

MODELAÇÃO GEOESTATÍSTICA NA INVESTIGAÇÃO *IN SITU* E AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM ÁREAS INDUSTRIAIS

GEOSTATISTICAL MODELING FOR ENVIRONMENTAL SITE INVESTIGATION AND EVALUATION OF INDUSTRIAL SITES

Brito, M. G., *CIGA, FCT/UNL - Caparica – Portugal, mgb@fct.unl.pt*

Costa, C.N., *CIGA, FCT/UNL - Caparica – Portugal, cnc@fct.unl.pt*

Vendas, D. F., *CIGA, FCT/UNL - Caparica – Portugal, daniel@ciga.fct.unl.pt*

RESUMO

Nesta comunicação é apresentada uma metodologia faseada para a avaliação da contaminação de terrenos em áreas industriais degradadas, que visa a maximização do ratio benefício-custo das operações de investigação *in situ*, através da utilização de modelos da geoestatística e SIG, na caracterização espacial do grau de contaminação dos solos e águas subterrâneas. Esta metodologia foi implementada numa área industrial de 30ha do Parque Empresarial do Barreiro, contaminada com metais pesados após cerca de 100 anos de actividades industriais de química e metalurgia pesada.

ABSTRACT

It is presented an integrated methodology for the evaluation of land contamination on derelict industrial sites that aims for the definition of environmental action towards environmental site rehabilitation, taking into account best benefit/cost ratio for site investigation, through the integration of geostatistical models in the various stages of site investigation. The methodology was implemented at an old industrial site, contaminated by heavy metals due a hundred years chemical and metallurgical activity.

1. METODOLOGIA

A avaliação do grau de contaminação e o subsequente tratamento de áreas contaminadas visa minimizar os riscos para a saúde a que está sujeita a população e proteger o meio ambiente. Nesta comunicação apresenta-se uma metodologia de investigação faseada que integra de uma forma sistemática a modelação geoestatística de forma a contribuir para a optimização dos recursos técnicos e económicos decorrentes das acções de caracterização do local e respectivas medidas de mitigação. Desta forma, para a investigação de um local contaminado, propõe-se uma abordagem que integre modelos geoestatísticos de estimação espacial das características do local, nas seguintes 3 etapas de investigação [1]:

Etapa 1 – Avaliação da contaminação dos terrenos – em 3 fases sequenciais:

fase 1 – fase de investigação preliminar

fase 2 – fase de investigação exploratória

fase 3 – fase de investigação detalhada

Etapa 2 – Avaliação do risco de contaminação

Etapa 3 – Selecção das medidas de remediação

Os resultados da modelação geoestatística irão contribuir para o planeamento e racionalização dos trabalhos de campo a realizar na fase de investigação da contaminação, para a

caracterização das plumas de contaminação e estimação do volume de materiais a tratar, para o zonamento de áreas de risco e, consequentemente, para a definição das acções de remediação, com base nas quantidades e tipologia dos materiais.

1.1 Etapa 1 – Avaliação da contaminação dos terrenos

Tem por objectivo a caracterização da extensão e tipologia da contaminação do local. Inclui os trabalhos de investigação da contaminação *in situ*, nomeadamente a recolha, análise e interpretação de informação do local, com vista à elaboração de um modelo de contaminação.

Dados os elevados custos envolvidos nas operações de recolha e amostragem dos terrenos, esta etapa deverá ser realizada de forma faseada de modo a orientar o planeamento e gestão dos recursos envolvidos nos trabalhos de investigação *in situ*. Assim sendo, propõem-se 3 fases seqüências de investigação:

- a) fase de investigação preliminar – tem por objectivo a identificação das áreas potenciais focos de contaminação (*hot spots*) com recurso a métodos de investigação expeditos e de baixo custo cujos resultados permitam orientar os trabalhos de prospecção a realizar numa fase subsequente de investigação exploratória;
- b) fase de investigação exploratória – engloba a caracterização do meio a investigar (solos, resíduos, sedimentos, águas) através da recolha de amostras e identificação da tipologia e extensão das manchas de contaminação. O refinamento dos limites das áreas contaminadas deverá ser realizado com base em novos elementos recolhidos, numa fase posterior de investigação detalhada;
- c) fase de investigação detalhada – tem por objectivo a definição do modelo de risco de contaminação, a identificação da extensão e volume do meio contaminado. O modelo de contaminação resultante servirá de base para a etapa posterior de avaliação do risco do local.

