



Carla Caroline Alles

**Análise Estatística e Geoestatística da Distribuição de CO₂,
CH₄, Rn e Microbiota em um Campo Petrolífero do
Recôncavo Baiano (BA)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. José Tavares Araruna Júnior
Co-orientador: Patrício José Moreira Pires

Rio de Janeiro, Março de 2011



Carla Caroline Alles

**Análise Estatística e Geoestatística da Distribuição de CO₂,
CH₄, Rn e Microbiota em um Campo Petrolífero do
Recôncavo Baiano (BA)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo citada.

Prof. José Tavares Araruna Júnior

Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Dr. Patrício José Moreira Pires

Co-orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior

Departamento de Engenharia Civil - UENF

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de Março de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Carla Caroline Alessi

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Paraná, em 2009. Durante a graduação, atuou nas áreas de construção civil e geotecnia. Desenvolveu trabalhos de iniciação científica nos anos de 2005 e 2006. As linhas de pesquisa estudadas foram geotecnia experimental e resistividade de solos. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Geotecnia) no ano de 2009, atuando na área de geotecnia experimental e ambiental. Desenvolveu pesquisa sobre armazenamento geológico de dióxido de carbono, geoestatística e estatística clássica.

Ficha Catalográfica

Allessi, Carla Caroline

Análise estatística e geoestatística da distribuição de CO₂, CH₄ Rn e microbiota em uso campo petrolífero do Recôncavo Baiano (BA) / Carla Caroline Alessi ; orientadores: José Tavares Araruna Júnior ; co-orientador: Patrício José Moreira Pires. – 2010.

218 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Armazenamento Geológico. 3. Dióxido de carbono. 4. Geoestatística. 5. Estatística. I. Araruna Júnior, José Tavares. II. Pires, Patrício José Moreira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho a minha família.

“Um sonho sonhado sozinho permanece apenas um sonho.
Um sonho sonhado junto pode tornar-se realidade.”
(Edward Schillebeeckx)

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado essa oportunidade. Pela força e coragem para realizar este trabalho e por ter colocado no meu caminho pessoas tão especiais.

Ao meu orientador Prof. José Tavares Araruna Júnior, minha sincera admiração e respeito. Agradeço pelos ensinamentos compartilhados, apoio e incentivo durante esse período. Obrigada pela paciência e pela oportunidade de realizarmos este trabalho. Sobretudo obrigada pela amizade.

Ao meu co-orientador Patrício José Moreira Pires pela ajuda, paciência, pelo intercâmbio de informações, dedicação e pela amizade.

A Petrobrás que disponibilizou os dados para a realização dessa dissertação.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso de mestrado.

Ao Prof. Arthur de Lemos Scofield pela boa vontade e pelo tempo despendido.

Ao Prof. Luiz Felipe Guanaes Rego pelos ensinamentos de ArcGis.

Agradeço a todos do Laboratório de Geotecnia, por compartilhar os seus conhecimentos e amizade. À Rita e a Fátima pela preocupação e carinho. Ao Marcel pela disposição em ajudar.

A minha família, meus pais Luiz e Roseli, pelo exemplo de vida, pela educação, pelo incentivo e carinho que sempre tiveram comigo. Meus irmãos Rafaela e Rodrigo que me apoiaram e que mesmo distantes sempre se fizeram presentes. Minha avó, meus tios e primos pela torcida. Minha segunda família, Rute, Edson, Daniela e Júnior pela motivação e carinho.

Ao Guilherme, meu grande Amor. Agradeço a paciência, a confiança e o grande apoio durante todo o mestrado. Principalmente por seu amor, carinho e pelas longas conversas que incentivaram o término deste trabalho.

A família que escolhemos: os amigos. Agradeço a todos do “Ponto Geotécnico” Eric, Louise, Paula, Ricardo, Raquel, Thiago Carnavale, Thiago Pessoa e em especial a Débora que além da grande amizade me ajudou com assuntos acadêmicos e me acolheu nesses últimos meses.

