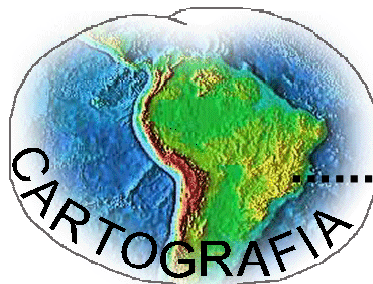


Ricardo Scott Varella Malta

Análise exploratória da radiação de Radônio utilizando ferramentas de geoprocessamento: Caracterização da radiação do ^{222}Rn na RMBH.

XII Curso de Especialização em Geoprocessamento
2010



UFMG
Instituto de Geociências
Departamento de Cartografia
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha
Belo Horizonte
cartog@igc.ufmg.br

Ricardo Scott Varella Malta

Análise exploratória da radiação de Radônio utilizando ferramentas
de geoprocessamento: Caracterização da radiação do ^{222}Rn na
RMBH.

Monografia apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de especialista em
Geoprocessamento. Curso de especialização em
Geoprocessamento. Departamento de Cartografia.
Instituto de Geociências. Universidade Federal de
Minas Gerais.

Orientador: Professor Marcos Antônio Timbó Elmiro

BELO HORIZONTE

2010

M261a Malta, Ricardo Scott Varella.
2010 Análise exploratória da radiação de Radônio utilizando ferramentas de geoprocessamento [manuscrito] : caracterização da radiação do ²²²Rn na RMBH / Ricardo Scott Varella Malta. – 2010. 37 f. : il.

Monografia (especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2010.

Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro.

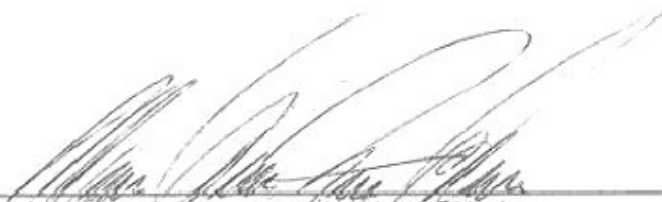
Bibliografia: f. 36-37.

1. Sensoriamento remoto. 2. Sistemas de informação geográfica. 3. Radon. 4. Análise espacial (Estatística). 5. Mineração de dados (Computação). I. Elmiro, Marcos Antônio Timbó. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 528.8

Aluno: Ricardo Scott Varella Malta

Monografia defendida e aprovada em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, em 16 de dezembro de 2010, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro



Prof. Dr. Plínio Temba

Agradecimentos

A minha família, aos meus pais em especial, que tanto se dedicam a amar tudo e a todos, tendo me incentivado a buscar sempre o melhor para mim. Aos meus irmãos e família, Frederico, Maria Clara, Clarissa, Guilherme e Andrea, por estarem sempre presentes nas horas corretas, sempre dispostos a ajudar. Clarissinha? Você trouxe a nossa família muita alegria e amor. Obrigado minha pequena. Eu amo vocês!

A Valeria, por ter proposto a idéia deste trabalho e acompanhado desde o início cada detalhe, me incentivando sempre a crescer com o coração, a ter paciência nas horas certas e por acreditar sempre no meu potencial. Obrigado Vaval, por ter entrado na minha vida e junto com toda a família. Valeu Giuseppe, Maria, Dani, Ka e ao amigo Pedroca, por estarem comigo e fazerem os dias serem mais engraçados e divertidos. Grazie!

Ao orientador, Timbó, que mostrou a verdade sobre a minha monografia e me fez emprenhar mais por ela, sempre me corrigindo e me ensinando um pouco mais sobre cartografia e geoprocessamento.

A VirtualCad Ltda, em especial ao Bernardo, Fátima e Sandro que me ensinaram toda a base de conhecimento de Geoprocessamento e CAD. Que me instruíram a tentar a especialização desde a minha entrada na empresa, por terem fornecido todo o recurso para a conclusão do curso e por me ensinar a ser o profissional que sou hoje!

Ao Charles, pelo seu conhecimento inesgotável e empenho mesmo nas horas onde o tema se confundia, nos finais de semana adquiridos de conhecimentos, a grande força de vontade de querer ensinar de verdade! Mestre! Valeu pela força que você deu para todos da turma!

Ao Zildete e Talita, que de braços abertos me aceitaram no CDTN, fornecendo os dados de concentração de radônio da RMBH. Pelas horas que estive com vocês, discutindo, escutando e aprendendo sobre uma área completamente nova. Espero poder tê-los sempre como referência nos meus estudos futuros.

Aos amigos da especialização que de uma forma ou outra contribuíram para o meu crescimento. Cyleno e Moacir, pelas brincadeiras e dedicação até o último minuto de aula. Ao Ciro que como instrutor trouxe sempre a boa vontade de solucionar os problemas.

Ao Alexandre, Buyu, Ronoel, Leandro Durães, Fred e Ana, por terem me suportado nas brincadeiras e bate-papos no trabalho. Agente vai se ver por aí ainda!

Ao Dersu, Geovanna, Delfino, Sandra e família, Mateus Carvalho e Bernardo (Kacu) que tenho certeza da amizade que temos!

A todos os presentes na minha vida, obrigado por me ajudar a ser eu mesmo a cada dia.

Que sempre tenham mais pessoas de coração como vocês na minha estadia! Estarei certo do sucesso aonde eu for!

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. Introdução.....	1
2. Objetivo.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. Estudo do radônio e geoprocessamento.....	4
3.1. Histórico.....	4
3.2. Pesquisas atuais.....	4
3.3. Análises espaciais.....	5
3.4. Interpoladores.....	5
3.4.1. IDW (<i>Inverse distance weighted</i>).....	6
3.4.2. Krigagem.....	7
3.5. <i>Data mining</i> (mineração de dados).....	8
4. Estudo de caso.....	10
4.1. Localização.....	10
4.2. Caracterização geológica.....	12
4.3. Caracterização Pedológica.....	13
4.4. Caracterização climática ao longo das estações do ano.....	13
4.5. Materiais e métodos.....	14
4.5.1. Materiais.....	14
4.5.2. Métodos.....	15
4.6. Resultados.....	19
4.6.1. Estatística do radônio com a litologia.....	19
4.6.2. Estatística do radônio com a pedologia.....	20
4.6.3. Estatística do radônio com as estações do ano.....	22
4.6.4. Interpoladores.....	23
4.6.5. Mineração de dados.....	26
5. Discussão de resultados.....	29
5.1. Relação do radônio com a litologia.....	29
5.2. Relação do radônio com a pedologia.....	29
5.3. Relação do radônio com as estações do ano.....	30
5.4. Relação do radônio com litologia e pedologia - sobreposição.....	30
6. Conclusões.....	35
7. Referências bibliográficas.....	36

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 - Distribuição e valores de um conjunto de pontos espacialmente distribuídos e o raster gerado a partir deles por interpolação.....	6
Figura 2 – Mapa da Região Metropolitana de Belo Horizonte com detalhe da região sobre o estado de Minas Gerais.....	11
Figura 3 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.....	18
Figura 4 – Gráfico de dispersão por média e desvio padrão da Litologia por Bq/m ³	20
Figura 5 - Gráfico de dispersão por média e desvio padrão da Pedologia por Bq/m ³	21
Figura 6 – Gráfico de dispersão por média e desvio padrão da Pedologia por Bq/m ³	22
Figura 7 – Mapa de interpolação dos valores de radônio - Krigeagem.....	24
Figura 8 – Mapa de interpolação dos valores de radônio – IDW	25
Figura 9 – Matriz de confusão dos dados de Litologia	26
Figura 10 – Índice de kappa dos dados de litologia	26
Figura 11 – Matriz de confusão dos dados de Pedologia	27
Figura 12 – Índice de Kappa dos dados de pedologia	27
Figura 13 – Matriz de confusão dos dados das estações do ano	27
Figura 14 – Índice de Kappa dos dados das estações do ano	28
Figura 15 – Mapa de sobreposição dos dados de Litologia e Pedologia coincidentes.....	32
Figura 16 – Mapa de sobreposição entre a Litologia, Pedologia e Krigeagem.	33
Figura 17 – Mapa de sobreposição entre a Litologia, Pedologia e IDW.....	34

LISTA DE QUADROS

Pág.

Quadro 1 – Índice kappa e sua concordância	9
Quadro 2 – Tipos litológicos encontrados na RMBH	12
Quadro 3 – Tipos de solos encontrados na RMBH.....	13
Quadro 4 – Tabela de média e desvio padrão da Litologia da RMBH por Bq/m ³	19
Quadro 5 – Tabela de média e desvio padrão da Pedologia da RMBH por Bq/m ³	21
Quadro 6 – Tabela de média e desvio padrão das Estações do Ano da RMBH por Bq/m ³ ...	22

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Bq/m³ - Bequerel por metro cúbico

CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear do Brasil

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

EPA - Environmental Protection Agency

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICRP - International Commission of Radiological Protection

IDW - Inverse Distance Weighted

SIG - Sistema de informações geográficas

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

WGS84 – World Geodetic System of 1984

RESUMO

O radônio tem sido objeto de pesquisa em vários países por ser um elemento radioativo gasoso, inodoro e incolor e por ser considerado o segundo maior causador de morte por câncer de pulmão nos Estados Unidos. Pelo fato do radônio ter sua origem a partir do urânio, existe uma forte influência com o tipo litológico e pedológico. A concentração de radônio é obtida das medidas realizadas nas estações do ano em que o gás foi coletado. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo utilizar as ferramentas de geoprocessamento, para produzir uma caracterização estatística que relacione o radônio com as suas variáveis físicas, litologia e pedologia e com as variáveis climáticas, estações do ano e utilizando modelos geoestatísticos como a krigagem e o *IDW* para interpolar os valores estatísticos gerados. Para isso, usou a metodologia de gerar três diferentes tabelas com os valores estatísticos de média e desvio padrão de cada variável. Para esses valores foram necessários minerar os dados, *data mining*, para gerar o índice de kappa e a matriz de confusão para demonstrar uma maior confiabilidade entre os dados coletados. Após analisar os dados, foram feitos os modelos geoestatísticos de cada variável física e climática, para auxiliar na análise dos dados finais. De acordo com os dados analisados de litologia da RMBH percebeu-se que siltito, folhelho e o xisto, rocha metamáfica, metagrauvaca possuem uma média alta de concentração de atividade de radônio da mesma forma que pedologicamente o solo Podzólico vermelho escuro, apresentou características propícias a possuir concentrações mais elevadas. Em relação às estações do ano, os dados demonstram ser necessário fazer novas coletas de dados utilizando uma metodologia mais adequada para a pesquisa. Interpolando os dados e sobrepondo-os pode-se perceber que o município de Lagoa Santa é um local que necessita ser estudado e analisado com maior interesse.

Palavras chave: Geoprocessamento, SIG, Radônio, Krigagem, IDW, Data Mining

1. Introdução

O meio ambiente e os seres humanos estão continuamente expostos a radiações ionizantes. As fontes naturais de radiação podem ser raios cósmicos, radionuclídeos produzidos pela interação da radiação cósmica com a atmosfera, solo e água e radionuclídeos primordiais, principalmente das séries naturais do urânio, tório e potássio-40. As fontes não naturais são provenientes de transformações nucleares artificiais, pelo bombardeamento do núcleo com partículas apropriadas.

O núcleo dos elementos químicos pode ser diferenciado pela estabilidade em que se encontram. Essa estabilidade é o fator que permite diferenciar os elementos radioativos dos demais elementos químicos, pois, quando o núcleo tende a se tornar estável, emite radiação. A radiação emitida pelos núcleos atômicos pode ser de três tipos: radiação alfa, beta e gama.

Segundo Cuccia (2006), a maior parte dos elementos radioativos que ocorre na natureza é membro de uma de três séries radioativas: a do urânio (em que o pai é ^{238}U), do actínio (^{235}U) e do tório (^{232}Th). O decaimento radioativo do ^{238}U é complexo e passa por quatorze etapas, com desintegrações características, até alcançar o produto final estável, chumbo-206 (^{206}Pb).