Nas figuras 1, 2 e 3 apresenta-se, de forma esquemática, o diagrama de procedimentos utilizados em cada uma das fases de investigação (adaptado de CETESB, (1999) *in* [1]).

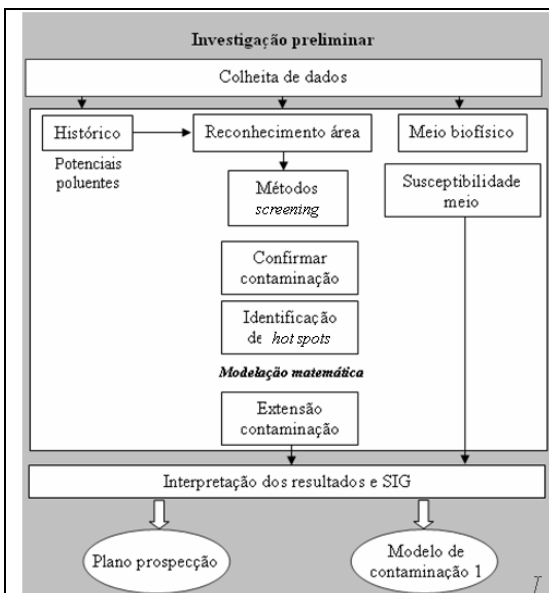


Figura 1 – Metodologia de investigação preliminar

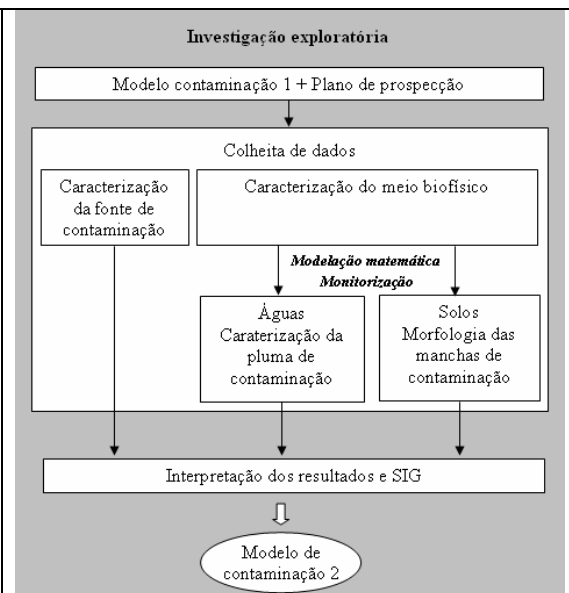


Figura 2 – Metodologia de investigação exploratória

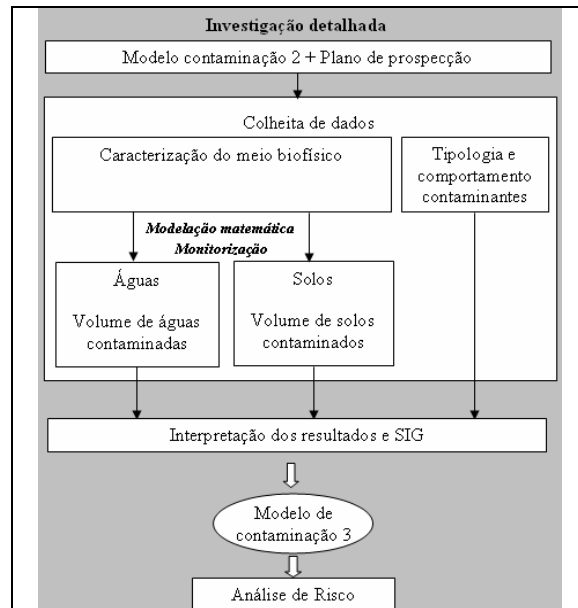


Figura 3 – Metodologia de investigação detalhada

A integração de métodos de estimação geoestatística nas 3 fases da investigação permite o mapeamento das áreas contaminadas e respectivas zonas de incerteza contribuindo para a racionalização dos trabalhos a realizar nas etapas de estudo posteriores.

O modelo de contaminação final (modelo de contaminação 3 na figura 3) resulta do refinamento do modelo conceptual inicial (modelo de contaminação 1 na figura 1) durante as várias fases de investigação. Após confirmação da existência de contaminação no local, a etapa seguinte é a avaliação do risco, para a saúde e para o ambiente.

1.2 Etapa 2 – Análise de risco para a saúde e para o ambiente

Tem por objectivo avaliar os efeitos nefastos da contaminação na saúde humana e no ambiente, para diferentes cenários de uso futuro do local. Esta etapa serve de base para a tomada de decisão quanto às acções de remediação a serem implementadas de modo a promover a requalificação da área.