Agradeço a Vivian pelo empréstimo de material estatístico e geoestatístico, além da amizade e apoio.

Aos amigos de Curitiba que fizeram muita falta nesta etapa da vida, em especial a Paulinha, Bárbara e Roberta a companhia de vocês é um presente na minha vida.

Aos professores e amigos da UFPR, em especial ao Alessandro, Chamecki, Laryssa e Roberta, que foram os que me introduziram neste encantador mundo geotécnico e me apoiaram neste trabalho.

Agradeço aos professores da banca examinadora pelas sugestões muito construtivas ao presente trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

Enfim, a todos aqueles que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho de forma direta ou indireta.

Resumo

Allessi, Carla Caroline; Araruna Jr., Jose Tavares (orientador); Pires, Patrício José Moreira (co-orientador). **Análise Estatística e Geoestatística da Distribuição de CO₂, CH₄, Rn e Microbiota em um Campo Petrolífero do Recôncavo Baiano (BA)**. Rio de Janeiro, 2011. 218p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação visa analisar os dados de um programa experimental que buscou estabelecer a distribuição de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), radônio (Rn), microbiota (NMP) e hidrocarbonetos leves (C1-C5) em uma área de 30km² num campo petrolífero do recôncavo baiano, como parte do estabelecimento do controle ambiental do projeto de armazenamento geológico de CO₂. A análise dos dados contemplou um estudo estatístico descritivo clássico e geoestatístico para auxiliar na interpretação dos dados e elaboração de mapas de distribuição dos referidos parâmetros. A análise estatística descritiva clássica apresentou parâmetros de distribuição, dispersão e posição dos dados. Através desses valores foi possível concluir que as distribuições do CO₂, CH₄, NMP, Rn e alguns valores da gasometria apresentaram heterogeneidade e assimetria. A distribuição homogênea foi observada para valores de temperatura, teor de umidade, porosidade e alguns valores da gasometria (propeno, 2-Buteno Trans, 1 Buteno, 2-Butano-Cis e N-Pentano). Os dados não apresentaram ajuste à distribuição normal, exceto pelos valores de teor de umidade de solos. A análise geoestatística apresentou mapas de distribuição dos dados, com o intuito de melhor visualizar a distribuição local das concentrações dos parâmetros de interesse. Verificou-se que, entre os métodos de interpolação clássicos, os que melhor se ajustaram aos dados foram o método do inverso da distância e a krigagem. Através da análise semivariográfica foi possível observar a ocorrência de variabilidade espacial dos dados, sendo que para os valores de CO₂ e CH₄ observou-se uma dependência espacial. Já para os valores de Rn e NMP a dependência espacial mostrou-se menos expressiva. A variabilidade espacial de propriedades e parâmetros do solo observadas no presente estudo evidencia que os solos são altamente estruturados espacialmente e que tal condição deve ser levada em consideração na escolha de metodologias mais adequadas para projetos de monitoramento e futuras amostragens.

Palavras-chave

Armazenamento Geológico; Dióxido de Carbono; Geoestatística; Estatística.