O Radônio tem sido objeto de pesquisa em vários países, por ser um elemento radioativo gasoso, inodoro e incolor. Estudos recentes feitos pelo EPA (*Environmental Protection Agency*), um órgão americano o qual pesquisa sobre as taxas de radônio nos Estados Unidos cita que o radônio é a segunda maior fonte de câncer de pulmão, depois do cigarro. Segundo Neves *et al*, (2004) a exposição do radônio é causa de 6 a 15% do câncer de pulmão no mundo.

A concentração de radônio varia de acordo com os diferentes materiais geológicos, especialmente nas rochas, solos e água (Santos, 2010).

Esses materiais, quando espacializados por meios de ferramentas disponíveis em diferentes softwares de geoprocessamento, permitem fazer análises importantes e abrangentes para permitir o entendimento de processos inerentes a interação entre eles e o ambiente.

O geoprocessamento pode ser entendido como um conjunto de técnicas que lidam com aquisição, tratamento, interpretação e análise de dados georreferenciados, ou seja, é o processamento da informação que tem relacionamento com o espaço geográfico. O processamento e a análise dos dados são feitos em ambientes integrados de softwares, hardware e procedimentos chamados de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Dessa forma, no presente trabalho, o geoprocessamento é usado como ferramenta de análise que aborda um enfoque ainda pouco estudado nas pesquisas desenvolvidas e publicadas com o objetivo de monitoramento do radônio.

O geoprocessamento possibilita a integração entre diferentes bases cartográficas com possibilidade de gerar diversas análises, sejam elas de estatísticas geoespaciais, análises entre bases em 2D e 3D, modelagem espacial, integração de dados de rasters provenientes de diversas fontes, sejam elas fontes de satélites, radar, laser ou fotografias aéreas. Essas análises facilitam o entendimento da distribuição de qualquer natureza de objeto que, no caso desse trabalho, traz um foco importante de demonstrar a relação entre os valores de atividade do radônio coletados pelo laboratório de Trítio do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) com os demais meios naturais, como geologia, solo e as estações dos anos.

2. Objetivo

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da concentração do radônio na RMBH (Região Metropolitana de Belo Horizonte) em relação a variáveis do meio físico, como litologia, solo e variáveis climáticas (estações do ano), produzindo um mapa de distribuição da concentração de radônio na área de estudo.

2.2. Objetivos específicos

Para atender aos objetivos gerais propostos, enumeram-se a seguir os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização estatística que relacione a concentração de gás radônio com os seguintes fatores:
 - A geologia, nas diferentes Litologias observadas na região;
 - O solo, nas distintas classes pedológicas;
 - O clima, de forma generalizada em função das quatro estações do ano.

- Interpolar os valores de radiação coletados em campo utilizando os algoritmos e os modelos disponíveis nos softwares de SIG's.

3. Estudo do radônio e geoprocessamento

3.1. Histórico

O radônio é um elemento químico descoberto em meados de 1899, pelo pesquisador R. B. Ownes, que observou que a atividade dos compostos do tório expostos ao ar era diminuída. Rutherford, analisando essa atividade no elemento tório, percebeu que este elemento emitia um tipo de gás radioativo, que foi denominado à época como emanção do tório e, posteriormente, ficou conhecido como o elemento radioativo radônio.

Determinados órgãos como o *UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)* e o *ICRP (International Commission of Radiological Protection)* tem definido os limites aceitáveis de exposição do radônio pelos seres humanos, de 148 Bq/m³ e 200 Bq/m³, respectivamente.

Atualmente, com o avanço da tecnologia e a preocupação crescente com este gás, várias instituições nacionais e internacionais de pesquisa, como por exemplo, a *EPA (Environmental Protection Agency – Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos)* e o *CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear do Brasil)* estão se empenhando em estudar e entender melhor o comportamento deste gás.

3.2. Pesquisas atuais

No Brasil, ainda não existem dados estatísticos suficientes para um mapeamento detalhado das regiões com maior concentração de radônio e nem legislação específica (Santos 2010). Entretanto, tem sido uma constante o crescimento das pesquisas feitas sobre o monitoramento do gás. Alguns exemplos são as pesquisas de Santos (2010), em seus estudos de distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH; Zhu *et al* (2001), que fundamentou-se no mapeamento geoestatístico e análises espaciais para definir três categorias de riscos de radônio no sudeste da Bélgica; Salih *et al* (2002), abordam a correlação espacial entre o radônio (²²²Rn) nas águas subterrâneas e nas rochas de urânio (²³⁸U), utilizando o SIG e análises geoestatísticas.

3.3. Análises espaciais

A crescente necessidade de obter maiores informações espaciais e o inter-relacionamento entre elas incorporou ao geoprocessamento uma base de ferramentas apropriadas para analisar diferentes fenômenos e elementos da natureza. Os modelos de análise espacial se desenvolveram fortemente na década de 50, o geoprocessamento proporcionou a implementação destes modelos no ambiente computacional. Câmara e Medeiros (2003) fornecem um exemplo bastante claro sobre a análise espacial, onde é feito uma análise para fins de zoneamento agrícola. Para a sua determinação são necessárias outras variáveis espaciais como o solo, a vegetação e a geomorfologia, a fim de determinar qual a contribuição de cada uma delas para gerar um mapa resultante.

Essa análise parte do princípio de que o conjunto de informações pode ser resultado de cálculos booleanos ou cálculos matemáticos simples e ou avançados. Para isso, vários SIG's têm incorporado, ou tentado incorporar todas as funções de análise espacial junto com outras ferramentas como, por exemplo, ferramentas de análise estatística, modelagem matemática e geoestatística. (Miranda, 2005)

3.4. Interpoladores

A técnica de interpolação possibilita a criação de um conjunto de dados de distribuição uniforme sobre a área em estudo, superando o problema de desigual distribuição de dados. (Martins *et al*, 1992)

A interpolação é o processo de determinar valores desconhecidos, ou não amostrados, de um atributo contínuo usando valores conhecidos ou amostrados. Esse processo é constituído de duas partes, uma é a definição de um relacionamento de vizinhança, ou seja, saber quais pontos são os vizinhos apropriados e a segunda é a definição de métodos que calcularão os valores desconhecidos. O balanço entre essas duas partes pode variar. A interpolação assume que o fenômeno sendo estimado é aproximado pela função matemática usada. Os valores desconhecidos são então calculados de acordo com essa função. A escolha de um modelo apropriado, expresso mediante função matemática, é essencial para obter resultados razoáveis. Os melhores resultados são obtidos quando a função matemática se comporta de maneira similar ao fenômeno. (Miranda, 2005)

A Figura 1 mostra a distribuição e valores de um conjunto de pontos espacialmente distribuídos e o *raster* gerado por interpolação. A ilustração da esquerda mostra um conjunto de pontos, por exemplo, de valores de atividade. A ilustração à direita mostra o *raster* interpolado. Para os valores desconhecidos, são utilizadas fórmulas matemáticas que utilizam os valores dos pontos mais próximos.

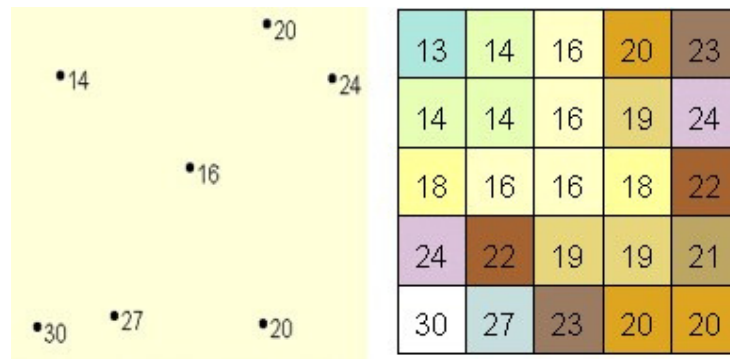


Figura 1 - Distribuição e valores de um conjunto de pontos espacialmente distribuídos e o raster gerado a partir deles por interpolação.

A hipótese de que a interpolação seja uma opção viável é a de que objetos espacialmente distribuídos estão espacialmente correlacionados, ou seja, objetos que estão juntos e próximos tendem a ter características similares.

Existem diferentes métodos de interpolação para dados espaciais que atendem a diferentes propósitos. Para o presente trabalho serão brevemente abordados os métodos de Krigagem e IDW (*Inverse Distance Weighted*).

3.4.1. IDW (*Inverse distance weighted*)

Segundo Miranda (2005), o IDW ou “inverso da distância”, estima um valor para um local não amostrado como uma média dos valores dos dados dentro de uma vizinhança. O cálculo da média é ponderado pela distância entre o ponto a ser interpolado e seus vizinhos, de maneira que a influência dos valores vizinhos decresce com a distância do local estimado. O inverso da distância é bem mais aplicado para dados razoavelmente independentes das localizações vizinhas.

Neste método, os pontos amostrados mais próximos do ponto interpolado recebem um peso maior do que os pontos mais distantes. É o que, segundo Salih *et al* (2002) chama de “Power” (ponderador) ou seja, a ponderação é atribuída a partir de um valor e o raio do objeto, sendo que, quanto maior o “Power” mais os pontos próximos terão influência na interpolação.

Outro método mais analítico será abordado a seguir, onde os pesos são otimizados a cada ponto de interpolação, para produzir uma superfície que satisfaça os critérios estatísticos.

3.4.2. Krigagem

A krigagem é um método de interpolação que parte do uso da distância. A partir de um raciocínio básico, ao invés dos pesos serem uma simples função da distância é incorporado pela influência da “tendência” ou “dependência” espacial dos dados amostrados. A precisão de um valor amostrado é melhor no local amostrado e torna-se menos confiável quando se distancia dos pontos interpolados. (Miranda, 2005).

O resultado de um método de Krigagem pode levar em consideração a direção para um valor amostrado, fazendo que a interpolação seja influenciada por essa distância. A krigagem é capaz de identificar a localização ou valor que está associado a uma amostra de tamanho, forma e orientação específica, atributos não considerados na estatística clássica, a existência de *anisotropias*, ou seja, comportamento distinto em diferentes direções do espaço, e desta forma permite modelar e explicitar este fenômeno no resultado de sua interpolação e a *continuidade* que é a variação no espaço da variável regionalizada que pode ser grande ou pequena.

Na Krigagem um gráfico é usado para demonstrar o comportamento dos dados no campo, chamado de semivariograma, que é encontrado como sendo a metade do variograma. Entende-se como variograma o que é representado quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado, como por exemplo o radônio no solo específico.

O semivariograma pode ser calculado a partir de amostras coletadas de maneira sistemática ou de maneira aleatória. No caso de coleta de dados aleatórios é necessário definir dois parâmetros para os limites de tolerância, que são tolerância angular e tolerância da

distância. Pelo motivo de os pontos estarem distribuídos de maneira aleatória, o algoritmo que calcula o semivariograma precisa saber para onde pode se deslocar e que pares de pontos devem ser considerados para que sejam efetuados os cálculos. Segundo Miranda, 2005, para se “andar” por todos os pontos aleatórios, é necessário definir o chamado *lag*, que é um valor de distância fixa que se irradia a partir de um ponto.

O que a krigagem faz depois de definir os dados acima é determinar um modelo teórico para demonstrar de maneira universal esses dados, para isso, pode-se utilizar vários modelos, como o modelo de efeito pirita, modelo esférico, o modelo exponencial e o modelo gaussiano. Esses modelos são usados para ajustar as incertezas sobre os parâmetros gerados.

O resultado de um krige, quando visualizado como uma imagem no SIG, mostra o comportamento espacial da variável ambiental regionalizada em estudo, podendo assim tirar conclusões mais precisas.

