 | 33,1 | 79 | < 0,05 | 0,3 | 11,1 | 7,2 | 65,4 | < 0,1 | 8 | 2 | 8 | 13 | 0,23 | 2,2 | 25 | < 0,1 | 14,9 | 12,3 | 27 |
| HUM-11 | 7,6 | 30 | 32,2 | 118 | 0,62 | 2 | 10,6 | 7,3 | 62,6 | < 0,1 | 9 | 3 | 8 | 11,5 | 0,24 | 2,1 | 32 | < 0,1 | 14,6 | 11,5 | 233 |
| HUM-5 | 0,1 | 50 | 24,5 | 82 | 0,15 | 0,3 | 11,2 | 7,5 | 41,2 | < 0,1 | 7 | 2 | 10,5 | 8,4 | 0,2 | 1,7 | 30 | < 0,1 | 11,5 | 11,7 | 24 |
| ̄ | 1,8 | 30 | 20,6 | 95 | 0,61 | 1,6 | 8,2 | 7,5 | 36,8 | 0,1 | 6 | 2 | 10,5 | 8,8 | 0,16 | 1,7 | 32 | 0,4 | 10,8 | 11,4 | 53 |
| med. | 0,5 | 30 | 21,8 | 83 | 0,52 | 1,2 | 8,6 | 7,3 | 35,7 | 0,1 | 7 | 2 | 8,8 | 8,6 | 0,16 | 1,8 | 29 | 0,4 | 10,3 | 11,6 | 21 |
| s | 3,2 | 11 | 11,6 | 23 | 0,60 | 1,7 | 3,1 | 2,0 | 24,1 | – | 3 | 0 | 4,8 | 3,0 | 0,08 | 0,5 | 16 | – | 3,6 | 6,9 | 89 |
| máx | 7,6 | 50 | 33,1 | 131 | 1,62 | 4,8 | 11,2 | 11,3 | 65,4 | 0,1 | 9 | 3 | 19 | 13 | 0,24 | 2,2 | 62 | 0,4 | 14,9 | 23,6 | 233 |
| min | 0,1 | 20 | 5,9 | 77 | 0,15 | 0,3 | 4,1 | 5,3 | 9,8 | 0,1 | 2 | 2 | 8 | 5,3 | 0,07 | 1,1 | 16 | 0,4 | 5,6 | 4 | 6 |
| Solo urbano | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HUM-6 | 0,1 | 30 | 14,2 | 72 | 0,22 | 0,4 | 4 | 7,4 | 22,7 | < 0,1 | 3 | 2 | 13,8 | 5,7 | 0,1 | 1 | 25 | < 0,1 | 6,6 | 41,2 | 7 |
| HUM-7 | 0,1 | 50 | 17,6 | 256 | 1 | 3,2 | 9,4 | 71,8 | 34,6 | 0,8 | 6 | 3 | 38,4 | 7,9 | 0,16 | 1,5 | 49 | 0,9 | 9,8 | 118 | 7 |
| HUM-8 | 0,3 | 70 | 14,3 | 590 | 0,93 | 2,1 | 13,2 | 21,4 | 15,2 | 0,6 | 6 | 3 | 39,3 | 7,8 | 0,16 | 1,3 | 39 | 0,5 | 7,9 | 485 | 8 |
| HUM-9 | 0,1 | 50 | 18,6 | 807 | 1,4 | 1,9 | 48,1 | 31,4 | 21,4 | 0,1 | 9 | 4 | 52,1 | 12,5 | 0,19 | 1,8 | 57 | 0,1 | 10,6 | 538 | 9 |
| HUM-10 | < 0,1 | 50 | 19,1 | 522 | 0,57 | 0,1 | 8,9 | 9,8 | 39,1 | < 0,1 | 4 | 1 | 47,5 | 6,7 | 0,18 | 1,2 | 28 | < 0,1 | 10,1 | 68,9 | 1 |
| ̄ | 0,2 | 50 | 16,8 | 449 | 0,82 | 1,5 | 16,7 | 28,4 | 26,6 | 0,5 | 6 | 3 | 38,2 | 8,1 | 0,16 | 1,4 | 40 | 0,5 | 9,0 | 250,2 | 6 |
| med. | 0,1 | 50 | 17,6 | 522 | 0,93 | 1,9 | 9,4 | 21,4 | 22,7 | 0,6 | 6 | 3 | 39,3 | 7,8 | 0,16 | 1,3 | 39 | 0,5 | 9,8 | 118,0 | 7 |
| s | 0,1 | 14 | 2,4 | 288 | 0,45 | 1,3 | 17,8 | 26,1 | 9,9 | 0,4 | 2 | 1 | 14,8 | 2,6 | 0,03 | 0,3 | 14 | 0,4 | 1,7 | 240,8 | 3 |
| máx | 0,3 | 70 | 19,1 | 807 | 1,40 | 3,2 | 48,1 | 71,8 | 39,1 | 0,8 | 9 | 4 | 52,1 | 12,5 | 0,19 | 1,8 | 57 | 0,9 | 10,6 | 538 | 9 |
| min | 0,1 | 30 | 14,2 | 72 | 0,22 | 0,1 | 4 | 7,4 | 15,2 | 0,1 | 3 | 1 | 13,8 | 5,7 | 0,1 | 1 | 25 | 0,1 | 6,6 | 41,2 | 1 |
| teste- t | 0,31 | 0,03 | 0,47 | 0,05 | 0,55 | 0,93 | 0,35 | 0,15 | 0,37 | – | 0,80 | 0,46 | 0,01 | 0,69 | 0,94 | 0,18 | 0,41 | – | 0,32 | 0,09 | 0,26 |

̄ : valor médio; med: valor da mediana; s: desvio padrão; máx: valor máximo; min: valor mínimo.

Re e Ta não representados porque têm teores inferiores ao limite de detecção.

4.4. Relação entre elementos químicos

Os elementos químicos nos solos podem classificar-se em geogénicos, quando provém da meteorização do substrato rochoso ou rocha-mãe, ou antropogénicos, quando resultam de atividades humanas (Jia *et al.*, 2018). É por isso importante distinguir, quais os elementos químicos geogénicos dos antropogénicos quando se faz a comparação entre solos naturais e urbanos ou entre solos naturais e agrícolas.

De forma a obter todas as relações entre todos os elementos químicos analisados, foram efetuadas matrizes de correlação (tabelas 9, 10 e 11) com as combinações possíveis entre elementos para os solos das três regiões em estudo (Benguela, Lubango e Humpata). Para complementar a informação, foram também efetuados, para as três regiões, gráficos de dispersão com as combinações possíveis entre elementos, sendo que elementos que mostram correlações positivas fortes entre si terão, em princípio, a mesma origem.

Após ser feita uma análise da matriz de correlação para cada região, foram selecionadas as correlações mais elevadas ($\rho > 0,710$) e foi analisada a sua significância, verificando-se se o valor p (*p-value*) é inferior a 0,05 e só se essa condição se verificar, é que se escolhem esses mesmos gráficos.

Assim sendo, foram selecionados 8 gráficos de correlações positivas com significância inferior a 0,05 (4 da região de Benguela, 3 da região de Lubango e 1 da região de Humpata). Nas figuras 11, 12 e 13 são apresentados os gráficos de dispersão selecionados para os solos das três regiões e nos quais são apresentados os valores do coeficiente de correlação (ρ), para os elementos geogénicos. Porém, também foram observadas algumas correlações negativas, mas os gráficos que apresentavam coeficientes de correlação (ρ) superiores a - 0,710 não possuíam significância.

Avaliação da perigosidade do solo urbano em
cidades de rápida expansão, sem planeamento
urbano e com sistemas sanitários deficientes

Tabela 9 - Matriz de correlação dos teores dos solos da região de Benguela.

| | Al | Ti | Fe | Mg | Ca | Na | K | P | Li | Be | Bi | Sc | V | Cr | Mn | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | As | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | Sn | Sb | Cs | Ba | Cd | Tl | Pb | Th | U | Hg | | | |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--|--|--|
| Al | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ti | 0,845 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe | 0,948 | 0,824 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mg | 0,708 | 0,630 | 0,708 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | -0,322 | -0,507 | -0,295 | 0,128 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na | -0,592 | -0,463 | -0,543 | -0,229 | 0,418 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | 0,766 | 0,759 | 0,782 | 0,843 | -0,301 | -0,307 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | -0,219 | -0,132 | 0,009 | -0,032 | -0,030 | 0,139 | 0,093 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | 0,748 | 0,410 | 0,619 | 0,544 | 0,103 | -0,403 | 0,378 | -0,433 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Be | 0,975 | 0,783 | 0,929 | 0,679 | -0,276 | -0,595 | 0,699 | -0,226 | 0,748 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bi | -0,164 | -0,388 | -0,128 | -0,163 | 0,228 | 0,267 | -0,268 | 0,363 | 0,077 | -0,075 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sc | 0,968 | 0,835 | 0,900 | 0,675 | -0,294 | -0,560 | 0,675 | -0,300 | 0,796 | 0,953 | -0,138 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V | 0,867 | 0,841 | 0,883 | 0,694 | -0,235 | -0,577 | 0,641 | -0,097 | 0,546 | 0,875 | -0,217 | 0,872 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0,542 | 0,285 | 0,577 | 0,569 | 0,188 | -0,359 | 0,318 | -0,056 | 0,650 | 0,612 | 0,163 | 0,620 | 0,669 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mn | 0,544 | 0,694 | 0,673 | 0,397 | -0,536 | -0,376 | 0,716 | 0,453 | -0,067 | 0,482 | -0,250 | 0,416 | 0,552 | -0,014 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Co | 0,814 | 0,866 | 0,863 | 0,614 | -0,484 | -0,447 | 0,841 | 0,105 | 0,257 | 0,760 | -0,326 | 0,716 | 0,743 | 0,196 | 0,879 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ni | 0,790 | 0,512 | 0,817 | 0,768 | -0,038 | -0,455 | 0,698 | 0,044 | 0,620 | 0,827 | 0,107 | 0,751 | 0,763 | 0,798 | 0,395 | 0,607 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cu | -0,201 | -0,219 | 0,039 | 0,029 | 0,153 | 0,314 | 0,113 | 0,545 | -0,381 | -0,231 | 0,056 | -0,283 | -0,208 | -0,042 | 0,255 | 0,151 | 0,079 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zn | -0,336 | -0,478 | -0,142 | -0,174 | 0,207 | 0,250 | -0,108 | 0,653 | -0,357 | -0,320 | 0,461 | -0,425 | -0,376 | -0,060 | 0,101 | -0,111 | 0,046 | 0,781 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ga | 0,992 | 0,876 | 0,959 | 0,691 | -0,372 | -0,595 | 0,770 | -0,141 | 0,696 | 0,965 | -0,156 | 0,964 | 0,882 | 0,525 | 0,609 | 0,851 | 0,775 | -0,165 | -0,308 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| As | 0,064 | -0,332 | -0,028 | 0,180 | 0,638 | 0,045 | -0,217 | -0,378 | 0,603 | 0,110 | 0,300 | 0,123 | -0,018 | 0,485 | -0,634 | -0,404 | 0,282 | -0,168 | -0,041 | -0,017 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rb | 0,920 | 0,815 | 0,889 | 0,849 | -0,284 | -0,479 | 0,919 | -0,079 | 0,654 | 0,870 | -0,173 | 0,884 | 0,785 | 0,534 | 0,588 | 0,813 | 0,805 | -0,068 | -0,217 | 0,919 | -0,010 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sr | 0,070 | -0,238 | -0,041 | 0,054 | 0,422 | -0,144 | -0,166 | -0,352 | 0,505 | 0,066 | 0,016 | 0,127 | -0,073 | 0,230 | -0,431 | -0,285 | 0,108 | -0,255 | -0,177 | 0,017 | 0,733 | 0,016 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Y | 0,894 | 0,815 | 0,864 | 0,640 | -0,350 | -0,545 | 0,633 | -0,125 | 0,660 | 0,909 | -0,020 | 0,936 | 0,924 | 0,717 | 0,459 | 0,687 | 0,790 | -0,264 | -0,341 | 0,911 | 0,032 | 0,833 | -0,044 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zr | 0,344 | 0,065 | 0,206 | 0,260 | 0,365 | -0,128 | -0,058 | -0,619 | 0,815 | 0,378 | 0,086 | 0,499 | 0,273 | 0,652 | -0,517 | -0,200 | 0,323 | -0,390 | -0,368 | 0,286 | 0,736 | 0,255 | 0,619 | 0,401 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nb | 0,060 | 0,343 | 0,150 | 0,100 | -0,334 | 0,249 | 0,334 | 0,372 | -0,265 | -0,001 | 0,103 | -0,010 | 0,010 | -0,394 | 0,552 | 0,368 | -0,129 | 0,159 | 0,042 | 0,119 | -0,509 | 0,144 | -0,405 | 0,018 | -0,536 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mo | -0,061 | -0,302 | -0,126 | 0,194 | 0,623 | 0,307 | -0,178 | -0,315 | 0,448 | -0,017 | 0,362 | 0,084 | -0,099 | 0,439 | -0,623 | -0,434 | 0,126 | -0,078 | -0,012 | -0,108 | 0,748 | 0,002 | 0,594 | 0,037 | 0,744 | -0,326 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Ag | 0,008 | 0,113 | 0,062 | -0,093 | -0,340 | -0,200 | 0,033 | 0,407 | -0,247 | -0,055 | -0,054 | -0,005 | 0,077 | -0,056 | 0,325 | 0,209 | 0,066 | 0,184 | 0,119 | 0,067 | -0,209 | 0,012 | -0,026 | 0,098 | -0,306 | 0,050 | -0,279 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | |
| Sn | -0,451 | -0,552 | -0,249 | -0,331 | 0,142 | 0,280 | -0,287 | 0,648 | -0,445 | -0,438 | 0,540 | -0,504 | -0,454 | -0,121 | -0,022 | -0,242 | -0,085 | 0,750 | 0,871 | -0,418 | -0,023 | -0,390 | -0,185 | -0,424 | -0,399 | 0,082 | -0,041 | 0,248 | 1,000 | | | | | | | | | | | | |
| Sb | -0,541 | -0,585 | -0,527 | -0,487 | 0,111 | 0,491 | -0,405 | 0,293 | -0,473 | -0,555 | 0,437 | -0,577 | -0,627 | -0,450 | -0,207 | -0,329 | -0,393 | 0,434 | 0,605 | -0,523 | -0,105 | -0,472 | -0,205 | -0,529 | -0,352 | 0,018 | 0,049 | 0,104 | 0,613 | 1,000 | | | | | | | | | | | |
| Cs | 0,802 | 0,547 | 0,700 | 0,677 | -0,018 | -0,422 | 0,518 | -0,332 | 0,905 | 0,820 | 0,107 | 0,875 | 0,710 | 0,801 | 0,065 | 0,389 | 0,766 | -0,328 | -0,320 | 0,775 | 0,446 | 0,787 | 0,309 | 0,850 | 0,749 | -0,216 | 0,446 | -0,157 | -0,439 | -0,455 | 1,000 | | | | | | | | | | |
| Ba | 0,438 | 0,547 | 0,560 | 0,327 | -0,488 | -0,476 | 0,552 | 0,498 | -0,137 | 0,418 | -0,125 | 0,309 | 0,532 | 0,099 | 0,863 | 0,739 | 0,441 | 0,259 | 0,194 | 0,502 | -0,559 | 0,455 | -0,567 | 0,439 | -0,521 | 0,378 | -0,694 | 0,383 | 0,130 | -0,138 | 0,035 | 1,000 | | | | | | | | | |
| Cd | -0,278 | -0,266 | -0,176 | 0,052 | 0,553 | 0,564 | -0,136 | -0,053 | -0,131 | -0,262 | 0,015 | -0,233 | -0,231 | 0,059 | -0,250 | -0,174 | -0,119 | 0,551 | 0,379 | -0,280 | 0,197 | -0,172 | 0,001 | -0,242 | 0,157 | -0,017 | 0,506 | -0,242 | 0,213 | 0,284 | -0,081 | -0,312 | 1,000 | | | | | | | | |
| Tl | 0,885 | 0,707 | 0,800 | 0,815 | -0,117 | -0,473 | 0,741 | -0,333 | 0,828 | 0,871 | -0,113 | 0,912 | 0,785 | 0,702 | 0,275 | 0,578 | 0,791 | -0,291 | -0,386 | 0,855 | 0,258 | 0,918 | 0,183 | 0,855 | 0,575 | -0,092 | 0,265 | -0,173 | -0,531 | -0,550 | 0,934 | 0,180 | -0,134 | 1,000 | | | | | | | |
| Pb | -0,298 | -0,470 | -0,148 | -0,333 | -0,015 | 0,146 | -0,154 | 0,408 | -0,352 | -0,298 | 0,276 | -0,380 | -0,402 | -0,136 | 0,059 | -0,093 | -0,027 | 0,739 | 0,862 | -0,283 | -0,108 | -0,243 | -0,149 | -0,351 | -0,349 | -0,112 | -0,062 | 0,108 | 0,794 | 0,675 | -0,345 | 0,091 | 0,285 | -0,384 | 1,000 | | | | | | |
| Th | 0,708 | 0,806 | 0,684 | 0,299 | -0,521 | -0,493 | 0,392 | -0,143 | 0,480 | 0,681 | -0,251 | 0,781 | 0,789 | 0,439 | 0,450 | 0,565 | 0,383 | -0,375 | -0,527 | 0,747 | -0,199 | 0,576 | -0,084 | 0,829 | 0,309 | 0,124 | -0,154 | 0,150 | -0,537 | -0,586 | 0,586 | 0,342 | -0,327 | 0,591 | -0,449 | 1,000 | | | | | |
| U | 0,498 | 0,381 | 0,471 | 0,369 | 0,014 | -0,274 | 0,185 | -0,043 | 0,653 | 0,503 | 0,160 | 0,633 | 0,562 | 0,706 | 0,026 | 0,181 | 0,461 | -0,212 | -0,179 | 0,526 | 0,315 | 0,473 | 0,316 | 0,695 | 0,664 | -0,141 | 0,449 | 0,027 | -0,262 | -0,377 | 0,771 | -0,005 | 0,034 | 0,589 | -0,272 | 0,671 | 1,000 | | | | |
| Hg | -0,162 | -0,310 | -0,064 | -0,257 | -0,161 | -0,178 | -0,209 | 0,076 | -0,111 | -0,138 | -0,062 | -0,163 | -0,168 | 0,077 | -0,087 | -0,134 | -0,021 | 0,430 | 0,388 | -0,158 | -0,002 | -0,176 | -0,055 | -0,146 | -0,073 | -0,388 | -0,009 | 0,124 | 0,415 | 0,175 | -0,118 | -0,018 | 0,125 | -0,172 | 0,622 | -0,105 | -0,014 | 1,000 | | | |