Abstract

Allessi, Carla Caroline; Araruna Jr., Jose Tavares (advisor); Pires, Patrício José Moreira (co- advisor). **Statistical and Geostatistical Analysis of CO₂, CH₄, Rn e and Microbiota in an Oil Field in the Recôncavo Baiano (BA)**. Rio de Janeiro, 2011. 218p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The geological storage of CO₂ is a very promising technique to minimize the effects of climate change. In Brazil, the pioneering project of geological storage of CO₂ will complement activities of enhanced oil recovery in mature fields of Recôncavo Baiano. This dissertation aims to analyze the data of an experimental program that sought to establish the distribution of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), radon (Rn), microbiota and light hydrocarbons (C1-C5) in an area of 30km² in an oil field in the recôncavo baiano field as part of the establishment of environmental control of the geological storage of CO₂ program. Analysis of the data contemplated a descriptive classic statistical study and a geostatistic study to assist in interpretation of the experimental program data and mapping the distribution of these parameters for the oil field. The descriptive statistics analysis presented classical distribution, dispersion and position parameters. Through these values was possible to conclude that the distributions of CO₂, CH₄, NMP, Rn and some values of study presented heterogeneity and asymmetry. The homogeneous distribution was observed for values of temperature, moisture content, porosity and some light hydrocarbons (*i.e.*, propene, 2-Butene Trans, 1 Butene, 2-butane-Cis and N-Pentane). The data did not fit the normal distribution, except by the values of soil moisture content. Geostatistics codes were used to generate data distribution maps, in order to better visualize the local distribution of concentrations of the parameters of interest. It was found that, among the classic interpolation methods, that best fit to the data were obtained by the method of inverse distance and krigging. By analyzing semivariograms was possible to observe the occurrence of spatial variability of the data. It was noted a spatial dependence for the values of CO₂ and CH₄. However, the spatial dependence of Rn and Microbiota proved less expressive. Spatial variability of soil properties and parameters observed in this study reveals that soils are highly structured spatially and that such a condition must be taken into consideration when choosing the most appropriate experimental methodologies for monitoring programs and future sampling.

Keywords

Geological Storage; Carbon Dioxide; Geostatistics; Statistics.

Sumário

1 Introdução	20
1.1. Organização da Dissertação	22
2 Revisão Bibliográfica	23
2.1. Propriedades do Carbono (C) e do Dióxido de Carbono (CO ₂)	23
2.2. Ciclo do Carbono	25
2.2.1. Ciclo Geológico do Carbono	25
2.2.2. Ciclo Biológico do Carbono	26
2.3. Aquecimento Global e Efeito Estufa	27
2.4. Armazenamento de CO ₂ : Captura - Separação - Transporte - Injeção e Monitoramento	29
2.4.1. Histórico	30
2.4.2. Técnicas de Captura do CO ₂	31
2.4.2.1. Captura por Pós-Combustão	33
2.4.2.2. Captura por Oxi-Combustão	36
2.4.2.3. Captura por Pré Combustão	40
2.4.3. Técnica de Separação do CO ₂	43
2.4.3.1. Absorção	43
2.4.3.2. Membranas	44
2.4.3.3. Adsorção	45
2.4.3.4. Criogenia do Ar	47
2.4.3.5. <i>Looping</i> Químico	47
2.4.4. Transporte	48
2.4.4.1. Transporte por Dutos	49
2.4.4.2. Transporte por Navios	50
2.4.4.3. Transporte por Trens e Caminhões	51
2.4.5. Injeção	52
2.4.6. Monitoramento	53
2.4.6.1. Tecnologias de Monitoramento das Taxas de Injeção e Pressão	54
2.4.6.2. Tecnologias de Monitoramento da Distribuição Subterrânea do CO ₂	55
2.4.6.3. Tecnologia para o Monitoramento da Integridade dos Poços de Injeção	56
2.4.6.4. Tecnologias para o Monitoramento Local de Efeitos Ambientais	57
2.4.6.5. Tecnologias de Monitoramento através de Métodos Analíticos	59