3.5. *Data mining* (mineração de dados)

Segundo Cortês *et al* (2002), mineração de dados é um processo altamente cooperativo entre homens e máquinas, que visa a exploração de grandes bancos de dados, com objetivo de extrair conhecimentos a partir do reconhecimento de padrões e relacionamentos entre variáveis, conhecimentos esses que possam ser obtidas por técnicas comprovadamente confiáveis e validados pela sua expressividade estatística.

Essa expressividade estatística é encontrada nos diversos algoritmos utilizados pelos softwares de mineração de dados. Esses algoritmos, segundo Júnior (2003), podem ser entendidos, como por exemplo, o algoritmo de Classificação Bayesiana que recebe este nome por ser baseado no teorema de probabilidade de Bayes. Também é conhecido por classificador de Naive Bayes ou somente algoritmo de Bayes.

O algoritmo tem como objetivo calcular a probabilidade que uma amostra desconhecida pertença a cada uma das classes possíveis, ou seja, predizer a classe mais provável. Este

tipo de predição é chamado de classificação estatística, pois é completamente baseada em probabilidades.

Dois fatores são de extrema importância para entender os dados gerados pelos softwares de mineração de dados. O primeiro fator é sobre o índice estatístico de Kappa e a outra é sobre a matriz de confusão gerada pelo equipamento.

O índice kappa (Quadro 1) é uma medida de concordância usada em escalas nominais que nos fornecem uma idéia do quanto as observações se afastam daquelas esperadas, indicando-nos assim se as amostras são legítimas de interpretações ou não.

Quadro 1 – Índice kappa e sua concordância

Valor de kappa	Concordância
0	Pobre
0 – 0,20	Ligeira
0,21 – 0,40	Considerável
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Substancial
0,81 – 1	Excelente

A matriz de confusão por sua vez refere-se ao classificador, ou seja, mostra o número de classificações corretas em oposição às classificações preditas para cada classe, ou seja, a matriz indica quantos casos da amostra com diagnóstico “x” foram diagnosticados como “y”.

A matriz contém informações muito importantes para o entendimento dos resultados do algoritmo, como a quantidade de instâncias classificadas corretamente e a quantidade de instâncias classificadas erroneamente. Essa classificação é estimada pela somatória dos dados e pela distribuição dos dados na matriz. Caso os dados não coincidam com a matriz é classificada como errônea, ao inverso como correta.

4. Estudo de caso

4.1. Localização

A área de estudo objeto do presente trabalho é a região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) que está situada no estado de Minas Gerais e compreende 34 municípios. A RMBH possui uma extensão territorial de 9.460 km², correspondente a 1,6% da área total do estado. A população na região em 2008 era de 5.044.532 habitantes, correspondente a 25,4% do total do estado, segundo dados do IBGE 2008 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Segundo a Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, a RMBH tem localização privilegiada por estar próximo das principais regiões metropolitanas do Brasil, como as regiões do Estado de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Distrito Federal.

A Figura 2 mostra a localização dos municípios componentes da RMBH e como detalhe a localização da RMBH dentro do estado de Minas Gerais. A localização da área de estudo não foi definida segundo critérios específicos, pois a importância dos dados é caracterizada pelos valores de atividade de radônio (Bq/m³), independentemente de uma área específica.

Dessa forma, optou-se por trabalhar com a RMBH, pois os pontos amostrados para radônio pelo Laboratório de Trítio do CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) estavam espacializados dentro de toda a referida região.

MAPA DE LOCALIZAÇÃO RMBH

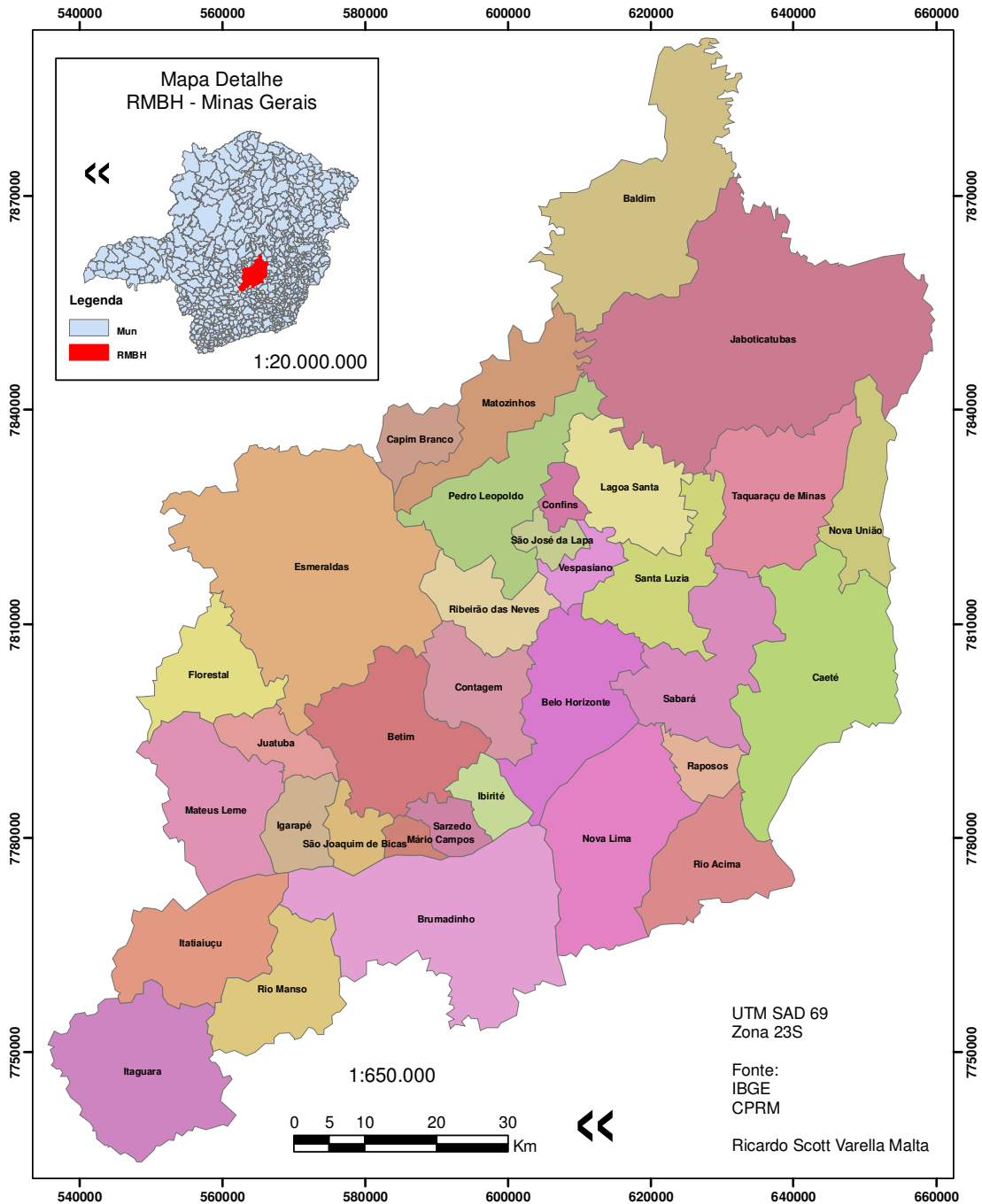


Figura 2 – Mapa da Região Metropolitana de Belo Horizonte com detalhe da região sobre o estado de Minas Gerais.

4.2. Caracterização geológica

O conhecimento da composição química das rochas é de suma importância quando se trata de radônio, uma vez que concentrações de urânio (U) e tório (Th) podem influenciar bastante na atividade de radiação no ambiente, pois esses elementos são os pais das séries de decaimento que originam o radônio.

No Quadro 2 são mostrados os tipos litológicos encontrados na região metropolitana segundo a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), no mapa de escala de 1:1.000.000.

Segundo Buffon 2002, as rochas graníticas e os gnaisses apresentam uma maior concentração de rádio-elemento do que as rochas ultramáficas. Além disso, as rochas ácidas apresentam uma média de U e Th maiores do que as rochas ultrabásicas.

Quadro 2 – Tipos litológicos encontrados na RMBH

Argilito
Calcarenito, Calcissiltito
Calcissiltito, Micrito
Filito
Filito, Dolomito, Xisto
Gnaisse
Gnaisse granulítico, Migmatito
Granito, Granito gnaisse, Granodiorito
Granodiorito, Granito, Tonalito
Itabirito
Metarenito, Rocha metapelética
Monzonito
Ortognaisse
Rocha metapelética
Serpentinito, Metagabro
Siltito, Folhelho
Xisto, Metagrauvaca
Xisto, Rocha metamórfica, Metagrauvaca

Apesar das concentrações de radioelementos nas rochas apresentarem diferenças significativas, não é possível fazer uma classificação litológica confiável somente com base nas concentrações de radioelementos. Segundo Buffon (2002) *apud* Dickson e Scott

(1997), valores radiométricos podem ocorrer em qualquer uma das rochas, sejam elas de alta concentração ou de baixa concentração de radioelementos.

4.3. Caracterização Pedológica

O solo, segundo Fonseca (1999), é a interface entre a litosfera e a biosfera no sentido geoquímico. Uma das características do solo é a organização de seus constituintes e das suas propriedades em camadas, que variam verticalmente com a profundidade.

A formação do solo, ou seja, a sua pedogênese, tem origem a partir do intemperismo da rocha fonte.

Dessa forma, entende-se que a quantidade de radioelementos no solo está correlacionada com a rocha fonte, ou seja, rochas com grande quantidade de radioelementos do tipo tório e urânio tendem a formar solos com quantidades significantes de concentração de radônio.

Na RMBH a distribuição da pedologia é diversificada da mesma forma que a litologia. No Quadro 3, mostram-se os tipos de solos encontrados na RMBH de acordo com a base disponibilizada na CPRM na escala de 1:1.000.000.

Quadro 3 – Tipos de solos encontrados na RMBH

CAMBISSOLO
LATOSSOLO FERRÍFERO
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO
LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO
LITOSSOLO
PODZOLICO VERMELHO-AMARELO
PODZOLICO VERMELHO-ESCURO

4.4. Caracterização climática ao longo das estações do ano

A RMBH apresenta clima tropical de altitude, no qual o período de verão é definido por chuvas e temperaturas elevadas enquanto que o inverno por baixas temperaturas e pouca

precipitação. Essa característica de chuvas constantes no verão aumenta a umidade dos solos, o que cria uma barreira física para a difusão do radônio, com conseqüente redução da taxa de exalação desse gás. Além disso, devido à alta solubilidade do radônio em água, a chuva o transporta para as camadas mais profundas do solo (Magalhães et al, 2003).

Segundo Santos (2010), existe uma relação inversa entre radônio e temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, menor serão os valores de radioatividade do gás.

É importante ressaltar que neste trabalho os pontos de radônio coletados, não tiveram uma definição clara a respeito de uma metodologia de coleta para avaliar os valores de radioatividade e a temperatura, dessa forma, a base utilizada neste trabalho não deve ser usada como parâmetro para explicar a variabilidade dos resultados de radônio e sim para complementar os dados estatísticos.

4.5. Materiais e métodos

4.5.1. Materiais

Para este trabalho utilizou-se inicialmente um arquivo em Excel de pontos de medição de radônio, disponibilizados e coletados pelo laboratório de Trítio do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Esses pontos que totalizaram 502 amostras distribuídas pela Região Metropolitana foram coletados utilizando coletores específicos para analisar o gás radônio.

As concentrações de radônio são medidas através de sua atividade radiométrica, utilizando uma unidade chamada Bequerel (Bq). A unidade de medida deste trabalho foi Bq/m³ (Bequerel por metro cúbico).

O sistema de coordenadas utilizado pela equipe do CDTN para a coleta da posição dos pontos foi o sistema de coordenadas geográficas, com Datum WGS84, com medidas em graus decimais.

Para fazer as associações necessárias com os dados de radônio, foram coletadas bases vetoriais em formato shapefile (*.shp). A base de Litologia (Geologia.shp) foi coletada no

site da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), que possui toda a base geológica de Minas Gerais. Esse dado encontra-se na projeção geográfica com Datum Sad69 (South America Datum de 1969), na escala de 1:1.000.000.