A *Avaliação de Risco* é uma ferramenta utilizada tanto, para estimar o perigo para a saúde humana e meio ambiente que um determinado poluente pode causar, como também para tomar decisões, elaborar acções e metas de remediação e avaliar áreas contaminadas [2]. Esta avaliação exige a definição de um modelo conceptual de contaminação que assuma a existência de três entidades distintas: [*Fonte (ou origem) → Trajecto → Alvo ou Receptor*] [3], em que, a origem ou *fonte* de contaminação é todo o local cujas concentrações de elementos poluentes estejam acima de valores de referência; o *trajecto* ou meio de transferência da contaminação, que assume a dupla condição de transmissor/barreira e receptor primário; o *alvo* (ou receptor secundário) é, para além do meio biofísico, o meio antropogénico. Neste estudo é proposta uma metodologia em 2 etapas sequenciais [1], que se apresenta, de forma esquemática, na figura 4:

Etapa 1 – Cálculo do *risco cancerígeno* e *perigosidade* associada à contaminação dos poluentes no solo, em cada ponto amostrado, para diferentes cenários e meios de exposição;

Etapa 2 – Zonamento das áreas de risco e perigosidade através da estimação geostatística dos valores de risco calculados em cada ponto amostrado.

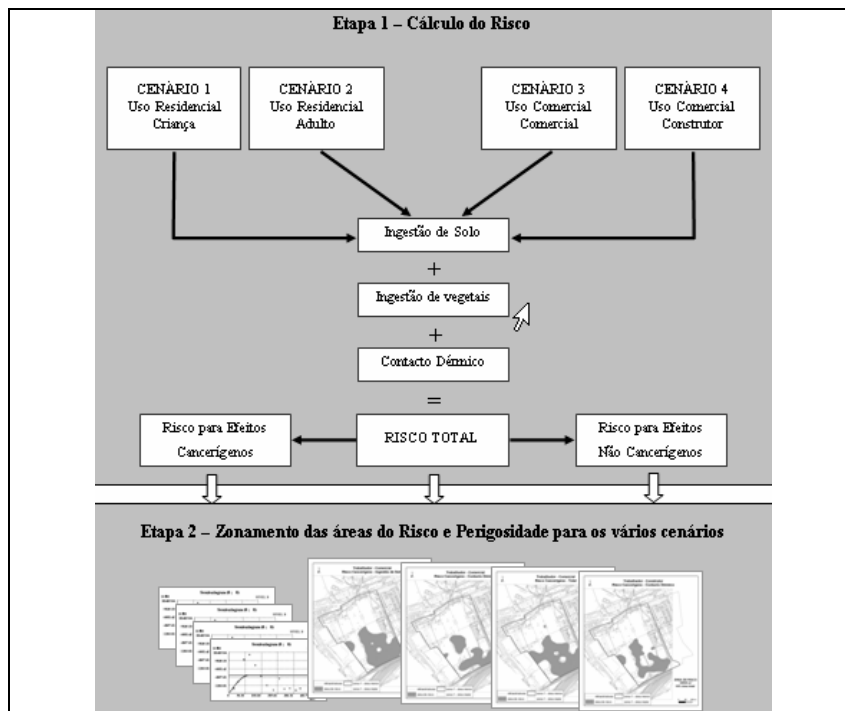


Figura 4 – Metodologia genérica para análise de risco (BRITO, 2005)

A primeira etapa utiliza a metodologia desenvolvida pela *Agência de Protecção Ambiental Americana*, [4, 5]. A caracterização do risco e perigosidade para a saúde é feita separadamente para compostos químicos cancerígenos (risco cancerígeno) e não cancerígenos (em termos de perigosidade). No caso dos riscos serem inaceitáveis para a saúde e para o ambiente estabelecem-se as bases para a elaboração de um plano de descontaminação que detalhe as medidas de recuperação a adoptar para a superação do risco e a selecção das melhores metodologias disponíveis para o tratamento dos terrenos.

1.3 Etapa 3 – Medidas de remediação do local

A remediação de um sítio contaminado tem como objectivos genéricos fundamentais, não só proteger a saúde pública e o ambiente, como também reabilitar o local afectado, com vista a possibilitar o uso futuro do solo, em condições ambientalmente favoráveis. Assim, um dos factores a ter em consideração quando se pretende fazer a reabilitação de um local degradado é definir o seu uso futuro, de forma a procurar as medidas de remediação adequadas e capazes de minimizar o risco no receptor.