2.4.6.6. Exemplos de Técnicas de Monitoramento em Uso	65
2.5. Toxicidade do CO ₂	66
2.6. Formações Geológicas Possíveis de Armazenagem de CO ₂	70
2.6.1. Reservatórios de Petróleo e Gás	73
2.6.2. Minas de Carvão Inativas	74
2.6.3. Aquíferos Salinos	75
2.6.4. Oceanos	76
2.7. Aspectos Geológicos do Campo Petrolífero do Recôncavo Baiano	76
3 Apresentação do Programa Experimental	84
3.1. Descritivo do Campo de Estudo e Atividades	84
3.2. Localização dos Pontos	87
3.3. Coleta de Amostras	88
3.4. Classificação Tátil Visual do Tipo de Solo	94
3.5. Análise Geoquímica	98
3.6. Análise Microbiológica	104
3.6.1. Ensaios de Atividade Metabólica Microbiana	107
3.7. Análise <i>In Situ</i> de Gases Presentes nos Poros da Massa de Solo	108
4 Análise Estatística e Geoestatística dos Dados	117
4.1. Análise Estatística	117
4.1.1. Análise Estatística Descritiva Clássica	117
4.1.1.1. Medidas de Posição	117
4.1.1.2. Medidas de Dispersão	118
4.1.1.3. Medidas de Forma da Distribuição	119
4.1.1.4. Correlação Linear Simples	120
4.1.1.5. Histograma	120
4.1.2. Análise Geoestatística	121
4.1.2.1. Métodos de Interpolação	122
4.2. Programas Computacionais Utilizados	134
4.2.1. RockWorks 15	134
4.2.2. Arc Gis 9.3	135
4.2.3. Petrel	136
5 Apresentação e Discussão dos Resultados	137
5.1. Estatística Descritiva Clássica	137
5.2. Geoestatística	144
5.2.1. Dióxido de Carbono (CO ₂)	144

5.2.2. Metano (CH ₄)	157
5.2.3. Radônio (Rn)	163
5.2.4. Número mais Provável (NMP)	170
5.2.5. Gasometria	176
5.2.6. Porosidade	180
5.2.7. Vegetação Densa	180
5.2.8. Tipo de Solo	182
6 Conclusões e Sugestões	184
6.1. Conclusões	184
6.2. Sugestões	186
Referências Bibliográficas	188
APÊNDICE I	200
APÊNDICE II	207

Lista de figuras

Figura 2.1 – Esquema da molécula do dióxido de carbono.	24
Figura 2.2 – Esquema do ciclo geológico e biológico do carbono. Modificado de Earthobservatory, (2010).	26
Figura 2.3 – Gráfico da emissão mundial de CO ₂ devido a queima de combustíveis fósseis por setores da economia (1971 a 2001). No setor da indústria está incluso as industrias energéticas como por exemplo o refino de petróleo. Modificado de IEA (2003).	29
Figura 2.4– Diagrama do processo do seqüestro de carbono geológico. Modificado de <i>British Geological Survey</i> (BGS, 2010).	30
Figura 2.5 – Diagrama de fases do dióxido de carbono: Temperatura (°C) x Pressão (bar). Modificado de Chemicalogic, (2010).	32
Figura 2.6 – Processo da captura do CO ₂ por pós-combustão. Modificado de Scottish Centre for Carbon Storage (SCCS, 2010).	34
Figura 2.7 – Processo dentro da câmara de pós-combustão. Modificado de Scottish Centre for Carbon Storage (SCCS, 2010)	35
Figura 2.8 – Esquema geral da captura do CO ₂ por pós-combustão. (Planetseed, 2010).	35
Figura 2.9 – Processo da captura do CO ₂ por oxi-combustão. Modificado de Scottish Centre for Carbon Storage (SCCS, ,2010).	38
Figura 2.10 – Processo dentro da câmara de oxi-combustão. Modificado de Scottish Centre for Carbon Storage (SCCS, 2010).	39
Figura 2.11 – Esquema geral da captura do CO ₂ por oxi-combustão. (Planetseed, 2010).	39
Figura 2.12 – Processo da captura do CO ₂ por pré-combustão. Modificado de Scottish Centre for Carbon Storage (SCCS, 2010),	41
Figura 2.13 – Processo dentro da câmara de pré-combustão. Modificado de Scottish Centre for Carbon Storage (SCCS, 2010).	42
Figura 2.14 – Esquema geral da captura do CO ₂ por pré-combustão. (Planetseed, 2010)	42
Figura 2.15 – Esquema da membrana utilizada para a separação do CO ₂ . (Bellona, 2010).	45
Figura 2.16 – Transporte do CO ₂ por dutos. (CO ₂ Capture Project, 2010).	50
Figura 2.17 – Transporte do CO ₂ por navios. (CO ₂ Shipping, 2010)	51