A base de Pedologia (Solos.shp) também foi coletada na CPRM. O dado pedológico encontrava-se no sistema de projeção geográfica com Datum Sad69 e também na escala de 1:1.000.000.

Para complementar as análises, usou-se como referência a própria base de pontos atribuídos pela medição (Excel), para identificar as estações do ano em que os pontos foram coletados, gerando assim a base de Estações do Ano.

Para delimitar a área estudada foi coletado no IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) o arquivo de municípios do estado de Minas Gerais no formato de extensão Shapefile. Este arquivo é coletado no IBGE com o sistema de projeção geográfica com sistema de Datum Sad69 e sistema de coordenada em graus decimais.

4.5.2. Métodos

As coletas dos dados de concentração do radônio foram feitas pelo Laboratório de Trítio do Centro de Desenvolvimento da Energia Nuclear, para análise de distribuição da concentração do radônio inseridos na RMBH. Desses pontos coletados gerou-se um arquivo Excel intitulado de Eletretos.xls. Esse arquivo de dados é a base deste trabalho.

Inicialmente fez-se uma correção dos dados, a fim de eliminar inconsistências com softwares, sistema de projeção e valores vazios. Após a correção dos dados, dos 502 pontos amostrados resultou-se em 498 pontos corrigidos.

Com os 498 pontos corrigidos gerou-se um novo arquivo de nome Eletretosdec.xls. Este arquivo foi utilizado para gerar pontos dentro do Arcgis, utilizando o comando Add XY.

O sistema de projeção utilizado para gerar os pontos foi o mesmo utilizado pelo Laboratório de Trítio (sistema geográfico, WGS84), gerou-se então o primeiro arquivo georreferenciado de nome Eletretos.shp. Este arquivo ao ser posicionado teve a

necessidade de convertê-lo para o sistema de projeção utilizado no trabalho (UTM Sad69, zona23 Sul). Nessa conversão foi gerado o arquivo base georreferenciado para todo o restante do trabalho (Radonio.shp).

Para obter os dados de geologia, pedologia e limite de Minas Gerais, foram feitas buscas nos órgãos responsáveis, como o IBGE, CPRM e Geominas. Os arquivos coletados estavam todos em um sistema de projeção diferente do trabalho, sendo assim todos eles passaram por um processo de conversão do sistema de projeção geográfica Sad69 para UTM Sad69, zona23S, gerando os arquivos Litologia.shp, Pedologia.shp e Mins.shp, além disso os arquivos estavam em escala Nacional tendo a necessidade de concentrar os dados dentro de uma área, que neste caso é a RMBH. Ao concluir as conversões utilizou-se o comando de clip (comando para recorte de objetos espaciais a partir de uma fronteira delimitada) para delimitar do mapa de Minas Gerais o contorno da RMBH, criando o arquivo RMBH.shp. Ainda utilizando esse comando, houve a necessidade de utilizar o arquivo RMBH.shp para delimitar as áreas dos arquivos de Litologia.shp e Pedologia.shp, gerando assim os outros dois arquivos bases para o trabalho, Litologia_RMBH.shp e Pedologia_RMBH.shp.

O arquivo base Radonio.shp é de extrema importância para o trabalho, uma vez que é nele que possui os dados de radioatividade de radônio. A partir deste dado foi gerado um cruzamento espacial (Join) com os dados de Litologia_RMBH e Pedologia_RMBH, para que esses arquivos além de ter os dados de litologia e pedologia, possuíssem também os valores de BQ/m³ por meios naturais. Esse cruzamento gerou dois arquivos, Radonio_Litologia.shp e Radonio_Pedologia.shp.

Ainda utilizando o dado de Radônio, foi necessário gerar um arquivo com as estações do ano, para isso utilizou-se a coluna de data coletada para dividir os dados de acordo com as datas iniciais de cada estação. Verão – 21/12, Outono – 21/03, Inverno – 21/06 e Primavera – 21/09. Criou-se então o arquivo Radonio_Estacao_ano.shp.

A obtenção dos três arquivos, Radonio_Litologia.shp, Radonio_Pedologia.shp e Radonio_Estacao_ano.shp foram baseados em um número de 498 pontos coletados de

radônio. Percebeu-se que vários valores apresentavam-se vazios dentro de cada arquivo, ou seja, no arquivo de Radonio_litologia não possuía todos os valores de bequerel e litologia correspondentes, da mesma forma aconteceu com Radonio_pedologia e com Radonio_Estacao_ano. Sendo assim, foi feita uma junção espacial (Join spatial) para unir todos os três arquivos em um único, intitulado de Rn222.shp. Nessa junção foram apagados os valores vazios, totalizando no final um arquivo de 481 pontos distribuídos pela RMBH, onde cada ponto agora representado com os valores respectivos de litologia, pedologia e estação do ano.

Do arquivo Rn222 foram gerados três caminhos de estudo, o primeiro foi a geração de uma tabela para cada meio natural com as respectivas médias, desvios padrões, variâncias e desvios padrões da média separadamente. A partir das tabelas foram gerados gráficos de dispersão entre a média e o desvio padrão e com rótulos de séries por meio natural adequado, ou seja, litologia, pedologia e estação do ano.

Para o segundo caminho foi necessário fazer uma mineração dos dados. Esse processo utilizou-se o software WEKA, para gerar os índices de kappa de cada fator natural e uma matriz de confusão dos mesmos fatores naturais.

No terceiro caminho fez-se necessário gerar dois tipos de modelos de interpolação, o primeiro utilizado foi o IDW e logo depois a Krigeagem.

Com os resultados de interpolação, tabelas, gráficos e com a matriz de confusão e kappa, permitiu-se fazer as análises necessárias entre quais os modelos de interpolação e como os valores de concentração do radônio se comportam com as demais fontes naturais estudadas, permitindo assim concluir o trabalho.

No fluxograma da Figura 3, pode-se visualizar quais foram os métodos e caminhos utilizados para chegar até a conclusão do trabalho.

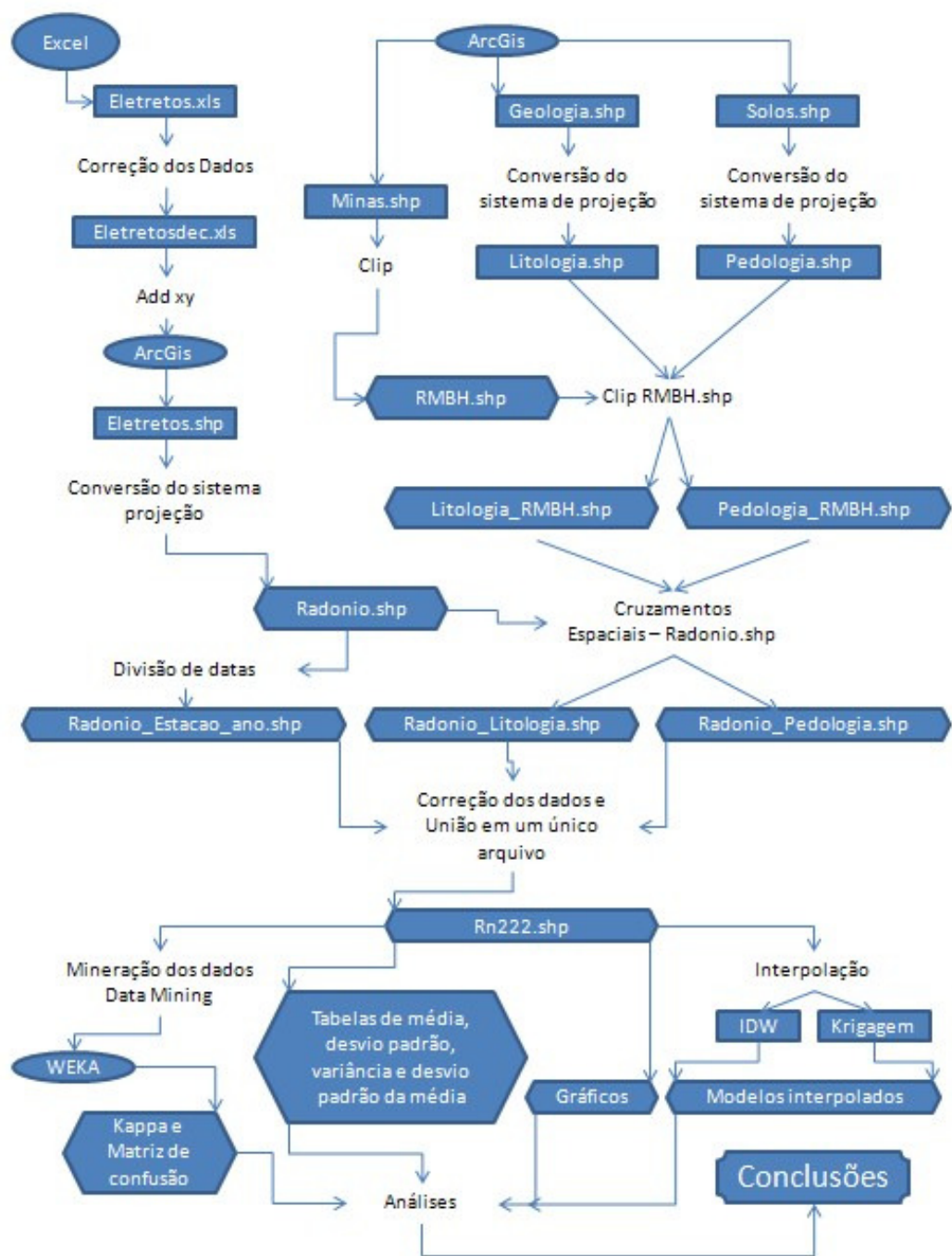


Figura 3 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.

4.6. Resultados

4.6.1. Estatística do radônio com a litologia

Para a Litologia, percebe-se que determinados tipos litológicos da região metropolitana, atribuem um valor de média alta em relação aos valores aceitáveis discutidos anteriormente pelo órgão UNSCEAR que é de 148,0 Bq/m³. No Quadro 4, percebe-se que o valor de média do Itabirito é de 152,9333 Bq/m³, enquanto o Filito, Dolomito e Xisto, encontra-se com valor de 203,5 Bq/m³.

Finalmente, o Gnaisse granulítico, Migmatito, com valor de 278,98 Bq/m³. Este último apresentou valores altos, utilizando como referência o ICRP que considera como aceitável a concentração de até 200 Bq/m³.

Quadro 4 – Quadro de média e desvio padrão da Litologia da RMBH por Bq/m³

LITOLOGIA	Média por Bq/m ³	Desvio padrão por Bq/m ³
Rocha metapeletica	65,6750	47,2074
Serpentinito, Metagabro	70,8286	47,7146
Granodiorito, Granito, Tonalito	109,7667	82,1690
Granito, Granito gnaisse, Granodiorito	110,6636	105,8155
Metarenito, Rocha metapeletica	111,8222	41,8522
Gnaisse	112,3601	130,0569
Xisto, Metagrauvaca	114,5238	112,8376
Calcissiltito, Micrito	122,9538	179,5177
Filito	125,8000	58,0322
Calcarenito, Calcissiltito	134,5875	141,2514
Xisto, Rocha metamafica, Metagrauvaca	139,0143	47,2315
Siltito, Folhelho	143,4462	135,6011
Itabirito	152,9333	76,3970
Filito, Dolomito, Xisto	203,5000	74,2770
Gnaisse granulítico, Migmatito	278,9800	440,4989

No gráfico de dispersão, Figura 4, dos valores de média e desvio padrão da Litologia, pode-se ver que o valor de gnaisse granulítico, migmatito é expressivo em relação aos outros tipos litológicos, pois possui um alto valor de média e alto valor de desvio padrão.