A selecção das estratégias possíveis de remediação deverão ter em consideração: (i) a redução do risco do local - que mede até que ponto a acção de remediação reduz o risco para os humanos, ecossistemas e outros alvos no local; (ii) o mérito ambiental - que mede o balanço (positivo/negativo) da acção de remediação em termos ambientais em que o uso de recursos, energia, água, espaço e poluição de outros meios é tido em consideração e; (iii) a redução dos custos – temporais e de operacionalidade.

2. APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO

A metodologia foi implementada numa área industrial com cerca de 30ha., situada na zona industrial do Barreiro que, devido ao rápido crescimento urbano no concelho, será objecto de requalificação ambiental. Não se pretende nesta comunicação descrever em pormenor os trabalhos realizados mas apenas ilustrar a utilização da metodologia anteriormente descrita.

2.1 Etapa 1 – Avaliação da contaminação dos terrenos

2.1.1 Fase de investigação preliminar

Esta fase de investigação *in situ* teve por objectivo o reconhecimento preliminar do local e a identificação das áreas potenciais focos de contaminação (*hot spots*) de forma a orientar os trabalhos de prospecção a executar na fase seguinte. Nesta etapa foram realizados os seguintes trabalhos:

- a) Colheita de dados históricos:
Levantamento histórico de actividades e processos industriais, matérias primas utilizadas e resíduos produzidos;
- b) Avaliação das características do terreno:
Levantamento topográfico, de estruturas enterradas (através da utilização de métodos de georadar), geológico e hidrogeológico;
- c) Identificação espacial de *hot spots* através da utilização de equipamentos expeditos de *screening* (varrimento), tais como:
 - espectroradiómetro portátil para a identificação de metais pesados na superfície do terreno (NITON XLi700), através de fluorescência de raio X;
 - aparelho portátil (PID- *Photovac* 2020) para a identificação de compostos orgânicos voláteis (COV's) nos solos e infraestruturas,
 - métodos de prospecção geofísica de resistividade eléctrica e electromagnética (EM31), de baixo custo de aquisição de dados para a identificação de concentrações anómalas de metais e sais dissolvidos, nas zonas saturadas e não saturadas do terreno.

Na figura 5 ilustra-se o equipamento *NITON XLi700* utilizado para a leitura expedita da concentração de metais nos solos, em 83 locais na superfície do terreno e na figura 6, a título ilustrativo, o mapa estimado dos valores de concentração de Cu na superfície do solo.

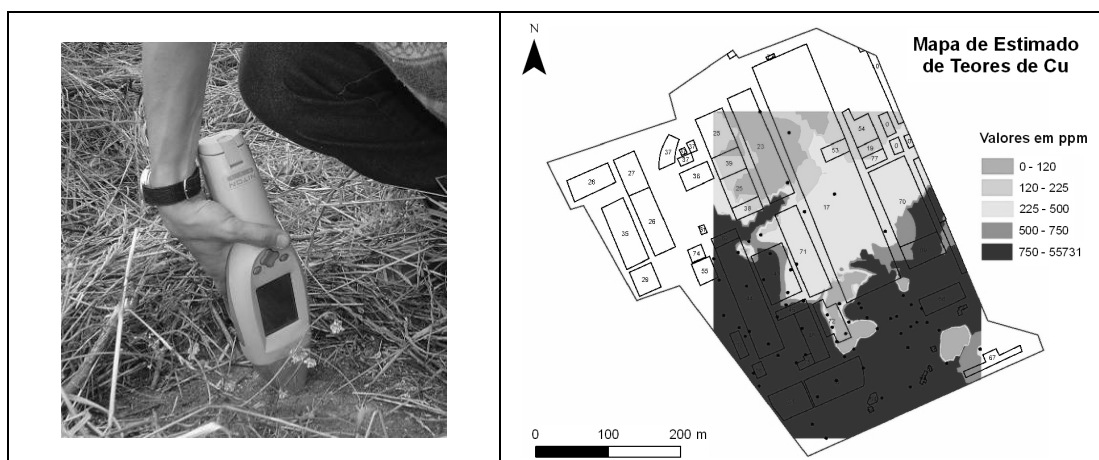


Figura 5 – Medição de metais pesados no solo com o NITON XLi 700

Figura 6 – Mapa estimado de teores De Cu no solo

Na figura 7 apresentam-se, a título ilustrativo, 10 dos 12 perfis de resistividade eléctrica realizados para detecção da concentrações anómalas de sais dissolvidos e metais na matriz do terrenos. O espaçamento dos perfis foi de 50 em 50 metros o que permitiu uma profundidade de investigação até cerca de 13.5 metros.