Figura 2.18 – Transporte do CO ₂ por caminhões. (Supercryo, 2010).	51
Figura 2.19 – Esquema de injeção típica de CO ₂ e configuração dos poços de petróleo. Modificado de IPCC, (2005).	53
Figura 2.20 – Séries radioativas com os respectivos valores de meia-vida de cada elemento: a) ²³⁸ U, b) ²³² Th, ²³⁵ U. Modificado de Nazaroff (1992).	60
Figura 2.21 – Lago Nyos, Camarões. (Geo Arizona, 2010).	68
Figura 2.22 – Opções para o armazenamento de CO ₂ em formações geológicas subterrâneas Modificado de IPCC (2005).	70
Figura 2.23 – Possíveis rotas de fuga do CO ₂ . Modificado de IPCC (2005).	72
Figura 2.24 – Injeção de CO ₂ para a técnica do EOR e estocagem de CO ₂ . Modificado de IPCC, (2005).	74
Figura 2.25 – Domínios tectônicos do Estado da Bahia (Delgado <i>et al.</i> , 2003).	78
Figura 2.26 – Continuação: Domínios tectônicos do Estado da Bahia (Delgado <i>et al.</i> , 2003).	79
Figura 2.27 – Mapa geológico simplificado do Recôncavo Baiano (Magnavita <i>et al.</i> , 2005).	80
Figura 2.28 – Arcabouço estrutural e campos de petróleo da Bacia do Recôncavo. A-A' refere-se à seção da Figura 2.29 (Magnavita <i>et al.</i> , 2005).	81
Figura 2.29 – Seção Geológica A-A' ao longo da porção sul da Bacia do Recôncavo (Magnavita <i>et al.</i> , 2005).	82
Figura 3.1 – Mapa de amostragem do campo petrolífero do estudo.	85
Figura 3.2 – Mapa das campanhas realizadas no campo petrolífero do estudo.	86
Figura 3.3 – Imagem de satélite para auxiliar na localização dos pontos em campo.	87
Figura 3.4 – Localização do ponto, alguns pontos foram facilmente identificados, pois já haviam sido estaqueados pela equipe da geofísica.	89
Figura 3.5 – Remoção do material orgânico antes da perfuração e amostragem.	90
Figura 3.6 – Escavação do solo com o auxílio de uma cavadeira para posterior coleta de material.	90
Figura 3.7 – Detalhe da cravação do amostrador.	91
Figura 3.8 – Ilustração do amostrador de solo e do amostrador de gás.	91
Figura 3.9 – Detalhe do amostrador de solo com o tubo plástico no interior.	92
Figura 3.10 – Detalhe do tubo amostrador com tubo plástico.	92
Figura 3.11 – Detalhe da extração da haste de cravação.	93