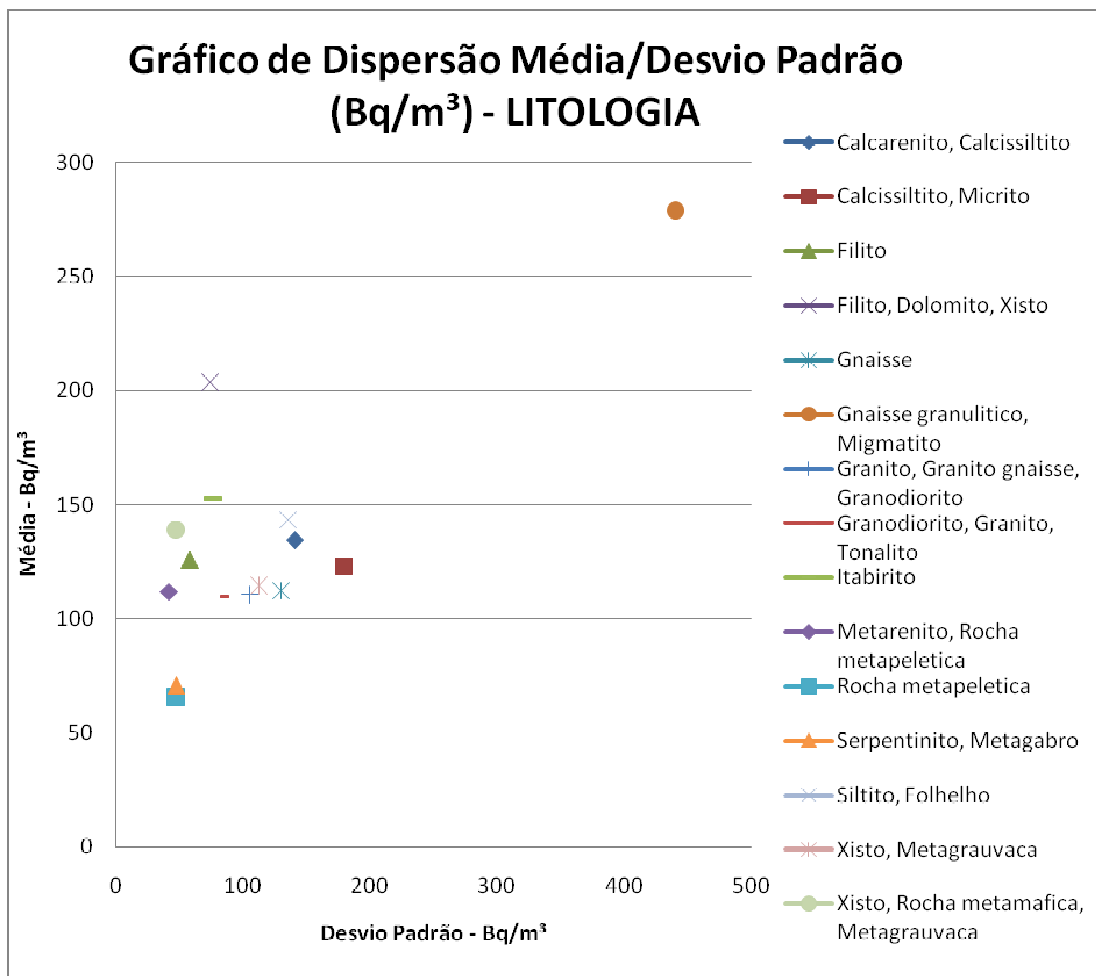


Figura 4 – Gráfico de dispersão por média e desvio padrão da Litologia por Bq/m³

4.6.2. Estatística do radônio com a pedologia

Para a Pedologia, nenhum valor de média ultrapassa os valores aceitáveis segundo o UNSCEAR. Pode-se ver no Quadro 5 que os Latossolos Ferríferos apresentam valor de 126 Bq/m³, os Latossolos vermelhos-escuros, 137 Bq/m³ e como maior valor de média os Podzólicos vermelhos-escuros, de 145 Bq/m³.

Em referência ao grupo dos Latossolos, o tipo de solo Latossolo vermelho-amarelo apresenta a menor média, de 81 Bq/m³, sendo distinto dos outros latossolos encontrados na região metropolitana de Belo Horizonte.

Quadro 5 – Quadro de média e desvio padrão da Pedologia da RMBH por Bq/m³

PEDOLOGIA	Média por Bq/m ³	Desvio padrão por Bq/m ³
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	81	32
CAMBISSOLO	99	75
LITOSSOLO	101	53
PODZOLICO VERMELHO-AMARELO	109	126
LATOSSOLO FERRIFERO	126	139
LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO	137	46
PODZOLICO VERMELHO-ESCURO	145	184

Na Figura 5, pode-se analisar a dispersão geral das amostras pedológicas tendo como referência a média e desvio padrão.

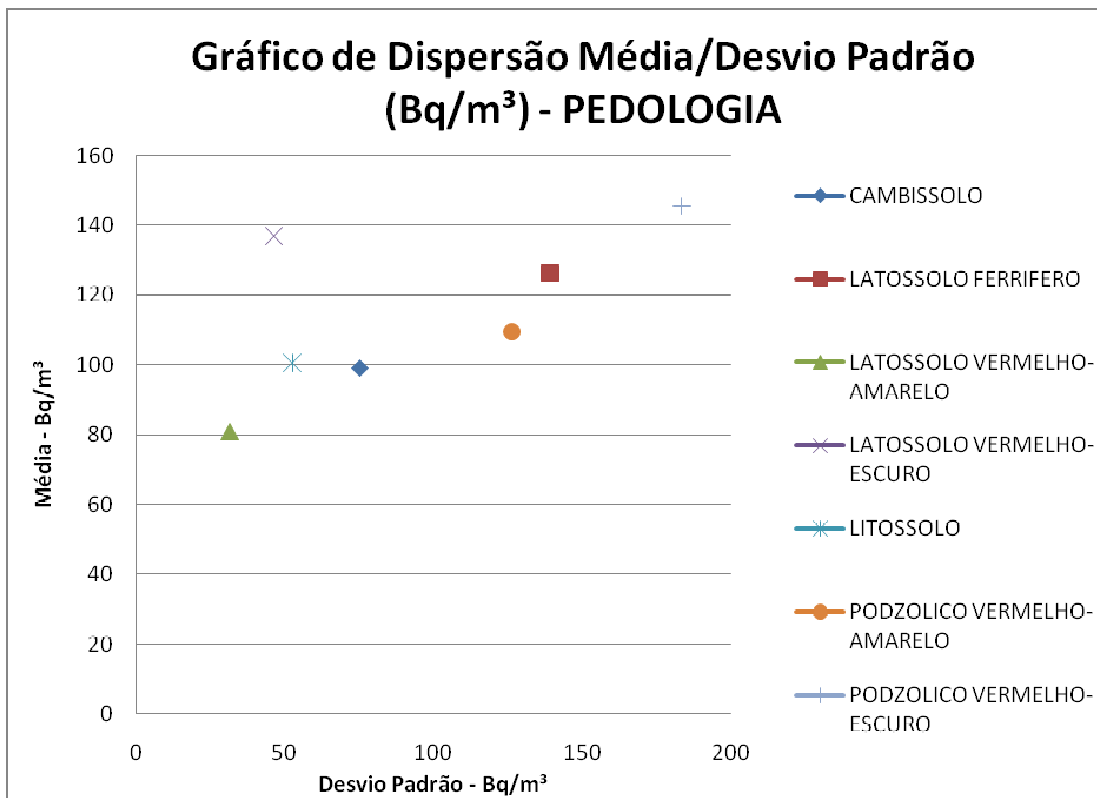


Figura 5 - Gráfico de dispersão por média e desvio padrão da Pedologia por Bq/m³

4.6.3. Estatística do radônio com as estações do ano

Nos resultados gerados para as Estações do Ano, disponíveis no Quadro 6, percebe-se que os valores coletados no verão possuem médias superiores as representadas nas outras estações, sendo a média de 122,2423 Bq/m³. No outono, a média encontrada foi de 116,9455 Bq/m³. Ambas as amostras estão abaixo dos valores aceitáveis de radiação deste gás.

Quadro 6 – Quadro de média e desvio padrão das Estações do Ano da RMBH por Bq/m³

Estação do ano	Média (Bq/m ³)	Desvio padrão (Bq/m ³)
Primavera	78,0364	51,7233
Inverno	114,5972	124,4750
Outono	116,9455	138,2450
Verão	122,2423	99,1185

Pela Figura 6, do gráfico de dispersão dos valores de média e desvio padrão, percebe-se que as amostras coletadas no inverno têm um desvio e média mais baixos que as outras amostras.

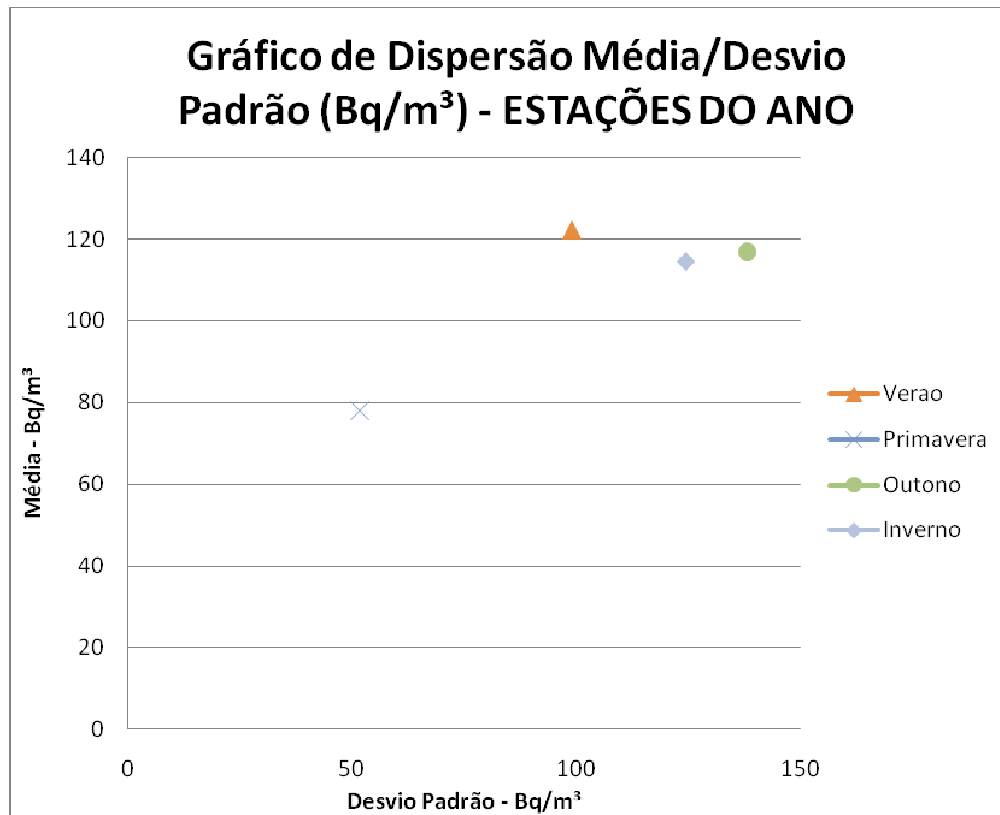


Figura 6 – Gráfico de dispersão por média e desvio padrão da Pedologia por Bq/m³

4.6.4. Interpoladores

Neste trabalho foram usados dois interpoladores, chamados de IDW e Krigeagem. Os dois interpoladores tiveram vários resultados de teste, dentre os quais foram coletados somente os de maior interesse para o trabalho.

Os resultados encontrados na Krigeagem, Figura 7, mostram que em determinadas regiões da RMBH, mais especificamente na região sudoeste, região da cidade de Belo Horizonte e região centro norte, existem valores altos interpolados.

As regiões de cores mais escuras representam área com alta concentração de radônio. Percebe-se que com o método de krigeagem existe uma distribuição mais detalhada da interpolação. Os valores mais claros, como por exemplo, a cor amarela clara, representam os índices de radônio de menor valor.