As correlações com $\rho > 0,710$ encontram-se a negrito.

Tabela 10 - Matriz de correlação dos teores dos solos, da região de Lubango.

| | Al | Ti | Fe | Mg | Ca | Na | K | P | S | Li | Be | Bi | Sc | V | Cr | Mn | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | Sn | Cs | Ba | Hf | Tl | Pb | Th | U | Hg | | | |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|-------|--------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|--------------|--------|-------|--|--|--|
| Al | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ti | -0,002 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe | 0,804 | -0,061 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mg | 0,510 | 0,404 | 0,656 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | -0,085 | 0,511 | -0,042 | 0,519 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na | 0,373 | 0,411 | 0,550 | 0,880 | 0,691 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | 0,251 | -0,425 | 0,599 | 0,232 | -0,141 | 0,381 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | 0,124 | 0,592 | 0,075 | 0,680 | 0,873 | 0,736 | -0,189 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S | 0,013 | 0,680 | 0,309 | 0,654 | 0,929 | 0,906 | 0,630 | 0,836 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | 0,847 | -0,100 | 0,653 | 0,371 | -0,389 | 0,249 | 0,364 | -0,110 | -0,244 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Be | 0,756 | -0,214 | 0,739 | 0,387 | -0,300 | 0,390 | 0,704 | -0,126 | -0,088 | 0,910 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bi | 0,682 | -0,185 | 0,287 | -0,171 | -0,198 | -0,139 | 0,008 | -0,085 | -0,229 | 0,509 | 0,417 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sc | 0,898 | -0,102 | 0,900 | 0,567 | -0,278 | 0,384 | 0,501 | -0,057 | -0,098 | 0,899 | 0,880 | 0,396 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V | 0,343 | 0,711 | 0,305 | 0,806 | 0,727 | 0,818 | -0,123 | 0,918 | 0,823 | 0,150 | 0,092 | -0,039 | 0,210 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0,299 | -0,112 | 0,438 | 0,289 | -0,032 | 0,525 | 0,827 | 0,030 | 0,521 | 0,536 | 0,791 | 0,084 | 0,469 | 0,153 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mn | 0,676 | -0,396 | 0,793 | 0,130 | -0,307 | 0,097 | 0,626 | -0,280 | -0,130 | 0,517 | 0,654 | 0,593 | 0,707 | -0,170 | 0,343 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Co | 0,436 | -0,316 | 0,833 | 0,402 | -0,206 | 0,266 | 0,705 | -0,231 | 0,151 | 0,334 | 0,522 | -0,001 | 0,674 | -0,104 | 0,298 | 0,787 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ni | 0,625 | -0,048 | 0,800 | 0,614 | -0,278 | 0,475 | 0,605 | -0,092 | 0,018 | 0,796 | 0,840 | -0,016 | 0,886 | 0,197 | 0,613 | 0,472 | 0,663 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cu | -0,117 | 0,253 | 0,051 | 0,311 | 0,485 | 0,376 | -0,056 | 0,491 | 0,414 | -0,339 | -0,298 | -0,274 | -0,179 | 0,522 | -0,046 | -0,253 | -0,083 | -0,128 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zn | 0,405 | 0,125 | 0,532 | 0,735 | 0,705 | 0,803 | 0,239 | 0,672 | 0,906 | 0,076 | 0,169 | 0,019 | 0,295 | 0,676 | 0,181 | 0,195 | 0,302 | 0,228 | 0,550 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ga | 0,812 | 0,030 | 0,417 | 0,034 | -0,567 | -0,077 | 0,046 | -0,331 | -0,349 | 0,952 | 0,758 | 0,606 | 0,783 | -0,078 | 0,271 | 0,422 | 0,106 | 0,569 | -0,645 | -0,336 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rb | 0,487 | -0,598 | 0,501 | -0,004 | -0,572 | -0,026 | 0,758 | -0,473 | -0,721 | 0,708 | 0,845 | 0,363 | 0,673 | -0,367 | 0,666 | 0,660 | 0,536 | 0,630 | -0,428 | -0,106 | 0,579 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sr | -0,099 | 0,490 | 0,011 | 0,562 | 0,964 | 0,726 | -0,063 | 0,900 | 0,896 | -0,366 | -0,255 | -0,229 | -0,244 | 0,739 | 0,025 | -0,243 | -0,127 | -0,218 | 0,420 | 0,684 | -0,528 | -0,530 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Y | 0,904 | 0,000 | 0,666 | 0,331 | -0,071 | 0,299 | 0,337 | 0,036 | -0,024 | 0,787 | 0,780 | 0,755 | 0,785 | 0,200 | 0,420 | 0,690 | 0,360 | 0,502 | -0,309 | 0,229 | 0,845 | 0,572 | -0,109 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zr | 0,776 | 0,163 | 0,558 | 0,319 | -0,200 | 0,334 | 0,242 | 0,096 | -0,017 | 0,861 | 0,784 | 0,623 | 0,718 | 0,340 | 0,545 | 0,463 | 0,125 | 0,586 | -0,225 | 0,066 | 0,828 | 0,451 | -0,145 | 0,759 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nb | 0,271 | 0,697 | 0,352 | 0,755 | 0,804 | 0,756 | -0,186 | 0,797 | 0,889 | -0,014 | -0,027 | -0,110 | 0,151 | 0,809 | -0,070 | -0,142 | 0,124 | 0,111 | 0,172 | 0,613 | -0,044 | -0,441 | 0,780 | 0,256 | 0,109 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Mo | -0,046 | 0,414 | 0,048 | 0,468 | 0,603 | 0,433 | -0,330 | 0,762 | 0,372 | -0,340 | -0,429 | -0,238 | -0,171 | 0,765 | -0,385 | -0,418 | -0,192 | -0,214 | 0,883 | 0,743 | -0,742 | -0,538 | 0,598 | -0,338 | -0,346 | 0,342 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | |
| Ag | 0,469 | 0,284 | 0,143 | 0,124 | 0,292 | 0,250 | -0,033 | 0,366 | 0,168 | 0,289 | 0,283 | 0,664 | 0,190 | 0,383 | 0,239 | 0,217 | -0,217 | -0,081 | 0,024 | 0,115 | 0,387 | 0,038 | 0,231 | 0,659 | 0,571 | 0,408 | -0,098 | 1,000 | | | | | | | | | | | | |
| Sn | -0,077 | 0,336 | 0,028 | 0,571 | 0,840 | 0,651 | -0,051 | 0,911 | 0,702 | -0,310 | -0,238 | -0,220 | -0,192 | 0,727 | -0,005 | -0,222 | -0,099 | -0,186 | 0,484 | 0,685 | -0,589 | -0,435 | 0,923 | -0,185 | -0,148 | 0,594 | 0,732 | 0,107 | 1,000 | | | | | | | | | | | |
| Cs | 0,704 | -0,399 | 0,663 | 0,132 | -0,485 | 0,131 | 0,712 | -0,353 | -0,393 | 0,852 | 0,951 | 0,532 | 0,817 | -0,164 | 0,710 | 0,752 | 0,538 | 0,716 | -0,379 | 0,004 | 0,759 | 0,938 | -0,455 | 0,773 | 0,698 | -0,260 | -0,525 | 0,260 | -0,420 | 1,000 | | | | | | | | | | |
| Ba | -0,100 | 0,368 | 0,239 | 0,371 | 0,692 | 0,653 | 0,362 | 0,435 | 0,928 | -0,323 | -0,027 | -0,226 | -0,105 | 0,404 | 0,319 | 0,108 | 0,242 | -0,008 | 0,341 | 0,501 | -0,440 | -0,256 | 0,695 | 0,033 | -0,088 | 0,630 | 0,181 | 0,250 | 0,457 | -0,145 | 1,000 | | | | | | | | | |
| Hf | 0,778 | 0,080 | 0,530 | 0,216 | -0,276 | 0,235 | 0,257 | 0,007 | -0,114 | 0,867 | 0,794 | 0,699 | 0,709 | 0,238 | 0,538 | 0,512 | 0,122 | 0,544 | -0,280 | 0,001 | 0,857 | 0,517 | -0,230 | 0,789 | 0,991 | 0,011 | -0,399 | 0,585 | -0,227 | 0,747 | -0,145 | 1,000 | | | | | | | | |
| Tl | 0,449 | -0,506 | 0,546 | -0,019 | -0,396 | 0,097 | 0,867 | -0,413 | -0,363 | 0,580 | 0,823 | 0,407 | 0,596 | -0,325 | 0,757 | 0,764 | 0,587 | 0,543 | -0,380 | -0,020 | 0,443 | 0,921 | -0,356 | 0,620 | 0,455 | -0,334 | -0,626 | 0,193 | -0,368 | 0,914 | 0,088 | 0,519 | 1,000 | | | | | | | |
| Pb | 0,600 | -0,195 | 0,503 | 0,345 | 0,338 | 0,570 | 0,527 | 0,336 | 0,563 | 0,448 | 0,606 | 0,560 | 0,443 | 0,328 | 0,600 | 0,514 | 0,218 | 0,258 | 0,061 | 0,649 | 0,201 | 0,444 | 0,330 | 0,651 | 0,481 | 0,195 | 0,013 | 0,483 | 0,315 | 0,558 | 0,315 | 0,495 | 0,568 | 1,000 | | | | | | |
| Th | 0,739 | -0,334 | 0,695 | 0,057 | -0,297 | 0,040 | 0,512 | -0,248 | -0,187 | 0,585 | 0,671 | 0,760 | 0,687 | -0,153 | 0,324 | 0,957 | 0,617 | 0,383 | -0,366 | 0,135 | 0,555 | 0,672 | -0,258 | 0,806 | 0,547 | -0,126 | -0,434 | 0,358 | -0,251 | 0,782 | 0,010 | 0,613 | 0,760 | 0,586 | 1,000 | | | | | |
| U | 0,828 | -0,305 | 0,770 | 0,237 | -0,369 | 0,243 | 0,622 | -0,252 | -0,108 | 0,878 | 0,938 | 0,618 | 0,872 | -0,036 | 0,626 | 0,808 | 0,560 | 0,726 | -0,355 | 0,167 | 0,797 | 0,812 | -0,342 | 0,842 | 0,776 | -0,106 | -0,497 | 0,298 | -0,346 | 0,951 | -0,064 | 0,809 | 0,826 | 0,638 | 0,838 | 1,000 | | | | |
| Hg | -0,018 | -0,235 | -0,174 | -0,539 | -0,223 | -0,613 | -0,271 | -0,423 | -0,460 | -0,258 | -0,297 | 0,407 | -0,188 | -0,509 | -0,508 | 0,240 | -0,001 | -0,469 | -0,196 | -0,365 | 0,064 | -0,077 | -0,335 | 0,155 | -0,230 | -0,113 | -0,256 | 0,311 | -0,442 | -0,074 | -0,090 | -0,146 | 0,012 | -0,211 | 0,283 | -0,081 | 1,000 | | | |

As correlações com $\rho > 0,710$ encontram-se a negrito.

Avaliação da perigosidade do solo urbano em cidades de rápida expansão, sem planejamento urbano e com sistemas sanitários deficientes

Tabela 11 - Matriz de correlação dos teores dos solos, da região de Humpata.