Na figura 8 apresentam-se os valores de condutividade electromagnética média do meio, medidos com o equipamento *GEONIX EM31 DL* pelo método *EM31*, em 19 perfis espaçados de 25 metros, que permitiu a detecção da concentrações anómalas de sais e metais na zona saturada dos terrenos, aos 3 e 6 metros de profundidade.

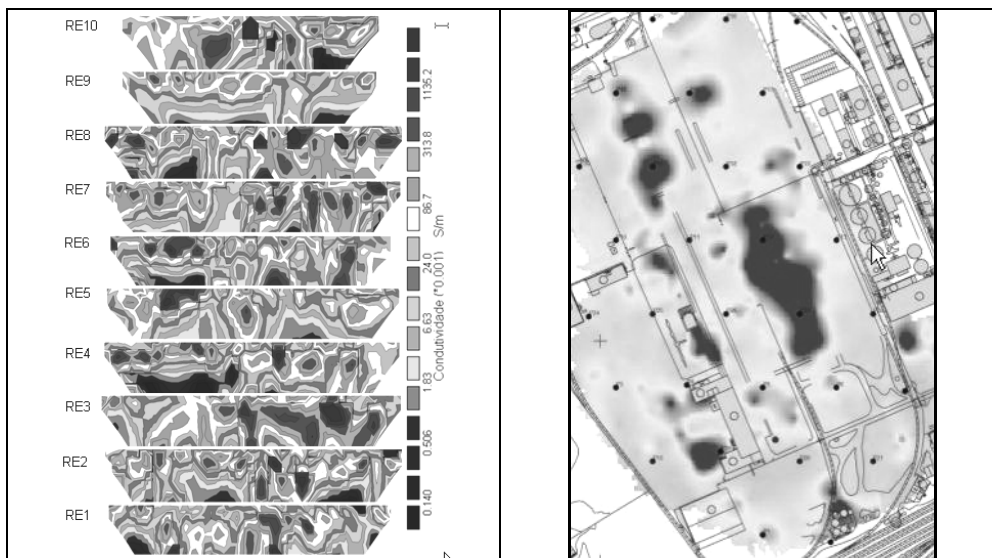


Figura 7 – Perfis de resistividade eléctrica

Figura 8 – Condutividade electromagnética

Como se pode observar na figura 7, os terrenos apresentam em profundidade grande heterogeneidade espacial nas suas propriedades eléctricas o que significa que existe grande variabilidade na concentração de metais e sais dissolvidos. Estes perfis fornecem informação indirecta, não só sobre a ocorrência de metais nos solos como podem também dar indicações sobre a presença de infraestruturas enterradas. Relativamente à figura 8 pode referir-se que existem zonas onde a condutividade é muito elevada (relativamente aos valores de *background*, que variam entre 40 a 60 mS/m) o que pressupõe a existência de elevadas concentrações de metais e sais dissolvidos nas zonas saturadas do solo. A informação recolhida nesta fase de investigação serviu de base para orientar a elaboração do plano de investigação *in situ* a realizar na fase seguinte.

Assim, para a definição da geometria e malha de amostragem foi utilizado o *software* *FIELDS* [6], (que se baseia-se em estudos probabilistas [7] para a estimação do número de locais a amostrar consoante a dimensão e geometria dos focos de contaminação) e a informação local recolhida, nomeadamente, o zonamento dos potenciais elementos químicos na superfície dos terreno e o mapeamento das zonas de maior condutividade dos terrenos. Assim, o plano de amostragem de solos considerou, numa primeira fase, a abertura de 41 poços de amostragem (figuras 9 e 10), numa malha triangular com espaçamento médio de cerca de 70 metros, ajustada de forma a cobrir as zonas de ocorrência das maiores concentrações de metais pesados e as áreas onde se observaram os valores mais elevados de condutividade do meio, resultantes da interpretação dos dados de prospecção geofísica.