O IDW traz uma resposta aos dados da interpolação dos valores de concentração de radônio na RMBH, Figura 8. Esses dados, apesar de muito parecidos com a krigeagem, trazem uma resposta visivelmente mais suave, mas não mais importante que a krigeagem. Os dados interpolados de IDW estão caracterizados de acordo com os valores aceitáveis pelos dois órgãos de referência mundial, ou seja, os valores de concentração de radônio na interpolação estão visualmente divididos segundo a escala de UNSCEAR e ICRP. Os valores amarelo-claro, são os valores interpolados de 0 até 148 Bq/m³, os valores verde-claro, estão entre o intervalo de 148,0001 e 200 Bq/m³, os demais valores indicam que a interpolação alcançou níveis mais altos do que o índices aceitáveis segundo os órgãos responsáveis.

Observando os valores de IDW na RMBH, pode-se entender que a região ao sudoeste apresenta uma concentração mais alta nos valores locais de radônio, enquanto que em pequenos espaços da cidade de Belo Horizonte e centro-norte da RMBH, também apresentam locais de grande concentração de radônio.

Mapa de interpolação dos valores de radônio - Krigeagem

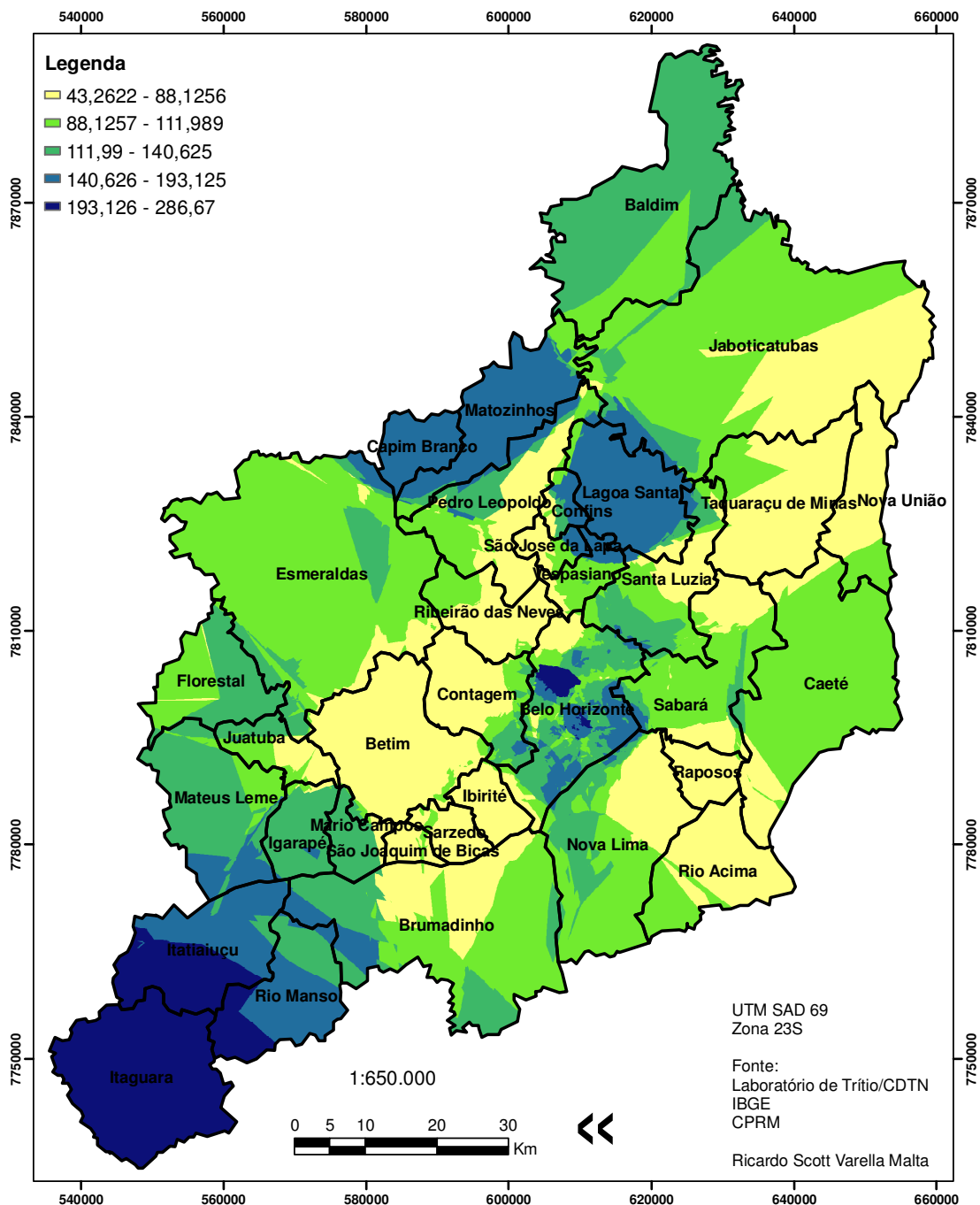


Figura 7 – Mapa de interpolação dos valores de radônio - Krigeagem

Mapa de interpolação dos valores de radônio - IDW

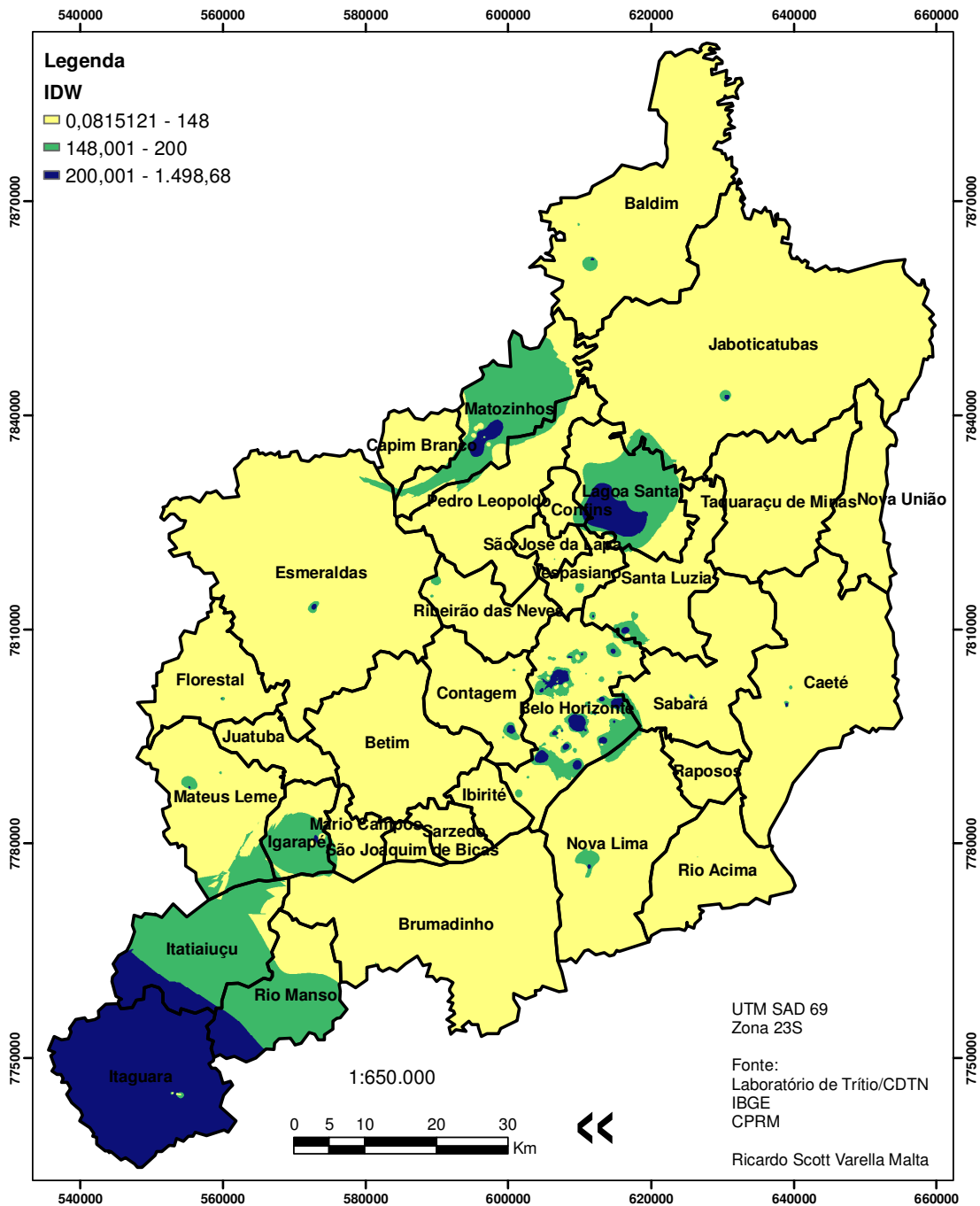


Figura 8 – Mapa de interpolação dos valores de radônio – IDW

4.6.5. Mineração de dados

Para desenvolver os resultados da mineração de dados foi utilizado o software WEKA. Deste software foi possível gerar uma matriz de confusão e o índice de kappa de cada fator natural estudado.

Para a Litologia, foi gerada uma matriz de confusão, Figura 9 e índice de kappa de 0,4928, Figura 10. Percebe-se que os dados foram classificados como corretos como 300 e incorretos como 181.

```

=== Confusion Matrix ===
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m  n  o  <-- classified as
17  0  0  0  0  0  0  0  6  0  0  0  0  0  1 | a = Granodiorito - Granito - Tonalito
 0 10  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0 | b = Granito - Granito gnaisse - Granodiorito
 0  0 34 22  3  3  0  1  0  0  0  0  0  0  0 | c = Xisto - Metagrauvaca
 0  0 37 173 1 15  0  0 16  8  0  0  0  2  1 | d = Gnaisse
 0  0  2  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0 | e = Itabirito
 0  0  2  2  1 25  1  1  3  0  0  0  0  0  0 | f = Serpentinito - Metagabro
 0  0  1  0  2  5  0  0  0  0  0  0  0  0  0 | g = Rocha metapeletica
 0  0  1  0  2  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0 | h = Filito
 0  0  2  3  0  0  0  0 13  0  0  0  0  0  0 | i = Metarenito - Rocha metapeletica
 0  0  0  0  0  0  0  0  0  7  0  0  0  0  0 | j = Xisto - Rocha metamafica - Metagrauvaca
 0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  3  0  0  1  0 | k = Gnaisse granulitico - Migmatito
 0  0  0  0  2  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0 | l = Filito - Dolomito - Xisto
 0  5  0  0  2  0  0  1  0  0  0  0 16  2  0 | m = Siltito - Folhelho
 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  9  2  2 | n = Calcissiltito - Micrito
 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  4  4  0 | o = Calcarenito - Calcissiltito

```

Figura 9 – Matriz de confusão dos dados de Litologia

Correctly Classified Instances	300	62.3701 %
Incorrectly Classified Instances	181	37.6299 %
Kappa statistic	0.4928	
Mean absolute error	0.0599	
Root mean squared error	0.1837	
Relative absolute error	64.2028 %	
Root relative squared error	85.4883 %	
Total Number of Instances	481	

Figura 10 – Índice de kappa dos dados de litologia

Para a pedologia, foi gerada uma matriz de confusão, Figura 11 e índice de kappa de 0,5229, Figura 12. É importante ressaltar que para os dados de pedologia, a matriz gerou um conjunto de dados classificados como corretos de 321 amostras, enquanto que incorretos foram classificados com 161.

```

=== Confusion Matrix ===

  a  b  c  d  e  f  g  <-- classified as
177  2 21 30  0  4  7 | a = PODZOLICO VERMELHO-AMARELO
  5 42  0  5  7  2  0 | b = CAMBISSOLO
  6  0 12  2  0  0  0 | c = LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO
27  0  0 36  3  0  1 | d = LATOSSOLO FERRIFERO
  7  1  0  9  3  0  0 | e = LITOSSOLO
  6  2  1  0  0  7  0 | f = LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO
11  0  0  0  1  0 44 | g = PODZOLICO VERMELHO-ESCURO