| | Al | Ti | Fe | Mg | Ca | Na | K | P | S | Li | Be | Bi | Sc | V | Cr | Mn | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | As | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | Sn | Sb | Cs | Ba | Cd | Hf | Tl | Pb | Th | U | Hg | | | | | | | | |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|--------|-------|-------|----|----|---|----|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Al | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ti | 0,733 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe | 0,375 | 0,321 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mg | 0,756 | 0,290 | 0,538 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ca | 0,407 | 0,611 | 0,215 | 0,218 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na | -0,173 | -0,254 | 0,105 | 0,234 | 0,468 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | 0,282 | -0,250 | 0,491 | 0,806 | -0,223 | 0,342 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P | 0,165 | 0,375 | 0,275 | 0,245 | 0,888 | 0,669 | -0,015 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S | 0,137 | 0,256 | 0,094 | 0,353 | 0,310 | 0,092 | 0,162 | 0,631 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li | 0,698 | 0,222 | 0,495 | 0,898 | -0,135 | -0,056 | 0,805 | -0,152 | 0,110 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Be | 0,513 | 0,235 | 0,878 | 0,783 | -0,010 | 0,086 | 0,782 | 0,077 | 0,144 | 0,819 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bi | 0,196 | 0,599 | -0,169 | -0,237 | 0,544 | -0,175 | -0,651 | 0,318 | 0,103 | -0,376 | -0,356 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sc | 0,910 | 0,720 | 0,647 | 0,790 | 0,279 | -0,207 | 0,420 | 0,117 | 0,144 | 0,800 | 0,755 | 0,096 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V | 0,384 | 0,627 | 0,806 | 0,262 | 0,616 | 0,066 | -0,009 | 0,548 | 0,153 | 0,103 | 0,501 | 0,347 | 0,563 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0,323 | 0,505 | 0,810 | 0,170 | 0,248 | -0,203 | 0,019 | 0,153 | -0,083 | 0,152 | 0,561 | 0,289 | 0,552 | 0,874 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mn | 0,460 | 0,588 | 0,073 | 0,239 | 0,953 | 0,459 | -0,228 | 0,774 | 0,100 | -0,090 | -0,094 | 0,551 | 0,285 | 0,471 | 0,139 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Co | 0,513 | 0,259 | 0,368 | 0,750 | 0,557 | 0,713 | 0,551 | 0,596 | 0,124 | 0,508 | 0,490 | -0,080 | 0,472 | 0,258 | 0,048 | 0,617 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ni | 0,737 | 0,831 | 0,193 | 0,301 | 0,758 | 0,037 | -0,225 | 0,459 | 0,041 | 0,143 | 0,127 | 0,622 | 0,572 | 0,509 | 0,362 | 0,767 | 0,437 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cu | 0,555 | 0,776 | 0,137 | 0,144 | 0,888 | 0,159 | -0,369 | 0,631 | 0,115 | -0,093 | -0,035 | 0,733 | 0,392 | 0,571 | 0,344 | 0,867 | 0,388 | 0,951 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zn | 0,513 | 0,717 | 0,008 | 0,091 | 0,857 | 0,058 | -0,459 | 0,570 | 0,067 | -0,139 | -0,206 | 0,660 | 0,338 | 0,495 | 0,194 | 0,895 | 0,287 | 0,775 | 0,865 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ga | 0,966 | 0,725 | 0,245 | 0,631 | 0,241 | -0,381 | 0,169 | -0,049 | 0,026 | 0,658 | 0,412 | 0,244 | 0,868 | 0,260 | 0,294 | 0,326 | 0,333 | 0,690 | 0,479 | 0,447 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| As | 0,472 | 0,672 | 0,779 | 0,266 | 0,591 | 0,005 | -0,013 | 0,481 | 0,116 | 0,129 | 0,514 | 0,345 | 0,599 | 0,959 | 0,885 | 0,443 | 0,241 | 0,623 | 0,635 | 0,464 | 0,369 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rb | 0,533 | 0,000 | 0,417 | 0,870 | -0,270 | 0,032 | 0,909 | -0,179 | 0,298 | 0,960 | 0,787 | -0,524 | 0,633 | -0,059 | 0,010 | -0,242 | 0,476 | -0,055 | -0,279 | -0,351 | 0,486 | -0,029 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sr | 0,279 | 0,441 | 0,207 | 0,245 | 0,967 | 0,654 | -0,102 | 0,946 | 0,347 | -0,138 | 0,000 | 0,388 | 0,170 | 0,536 | 0,133 | 0,924 | 0,649 | 0,601 | 0,755 | 0,749 | 0,079 | 0,475 | -0,226 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Y | 0,704 | 0,291 | 0,401 | 0,874 | -0,106 | -0,089 | 0,728 | -0,112 | 0,335 | 0,934 | 0,744 | -0,134 | 0,784 | 0,078 | 0,174 | -0,051 | 0,501 | 0,211 | -0,010 | -0,125 | 0,692 | 0,112 | 0,907 | -0,131 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zr | 0,383 | 0,147 | 0,036 | 0,417 | -0,324 | -0,270 | 0,448 | -0,334 | -0,003 | 0,562 | 0,331 | -0,240 | 0,450 | -0,127 | 0,007 | -0,229 | 0,072 | -0,043 | -0,219 | -0,215 | 0,453 | -0,045 | 0,576 | -0,355 | 0,572 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nb | 0,098 | 0,311 | 0,672 | 0,029 | 0,236 | -0,167 | -0,031 | 0,272 | 0,188 | -0,073 | 0,346 | 0,085 | 0,303 | 0,795 | 0,796 | 0,083 | -0,127 | 0,069 | 0,144 | 0,179 | 0,034 | 0,760 | -0,138 | 0,181 | -0,118 | 0,052 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mo | 0,486 | 0,513 | 0,753 | 0,414 | 0,618 | 0,082 | 0,082 | 0,526 | 0,077 | 0,167 | 0,496 | 0,369 | 0,582 | 0,951 | 0,849 | 0,514 | 0,303 | 0,490 | 0,556 | 0,512 | 0,355 | 0,906 | 0,000 | 0,542 | 0,183 | -0,113 | 0,808 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ag | -0,160 | 0,263 | -0,225 | -0,403 | -0,057 | -0,278 | -0,451 | -0,044 | 0,366 | -0,243 | -0,271 | -0,055 | -0,141 | -0,122 | -0,221 | -0,109 | -0,303 | -0,027 | -0,030 | 0,060 | -0,095 | -0,121 | -0,290 | -0,083 | -0,338 | -0,082 | -0,091 | -0,499 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sn | 0,655 | 0,861 | 0,159 | 0,182 | 0,545 | -0,386 | -0,310 | 0,305 | 0,328 | 0,100 | 0,057 | 0,589 | 0,584 | 0,543 | 0,389 | 0,490 | -0,011 | 0,724 | 0,710 | 0,717 | 0,659 | 0,610 | -0,083 | 0,353 | 0,150 | 0,254 | 0,400 | 0,490 | 0,158 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sb | -0,434 | -0,309 | -0,479 | 0,045 | -0,085 | 0,218 | 0,091 | 0,494 | 0,811 | -0,612 | -0,412 | -0,261 | -0,795 | -0,774 | -0,823 | -0,185 | -0,433 | -0,482 | -0,385 | -0,088 | -0,484 | -0,775 | 0,154 | 0,130 | -0,336 | -0,073 | -0,218 | -0,912 | 0,911 | 0,000 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cs | 0,838 | 0,416 | 0,332 | 0,837 | -0,040 | -0,212 | 0,601 | -0,163 | 0,154 | 0,945 | 0,662 | -0,190 | 0,848 | 0,069 | 0,093 | 0,027 | 0,438 | 0,344 | 0,093 | 0,061 | 0,834 | 0,136 | 0,858 | -0,104 | 0,903 | 0,595 | -0,143 | 0,112 | -0,115 | 0,333 | -0,312 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ba | 0,063 | -0,007 | 0,491 | 0,478 | 0,539 | 0,825 | 0,502 | 0,798 | 0,463 | 0,178 | 0,436 | -0,249 | 0,127 | 0,401 | 0,076 | 0,403 | 0,699 | 0,104 | 0,199 | 0,093 | -0,190 | 0,337 | 0,244 | 0,687 | 0,101 | -0,184 | 0,199 | 0,356 | -0,178 | -0,091 | 0,445 | 0,015 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cd | 0,518 | 0,654 | 0,911 | 0,229 | 0,520 | -0,398 | -0,182 | 0,607 | 0,577 | 0,374 | 0,667 | 0,502 | 0,700 | 0,897 | 0,862 | -0,062 | -0,320 | 0,541 | 0,554 | 0,121 | 0,445 | 0,907 | 0,044 | 0,162 | 0,587 | 0,562 | 0,652 | 0,764 | 0,381 | 0,688 | -0,240 | 0,637 | 0,088 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Hf | 0,319 | 0,065 | 0,150 | 0,436 | -0,289 | -0,328 | 0,562 | -0,285 | -0,222 | 0,517 | 0,401 | -0,300 | 0,414 | -0,087 | 0,102 | -0,193 | 0,221 | -0,092 | -0,239 | -0,238 | 0,380 | -0,005 | 0,553 | -0,312 | 0,522 | 0,995 | 0,214 | -0,028 | -0,227 | 0,197 | 0,240 | 0,515 | -0,093 | -1,000 | 1,000 | | | | | | | | | | | | | |
| Tl | 0,824 | 0,446 | 0,386 | 0,929 | 0,185 | 0,085 | 0,658 | 0,138 | 0,308 | 0,914 | 0,680 | -0,186 | 0,834 | 0,155 | 0,060 | 0,253 | 0,700 | 0,381 | 0,184 | 0,173 | 0,751 | 0,171 | 0,837 | 0,182 | 0,877 | 0,499 | -0,125 | 0,185 | -0,115 | 0,279 | 0,098 | 0,930 | 0,295 | 0,192 | 0,460 | 1,000 | | | | | | | | | | | | |
| Pb | 0,180 | 0,426 | 0,323 | 0,192 | 0,590 | 0,154 | -0,042 | 0,746 | 0,897 | -0,069 | 0,153 | 0,246 | 0,202 | 0,539 | 0,207 | 0,360 | 0,138 | 0,287 | 0,417 | 0,381 | 0,030 | 0,496 | -0,075 | 0,575 | -0,039 | -0,195 | 0,453 | 0,436 | 0,180 | 0,533 | 0,713 | - | | | | | | | | | | | | | | | | |

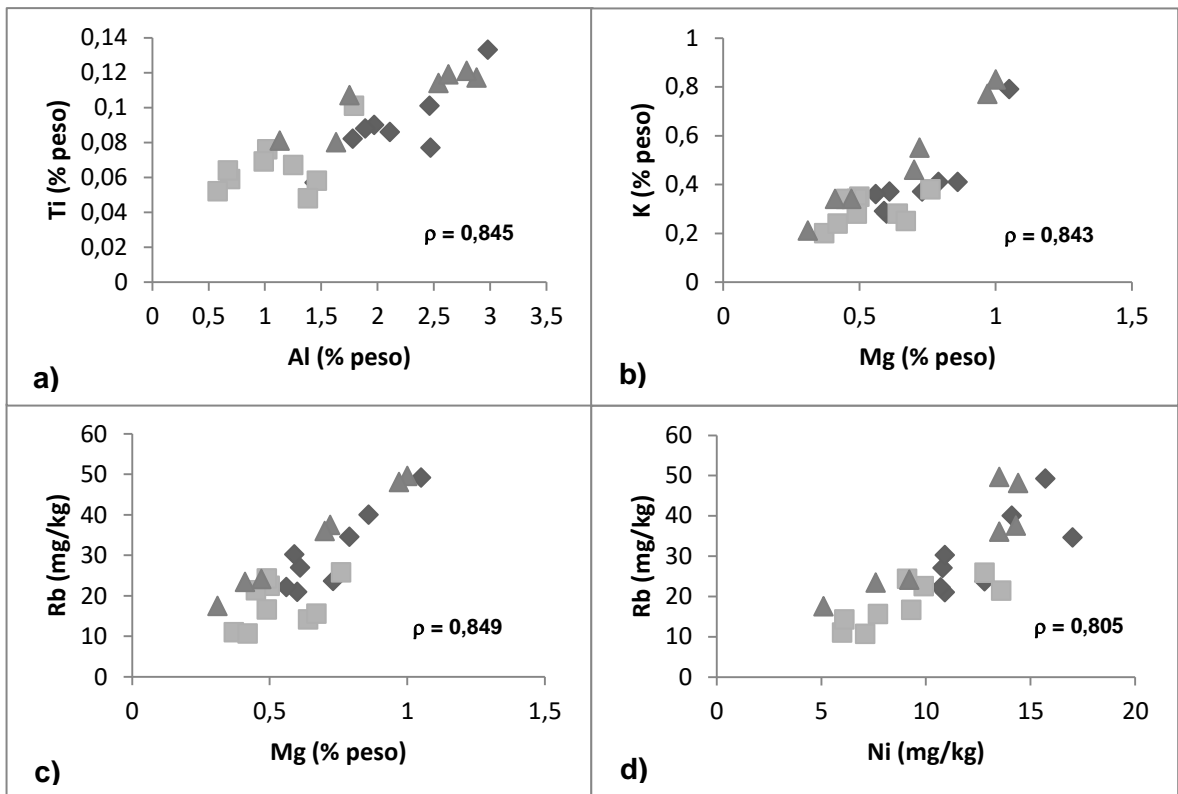


Figura 11 - Variação de Ti versus Al (a), K versus Mg (b), Rb versus Mg (c) e Rb versus Ni (d) nos solos da região de Benguela. Legenda: ◆ Natural; ■ Urbano; ▲ Agrícola

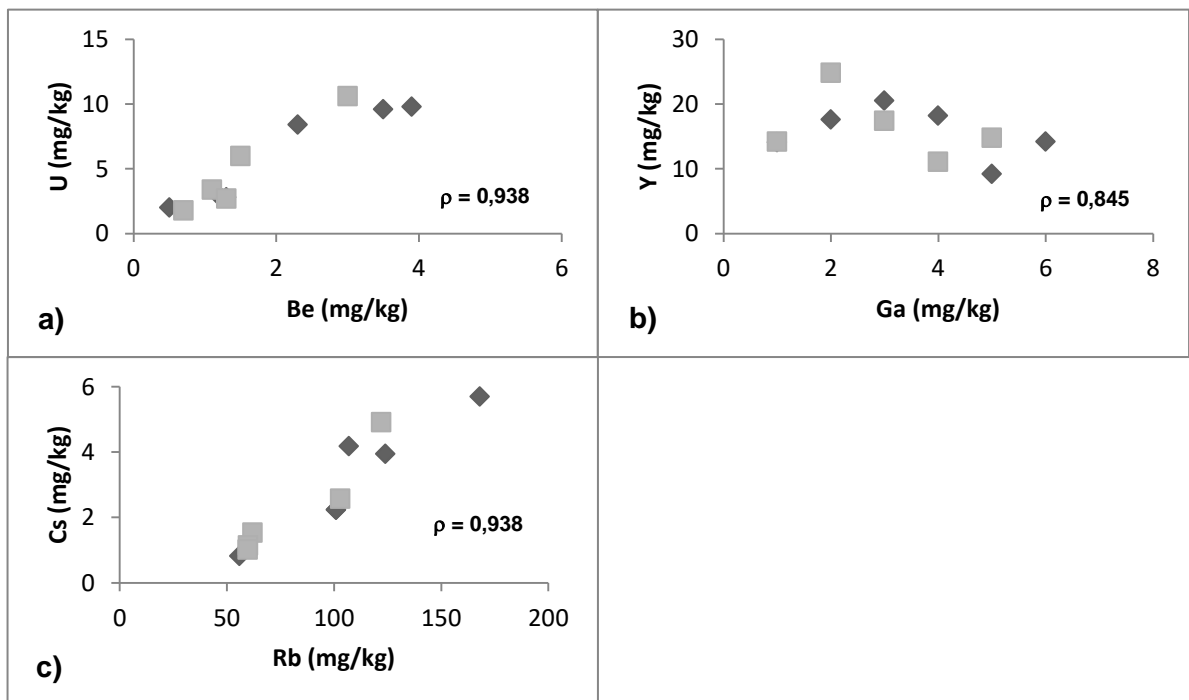


Figura 12 - Variação de U versus Be (a), Y versus Ga (b) e Cs versus Rb (c) nos solos da região de Lubango. Legenda: ◆ Natural; ■ Urbano

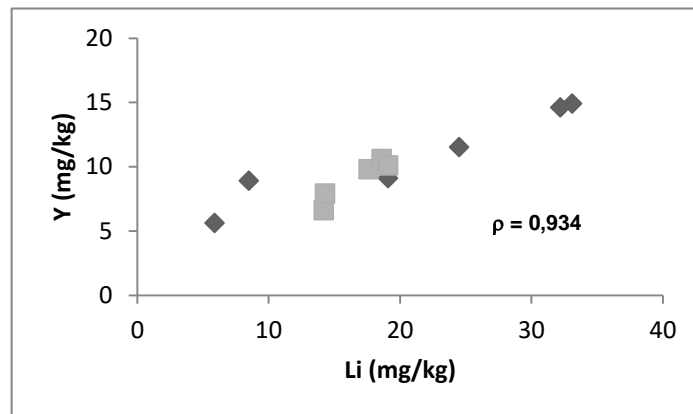


Figura 13 - Variação de Y versus Li nos solos da região de Humpata. Legenda:
◆ Natural; ■ Urbano.

Na figura 11 encontram-se os diagramas de variação entre elementos analisados nos solos para a região de Benguela. Os elementos que apresentam o mesmo comportamento geoquímico, o Al e o Ti (figura 11a) são elementos refratários e nos solos formam óxidos de Al e Ti. No que diz respeito à figura 11b, c e d, o comportamento dos elementos pode ser um reflexo da granulometria, pois os solos urbanos que são os mais grosseiros (Vodyanitskii, 2015), são os mais empobrecidos em todos estes elementos. Quando o K diminui, o Mg também diminui, da mesma forma que diminui o Rb e o Ni. A quantidade destes elementos diminui, porque o silício (Si) aumenta em solos arenosos e provoca um efeito de diluição nos outros elementos.

Na figura 12 encontram-se os gráficos selecionados para a região de Lubango. O Be e o U (figura 12a), são elementos que nas/os rochas/solos são incompatíveis e têm um comportamento geoquímico semelhante e normalmente quando um aumenta (dependendo da acidez da rocha), o outro também aumenta. Na figura 12b, o Y e o Ga têm o mesmo comportamento geoquímico e na figura 12c, o Rb e o Cs têm um coeficiente de correlação elevado ($\rho = 0,938$), o que se deve ao facto de estes elementos serem incompatíveis nas rochas e se substituírem mutuamente na malha dos feldspatos e acabando por ter o mesmo comportamento nos solos.