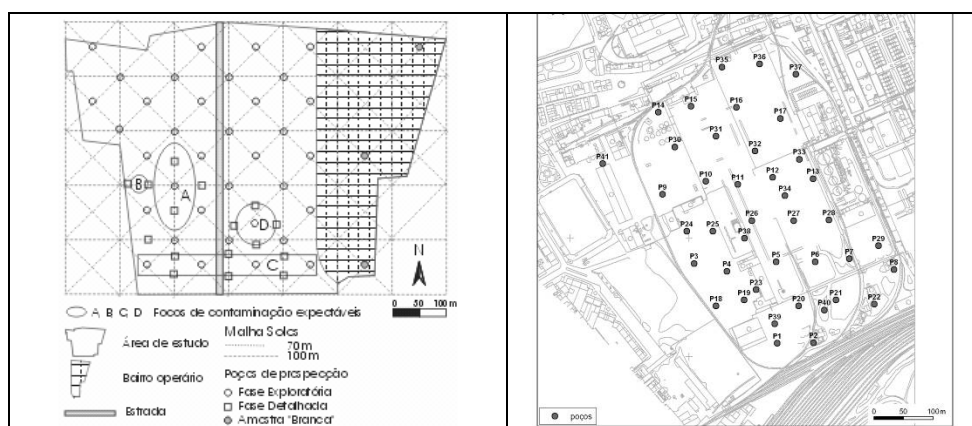


Figura 9 – Plano de amostragem teórico Figura 10 – Plano de amostragem real

A integração da informação num sistema de informação geográfica (SIG) resultou na elaboração de um modelo conceptual preliminar da contaminação (modelo de contaminação 1, conforme figura 1). Esse modelo serviu de base para a definição dos objectivos, métodos e estratégias a utilizar na fase posterior de investigação exploratória.

2.1.2 Fase de investigação exploratória

Esta fase de investigação teve por objectivo a confirmação da hipótese de contaminação através da recolha amostras de solo e águas subterrâneas, utilizadas para a determinação da natureza e concentração das substâncias contaminantes, a identificação do padrão de distribuição espacial da contaminação dos terrenos (solos e águas subterrâneas) e a caracterização do grau de contaminação, tendo por base valores de referência previamente estabelecidos (normas de Ontário, [8]). A metodologia de amostragem de solos e águas seguiu os procedimentos da USEPA, [9, 10]. Os trabalhos de investigação *in situ* tiveram por base o plano de prospecção definido na fase anterior de investigação e incluíram a realização dos seguintes trabalhos:

- abertura de 41 poços de prospecção, até profundidade máxima de 4 metros (solo não saturado) e recolha de 62 amostras de solo, para 3 níveis do terreno;
- realização de 8 sondagens a trado oco, até uma profundidade máxima de 10 metros, com instalação de piezómetros, desenvolvimento e estabilização dos furos e colheita de 8 amostras de água subterrânea. As sondagens foram também aproveitadas para reconhecimento geológico e recolhidas 4 amostras de solo, na zona não saturada do terreno, através de amostrador do tipo SPT (*Standard Penetration Test*);
- a identificação da contaminação química e das características físicas e geotécnicas do meio através de medições *in situ* e ensaios de caracterização laboratoriais (medição do pH e condutividade nas águas e ensaios de granulometria e determinação dos limites de consistência nos solos);
- a caracterização da geometria dos terrenos (naturais e antropogénicos), através da realização de perfis litológicos interpretativos e da estimação geoestatística das propriedades físicas do terreno, para dois níveis do terreno,
- a caracterização do sentido e direcção de fluxo das águas subterrâneas através da utilização de modelos matemáticos de fluxo;
- o refinamento do modelo de contaminação (modelo de contaminação 2, conforme figura 2).

Os mapas de contaminação estimados permitiram a identificação da geometria e extensão do meio contaminado e o refinamento dos trabalhos de investigação a realizar na fase posterior de

investigação detalhada. Na figura 11 apresenta-se, a título ilustrativo, um diagrama tridimensional dos mapas de probabilidade de contaminação nos solos, estimado para dois níveis do terreno.