```

Figura 11 – Matriz de confusão dos dados de Pedologia

Correctly Classified Instances	321	66.736 %
Incorrectly Classified Instances	160	33.264 %
Kappa statistic	0.5229	
Mean absolute error	0.1299	
Root mean squared error	0.2636	
Relative absolute error	65.1597 %	
Root relative squared error	83.6229 %	
Total Number of Instances	481	

Figura 12 – Índice de Kappa dos dados de pedologia

Na Figura 13, pode-se observar a matriz de confusão gerada a partir do software WEKA dos dados amostrados das estações do ano da RMBH e com seu respectivo índice de Kappa. Figura 14, de valor 0,7983. Percebe-se que os índices classificados como corretos tem uma expressão muito boa, sendo classificado com 429 e de dados classificados incorretos de 52 amostras.

```

=== Confusion Matrix ===

  a  b  c  d  <-- classified as
111 30  4  0 | a = Outono
  9 277  0  2 | b = Inverno
  2  0 21  3 | c = Verao
  0  0  2 20 | d = Primavera

```

Figura 13 – Matriz de confusão dos dados das estações do ano

Correctly Classified Instances	429	89.1892 %
Incorrectly Classified Instances	52	10.8108 %
Kappa statistic	0.7983	
Mean absolute error	0.0683	
Root mean squared error	0.1952	
Relative absolute error	24.9413 %	
Root relative squared error	52.8538 %	
Total Number of Instances	481	

Figura 14 – Índice de Kappa dos dados das estações do ano

5. Discussão de resultados

5.1. Relação do radônio com a litologia

Analisando os resultados da relação entre a Litologia e a concentração de radônio na região metropolitana de Belo Horizonte e sua estatística básica de média e desvio padrão, pode-se verificar que três litologias se destacam com altas médias de concentração de atividade (Bq/m^3), quais sejam: Gnaisse granulítico, Migmatito; Filito, Dolomito, Xisto e Itabirito.

Pela análise da matriz de confusão com essas três litologias, percebe-se que somente a litologia Gnaisse granulítico, Migmatito, tem um valor aceitável da amostra. Quando é expresso aceitável, entende-se que de cinco amostras, três são consideradas boas de serem amostradas, como gnaisse granulítico, migmatito. As outras duas amostras possuem baixíssima aceitação de acordo com a matriz de confusão.

Apesar das três amostras possuírem baixa aceitação e os dados apresentarem um índice de kappa moderado, pode-se visualizar que determinadas litologias tem valores altos de aceitação, como por exemplo, os granodioritos, granito, ionalito; granito, granito gnaisse, granodiorito; gnaisse; serpentinito, metagrabo; xisto, rocha metamáfica, metagrauvaca; gnaisse granulítico, migmatito e siltito, folhelho.

Dessas litologias com valores altos de aceitação, pode-se perceber que o siltito, folhelho e o xisto, rocha metamáfica, metagrauvaca, possuem uma média alta de concentração de atividade, sendo 143,4462 e 139,0143 Bq/m^3 , respectivamente. Entende-se que essas duas litologias devem ser estudadas com mais cautela, pois possuem um alto índice de ser um tipo litológico propício a possuir alta concentração de radônio.

5.2. Relação do radônio com a pedologia

Ao analisar os dados estatísticos de média das amostras de pedologia, nenhuma amostra está com média superior ao aceitável pelas organizações, mas três tipos de solos puderam ser distinguidos dos demais. Estes são os solos classificados como podzólico vermelho-escuro; latossolo vermelho-escuro e latossolo ferrífero, com médias respectivas de 145 Bq/m^3 , 137 Bq/m^3 e 126 Bq/m^3 .

Pode ser avaliado pela matriz de confusão que o solo podzólico vermelho escuro apresenta dados aceitáveis, seguidos do solo podzólico vermelho amarelo e do cambissolo. Percebe-se que o índice kappa dos dados pedológicos está classificado como moderado.

Visualizando a matriz de confusão juntamente com os dados de média adquiridos, pode-se chegar à conclusão de que os solos podzólico vermelho-amarelo e o solo cambissolo, possuem uma boa classificação na matriz, mas com médias de concentração de radônio muito baixa, o que leva a concluir que o solo podzólico vermelho-escuro é um solo propício a possuir grande concentração de radônio.

5.3. Relação do radônio com as estações do ano

Os dados coletados e amostrados segundo as estações do ano possuíram três estações destacadas pelas médias simples. O verão com média de 122,2423 Bq/m³, o outono com média de 116,9455 Bq/m³ e o inverno com média de 114,5972 Bq/m³.

Analisando a matriz de confusão, pode-se perceber que o verão, o outono e o inverno possuem boa classificação na matriz, além das amostras possuírem um substancial índice de kappa de 0.7983, o que considera que os valores estão muito confiáveis.

Em relação às amostras das estações do ano, deve-se levar em conta na análise de que as amostras não foram coletadas com o intuito de estudar a variação da concentração do radônio nas determinadas estações, o que indica uma necessidade de maior esclarecimento diante dos resultados gerados.

5.4. Relação do radônio com litologia e pedologia - sobreposição

Sobrepondo os resultados de litologia com os resultados de pedologia, ou seja, as litologias de Siltito, Folhelho e; Xisto, Rocha metamáfica e Metagrauvaca com o solo Podzólico vermelho-escuro, Figura 15, pode-se observar que os municípios de Lagoa Santa, Jaboticatubas e Baldim possuem quase que a totalidade dos pontos coincidentes entre as duas variáveis, perdendo somente uma amostra que está localizada em Confins.

Utilizando os métodos de interpolação IDW e Krigeagem, avaliou-se a distribuição da concentração do radônio na região metropolitana de Belo Horizonte. Analisando os dois

métodos de forma geral, encontram-se determinados focos com alta concentração de radônio. Nos dois métodos, pode-se observar que a região de Lagoa Santa, Matozinhos, Itaguara e Belo Horizonte, apresentam indícios de relevante concentração.

Analisando de forma mais aproximada, utilizando o *zoom*, encontra-se em determinadas regiões como Itaguara, Matozinhos e parte de Belo Horizonte, interpolações feitas somente com uma amostra e influenciando grande parte da RMBH. Isso ocorre possivelmente, por ser necessária uma avaliação estatística mais detalhada, pois nessas regiões as amostras podem possuir discrepâncias em relação ao restante das amostras.

Mapa de sobreposição entre as variáveis Litologia e Pedologia segundo as análises conclusivas

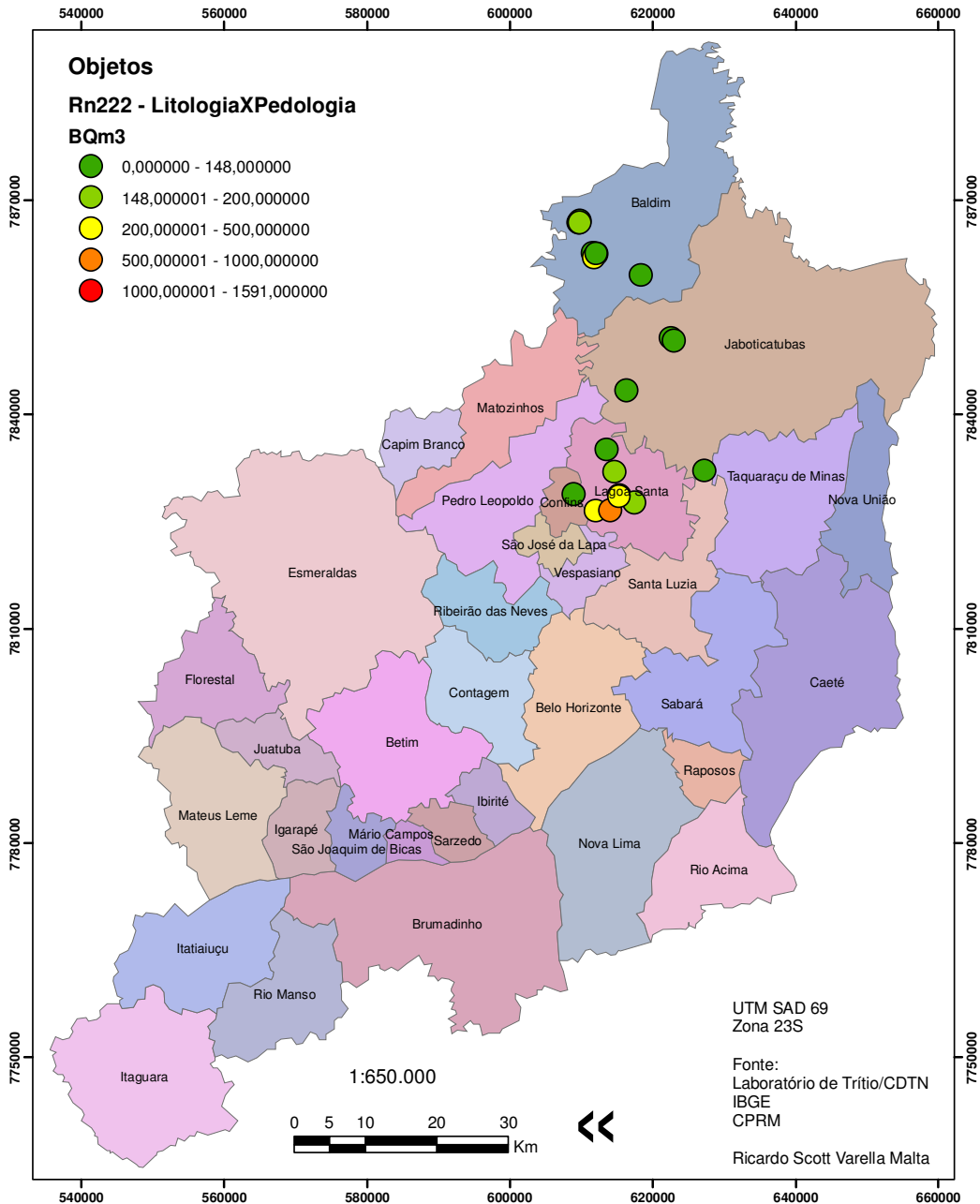


Figura 15 – Mapa de sobreposição dos dados de Litologia e Pedologia coincidentes.

No caso de Lagoa Santa, é considerado o único ponto onde as variáveis tanto de litologia, pedologia e dos interpoladores coincidiram com as análises exploratórias, Figura 16 e 17. Isso indica que essa região tem um índice de concentração de radônio alto e que merece ser estudado e analisado segundo os critérios adequados, de acordo com os órgãos responsáveis para determinada função.