Na figura 13 encontra-se o gráfico selecionado para a região de Humpata, que correlaciona o Li com o Y. Estes elementos também são incompatíveis e apresentam o mesmo comportamento geoquímico. Todos os elementos (Al, Be, Cs, Ga, K, Li, Mg, Ni, Rb, Ti, U e o Y) apresentados nas figuras 11, 12 e 13, são assim considerados geogénicos. Alguns dos elementos considerados geogénicos neste estudo, também

foram obtidos por outros autores nomeadamente o Al em Jafari *et al.* (2018) e o Ni em Xia *et al.* (2011), Yuan *et al.* (2014) e Argyraki *et al.* (2018).

Nas figuras 14, 15 e 16 são apresentados os gráficos de dispersão selecionados para os solos das três regiões e nos quais são apresentados os valores do coeficiente de correlação (ρ) para os elementos de origem antropogénica.

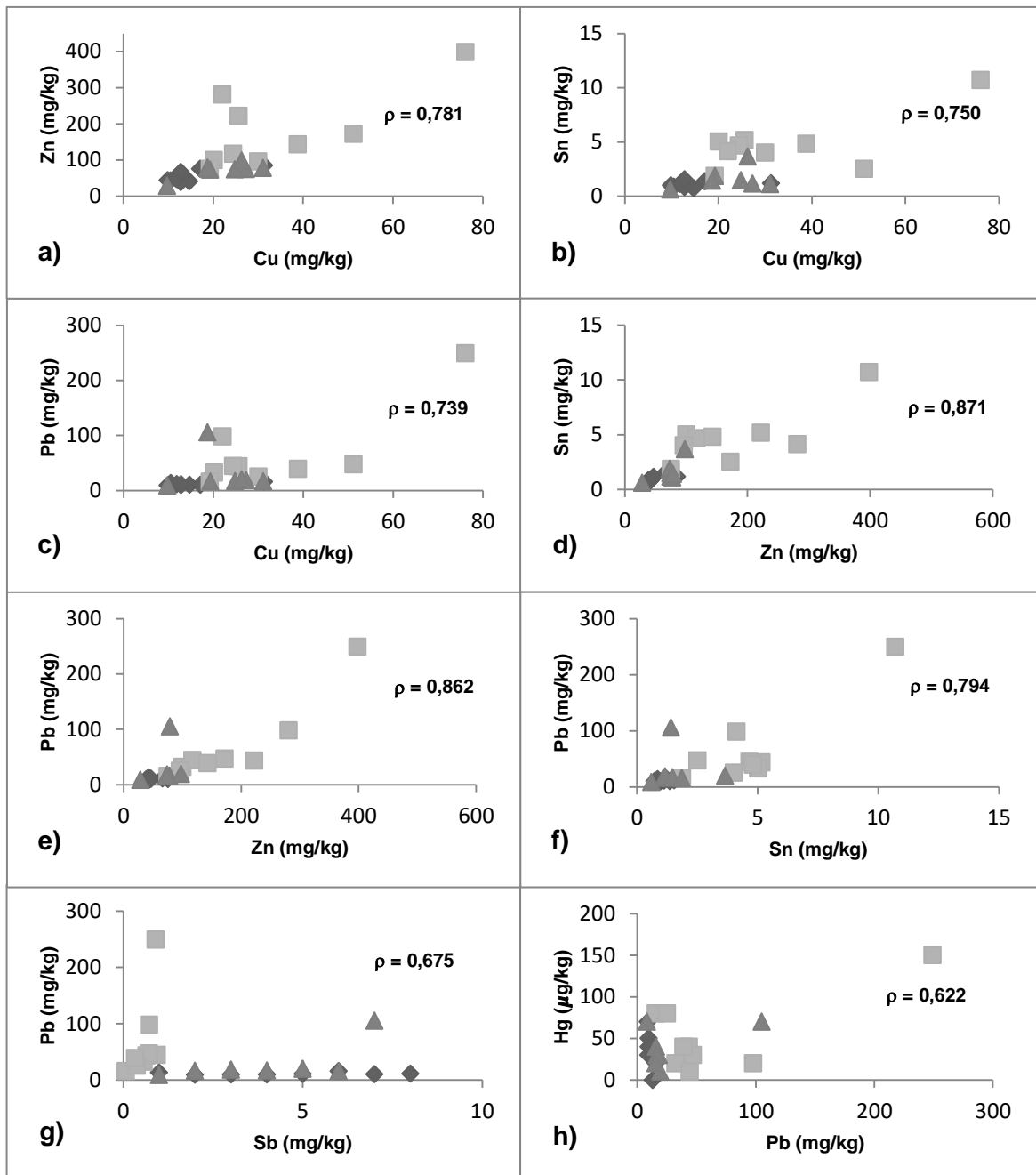


Figura 14 - Variação de Zn versus Cu (a), Sn versus Cu (b), Pb versus Cu (c), Sn versus Zn (d), Pb versus Zn (e), Pb versus Sn (f), Pb versus Sb (g) e Hg versus Pb (h) nos solos da região de Benguela. Legenda: ◆ Natural; ■ Urbano; ▲ Agrícola

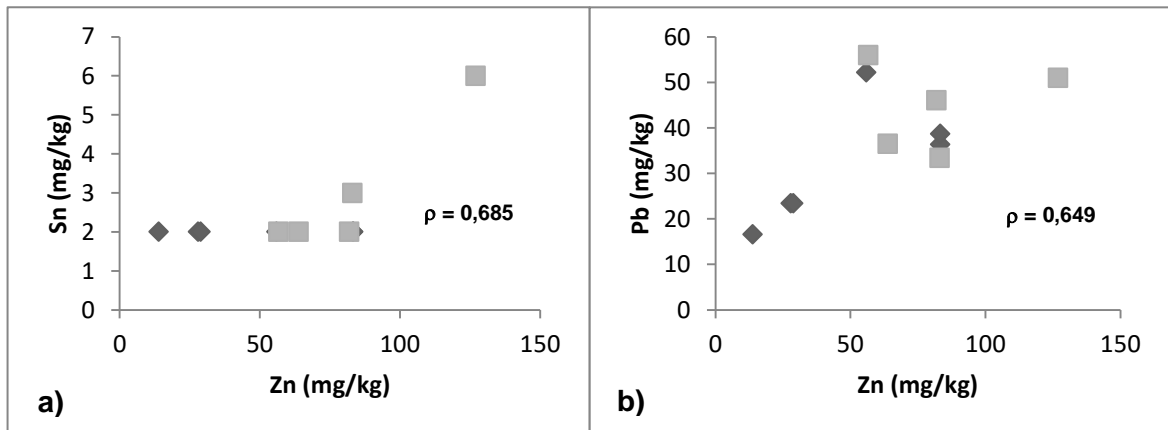


Figura 15 - Variação de Sn versus Zn (a) e Pb versus Zn (b) nos solos da região de Lubango. Legenda: ◆ Natural; ■ Urbano;

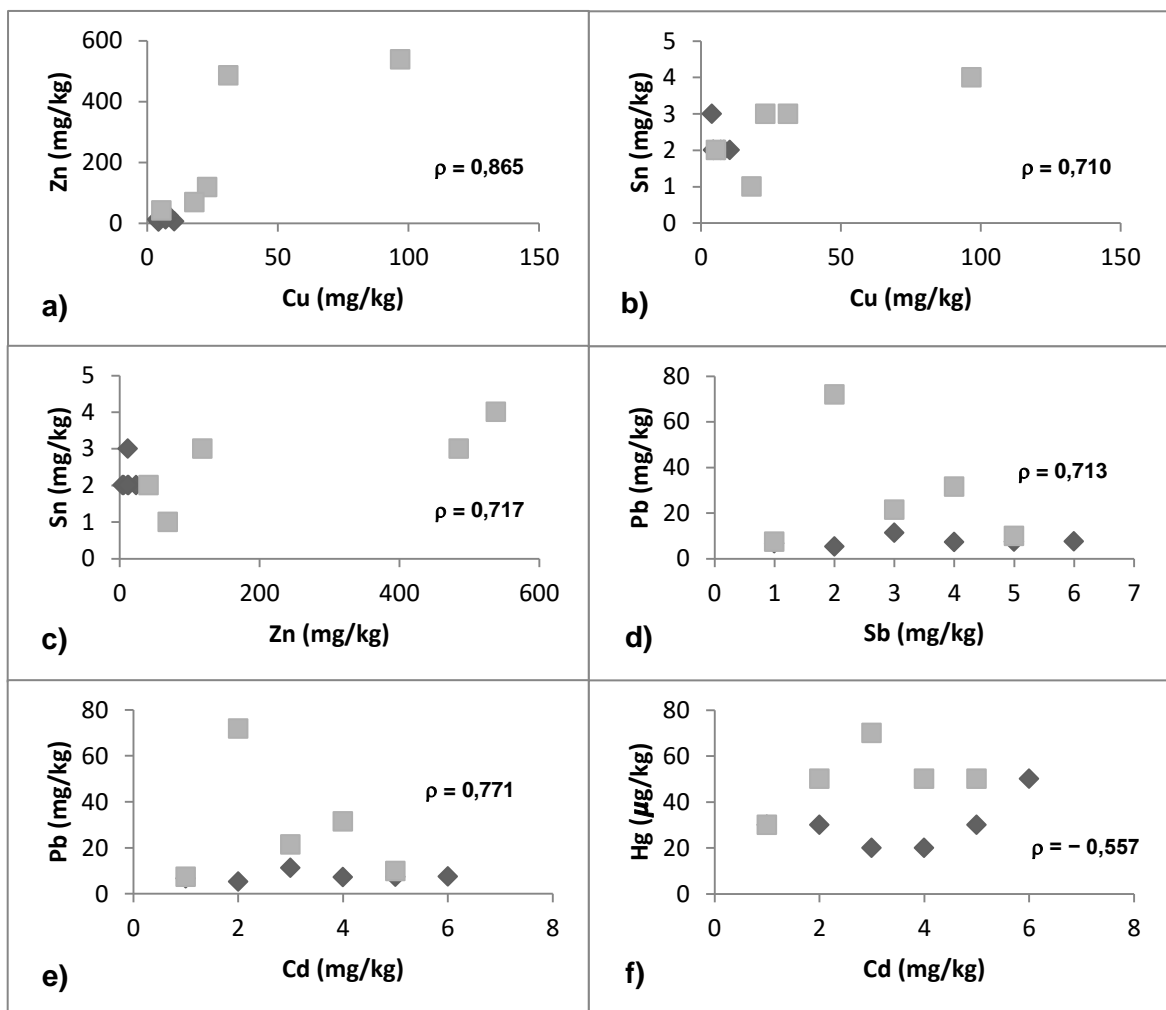


Figura 16 - Variação de Zn versus Cu (a), Sn versus Cu (b), Sn versus Zn (c), Pb versus Sb (d), Pb versus Cd (e) e Hg versus Cd (f) nos solos da região de Humpata. Legenda: ◆ Natural; ■ Urbano;

Na figura 14 encontram-se os diagramas de variação entre elementos analisados nos solos para a região de Benguela. O Hg, Zn, Pb e Sb podem ser provenientes de indústrias, serralharias ou podem ser provenientes de baterias; o Cu, Zn, Sn, Pb e Sb podem ter origem em serralharias ou no tráfego (Costa, 2015). Na figura 15 encontram-se os gráficos selecionados para a região de Lubango. O Zn e o Pb podem ser originários de baterias segundo Costa (2015), o Zn, Sn e o Pb podem ser provenientes de serralharias ou do tráfego. E por fim, na figura 16 encontram-se os gráficos selecionados para a região de Humpata. O Hg pode ser proveniente de indústrias ou serralharias; o Cd, Pb, Zn e o Sb podem ter origem em baterias segundo Costa (2015) e o Cu, Zn, Sn, Sb, Pb e Cd podem ser associados ao tráfego segundo Argyraki *et al.* (2018).

Todos os elementos (Cd, Cu, Hg, Pb, Sb, Sn e Zn) apresentados nas figuras 14, 15 e 16, terão origem antropogénica de acordo com diversos autores (e.g. Xia *et al.* (2011), Yuan *et al.* (2014), Islam *et al.* (2015a), Yang & Zhang (2015), Argyraki *et al.* (2018), Jafari *et al.* (2018), Jia *et al.* (2018)), porque são metais relacionados com a poluição urbana (e.g. Xia *et al.*, 2011; Yuan *et al.*, 2014; Costa, 2015; Islam *et al.*, 2015a; Yang & Zhang, 2015; Buttafuoco *et al.*, 2017; Argyraki *et al.*, 2018; Jafari *et al.*, 2018).

4.4.1. Relação entre elementos químicos e textura dos solos

Foram efetuados gráficos de dispersão e calculados os valores dos coeficientes de correlação entre os elementos químicos e os teores de areia dos solos da região de Benguela (figura 17). Selecionaram-se os teores de areia em vez de argila, porque os valores de argila são muito baixos e o erro analítico que aparece na análise granulométrica afeta mais a determinação da quantidade de argila do que da areia.

Nos gráficos da figura 17 foi possível observar um comportamento nítido dos elementos geogénicos (Rb, Tl), em que os teores destes decrescem em função do aumento da quantidade de areia, o que não se observa nos elementos de origem antrópica (Zn e Sn). Os teores dos elementos antropogénicos, Zn e Sn não mostram relação com a quantidade de areia nos solos, apresentando nos diagramas de variação uma grande dispersão e os valores mais elevados destes elementos químicos são encontrados nos solos urbanos.

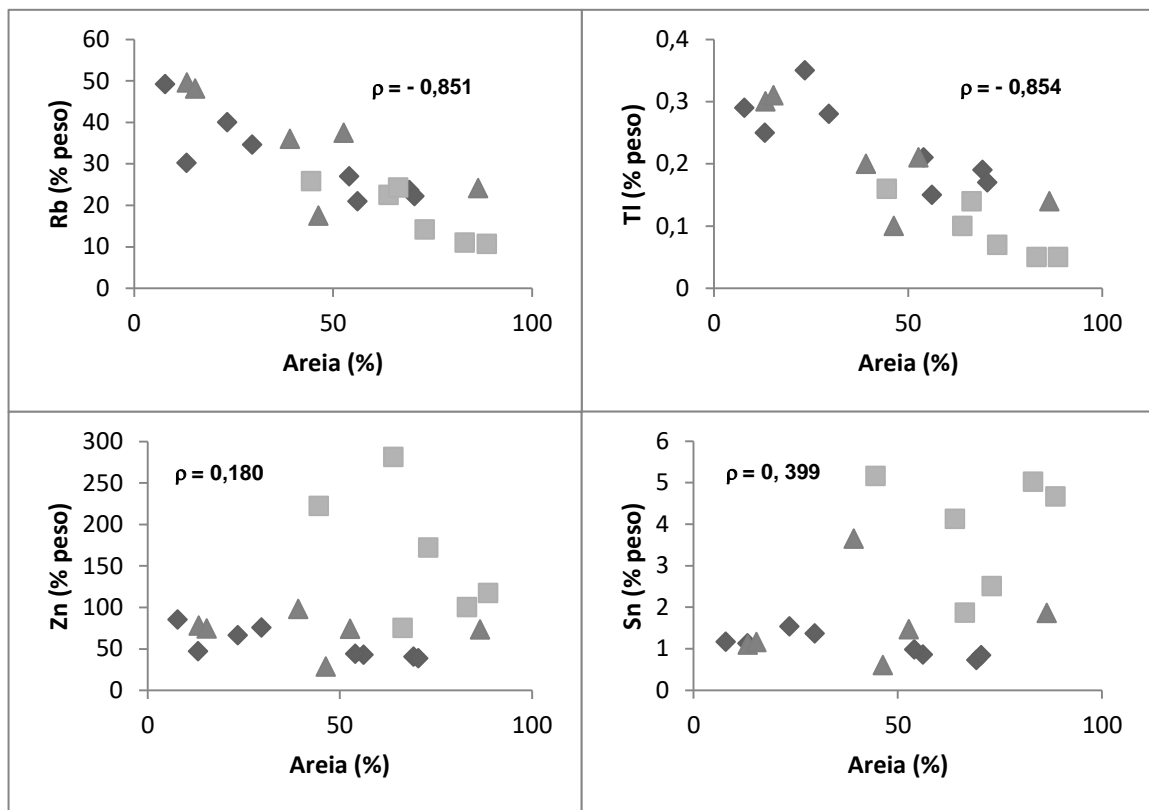


Figura 17 - Gráficos representativos de elementos geogénicos (Rb e Tl) e antropogénicos (Zn e Sn) dos solos da região de Benguela. Legenda: ◆ Natural; ■ Urbano; ▲ Agrícola

4.5. Cálculo dos fatores de enriquecimento (FE) e do índice de carga de poluição (PLI)

O fator de enriquecimento (FE), por vezes, permite distinguir os elementos geogénicos daqueles que provêm de atividades antrópicas (Muzerengi, 2017). Este parâmetro é calculado a partir da razão entre a concentração de um metal no solo, normalizada para um elemento de referência, com mobilidade muito baixa e estável no solo (Barbieri *et al.*, 2015) e a concentração desse elemento, também normalizada, no *background* geoquímico. Um dos elementos mais utilizados é o alumínio (Al), pois é um dos principais elementos da crosta terrestre, está presente nos solos em grande quantidade e é um elemento praticamente imóvel, exceto em climas equatoriais. Para além disso, os óxidos de alumínio desempenham funções importantes quando se juntam com os óxidos de ferro e manganês, no que diz respeito ao comportamento dos metais no solo (Batista, 2003), imobilizando-os. O Al também foi usado por Islam *et al.* (2015b) e por Gouveia *et al.* (2018) para normalização geoquímica. O *background* geoquímico pode ser regional, local ou pode usar-se a composição da crosta continental superior (CCS).