Figura 3.12 – Ralo utilizado para amostragem de solo arenoso e solos pedregosos.	93
Figura 3.13 – Amostras de solo. A) Amostra para classificação geológica; B) Amostra para análise microbiológica; C) Amostra para análise geoquímica.	94
Figura 3.14 – Esquema da amostragem de solo. Modificado de Geoprobe (2010).	95
Figura 3.15 – Carta de descrição de solos da Exploration Associates Ltd.	96
Figura 3.16 – Carta de descrição de rochas da Exploration Associates Ltd.	97
Figura 3.17 – Detalhe da embalagem utilizada para análise geoquímica.	99
Figura 3.18 – Detalhe do recipiente e da seringa utilizada no ensaio de cromatografia gasosa. pelo Laboratório de Estudos Marinhos e Ambientais da PUC - Rio – LABMAN.	100
Figura 3.19 – Amostra de gás sendo injetada no cromatógrafo no Laboratório de Estudos Marinhos e Ambientais da PUC - Rio - LABMAN.	100
Figura 3.20 – Detalhe do cromatógrafo utilizado no Laboratório de Estudos Marinhos e Ambientais da PUC - Rio - LABMAN.	101
Figura 3.21 – Detalhe interno do cromatógrafo do Laboratório de Estudos Marinhos e Ambientais da PUC - Rio - LABMAN.	101
Figura 3.22 – Diagrama de picos dos analitos de uma amostra do estudo elaborado pelo Laboratório de Estudos Marinhos e Ambientais da PUC - Rio - LABMAN.	103
Figura 3.23 – Detalhe da embalagem utilizada para análise microbiológica.	104
Figura 3.24 – Colocação de gelos reutilizáveis no fundo do isopor.	105
Figura 3.25 – Colocação de camada de papel toalha e amostras.	105
Figura 3.26 – Colocação de nova camada de papel toalha.	106
Figura 3.27 – Colocação de nova camada de gelo reutilizável acima das amostras.	106
Figura 3.28 – Detalhe do cromatógrafo utilizado para as análises de atividade metabólica microbiana. (Geochemical, 2010).	108
Figura 3.29 – Detalhe amostrador de gás tipo Geoprobe. (Geoprobe, 2010).	109
Figura 3.30 – Detalhe do manifolde empregado para realizar a medição simultânea dos gases de interesse.	110
Figura 3.31 – Vista lateral do filtro com o tampo aberto.	111
Figura 3.32 – Vista lateral do filtro com o tampo fechado.	111
Figura 3.33 – Vista de topo denotando o tampo e o interior do filtro.	112

Figura 3.34 – Representação esquemática em três dimensões.	112
Figura 3.35 – Detalhe do aparelho utilizado para a medição dos gases CO ₂ e CH ₄ .	113
Figura 3.36 – Medição realizada com cromatógrafo de campo pelo IFP.	114
Figura 3.37 – Detalhe do aparelho utilizado para a medição do TPH.	114
Figura 3.38 – Detalhe do aparelho utilizado para a medição do Radônio.	115
Figura 3.39 – Detalhe da caderneta de anotações utilizada em campo.	116
Figura 4.1– Curva polinomial ajustada para representar a variação de um conjunto de amostra (a) linear e (b) ordem maior. (INPE 1998).	123
Figura 4.2– Modelo de semivariograma experimental e modelo matemático ajustado. (Genú, 2004).	130
Figura 5.1– Histograma Linear das concentrações do dióxido de carbono (CO ₂).	142
Figura 5.2– Histograma Linear das concentrações do metano (CH ₄), para valores de 0 a 4000 ppm.	142
Figura 5.3– Histograma Linear das concentrações do Radônio.	143
Figura 5.4– Histograma Linear das concentrações do número mais provável (NMP), para valores até 10 ⁴ .	143
Figura 5.5– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método interpolador do vizinho mais próximo. Elaborado pelo programa ArcGis.	145
Figura 5.6– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método interpolador acumulativo. Elaborado pelo programa RockWorks.	146
Figura 5.7– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método de ponderação bidirecional. Elaborado pelo programa RockWorks.	147
Figura 5.8– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método de tendência polinomial. Elaborado pelo programa RockWorks.	148
Figura 5.9– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método de tendência residual. Elaborado pelo programa RockWorks.	149
Figura 5.10– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método de triangulação. Elaborado pelo programa RockWorks.	150
Figura 5.11– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método do inverso da distância em 2D e 3D. Elaborado pelo programa RockWorks.	151
Figura 5.12– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método do inverso da distância. Elaborado pelo programa Petrel.	152
Figura 5.13– Semivariograma considerando uma única direção para os dados de CO ₂ . Elaborado pelo programa RockWorks.	153