Mapa de sobreposição entre as variáveis Litologia e Pedologia segundo as análises conclusivas

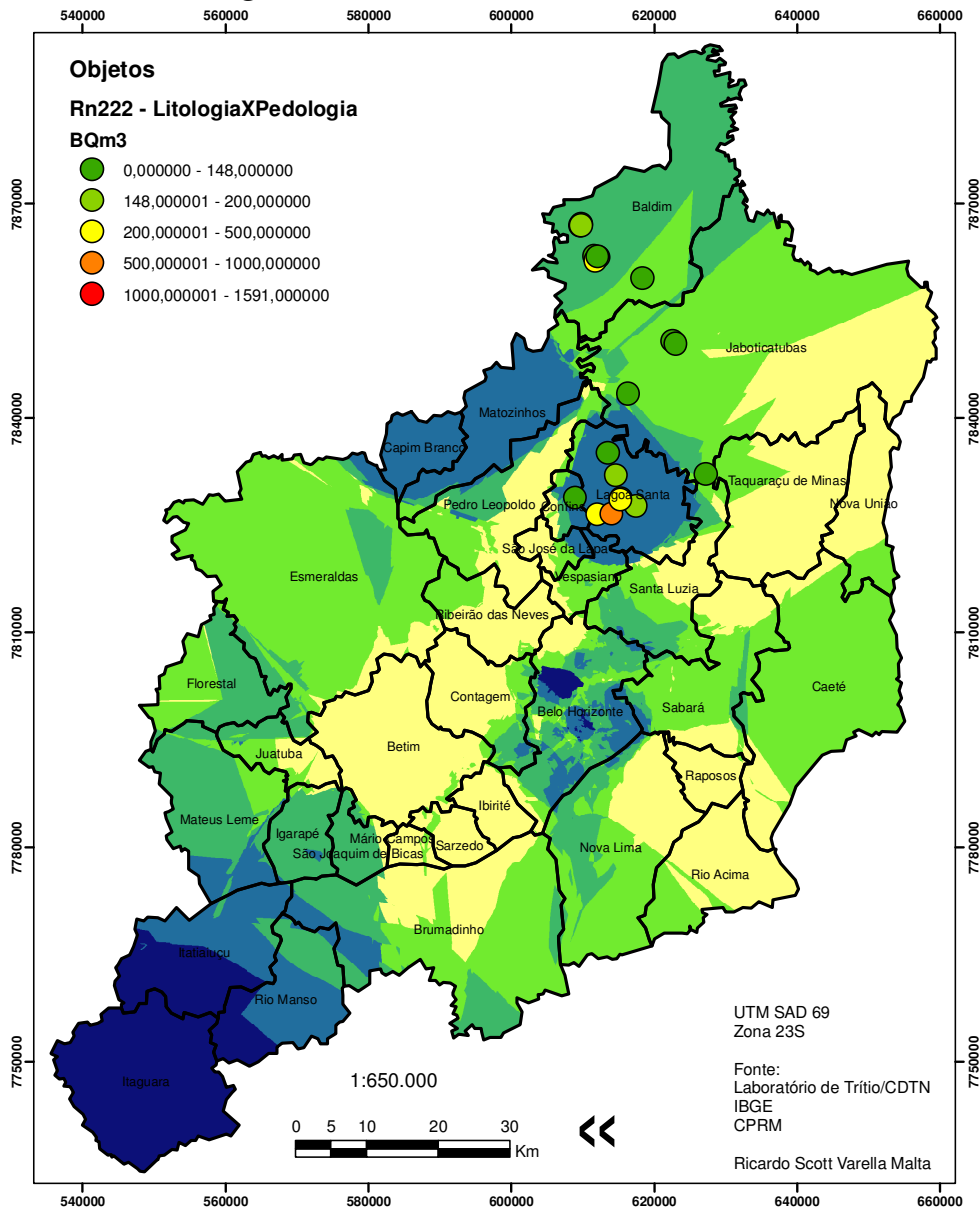


Figura 16 – Mapa de sobreposição entre a Litologia, Pedologia e Krigeagem.

Mapa de sobreposição entre as variáveis Litologia, Pedologia e IDW segundo as análises conclusivas

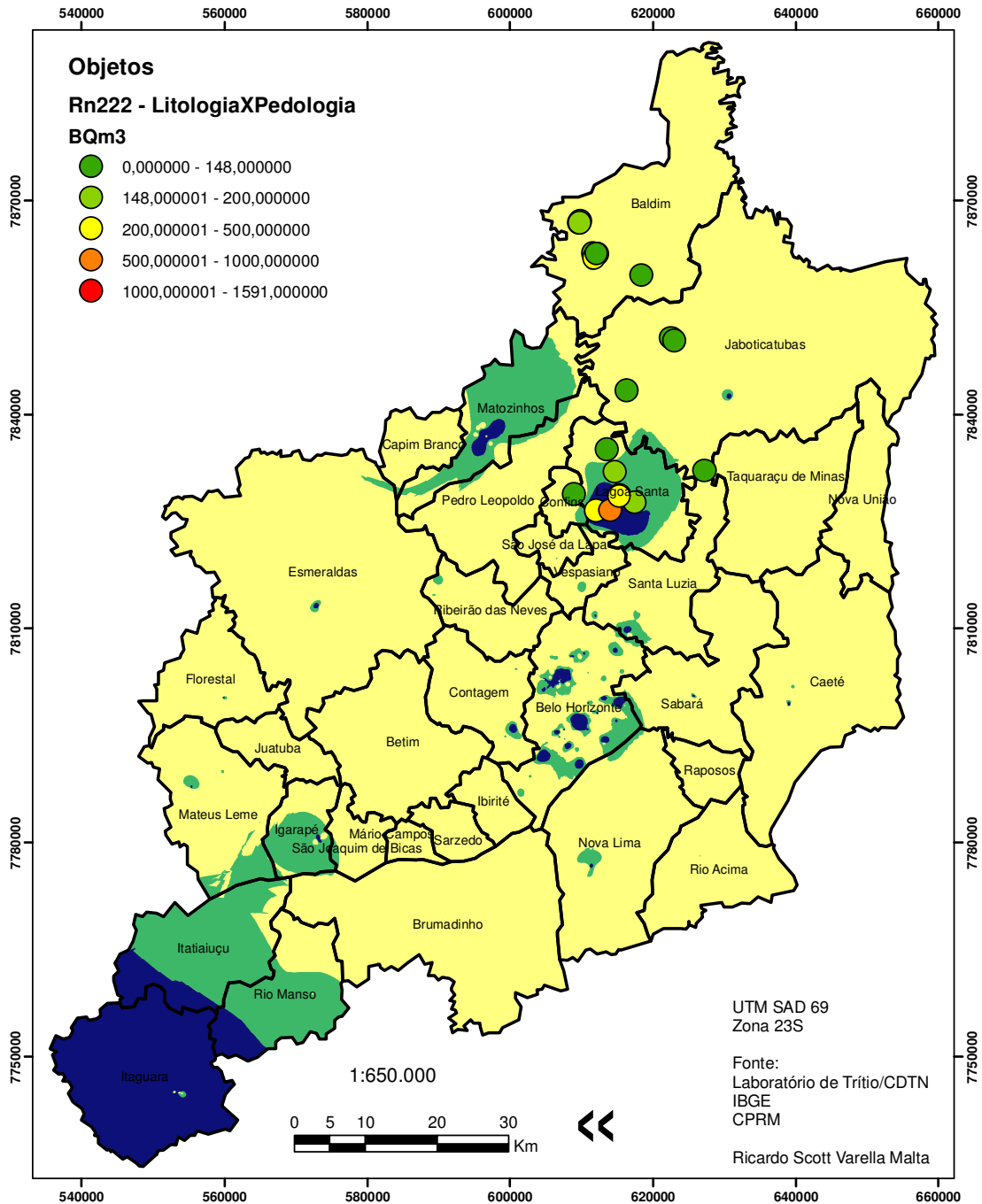


Figura 17 – Mapa de sobreposição entre a Litologia, Pedologia e IDW.

6. Conclusões

Por meio deste trabalho, foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento para produzir uma caracterização estatística para relacionar a concentração de gás radônio com a litologia, pedologia e estações do ano. Além disso, foram utilizados os interpoladores IDW e krigagem para interpolação de dados. Pode-se concluir que:

- As litologias com valores altos de aceitação dos dados foram os granodioritos, granito, ionalito; granito, granito gnaisse, granodiorito; gnaisse; serpentinito, metagrabo; metarenito, rocha metapelética; xisto, rocha metamáfica, metagrauvaca e silito, folhelho.
- Dentre as listadas, pode-se perceber que o silito, folhelho e o xisto, rocha metamáfica, metagrauvaca possuem uma média alta de concentração de atividade, sendo 143,4462 e 139,0143 Bq/m³, respectivamente. Essas duas litologias devem ser estudadas com mais cautela, pois possuem um alto índice de ser um tipo litológico propício a possuir alta concentração de radônio.
- Quanto à pedologia, o solo podzólico vermelho-escuro é propício a possuir concentração de radônio mais elevada.
- Sobre a concentração de radônio relacionada às estações do ano, os valores podem ser considerados muito confiáveis pela análise estatística. Destaca-se, porém, que as amostras não haviam sido coletadas com o intuito de estudar a variação da concentração do radônio nas determinadas estações, o que indica uma necessidade de maior esclarecimento diante dos resultados gerados.
- Pela utilização dos dois métodos de interpolação, IDW e krigagem, pode-se observar que a região de Lagoa Santa, Matozinhos, Itaguara e Belo Horizonte, apresentam indícios de relevante concentração de radônio.
- O município de Lagoa Santa pode ser considerado o único ponto onde as variáveis de litologia, pedologia e dos interpoladores coincidiram com as análises exploratórias, o que indica que essa região tem um índice de concentração de radônio alto e que merece ser estudado e analisado com maior profundidade.

7. Referências bibliográficas

BUFFON, Sérgio Alfredo, Utilização de dados geofísicos e geológicos na avaliação ambiental e epidemiológica de radiações naturais (radônio) no escudo sul-riograndense (RS-Brasil). Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CÂMARA, Gilberto; MEDEIROS, José Simeão de; Sistema de Informações Geográficas – Aplicações na Agricultura / editado por Eduardo Delgado Assad; Edson Eyji Sano – 2. Ed. rev. e ampl. – Brasília: Embrapa, 1998.

CORTÊS, Sérgio da Costa; PORCARO, Rosa Maria; LIFSCHITZ, Sérgio; Mineração de dados - Funcionalidades, Técnicas e Abordagens – PUC – Rio, 2002.

CUCCIA, Valeria. Estudo da distribuição de radionuclídeos naturais na bauxita, processo Bayer e seus produtos e resíduos. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Disponível em: <<http://www.epa.gov/radon/index.html>>. Acesso em 09 ago 2010.

FONSECA, A. C.. 1999. Geoquímica dos Solos. IN: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R. G. M.. Erosão e conservação dos solos – Conceitos , temas e aplicações. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. p. 165 – 194.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em 13 ago 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitais/municipio_2007/Malha_Municipal_Digital_2007_2500/Disseminacao_2007/Proj_Geografica/SAD_69/ArcView_Shp/2007/E2500/UF/MG/>. Acesso em 13 ago 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Disponível em: <<http://siscom.ibama.gov.br/shapes/>>. Acesso em 06 set 2010.

JÚNIOR, Hruschka Estevam Rafael – Imputação Bayesiana no Contexto da Mineração de Dados – Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro – 2003.

MARTINS, S.V. *et al.* Interpolação de valores de altitude e de variáveis climáticas para o estado do Espírito Santo, *Revista Árvore*. Vol.16, N. 3, Sociedade de Investigações Florestais, Universidade de Viçosa, set-dez 1992.

MAGALHÃES, M. H. *et al.* Radon in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 67, p. 131-143, Elsevier Science B.V., 2003

MIRANDA, José Iguelmar; Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas – Brasília – DF: Embrapa Informações Tecnológica, 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/aplicmap/geral.htm?3bfb0ec5116b13e7ae03cdb4b568184b#>>. Acesso em 06 set 2010.

NEVES, L.F. *et al.* Radioatividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. *Geonovas*. No 18, p.103-114, 2004.

REBELO, A.M.A, BITTENCOURT, André V. L., MANTOVANI, Luiz E. – Modelos de Exalação de Radônio em Paisagens Tropicais Úmidas Sobre Granito. – Boletim Paranaense de geociências, n52, p.61-76, 2003. Editora UFPR.

SALIH, Isam M; PETTERSON, Hakan B.L.; SIVERTUN Ake; LUND Eva - Spatial correlation between radon (^{222}Rn) in groundwater and bedrock uranium (^{238}U): GIS and geostatistical analyses. *Journal of Spatial Hidrology*. Vol.2 N.2, p. 1-10. 2002.

SANTOS, Talita de Oliveira. Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, UFMG, Belo Horizonte, 2010.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/estrada_real/geologia_estratigrafia.html>. Acesso em 13 ago 2010.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA. Disponível em: <<http://www.sbg-mg.org.br>>. Acesso em 06 set 2010.

Zhu, H. C. *et al.* Radon risk mapping in southern Belgium: an application of geostatistical and GIS techniques. *The Science of The Total Environment*, Vol. 272, p. 203-210. 2001.