De modo a avaliar o grau de contaminação nos solos de superfície foram calculados os FE. O FE foi calculado utilizando a fórmula de Buat-Menard & Chesselet, 1979 e o teor de Al para normalização em (1).

$$FE = \frac{\left(\frac{Cn}{Cref}\right) amostra}{\left(\frac{Bn}{Bref}\right) background} \quad (1)$$

Onde Cn (*amostra*) é a concentração do elemento químico examinado no solo; $Cref$ é a concentração do elemento químico (Al) usado na normalização; Bn é a concentração do elemento químico no *background* geoquímico e $Bref$ é a concentração de referência do Al, no *background* geoquímico admitido. Existem cinco categorias para a classificação da qualidade dos solos expressas na tabela 12. Os fatores de enriquecimento das três regiões estudadas são apresentados nas tabelas 13, 14 e 15. O elemento usado como referência foi o Al e o *background* geoquímico considerado foi a composição média da crosta continental superior (CCS), retirada de Rudnick & Gao (2003), calculando-se o valor de Al como 81520 ppm. Para os restantes elementos os valores de *background*, também retirados de Rudnick & Gao (2003) foram os seguintes: As – 4,8 ppm; Cd – 0,09 ppm; Cu – 28 ppm; Hg – 0,05 ppm; Mn – 770 ppm; Mo – 1,1 ppm; Pb – 17 ppm; Sb – 0,4 ppm; Sn – 2,1 ppm; Sr – 320 ppm e Zn – 67 ppm.

Tabela 12 - Classificação da qualidade dos solos (Retirado e modificado de: Barbieri *et al.*, 2015).

| Valores | Qualidade do solo |
|------------|--|
| FE <2 | Deficiência para enriquecimento mínimo |
| 2 <FE <5 | Enriquecimento moderado |
| 5 <FE <20 | Enriquecimento significativo |
| 20 <FE <40 | Enriquecimento muito alto |
| FE > 40 | Enriquecimento extremamente alto |

Avaliação da perigosidade do solo urbano em cidades de rápida expansão, sem planeamento urbano e com sistemas sanitários deficientes

Tabela 13 - Fator de enriquecimento de 11 elementos nos solos de Benguela.

| Solo natural | As | Cd | Cu | Hg | Mn | Mo | Pb | Sb | Sn | Sr | Zn |
|----------------------|--------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| BG-1 | 8,138 | 14,467 | 2,123 | - | 1,316 | 11,837 | 4,362 | 2,264 | 2,318 | 20,522 | 3,616 |
| BG-2 | 4,569 | 13,334 | 1,453 | 5,793 | 1,080 | 6,320 | 2,179 | 1,448 | 1,931 | 1,526 | 2,711 |
| BG-3 | 4,134 | 14,377 | 2,264 | 3,451 | 1,977 | 3,490 | 2,459 | 0,647 | 1,499 | 1,124 | 2,601 |
| BG-4 | 4,198 | 11,195 | 2,094 | 2,748 | 1,796 | 2,914 | 2,516 | 0,687 | 1,832 | 0,824 | 2,625 |
| BG-5 | 4,813 | 8,068 | 1,391 | 2,640 | 0,652 | 5,461 | 2,077 | 1,403 | 1,776 | 7,477 | 2,315 |
| BG-15 | 1,881 | 3,951 | 3,058 | 1,094 | 2,178 | 1,169 | 2,526 | - | 1,524 | 0,733 | 3,470 |
| BG-19 | 4,668 | 33,913 | 2,359 | 3,864 | 1,149 | 6,463 | 2,214 | 2,704 | 2,520 | 2,306 | 4,354 |
| BG-20 | 3,866 | 63,699 | 1,515 | 2,651 | 0,895 | 10,032 | 2,164 | 2,237 | 2,430 | 4,795 | 3,284 |
| Solo urbano | | | | | | | | | | | |
| BG-6 | 6,282 | 27,918 | 5,105 | 4,467 | 2,640 | 7,715 | 14,255 | 9,073 | 13,720 | 2,600 | 18,501 |
| BG-7 | 9,599 | 26,254 | 8,481 | 4,726 | 3,253 | 13,103 | 22,448 | 16,836 | 28,242 | 3,282 | 17,634 |
| BG-8 | 12,298 | 53,097 | 12,248 | 2,811 | 3,596 | 19,933 | 36,543 | 32,678 | 31,256 | 4,331 | 24,544 |
| BG-9 | 11,914 | 724,622 | 22,249 | 7,300 | 3,540 | 24,887 | 33,567 | 21,597 | 14,543 | 5,171 | 31,235 |
| BG-10 | 4,891 | 23,913 | 5,124 | 2,609 | 3,676 | 4,684 | 37,518 | 11,739 | 12,826 | 2,731 | 27,352 |
| BG-18 | 2,751 | 8,096 | 3,123 | 7,287 | 3,318 | 2,733 | 4,206 | 0,797 | 4,055 | 1,146 | 5,105 |
| P-1 | 7,160 | 22,200 | 8,563 | 12,787 | 3,072 | 7,193 | 11,706 | 7,593 | 15,299 | 2,468 | 11,451 |
| P-2 | 5,538 | 132,585 | 16,055 | 17,722 | 3,184 | 6,283 | 86,524 | 13,291 | 30,099 | 2,271 | 35,091 |
| P-5 | 6,004 | 18,299 | 11,410 | 6,587 | 3,721 | 5,315 | 18,842 | 6,793 | 18,861 | 5,661 | 17,575 |
| Solo agrícola | | | | | | | | | | | |
| BG-11 | 3,908 | 4,008 | 2,507 | 10,100 | 2,417 | 2,295 | 3,488 | - | 2,061 | 1,118 | 3,058 |
| BG-12 | 2,073 | 6,419 | 3,565 | 2,568 | 2,843 | 2,801 | 3,021 | 0,160 | 1,681 | 1,013 | 3,722 |
| BG-13 | 2,648 | 15,154 | 3,022 | 1,860 | 2,101 | 3,156 | 3,318 | 0,542 | 1,712 | 1,405 | 3,433 |
| BG-14 | 1,828 | 5,976 | 2,507 | 1,698 | 2,279 | 1,930 | 2,764 | 0,212 | 1,981 | 0,902 | 3,126 |
| BG-16 | 2,800 | 4,220 | 2,744 | 0,584 | 2,171 | 1,753 | 3,334 | 4,310 | 5,078 | 0,977 | 4,269 |
| BG-17 | 3,008 | 9,317 | 3,211 | 1,863 | 3,303 | 2,456 | 4,220 | 0,699 | 4,126 | 1,202 | 5,082 |
| R-10 | 3,022 | 4,446 | 3,340 | 7,002 | 2,566 | 4,001 | 30,890 | 14,629 | 3,358 | 0,972 | 5,867 |

Na tabela 13, os resultados nos solos da região de Benguela demonstram no geral, um enriquecimento moderado a significativo nos 11 elementos considerados. Alguns solos da região de Benguela são extremamente enriquecidos em Cd (nas amostras BG20, BG8, BG9 e P2) e em Pb (amostra P2). Porém, alguns solos também mostram um enriquecimento muito alto em Cd (amostras BG19, BG6, BG7, BG10 e P1), Cu e Mo (amostra BG9), Pb (amostras BG7,8,9,10 e R10), Sb (amostras BG8 e 9), Sn (amostras BG7, 8 e P2) e Zn (amostras BG8, 9, 10 e P2). O grau de enriquecimento nestes elementos nos solos urbanos e agrícolas é semelhante, de moderados a mínimos, mas os solos urbanos têm enriquecimentos de extremamente altos a significativos.

Relativamente aos solos de Lubango (tabela 14) estes demonstram, no geral, que não são enriquecidos ou mostram um enriquecimento mínimo em todos os elementos, com exceção do Pb, sendo os solos naturais e urbanos desta região moderadamente enriquecidos em Pb. Algumas amostras de solos urbanos possuem enriquecimento moderado em Cd, Cu, Sn e Zn.

Tabela 14 - Fator de enriquecimento de 9 elementos nos solos de Lubango.

| Solo natural | Cd | Cu | Hg | Mn | Mo | Pb | Sb | Sn | Zn |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LUB-1 | - | 0,519 | 1,249 | 0,613 | - | 2,150 | - | 1,487 | 0,653 |
| LUB-2 | - | 0,394 | 0,544 | 2,033 | 0,111 | 4,179 | - | 1,296 | 1,137 |
| LUB-3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| LUB-4 | - | 0,471 | 0,844 | 3,082 | - | 2,401 | - | 1,004 | 1,313 |
| LUB-5 | - | 0,441 | 1,609 | 0,999 | 0,488 | 2,618 | - | 2,554 | 0,556 |
| LUB-6 | - | 0,430 | 0,950 | 0,654 | - | 2,179 | - | 1,508 | 0,683 |
| Solo urbano | | | | | | | | | |
| LUB-7 | - | 0,478 | 0,788 | 1,021 | - | 3,560 | - | 1,250 | 1,605 |
| LUB-8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| LUB-9 | - | 0,631 | 1,240 | 0,539 | 0,282 | 3,328 | 0,387 | 1,476 | 1,478 |
| LUB-10 | 1,879 | 2,537 | 1,015 | 0,501 | 1,199 | 3,323 | 0,423 | 2,416 | 2,098 |
| LUB-11 | 2,917 | 1,017 | 0,525 | 0,755 | 0,859 | 3,938 | 1,313 | 3,751 | 2,488 |

E por fim os solos da região de Humpata apresentam-se, no geral, não enriquecidos ou com enriquecimento mínimo para quase todos os elementos analisados.

Algumas amostras exibem enriquecimento moderado em Cd, Cu, Hg, Mn, Mo, Pb, Sb, Sn e Zn e outras apresentam enriquecimento significativo em Cd e Pb (na amostra HUM7), Sn (na amostra HUM2) e Zn (nas amostras HUM8 e 9) (tabela 15). Portanto os solos urbanos de Humpata mostram enriquecimentos mais significativos nestes elementos do que os solos de Lubango.

Tabela 15 - Fator de enriquecimento de 9 elementos nos solos de Humpata.

| Solo natural | Cd | Cu | Hg | Mn | Mo | Pb | Sb | Sn | Zn |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| HUM-1 | - | 0,580 | 2,213 | 0,369 | 0,537 | 1,432 | - | 3,513 | 0,220 |
| HUM-2 | - | 2,013 | 3,283 | 0,590 | 2,586 | 1,706 | - | 5,211 | 0,449 |
| HUM-3 | - | 0,780 | 1,052 | 0,447 | 3,873 | 1,748 | 0,657 | 2,504 | 0,926 |
| HUM-4 | - | 0,237 | 0,591 | 0,152 | - | 0,625 | - | 1,406 | 0,271 |
| HUM-11 | - | 0,213 | 0,919 | 0,235 | 0,864 | 0,658 | - | 2,189 | 0,263 |
| HUM-5 | - | 0,547 | 2,157 | 0,230 | 0,294 | 0,951 | - | 2,054 | 0,377 |
| Solo urbano | | | | | | | | | |
| HUM-6 | - | 0,864 | 2,687 | 0,419 | 0,896 | 1,950 | - | 4,266 | 2,754 |
| HUM-7 | 5,440 | 2,011 | 2,448 | 0,814 | 2,225 | 10,339 | 4,896 | 3,497 | 4,311 |
| HUM-8 | 2,188 | 2,187 | 2,757 | 1,509 | 1,665 | 2,479 | 2,954 | 2,813 | 14,254 |
| HUM-9 | 2,791 | 4,342 | 1,256 | 1,316 | 1,599 | 2,320 | 0,314 | 2,393 | 10,086 |
| HUM-10 | 3,342 | 1,945 | 3,008 | 2,039 | 1,559 | 1,734 | - | 1,432 | 3,093 |

Os solos urbanos de Benguela foram os que apresentaram maiores FE para os elementos Cd, Cu, Pb, Sb, Sn e Zn. As diferentes categorias de enriquecimento foram utilizadas para estimar a intensidade com que os elementos antropogénicos se encontram nos solos (Machender *et al.*, 2010; Muzerengi, 2017; Islam *et al.*, 2015b e Gouveia *et al.*, 2018). Atendendo aos resultados obtidos neste estudo, é possível inferir que o enriquecimento maior em Cd, Cu, Pb, Sn e Zn, seja devido à disseminação de lixos e resíduos perigosos e à descarga dos efluentes domésticos e industriais depositados nos solos (Machender *et al.*, 2010). É importante realçar que, as fontes antropogénicas podem contribuir para que os valores de FE sejam mais elevados (Islam *et al.*, 2015b).

O índice de carga de poluição (PLI) é obtido através dos fatores de concentração (CF). O PLI de cada amostra é determinado pela enésima raiz das multiplicações do CF dos elementos traço que possuem maior FE nos solos urbanos. Os elementos traço que

apresentaram maior FE nos solos urbanos foram o Cd, Cu, Mn, Mo, Pb, Sb, Sn e o Zn, nas regiões de Benguela, Lubango e Humpata. De modo a obter uma apreciação ajustada sobre o grau de contaminação nos solos urbanos, foram calculados os PLI através das fórmulas (2) e (3).

$$PLI = (CF1 \times CF2 \times CF3 \times \dots \times CFn)^{1/n} \quad (2)$$

$$CF = \frac{Cn}{Cref} \quad (3)$$

Onde Cn representa a concentração de metal no ambiente em estudo e $Cref$ a concentração do metal no *background*. Estes valores da CCS de *background* foram retirados de Rudnick & Gao (2003). Os valores obtidos no cálculo do fator de concentração e do PLI das três regiões em estudo estão representados nas tabelas 16, 17, 18, 19, 20 e 21.