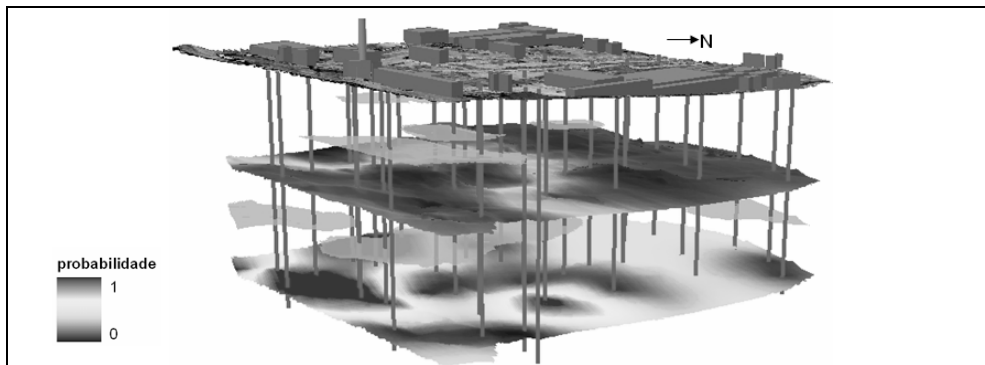


Figura 11 – Diagrama tridimensional de probabilidade de contaminação dos solos

2.1.3 Fase de investigação detalhada

Teve por objectivo o refinamento dos limites das áreas contaminadas. Com base nos resultados obtidos na fase anterior, foram realizados, nas zonas de maior incerteza de contaminação, 11 poços adicionais para a recolha de 23 amostras de solo e realizadas 14 novas sondagens do tipo trado oco, com profundidade máxima até cerca de 14 metros, e recolhidas 14 amostras de água e 15 amostras de solo, até uma profundidade de amostragem máxima de 7.5 metros.

A estimacão da morfologia das áreas contaminadas foi realizada para 3 níveis do terreno, através do método da krigagem da indicatriz [11] do *software Geoms* [12]. O volume de solos contaminados foi calculado para vários cenários de ocupação do local (valores de referência de Ontário para uso residencial e comercial). Esta fase de investigação cumpriu com os seguintes objectivos:

- a determinacão do volume de solos e águas contaminadas;
- o refinamento do modelo conceptual de contaminação.

Na figura 12 apresenta-se o modelo conceptual de risco de contaminação, tendo em consideracão: a fonte – ou origem da contaminação, o trajecto – ou vias de transferéncia e exposicão dos poluentes e o alvo - a populacão residente e o meio receptor.

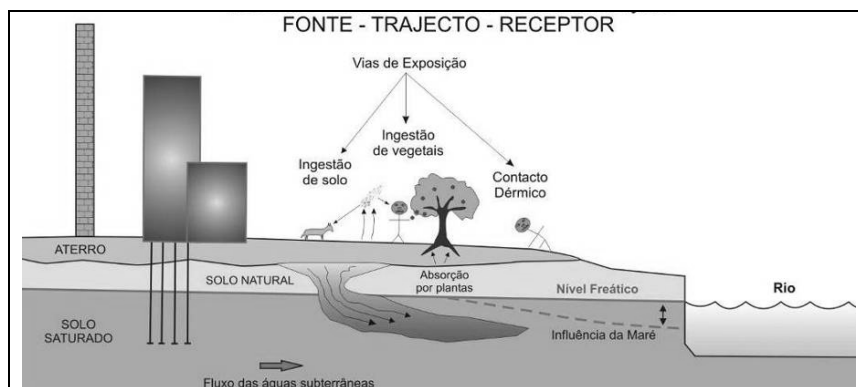


Figura 12 – Esquema do modelo conceptual de contaminação

O modelo de risco de contaminação serviu de base para a avaliação do risco associado à contaminação em face da previsível ocupação futura dos terrenos, que deve concluir se os riscos são aceitáveis para a saúde humana e o ambiente e, no caso afirmativo, quais as medidas de monitorização e controlo que garantam a manutenção desse nível de risco, aceitável a médio e longo prazo

2.2 Etapa 2 – Análise de risco

Com base no modelo de contaminação e nos cenários de ocupação previstos foi calculado, para cada local amostrado, o risco para a saúde para os seguintes cenários de ocupação e exposição:

- a) Cenários de ocupação:
 - Cenário 1 – Uso residencial – adulto e criança;
 - Cenário 2 – Uso comercial – trabalhador comercial e trabalhador construtor;
- b) Vias de exposição: contacto dérmico, ingestão de solo e ingestão de vegetais.

Na etapa de avaliação e cálculo do risco em cada ponto amostrado foi utilizado o *software RISC WorkBench* [13]. A modelação geostatística dos valores de risco obtidos permitiu o zonamento do local em termos de perigosidade e risco. Nas figuras 13 e 14 apresenta-se, a título ilustrativo, o zonamento da área em termos de risco cancerígeno, para os cenários trabalhador comercial e trabalhador construtor, para a exposição por contacto dérmico.