Tabela 16 - Fator de concentração dos solos urbanos de Benguela.

| Solo urbano | Cd | Cu | Mn | Mo | Pb | Sb | Sn | Zn |
|-------------|----------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|
| BG-6 | 310,198 | 0,182 | 0,003 | 7,014 | 0,839 | 22,683 | 6,533 | 0,276 |
| BG-7 | 291,716 | 0,303 | 0,004 | 11,912 | 1,320 | 42,089 | 13,449 | 0,263 |
| BG-8 | 589,970 | 0,437 | 0,005 | 18,121 | 2,150 | 81,696 | 14,884 | 0,366 |
| BG-9 | 8051,358 | 0,795 | 0,005 | 22,625 | 1,975 | 53,992 | 6,925 | 0,466 |
| BG-10 | 265,695 | 0,183 | 0,005 | 4,258 | 2,207 | 29,347 | 6,108 | 0,408 |
| BG-18 | 89,959 | 0,112 | 0,004 | 2,484 | 0,247 | 1,992 | 1,931 | 0,076 |
| P-1 | 246,672 | 0,306 | 0,004 | 6,539 | 0,689 | 18,981 | 7,285 | 0,171 |
| P-2 | 1473,165 | 0,573 | 0,004 | 5,712 | 5,090 | 33,228 | 14,333 | 0,524 |
| P-5 | 203,317 | 0,408 | 0,005 | 4,832 | 1,108 | 16,983 | 8,981 | 0,262 |

Tabela 17 - Índices de carga de poluição dos solos urbanos de Benguela.

| Solo urbano | BG-6 | BG-7 | BG-8 | BG-9 | BG-10 | BG-18 | P-1 | P-2 | P-5 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PLI | 1,617 | 2,332 | 3,468 | 4,677 | 1,885 | 0,545 | 1,542 | 3,552 | 1,745 |

Tabela 18 - Fator de concentração dos solos urbanos de Lubango.

| Solo urbano | Cd | Cu | Hg | Mn | Mo | Pb | Sb | Sn | Zn |
|--------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LUB-7 | - | 0,017 | 15,753 | 0,001 | - | 0,209 | - | 0,595 | 0,024 |
| LUB-8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| LUB-9 | - | 0,023 | 24,797 | 0,001 | 0,256 | 0,196 | 0,969 | 0,703 | 0,022 |
| LUB-10 | 20,880 | 0,091 | 20,295 | 0,001 | 1,090 | 0,195 | 1,057 | 1,151 | 0,031 |
| LUB-11 | 32,413 | 0,036 | 10,502 | 0,001 | 0,781 | 0,232 | 3,282 | 1,786 | 0,037 |

Tabela 19 - Índices de carga de poluição dos solos urbanos de Lubango.

| Solo urbano | LUB-7 | LUB-8 | LUB-9 | LUB-10 | LUB-11 |
|--------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| PLI | | | | 0,389 | 0,428 |

Tabela 20 - Fator de concentração dos solos urbanos de Humpata.

| Solo urbano | Cd | Cu | Hg | Mn | Mo | Pb | Sb | Sn | Zn |
|--------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| HUM-6 | - | 0,031 | 53,749 | 0,001 | 0,814 | 0,115 | - | 2,031 | 0,041 |
| HUM-7 | 60,446 | 0,072 | 48,961 | 0,001 | 2,023 | 0,608 | 12,240 | 1,665 | 0,064 |
| HUM-8 | 24,310 | 0,078 | 55,134 | 0,002 | 1,513 | 0,146 | 7,384 | 1,340 | 0,213 |
| HUM-9 | 31,014 | 0,155 | 25,122 | 0,002 | 1,453 | 0,136 | 0,785 | 1,139 | 0,151 |
| HUM-10 | 37,137 | 0,069 | 60,162 | 0,003 | 1,417 | 0,102 | - | 0,682 | 0,046 |

Tabela 21 - Índices de carga de poluição dos solos urbanos de Humpata.

| Solo urbano | HUM-6 | HUM-7 | HUM-8 | HUM-9 | HUM-10 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| PLI | | 0,893 | 0,770 | 0,561 | |

A tabela 17 apresenta os valores de PLI nos solos urbanos da região de Benguela. Nesta é possível observar que os valores de PLI variam de 0,545 a 4,677. Os valores de PLI <1 indicam ausência de poluição, enquanto que valores de PLI > 1 indicam poluição nos solos. Como se pode verificar na tabela 17, os valores de PLI nos solos urbanos de Benguela são praticamente todos superiores a 1, o que significa que estes solos se apresentam poluídos com poluição urbana significativa. Assim como Machender

et al. (2010) encontraram nos solos de Hyderabad, Índia e Islam *et al.* (2015b) nos solos urbanos de Bangladesh, os índices de carga de poluição foram superiores a 1 e isso indica uma deterioração dos solos. É possível concluir que os solos mais contaminados são o BG9 e o P2 e os menos contaminados são o P1 e o BG18.

Por sua vez, a tabela 19 apresenta os valores de PLI nos solos urbanos da região de Lubango, e nesta é possível observar que os valores de PLI variam de 0,389 a 0,428. E por fim, na tabela 21 são apresentados os valores de PLI nos solos urbanos da região de Humpata, e na qual é possível observar que os valores de PLI variam de 0,561 a 0,893. Como se pode verificar na tabela 19 e 21, os valores de PLI nos solos urbanos de Lubango e Humpata são todos inferiores a 1, o que significa que a carga de poluição destes solos urbanos é baixa ou inexistente.

4.6. Avaliação da qualidade dos solos e comparação com a legislação

Os níveis dos metais obtidos neste estudo são comparados com os critérios de qualidade dos solos ou valores guia para solos pouco profundos do projeto de Decreto-Lei Português de solos contaminados (ProSolos, 2015), com os critérios de sítios para uso de espaços verdes públicos, privados e residenciais da Lei Italiana para o Sn (Decreto Ministerial, 1999) e com os critérios de padrão residencial da Lei Sul-africana para o Mn (DEA, 2010). Os elementos para os quais foram feitas comparações, foram o Ba, Cd, Co, Mn, Pb, Sn e Zn.

A tabela 22 mostra os valores de alguns elementos nas amostras analisadas quando comparados com os valores estabelecidos pelo Decreto-Lei Português (para os elementos Ba, Cd, Co, Pb e Zn), para a Lei Italiana (para o Sn) e para a Lei Sul-africana (para o Mn). Esta tabela mostra que grande parte das amostras analisadas (40 de 46) excederam a *guideline*/diretriz italiana para o Sn.

Avaliação da perigosidade do solo urbano em cidades de rápida expansão, sem planeamento urbano e com sistemas sanitários deficientes

Tabela 22 - Valores analisados para o respetivo elemento que excedem as diretrizes.

| Amostras | Elementos Limites | Ba | Cd | Co | Mn | Pb | Sn | Zn |
|---------------|----------------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | | 390 | 1,2 | 22 | 1500 | 120 | 1 | 340 |
| | | PT | PT | PT | S.AFRI | PT | ITAL | PT |
| Solo natural | BG-1 | | | | | | | |
| | BG-2 | | | | | | | |
| | BG-3 | | | | | | | |
| | BG-4 | | | | | | | |
| | BG-5 | | | | | | 1,1 | |
| | BG-15 | | | | | | 1,2 | |
| | BG-19 | | | | | | 1,4 | |
| | BG-20 | | 1,73 | | | | 1,5 | |
| Solo urbano | BG-6 | | | | | | 5,2 | |
| | BG-7 | | | | | | 5,0 | |
| | BG-8 | | | | | | 4,7 | |
| | BG-9 | | 5,36 | | | | 2,5 | |
| | BG-10 | | | | | | 4,1 | |
| | BG-18 | | | | | | 1,9 | |
| | P-1 | | | | | | 4,0 | |
| | P-2 | | 2,02 | | | 249 | 10,7 | 398 |
| P-5 | | | | | | 4,8 | | |
| Solo agrícola | BG-11 | | | | | | 1,1 | |
| | BG-12 | | | | | | 1,2 | |
| | BG-13 | | | | | | 1,5 | |
| | BG-14 | | | | | | 3,7 | |
| | BG-16 | | | | | | 1,9 | |
| | BG-17 | | | | | | 1,4 | |
| | R-10 | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Solo natural | LUB1 | | | | | | 2 | |
| | LUB2 | 412 | | | | | 2 | |
| | LUB3 | | | | | | 2 | |
| | LUB4 | 438 | | 30,2 | 2250 | | 2 | |
| | LUB5 | | | | | | 2 | |
| | LUB6 | | | | | | 2 | |
| Solo urbano | LUB7 | | | | | | 2 | |
| | LUB8 | | | | 1740 | | 2 | |
| | LUB9 | 551 | | | | | 2 | |
| | LUB10 | 393 | | | | | 3 | |
| | LUB11 | 510 | | | | | 6 | |
| Solo natural | HUM1 | | | | | | 2 | |
| | HUM2 | | | | | | 2 | |
| | HUM3 | | | | | | 2 | |
| | HUM4 | | | | | | 2 | |
| | HUM11 | | | | | | 3 | |
| | HUM5 | | | | | | 2 | |
| Solo urbano | HUM6 | | | | | | 2 | |
| | HUM7 | | | | | | 3 | |
| | HUM8 | | | | | | 3 | 485 |
| | HUM9 | | | | | | 4 | 538 |
| | HUM10 | | | | | | | |

A negrito encontram-se os valores mais elevados para cada elemento que excede as diretrizes.

Relativamente aos solos da região de Benguela, as amostras BG20 (solo natural), BG9 e P2 (solo urbano) possuem teores de Cd superiores ao valor guia e a amostra P2 (solo urbano) apresenta teores em Pb, Sn e Zn superiores aos valores guia (tabela 22). Em relação aos solos de Lubango, 2 amostras do solo natural e 3 amostras de solo urbano possuem teores de Ba superiores ao valor guia, 1 amostra possui teor de Co superior ao valor guia e 2 amostras possuem teores de Mn superiores ao valor guia (tabela 22). E por fim, em relação aos solos da região de Humpata, apenas as amostras HUM8 e 9 (solo urbano) apresentam teores de Zn superiores ao valor guia (tabela 22).

Portanto, os solos P2 (urbano) e LUB4 (natural) são os que possuem mais elementos químicos a exceder as legislações usadas neste estudo. De acordo com a Lei Italiana o Sn é o metal que causa maior poluição nas três regiões em estudo. Relativamente aos solos de Benguela, de acordo com o projeto de Decreto-Lei Português de solos contaminados (ProSolos, 2015), o Cd é o metal que causa maior poluição, seguido do Pb e Zn.

Em relação os solos de Lubango, de acordo com o projeto de Decreto-Lei Português de solos contaminados (ProSolos, 2015), o Ba é o metal que causa maior poluição, seguido do Co e de acordo com a lei sul-africana é o Mn que causa maior poluição. E por fim, no que diz respeito aos solos de Humpata e de acordo com o projeto de Decreto-Lei Português de solos contaminados (ProSolos, 2015), o Zn é o metal que causa maior poluição.

4.7. Cálculo do risco de efeitos não cancerígenos e risco cancerígeno

A avaliação do risco para a saúde humana é um método bastante utilizado para estimar o risco associado à exposição do ser humano aos metais (Carvalho *et al.*, 2017, Pinto *et al.*, 2017a, b). Esta exposição a metais tem estado associada a várias doenças, como por exemplo o cancro (Kim *et al.*, 2015). No caso dos solos, o ser humano está sujeito à exposição direta a contaminantes através de três vias principais: a ingestão, o contacto dérmico e a inalação (Jia *et al.*, 2018; USEPA 2001).

Neste estudo vão ser utilizadas as três vias de exposição a metais: a ingestão, o contacto dérmico, e a inalação, e vão ser calculadas de acordo com o método estipulado pela USEPA (2011).

Os metais são adsorvidos via dérmica através do contacto com o solo, por ingestão em que as partículas dos solos entram no organismo através da boca, sofrem

digestão no estômago ou através da inalação em que as partículas dos solos entram no organismo através das vias respiratórias sendo depois os metais adsorvidos numa determinada quantidade pelo organismo. A exposição diária crónica (CDI) ($\text{mg.kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) por meio destas três vias é calculada através das fórmulas seguintes (4), (5) e (6).

$$\text{Ingestão (solo)} \quad CDI = \frac{CS \times IRing \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF \quad (4)$$

$$\text{Contacto dérmico (solo)} \quad CDI = \frac{CS \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times CF \quad (5)$$

$$\text{Inalação (solo)} \quad CDI = \frac{CS \times IRinh \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (6)$$

Sendo CDI a exposição diária crónica ($\text{mg.kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); CS é a concentração do metal presente nos solos (mg.kg^{-1}), tendo sido considerada a concentração média com limite superior de confiança (UCL) de 95 % de acordo com a USEPA (2002); $IRing$ - taxa de ingestão do solo (mg.dia^{-1}); EF (frequência de exposição) é o número de eventos de exposição ao longo de um determinado período de exposição (dias.ano^{-1}); ED (duração da exposição) é o tempo durante o qual há contacto com o contaminante (ano); BW é o peso corporal (kg); AT é o período médio de esperança de vida das pessoas que vão estar sujeitas à via de exposição (neste caso dérmico, por ingestão ou por inalação de partículas de solo) ($ED \times 365$ dias) que foi de 60 anos (CENSO, 2014); ABS é a fração de absorção dérmica (sem unidades); AF (fator de adesão) é a quantidade de um material (por exemplo, solo) que adere à pele por unidade de área de superfície ($\text{mg.cm}^{-2} \text{.dia}^{-1}$); SA é a superfície corporal exposta aos metais (cm^2); PEF – Fator de emissão de partículas ($1,36 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{.kg}$); $IRinh$ - taxa de inalação do solo ($\text{m}^3 \text{.dia}$), e por fim CF é o fator de conversão da unidade ($10^{-6} \text{ kg.mg}^{-1}$).

Após a identificação dos solos mais contaminados, foi efetuada uma avaliação de risco para a saúde humana apenas para os solos urbanos da região de Benguela,

utilizando as equações de (4) a (6). De forma a calcular o risco não cancerígeno e cancerígeno para a saúde da população de Benguela expostos a Cd, Cu, Pb e Zn nos solos urbanos, foi calculado o CDI através das três vias de exposição já referidas anteriormente e foram determinadas usando os fatores de exposição apresentados em DEA (2010), que também usa os dados do sistema integrado de informações de risco da USEPA (tabela 23).

De modo a calcular o CDI nas três vias de exposição, foi necessário determinar a concentração média com limite superior de confiança (UCL) de 95%, para os elementos de maior interesse (Cd, Cu, Pb e Zn). Para isso, usou-se o *software* estatístico ProUCL5.1.002. Assim, os dados dos solos urbanos com todos os metais de interesse foram inseridos no programa, e este analisa qual o tipo de dispersão dos dados e dá o valor mais correto para o UCL, garantindo que o valor não está sobrestimado (USEPA, 2002). Assim, os valores 95% UCL sugeridos pelo *software* foram os seguintes: Cd = 8,01; Cu = 45,81; Pb = 142,5 e Zn = 243,7.

Tabela 23 - Fatores de exposição utilizados para a avaliação do risco para a saúde humana segundo DEA (2010).

| Fatores de exposição | Acrónimo | Unidades | Crianças | Adultos |
|-----------------------------------|-----------------|--|-----------------|----------------|
| Peso corporal | BW | kg | 15 | 70 |
| Esperança média de vida | AT | dias | | |
| para não cancerígenos | | | 2190 | 25550 |
| para cancerígenos | | | 25550 | 25550 |
| Frequência de exposição | EF | dias.ano ⁻¹ | 365 | 365 |
| Duração da exposição | ED | ano | 6 | 70 |
| Taxa de ingestão | IRing | mg.dia ⁻¹ | 200 | 100 |
| Taxa de inalação | IRinh | m ³ .dia | 10 | 20 |
| Fator de emissão de partículas | PEF | m ³ .kg | 1,30E+09 | 1,30E+09 |
| Superfície corporal exposta | SA | cm ² | 2100 | 5800 |
| Fator de aderência do solo à pele | AF | mg.cm ⁻² .dia ⁻¹ | 0,2 | 0,07 |
| Fração de absorção dérmica | ABS | - | 0,1 | 0,1 |
| Fator de conversão | CF | - | 1,00E-06 | 1,00E-06 |

O quociente de risco (HQ) é o CDI dividido pelas doses de referência (RfD) (equação (7)) e a soma dos quocientes de risco fornece o índice de risco (HI) para o cálculo do risco não carcinogénico (equação (8)).

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \quad (7)$$

$$HI = \sum \frac{CDI \text{ (or expouse intake)}}{RfD \text{ (reference dose)}} \quad (8)$$

Se $HI < 1$ não são esperados efeitos adversos à saúde, enquanto que se $HI > 1$ são esperados efeitos adversos à saúde.

O risco cancerígeno (CR) é obtido através da multiplicação do CDI pelos fatores de inclinação (SF) (equação (9)).

$$CR = CDI \times SF \quad (9)$$

O valor de 10^{-4} é o limite máximo aceitável para o risco cancerígeno (CR) estipulado pela USEPA, sendo 10^{-6} o limite mínimo aceitável para CR segundo a USEPA. Na tabela 24 são apresentados os resultados da avaliação de risco cancerígeno e não cancerígeno de exposição da população a Cd, Cu, Pb e Zn em solos urbanos de Benguela.

Na tabela 24 é possível observar que o risco cancerígeno e não cancerígeno das crianças, para todos os metais, é sempre maior do que para adultos; o risco por ingestão oral é o principal contribuinte para o índice de risco e o metal que gera maior preocupação é o Pb (tabela 24), seguido do Cd. É possível observar que, os valores do índice de risco (HI) são sempre inferiores a 1, o que indica que os solos urbanos em Benguela representam um risco não-cancerígeno pouco importante tanto para adultos como para as crianças. Porém, é importante referir que os cálculos para o HQ de inalação não abrangeram o Cu, o Pb e o Zn e que o HQ para contacto dérmico não incluíram o Pb, porque não existiam doses de referência disponíveis.

Segundo a International Agency for Research on Cancer (IARC, 1993), o chumbo provavelmente é cancerígeno para humanos, e o cálculo do risco de cancro para crianças e adultos através de ingestão pode significar um possível risco de cancro para ambos, mas muito reduzido para os adultos (tabela 24). Representa um risco maior para as crianças, uma vez que a ingestão de solo é mais frequente por parte destas do que dos adultos.

Tabela 24 - Avaliação do risco para a saúde humana devido à exposição a elementos potencialmente tóxicos (EPT) nos solos urbanos de Benguela.

| | Risco não-cancerígeno | | | | | Risco cancerígeno | | |
|--|-----------------------|---------|---------|---------|----------|--------------------------------|---------|---------|
| | Cd | Cu | Pb | Zn | Total | Cd | Pb | |
| CS (mg.kg⁻¹) | 8,01 | 45,81 | 142,5 | 243,7 | | CS (mg.kg⁻¹) | 8,01 | 142,5 |
| RfD (mg.kg⁻¹.dia⁻¹) | 5,0E-04 | 3,7E-02 | 3,6E-03 | 3,0E-01 | | Slope factor | | 8,5E-03 |
| HQing Crianças | 2,1E-01 | 1,7E-02 | 5,3E-01 | 1,1E-02 | 0,768 | Ingestão Crianças | | 4,5E-03 |
| HQing Adultos | 2,3E-02 | 1,8E-03 | 5,7E-02 | 1,2E-03 | 0,083 | Ingestão Adultos | | 1,7E-06 |
| RfD (mg.kg⁻¹.dia⁻¹) | 5,7E-05 | | | | | Slope factor | 6,3E+00 | 4,2E-02 |
| HQinh Crianças | 7,2E-05 | | | | 7,21E-05 | Inalação Crianças | 2,6E-08 | 3,1E-09 |
| HQinh Adultos | 3,1E-05 | | | | 3,09E-05 | Inalação Adultos | 1,1E-08 | 1,3E-09 |
| RfD (mg.kg⁻¹.dia⁻¹) | 5,0E-04 | 2,4E-02 | | 7,5E-02 | | Risco de cancro Crianças | 2,6E-08 | 4,5E-03 |
| HQderm Crianças | 4,5E-02 | 3,5E-03 | | 2,3E-03 | 0,051 | Risco de cancro Adultos | 1,1E-08 | 1,7E-06 |
| HQderm Adultos | 9,3E-03 | 7,2E-04 | | 4,7E-04 | 0,010 | | | |
| HI Crianças | 0,259 | 0,020 | 0,528 | 0,013 | 0,820 | | | |
| HI Adultos | 0,032 | 0,002 | 0,057 | 0,002 | 0,093 | | | |

CS: 95% limite de confiança superior das concentrações médias.
RfD (doses de referência) e *slope factors* retirados de DEA (2010).

A avaliação de risco cancerígeno e não-cancerígeno também foi feita através do programa *online* da USEPA, o *Regional Screening Levels (RSL) calculator*. Os cálculos foram efetuados usando os fatores de exposição apresentados no *site* da USEPA (tabela 25). Na tabela 26 encontram-se os resultados obtidos seguindo este método.

Tabela 25 - Fatores de exposição utilizados para a avaliação do risco para a saúde humana segundo USEPA (2011).

| Fatores de exposição | Acrónimo | Unidades | Crianças | Adultos |
|-----------------------------------|----------|--|----------|----------|
| Peso corporal | BW | kg | 15 | 80 |
| Esperança média de vida | LT | - | - | 60 |
| Frequência de exposição | EF | dias.ano ⁻¹ | 350 | 350 |
| Duração da exposição | ED | ano | 6 | 54 |
| Taxa de ingestão | IRS | mg.dia ⁻¹ | 200 | 100 |
| Fator de emissão de partículas | PEF | m ³ .kg | 1,30E+09 | 1,30E+09 |
| Superfície corporal exposta | SA | cm ² | 2373 | 6032 |
| Fator de aderência do solo à pele | AF | mg.cm ⁻² .dia ⁻¹ | 0,2 | 0,07 |

Na tabela 26 é possível observar que o índice de risco, para todos os metais, é sempre maior para crianças do que para adultos; o risco por ingestão oral é o principal meio de exposição que contribui para o índice de risco e o metal que gera maior preocupação é o Zn (tabela 26), seguido do Cd. É possível observar que, os valores do índice de risco (HI) são sempre inferiores a 1, o que indica que os solos urbanos em Benguela não representam risco não cancerígeno tanto para adultos como para as crianças. Porém, é importante referir que os cálculos para o HQ de inalação e de contacto dérmico não abrangeram o Cu, o Pb e o Zn, porque não existiam doses de referência disponíveis.

Considerando a exposição ao Cd apenas por inalação, os valores de risco de cancro são menores que 10⁻⁶, porque não existem valores para os *slope factor* para a ingestão de Cd. De acordo com o *Regional Screening Levels (RSL) calculator*, não existem RfD e *slope factor* para o Pb, pelo que não se pode calcular tanto risco cancerígeno, como não cancerígeno (tabela 26).

Tabela 26 - Avaliação do risco para a saúde humana devido à exposição a elementos potencialmente tóxicos (EPT) nos solos urbanos de Benguela, calculados através do *Regional Screening Levels calculator* (RSL) disponibilizado pela USEPA.

| Elementos | Concentração (*) | Risco de Ingestão | Risco de Contacto dérmico | Risco de Inalação | Risco Cancerígeno | Ingestão | Contacto Dérmico | Inalação | Não- cancerígeno | Ingestão | Contacto Dérmico | Inalação | Não- canceríge no |
|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|-------------------------|
| | | | | | | Crianças | Crianças | Crianças | Crianças | Adultos | Adultos | Adultos | Adultos |
| | | | | | | HQ | HQ | HQ | HI | HQ | HQ | HQ | HI |
| Cd | 8,01 | - | - | 8,72E-09 | 8,72E-09 | 1,02E-01 | 9,72E-03 | 5,65E-04 | 1,13E-01 | 9,60E-03 | 1,62E-03 | 5,65E-04 | 1,18E-02 |
| Cu | 45,81 | - | - | - | - | 1,46E-02 | - | - | 1,46E-02 | 1,37E-03 | - | - | 1,37E-03 |
| Pb | 142,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Zn | 243,7 | - | - | - | - | 1,04E-02 | - | - | 1,04E-02 | 9,74E-04 | - | - | 9,74E-04 |
| Risco Total/Hi | - | - | - | 8,72E-09 | 8,72E-09 | 1,27E-01 | 9,72E-03 | 5,65E-04 | 1,38E-01 | 1,19E-02 | 1,62E-03 | 5,65E-04 | 1,41E-02 |

(*) **Concentração:** 95% limite de confiança superior das concentrações médias

Limite aceitável da USEPA para risco não-cancerígeno da USEPA: $\leq 1,0$

Limite mínimo aceitável da USEPA para risco cancerígeno: $1E-06$; Limite máximo aceitável pela USEPA para risco cancerígeno: $1E-04$

No entanto, quando o ser humano é exposto a níveis elevados de Zn sofre um decréscimo nas funções do sistema imunitário, pode adquirir anemia e danos em alguns órgãos, como o fígado, o pâncreas e os rins (Costa, 2015). O Cd em excesso no organismo pode provocar danos no sistema nervoso e cardiovascular, cancro do pulmão, fraturas ósseas, lesões na próstata e disfunções renais (Rocha, 2009; Wu *et al.*, 2018).

Os metais pesados, como é o caso dos metais utilizados neste estudo da avaliação do risco para a saúde humana (Cd, Cu, Pb e Zn), são elementos que o organismo não consegue excretar rapidamente e de modo eficaz, e desta forma quando estes estão presentes em excesso no organismo podem ser prejudiciais à saúde (Rocha, 2009). No entanto, até certas doses o Co, Cr, Cu, Fe e Zn são imprescindíveis para o funcionamento metabólico dos seres vivos (Costa, 2015). Os elementos As, Cd, Hg e Pb não apresentam qualquer benefício para os seres vivos sendo muitas vezes relacionados com intoxicações. Porém, nem todos os metais pesados são prejudiciais à saúde.

Como demonstrado por outros estudos (e.g. Costa, 2015; Islam *et al.*, 2015a; Wu *et al.*, 2018; Proshad *et al.* 2019) a ingestão é a principal via de exposição aos metais, tal como acontece com os resultados obtidos para os solos de Benguela. Neste estudo o índice de risco (HI) para todos os metais estudados foi sempre maior para as crianças do que para os adultos. Isto deve-se principalmente ao facto destas ingerirem por acidente partículas de solo contaminadas e terem um peso corporal mais baixo do que o dos adultos, representando assim um risco mais elevado (Costa, 2015; Islam *et al.*, 2015a; Proshad *et al.* 2019; Mehmood *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2018). Em Benguela, as crianças passam grande parte do tempo a brincar na rua e põem à boca objetos e as mãos que podem ter estado em contacto com o solo contaminado e podem mesmo ingerir solo (geofagia) e daí apresentarem um risco maior.

A IARC (1993) considerou o Pb como possivelmente carcinogénico e este elemento ultrapassou o limite máximo aceitável estabelecido pela USEPA ($CR > 10^{-4}$) para crianças (tabela 24). A exposição a níveis elevados de Pb, um elemento não essencial aos seres vivos, leva à inibição das enzimas, danos no sistema nervoso, esquelético, imunitário, circulatório alterando a produção de hemoglobina, endócrino afetando os rins, e pode ainda reduzir a fertilidade masculina (Rocha, 2009; Costa, 2015; Wu *et al.*, 2018). Os solos da região de Benguela estão poluídos em metais pesados especialmente em Pb e Cd, mas esta poluição do solo não apresenta valores elevados de HI e CR.

5. Conclusões

Os solos de Benguela foram classificados de arenosos a franco-arenosos, pois possuem sempre baixa quantidade de argila e a maioria dos solos urbanos são mais arenosos e os solos agrícolas são os mais argilosos.

Os solos urbanos de Benguela e de Lubango apresentaram valores de pH ($\bar{x} = 8,3$ e $7,4$ respetivamente) e de CE ($\bar{x} = 2677$ e $881,9 \mu\text{S/cm}$ respetivamente) mais elevados do que os valores de pH ($\bar{x} = 8,1$ e $6,3$ respetivamente) e de CE ($\bar{x} = 1277$ e $29,3 \mu\text{S/cm}$ respetivamente) dos solos naturais das mesmas regiões.

Nos solos de Benguela a média do carbono orgânico nos solos urbanos ($\bar{x} = 1,11$) é superior à média dos solos naturais ($\bar{x} = 0,32$) e dos solos agrícolas ($\bar{x} = 0,60$). Podemos concluir que houve um aumento significativo nos valores pH, CE e da MO nos solos urbanos quando comparados aos não urbanos.

Apesar dos processos de urbanização serem semelhantes nas 3 cidades em estudo, os solos urbanos de Benguela foram os que apresentaram maiores valores de FE e PLI para Cd, Cu, Pb, Sb, Sn e Zn. Tal deve-se às características geológicas, morfológicas, geográficas e climáticas de Benguela e ao pH do solo, que potencializa a precipitação e a adsorção destes elementos nos solos. Este estudo demonstrou como a litologia da rocha-mãe, os tipos de solos e as suas características influenciam o grau de contaminação dos solos urbanos, em cidades que possuem influências antrópicas semelhantes.

De acordo com a Lei Italiana o Sn é o metal que causa maior poluição nas três regiões em estudo. De acordo com o projecto de Lei Português, nos solos de Humpata, o Zn é o metal que causa maior poluição, enquanto o Cd é o metal que causa maior poluição, seguido do Pb e Zn nos solos de Benguela e nos solos de Lubango, o Ba é o metal que causa maior poluição, seguido do Co, mas nestes solos é o Mn que causa maior poluição de acordo com a lei Sul-africana.

O índice de risco para Cd, Cu, Pb e Zn foi sempre maior para as crianças do que para os adultos, por via de ingestão e por terem um peso corporal mais baixo, mas o risco não cancerígeno para estes metais e o risco de cancro para o Cd são insignificantes. Deste modo os solos da região de Benguela estão poluídos em metais pesados, especialmente em Pb e Cd, mas esta poluição do solo não apresenta valores elevados de risco. O risco de cancro para as crianças, por ingestão de solo contaminado

em Pb, metal potencialmente cancerígeno, é significativo, ultrapassando o limite máximo aceitável estabelecido pela USEPA ($CR > 10^{-4}$).

A continuação da rápida e caótica expansão da cidade de Benguela sem a implementação de sistemas recolha de resíduos industriais e domésticos, sem a construção de redes de esgotos e de distribuição de eletricidade em toda a área urbana pode levar ainda a concentrações mais altas destes metais pesados nos solos, as quais poderão trazer problemas de saúde à população residente. É da competência das autoridades nacionais e regionais ter estes aspetos em consideração na planificação, para além de terem a obrigação de implementar regras políticas para a proteção deste recurso natural tão importante.

6. Referências Bibliográficas

- Alekseenko, V. e Alekseenko, A., (2014). – “The abundances of chemical elements in urban soils”. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 147, pp. 245– 249.
- Alexandre, C. (2012). – “Funções, usos e degradação do solo”. Disponível em: http://esa.ipb.pt/pscdrt/images/pdf/Carlos_Alexandre_UEvora.pdf. [Acedido em 08/03/2018].
- Andersson, M., Ottesen, R. T. e Langedal, M. (2010). – “Geochemistry of urban surface soils - Monitoring in Trondheim, Norway”. *Geoderma*, vol. 156, no. 3–4, pp. 112–118.
- Andrews, J.E., Brimblecombe, P., Jickells, T.D., Liss, P.S. e Reid, B. (2003). – “An Introduction to Environmental Chemistry”. Wiley-Blackwell, 318 p.
- António, A. (2016). – “A influência da urbanização no pH e na condutividade elétrica de solos de diferentes regiões de Angola (Benguela, Kuito e Lubango)”. Tese de Mestrado em Geociências, não publicada, Universidade de Coimbra, Coimbra, 55 pp.
- Araújo, A. G., Perevalof, O. V. e Jukov, R. A. (coord.) (1988). – “Carta Geológica de Angola”. Instituto Nacional de Geologia. Escala 1:1 000 000.
- Argyrazi, A., Kelepertzis, E., Botsou, F., Paraskevopoulou, V., Katsikis, I. e Trigoni, M. (2018). – “Environmental availability of trace elements (Pb, Cd, Zn, Cu) in soil from urban, suburban, rural and mining areas of Attica, Hellas”. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 187, pp. 201-213.
- Asabere, S.B., Zeppenfeld, T., Nketia, K.A. e Sauer, D. (2018). – “Urbanization Leads to Increases in pH, Carbonate, and Soil Organic Matter Stocks of Arable Soils of Kumasi, Ghana (West Africa)”. *Frontiers in Environmental Science*. 6:119. doi: 10.3389/fenvs.2018.00119.
- Barbieri, M., Nigro, A. e Sappa, G. (2015). – “Soil contamination evaluation by Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) “. *Senses and Sciences*. vol. 2, no. 3, pp. 94-97 .DOI: 10.14616/sands-2015-3-9497.
- Batista, M. J. A. F. (2003) – “Comportamento de elementos químicos no sistema rocha-solo-sedimento-planta na área mineira de Neves Corvo: Implicações Ambientais”. Dissertação de Doutoramento em Geociências. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro. 406 pp.
- Batjes N., Bindraban P. e Reuter H. (2013). – “Towards improved soil information for quantification of environmental, societal and economic sustainability”. Report. - ISRIC World Soil Information, no. 2013/05, p. 44 pp.
- Brevik, E. C. e Burgess, L. C. (2014). – “The Influence of Soils on Human Health”. *Nature Education Knowledge*.
- Buat-Menard R.A. e Chesselet, R. (1979). – “Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter”. *J. Earth Planet. Sci.* vol. 42, pp. 398–411.
- Buttafuoco, G., Guagliardi, I., Tarvainen, T. e Jarva, J. (2017). – “A multivariate approach to study the geochemistry of urban topsoil in the city of Tampere, Finland”. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 181, pp. 191–204.
- Carvalho, H. (1982). – “Carta Geológica de Angola à escala 1: 1 000 000”. Pub. Inst. Inv. Cient. Tropical, Lisboa.