Figura 13 – Trabalhador comercial – zonamento das áreas de risco cancerígeno

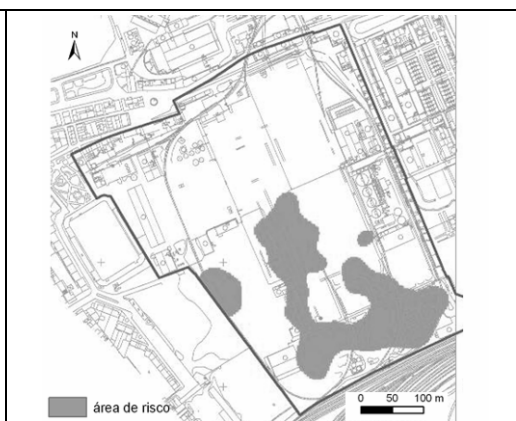


Figura 14 – Trabalhador construtor – zonamento das áreas de risco cancerígeno

O zonamento das áreas de risco permitiu distinguir, dentro da zona industrial, duas subzonas: uma escassamente contaminada e que não apresenta risco para a saúde e uma outra, cuja concentração dos elementos químicos no solo, constitui risco para a saúde. Com base nestes resultados foi possível influenciar a repartição do uso do território, procurando que no projecto de ocupação se privilegie o uso residencial, mais exigente, na subzona onde a análise de risco apresentou índices menos gravosos para os receptores mais sensíveis.

3. CONCLUSÕES

A utilização de uma metodologia de investigação faseada permitiu o conhecimento gradual das condições do local e, conseqüentemente o racionalização dos trabalhos de investigação *in situ* e a redução dos respectivos custos.

A modelação geoestatística utilizada nas várias fases de investigação permitiu, de forma sistemática (i) a racionalização dos trabalhos de campo a realizar, (ii) a caracterização das plumas de contaminação, respectivas áreas de incerteza e volume de materiais a tratar, (iii) o zonamento de áreas de risco e a definição das acções de remediação, com base nas quantidades e definição espacial do tipo de materiais a tratar, conduzindo à optimização dos meios e tecnologias de tratamento a adoptar, para diferentes cenários de ocupação.

4. REFERÊNCIAS

- [1] Brito, M. G., “Metodologia para a avaliação e remediação da contaminação por metais pesados em áreas industriais degradadas”, Dissertação Doutoramento Univ. Nova de Lisboa, (2005), 366p.
- [2] LaGrega, M. D., Buckingham, P.L. & Evans, C., “Hazardous Waste Management and Environmental Resources Management”, 2nd ed. McGraw-Hill, NY, (2001), 1157p.
- [3] Petts, J., Cairney, T. & Smith, M., “Risk-Based Contaminated Land Investigation and Assessment”, John Wiley & Sons, New York (1997), 352p.
- [4] USEPA, “Risk Assessment Guidelines for Superfund – Volume 1 Human Health Evaluation Manual (Part A)”. EPA/540/1-89/002, U. S. Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C. (1989), 278p.
- [5] USEPA, “Integrated Risk Information System (IRIS)”, <http://www.epa.gov/iris/> (1989).
- [6] ESRI, Using ArcView GIS, “The Geographic Information System for Everyone”, ESRI Press, U.S., (1996), VI+250 p.
- [7] GILBERT, R. O., “Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring”. John Wiley (Eds.), New York, (1987), 336 p.
- [8] OMEE, “Guidelines for use at contaminated sites in Ontario”. Revised February 1997. Queen’s Printer Ontario, (1997), XXI + 90 + 68 p.
- [9] USEPA, “Soil Sampling Quality Assurance User’s Guide”. Environmental Monitoring System Lab. Las Vegas, 2nd ed., EPA/600/8-69/046 (1989), 266 p.
- [10] USEPA, (Puls, R. W. & Barcelona, M. J.), “Low-Flow (Minimal Drawdown) Ground-Water Sampling Procedures”. EPA Ground Water Issue, Off. Solid Waste Emerg. Response, Washington, EPA/540/S-95/504 (1996), 12 p.
- [11] Soares A., “Geoestatística Aplicada às Ciências da Terra e do Ambiente”. IST PRESS, (2000), 206 p.
- [12] CMRP-IST, Manual de utilização do geoMS – Geostatistical Modelling Software, (v.1.0). Lisboa, (1999), 137 p.
- [13] WATERLOO HYDROGEOLOGIC, “RISC Workbench User’s Manual. Human Health Risk Assessment Software for Contaminated Sites”. Waterloo, 1 vol. (2001), text (XI + 1-1 – 12-5 p.) & appendix (IX + A1-R 25 p.)

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o acesso à informação, relativa ao caso de estudo, à Administração da Quimiparque, Parque Empresarial do Barreiro.