- Carvalho, P. C. S., Neiva, A. M. R., Silva, M. M. V. G. e Santos, A. C. T. (2017). – “Human health risks in an old gold mining area with circum-neutral drainage, central Portugal”. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 39, no. 1, pp. 43–62.
- CENSO (2014). – “Resultados definitivos do Recenseamento geral da população e da Habitação de Angola 2014. Instituto Nacional de Estatística. Governo de Angola”. Março de 2016. [Acedido em junho de 2019].
- Chisingui, A. V. (2017). – “Análise da paisagem e das alterações de uso/ocupação do solo no Lubango e arredores”. Tese de Doutoramento em Ciências do Ambiente - Universidade de Évora, Évora. 243 pp.
- Costa, H. T. D. (2015). – “Concentração de metais pesados nos solos utilizados para agricultura urbana na cidade de Lisboa”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior de Agronomia – Universidade de Lisboa, Lisboa. 141 pp.
- Davidson, C. M., Urquhart, G. J., Ajmone-Marsan, F., Biasioli, M., Duarte, A., Díaz-Barrientos, E., Grčman, H., Hossack I., Hursthouse A. S., Madrid, L., Rodrigues, S. e Zupan, M. (2006). – “Fractionation of potentially toxic elements in urban soils from five European cities by means of a harmonised sequential extraction procedure”. *Analytica Chimica Acta*, vol. 565, pp. 63-72.
- Decreto, M. (1999). – “Decreto Ministeriale nº 471 del 25/10/1999”. *Gazz. Uff. Suppl. Ordin*, nº 293 del 15/12/1999.
- DEA (Department of Environmental Affairs – Republic Of South Africa (2010). – “Framework for the Management of Contaminated Land”.
- Edmondson, J.L., Davies, Z.G., McHugh, N., Gaston, K.J. e Leake, J.R. (2012). – “Organic carbon hidden in urban ecosystems”. *Scientific Reports*. 2, 963. DOI:10.1038/srep00963.
- Effland, W. R. e Pouyat, R. V. (1997). – “The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas”. *Urban Ecosystems*, vol. 1, pp. 217–228.
- Ernst, R.E., Pereira, E., Hamilton, M.A., Pisarevsky, S.A., Rodrigues, J., Tassinari, C.C.G., Teixeira, W., Van-Dunem, V. (2013). – “Mesoproterozoic intraplate magmatic ‘barcode’ record of the Angola portion of the Congo Craton: Newly dated magmatic events at 1505 and 1110 Ma and implications for Nuna (Columbia) supercontinent reconstructions”. *Precambrian Research*, 230, 103-118.
- FAO (2014). – *World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report, N° 106, Rome.*
- Feio, M. (1981). – “O relevo do sudoeste de Angola. Estudo de Geomorfologia”. *Memórias da Junta de Investigações Científicas do Ultramar. N°67 (Segunda Série). Lisboa. Depósito legal nº 614/82. 326p.*
- Foster, S. (2001). – “The interdependence of groundwater and urbanization in rapidly developing cities”. *Urban Water*, vol. 3, no. 3, pp. 185–192.
- Gaberšek, M. e Gosar, M. (2017). – “Geochemistry of urban soil in the industrial town of Maribor, Slovenia”. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 187, pp. 141–154.
- Gardner, C., Long, D. e Lyons, W. (2017). – “Urban Geochemistry”. *Applied Geochemistry*, vol. 83, pp. 1–2.

- Guiraud, M., Buta-Neto, A. e Quesne, D. (2010). – “Segmentation and differential post-rift uplift at the Angola margin as recorded by the transform-rifted Benguela and oblique-to-orthogonal-rifted Kwanza basins”. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 27, no. 5, pp. 1040-1068.
- Golden, N., Morrison, L., Gibson, P.J., Potito, A.P. e Zhang, C. (2015). – “Spatial patterns of metal contamination and magnetic susceptibility of soils at an urban bonfire site”. *Applied Geochemistry*, vol. 52, pp. 86–96.
- Gouveia, M.M.L.C.G.P., Silva, M.M.V.G. e Carvalho, P.C.S. (2018). – “Geochemical Modifications in a Calcic Cambisol by the Impact of an Old Foundry (Coimbra, Central Portugal)”. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. Vol. 0, N^o. 0, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1080/15320383.2018.1494699> .
- Guo, G., Wu, F., Xie, F. e Zhang, R. (2012). – “Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China”. *Journal of Environmental Sciences*, vol. 24, no. 3, pp. 410–418.
- Horváth, A., Szűcs, P., Bidló, A. (2014). – “Soil condition and pollution in urban soils: evaluation of the soil quality in a Hungarian town”. *J Soils Sediments*. DOI 10.1007/s11368-014-0991-4.
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (1993). – “Some Naturally Occurring Substances: Food Items and Constituents, Heterocyclic Aromatic Amines and Mycotoxins”. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. World Health Organization, vol. 56, Lyon (France).
- INE, 2018. Instituto Nacional de Estatística (Angola). In Portuguese and available from www.ine.gov.ao/xportal/xmain?xpid=ine.
- Instituto Nacional de Estatística (2014). – “Resultados preliminares do recenseamento geral da população e habitação de Angola”.
- Islam, S., Ahmed, K. e Al-Mamun, H. (2015a). – “Distribution of trace elements in different soils and risk assessment: A case study for the urbanized area in Bangladesh”. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 158, pp. 212-222.
- Islam, M.S., Ahmed, M.K., Al-Mamun, M.H. e Masunaga, S. (2015b). – “Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh”. *Science of the Total Environment*. vol. 512–513, pp. 94–102.
- Jacinto, M.M.P.L. (2012). – “A problemática da água em Angola (1975-2010): Caso de estudo – Luanda”. Tese de Mestrado em Gestão do Território, Área de Especialização em Ambiente e Recursos Naturais. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas – Universidade Nova de Lisboa.
- Jafari, A. J., Kermani, M., Kalantary, R. R. e Arfaeinia, H. (2018). – “The effect of traffic on levels, distribution and chemical partitioning of harmful metals in the street dust and surface soil from urban areas of Tehran, Iran”. *Environmental Earth Sciences*. 77: 38. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7226-8>.
- Jia, Z., Li, S. e Wang, L. (2018). – “Assessment of soil heavy metals for eco-environment and human health in a rapidly urbanization area of the upper Yangtze Basin”. *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1–14.
- Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, E., Montanarella, L., Spaargaren, O., Thiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M. e Zougmore, R. (eds.) (2013). – “Soil Atlas of

- Africa". European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp.
- Kabata-Pendias, A. e Pendias, H. (2001). – “Trace elements in soils”. 3rd Edition. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., CRC Press LLC.
- Khorshid, M.S.H. e Thiele-Bruhn, S. (2016). – “Contamination status and assessment of urban and non-urban soils in the region of Sulaimani City, Kurdistan, Iraq”. *Environmental Earth Sciences*. 75:1171. DOI 10.1007/s12665-016-5972-z.
- Kim, H. S., Kim, Y. J. e Seo, Y. R. (2015). – “An overview of carcinogenic heavy metal: molecular toxicity mechanism and prevention”. *Journal of Cancer Prevention*, vol. 20, nº 4, pp. 232-240.
- Laneiro, C.F.M. (2012). – “Avaliação da biodisponibilidade de metais em solos contaminados por atividades mineiras: métodos químicos, bioquímicos e ecotoxicológicos”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Instituto Politécnico de Beja - Escola Superior Agrária, Beja.
- Luo, X., Yu, S., Zhu, Y. e Li, X. (2012). – “Trace metal contamination in urban soils of China”. *Science of the Total Environment*, vol. 421–422, pp. 17–30.
- Machender, G., Dhakate, R., Prasanna, L. e Govil, P. K. (2011). – “Assessment of heavy metal contamination in soils around Balanagar industrial area, Hyderabad, India”. *Environmental Earth Sciences*, vol. 63, pp. 945–953. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0763-4>.
- Marques, M.M. (1977). – “Esboço das grandes unidades geomorfológicas de Angola”. *Garcia de Orta*, 2(1), 41-43.
- McCourt S., Armstrong R.A., Jelsma H., Mapeo R.B.M. (2013). – “New U-Pb shrimp ages from the Lubango region, SW Angola; insight into the Paleoproterozoic evolution of the Angolan Shield, southern Congo Craton, Africa”. *Journal of the Geological Society, London*, 170, 353-363.
- Mehmood, K., Ahmad, H. R., Abbas, R., Saifullah e Murtaza, G. (2019). – “Heavy metals in urban and peri-urban soils of a heavily-populated and industrialized city: Assessment of ecological risks and human health repercussions”. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. DOI: 10.1080/10807039.2019.1601004.
- Mehr, M. R., Keshavarzi, B., Moore, F., Sharifi, R., Lahijanzadeh, A. e Kermani, M. (2017). – “Distribution, source identification and health risk assessment of soil heavy metals in urban areas of Isfahan province, Iran”. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 132, pp. 16–26.
- Muzerengi, C. (2017). – “Enrichment and Geoaccumulation of Pb, Zn, As, Cd and Cr in soils near New Union Gold Mine, Limpopo Province of South Africa”. In: Wolkersdorfer, C., Sartz, L. e Sillanpää M, Häkkinen A (Editors). LUT Scientific and Expertise Publications 13th International Mine Water Association Congress – Mine Water & Circular Economy. Lappeenranta, Finland. 25-30 junho 2017. pp.720-727.
- Nabulo G., Origa, H.O., Nasinyama G.W., Cole, D. (2008). – “Assessment of Zn, Cu, Pb, and Ni contamination in wetland soils and plants in the Lake Vitoria basin”. *Int. J. Environ. Sci. Tecn.* 5, 65-74.
- Nezat, C. A., Hatch, S. A. e Uecker, T. (2017). – “Heavy metal content in urban residential and park soils: A case study in Spokane, Washington, USA”. In: *Applied Geochemistry*, vol. 78, pp. 186–193.
- Pedron F.A., Dalmolin, R.S.D., Azevedo, A.C. e Kaminski, J. (2004). – “Solos Urbanos”. *Ciência Rural*. Santa Maria, vol. 34, pp. 1647-1653.

- Peel, M. C., Finlayson, B. L. e McMahon, T. A. (2007). – “Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification”. *Hydrology and Earth System Science*, vol. 11, pp. 1633-1644.
- Pereira, E., Rodrigues, J.F., Tassinari, C.C.G. e Van-Dúnen, M.V. (2013). – “Geologia da Região de Lubango, SW de Angola. Evolução no contexto do cratão do Congo”. Instituto Geológico de Angola (IGeo), 1ª edição.
- Pereira, E., Tassinari, C.G., Rodrigues, J.F., Van-Dúnen, M.V. (2011). – “New data on the deposition age of the volcano-sedimentary Chela Group and its Eburnean basement: implications to post-Eburnean crustal evolution of the SW of Angola”. *Comunicações Geológicas*, 98, 29-40.
- Pinto, M.M.S.C., Marinho-Reis, A.P., Almeida, A., Ordens, C.M., Silva, M.M.V.G., Freitas, S., Simões, M.R., Moreira, P.I, Dinis, P.A., Diniz, M.L., Silva, E.A.F. e Melo, M.T.C. (2017a). – “Human predisposition to cognitive impairment and its relation with environmental exposure to potentially toxic elements”. *Environmental Geochemistry and Health*. DOI 10.1007/s10653-017-9928-3.
- Pinto, M.M.S.C., Silva, M.M.V., Silva, E.A.F. e Marinho-Reis, A.P. (2017b). – “The Cancer and Non-Cancer Risk of Santiago Island (Cape Verde) Population due to Potential Toxic Elements Exposure from Soils”. *Geosciences*, vol. 7, no. 3, 78. DOI: 10.3390/geosciences7030078.
- Pouyat, R., Szlavecz, K., Yesilonis, I. D., Groffman, P. M. e Schwarz, K. (2010). – “Chemical, Physical, and Biological Characteristics of Urban Soils”. *Agronomy Monograph*, vol. 55, pp. 119-152.
- Proshad, R., Kormoker, T. e Islam S. (2019). – “Distribution, source identification, ecological and health risks of heavy metals in surface sediments of the Rupsa River, Bangladesh”. *Toxin Reviews*. DOI: 10.1080/15569543.2018.1564143.
- ProSolos (2015). Projecto de decreto-lei solos contaminados. Em consulta pública.
- Rocha, A. F. (2009). – “Cádmio, Chumbo, Mercúrio - A problemática destes metais pesados na Saúde Pública?”. Monografia em Ciências da Nutrição - Faculdade de Ciências da Nutrição e Alimentação da Universidade do Porto, Porto. 63 pp.
- Rudnick, R. L. e Gao, S. (2003). – “Composition of the Continental Crust. in *Treatise on Geochemistry*, vol. 3, pp. 1-64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
- Saque, P. (2013). – “Estudo da erosão costeira de arribas rochosas entre S. António e Caota (Benguela)”. Tese de Mestrado em Geociências - Universidade de Coimbra, não publicada, Coimbra.
- Sampaio, E. (2011). – “O solo e as suas funções”. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4413/1/O%20solo%20e%20suas%20fun%C3%A7%C3%B5es.pdf>. [Acedido em 08/03/2018].
- Simões, I.B. (2012). – “Influência de actividades mineiras na acumulação de elementos traço em culturas utilizadas na alimentação humana: o estudo de caso de minas situadas na Faixa Piritosa Ibérica”. Tese de Mestrado em Engenharia Alimentar. Instituto Politécnico de Beja - Escola Superior Agrária, Beja.
- Silva, M.M.V.G., Gomes, E.M.C., Isaías, M., Azevedo, J.M.M. e Zeferino, B. (2017). – “Spatial and seasonal variations of surface and groundwater quality in a fast-growing city: Lubango, Angola”. *Environmental Earth Sciences*. 76:790. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7149-9>.

- Silva, M.M.V.G.; Carvalho, P.C.S., António, A., Luís, A.C.M., (2018). – “Geochemistry of urban soils in a fast-growing city – Benguela (Angola)”. Submitted to *Environmental Earth Sciences*.
- Silva, M.M.V.G., Pinto, M.C., Dinis, P.A. e Mandavela, L. (2019). – “Geochemistry of Urban Soil in the Fast-Growing Kuito City (Angola)”. In: Doronzo D., Schingaro E., Armstrong-Altrin J., Zoheir B. (eds) *Petrogenesis and Exploration of the Earth’s Interior. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development)*. Springer, Cham. pp 133-135.
- Škrbić, B. e Mladenović, N. (2013). – “Distribution of heavy elements in urban and rural surface soils: the Novi Sad city and the surrounding settlements, Serbia”. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 185, pp. 457–471.
- Soil Atlas of Europe, European Soil Bureau Network European Commission, 2005, 128 pp Office for Official Publications of the European Communities, L-2995 Luxembourg.
- The World Bank Group (2018). – “Climate Change Knowledge Portal (CCKP). Disponível em: http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=country_historical_climate&ThisRegion=Africa&ThisCCCode=AGO. [Acedido em 20/04/2018].
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2001). – “Risk assessment guidance for superfund: Volume III—Part A, process for conducting probabilistic risk assessment”. Washington, DC: US Environmental Protection Agency [EPA 540-R-02-002].
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2002). – “Calculating upper confidence limits for exposure point concentrations at hazardous waste sites”. Office of Emergency and Remedial Response. December. Publication 9285.6-10.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2011). Exposure factors handbook 2011 edition (Final). <http://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252>.
- Vodyanitskii, Y. N. (2015) – “Organic Matter of Urban Soils: A Review”. *Eurasian Soil Science*. vol. 48, nº 8, pp. 802–811. DOI: 10.1134/S1064229315080116.
- Wu, W., Wu, P., Yang, F., Sun, D., Zhang, D. e Zhou, Y. (2018) – “Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility”. *Science of the Total Environment*, vol. 630, pp. 53–61.
- Xia, X., Chen, X., Liu, R. e Liu, H. (2011). – “Heavy metals in urban soils with various types of land use in Beijing, China”. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 186, pp. 2043–2050.
- Yang, J. e Zhang, G. (2015). – “Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review”. *Soil Science and Plant Nutrition*, vol. 61, pp. 30–46. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>.
- Yuan, G., Sun, T., Han, P., Li, J. e Lang, X. (2014). – “Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China”. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 136, pp. 40-47.