Figura 5.14– Semivariograma considerando todas as direções para os dados de CO ₂ . Elaborado pelo programa RockWorks.	154
Figura 5.15– Mapa de concentração do CO ₂ pelo método de krigagem. Elaborado pelo programa RockWorks.	156
Figura 5.16– Mapa de concentração do CH ₄ pelo método do inverso da distância. Elaborado pelo programa RockWorks.	157
Figura 5.17– Mapa de concentração do CH ₄ pelo método do inverso da distância em 2D e 3D. Elaborado pelo programa RockWorks.	159
Figura 5.18– Semivariograma considerando uma única direção para os dados de CH ₄ . Elaborado pelo programa RockWorks.	160
Figura 5.19– Semivariograma considerando todas as direções para os dados de CH ₄ . Elaborado pelo programa RockWorks.	161
Figura 5.20– Mapa de concentração do CH ₄ pelo método de krigagem. Elaborado pelo programa RockWorks.	162
Figura 5.21– Mapa de concentração do Rn pelo método do inverso da distância em 2D e 3D. Elaborado pelo programa RockWorks.	164
Figura 5.22– Gráfico de dispersão dos valores de radônio versus dióxido de carbono, separados por tipo de solo.	166
Figura 5.23– Semivariograma considerando uma única direção para os dados de Rn. Elaborado pelo programa RockWorks.	167
Figura 5.24– Semivariograma considerando todas as direções para os dados de Rn. Elaborado pelo programa RockWorks.	168
Figura 5.25– Mapa de concentração do Rn pelo método de krigagem. Elaborado pelo programa RockWorks.	169
Figura 5.26– Mapa de concentração do NMP pelo método do inverso da distância em 2D e 3D. Elaborado pelo programa RockWorks.	171
Figura 5.27– Semivariograma considerando uma única direção para os dados de NMP. Elaborado pelo programa RockWorks.	172
Figura 5.28– Semivariograma considerando todas as direções para os dados de NMP. Elaborado pelo programa RockWorks.	173
Figura 5.29– Mapa de concentração do NMP pelo método de krigagem. Elaborado pelo programa RockWorks.	174
Figura 5.30– Mapa de concentração do Teor de Umidade pelo método de krigagem. Elaborado pelo programa RockWorks.	175
Figura 5.31– Mapa de concentração do Metano pelo método do inverso da distância com os dados da Gasometria. Elaborado pelo programa	

RockWorks.	177
Figura 5.32– Mapa de concentração do Metano pelo método do inverso da distância com os dados da Gasometria entre 0 a 4000. Elaborado pelo programa RockWorks.	178
Figura 5.33– Mapa de distribuição dos tipos de solo. Elaborado pelo programa RockWorks.	179
Figura 5.34– Foto aérea do campo de estudo. Elaborado pelo programa ArcGis.	181
Figura 5.35– Mapa de vegetação densa. Elaborado pelo programa RockWorks.	182
Figura 5.36– Concentrações de dióxido de carbono pelos tipos de solo.	183
Figura 5.37– Concentrações de radônio pelos tipos de solo.	183
Apêndice I 1 – Histograma Linear das concentrações de Metano.	200
Apêndice I 2 – Histograma Linear das concentrações de Etano.	201
Apêndice I 3 – Histograma Linear das concentrações de Eteno.	201
Apêndice I 4 – Histograma Linear das concentrações de Propano.	202
Apêndice I 5 – Histograma Linear das concentrações de Propeno.	202
Apêndice I 6 – Histograma Linear das concentrações de I-Butano.	203
Apêndice I 7 – Histograma Linear das concentrações de N-Butano.	203
Apêndice I 8 – Histograma Linear das concentrações de 2-Buteno-Trans.	204
Apêndice I 9 – Histograma Linear das concentrações de 1-Buteno.	204
Apêndice I 10 – Histograma Linear das concentrações de 2-Buteno-Cis.	205
Apêndice I 11 – Histograma Linear das concentrações de Neo-Pentano.	205
Apêndice I 12 – Histograma Linear das concentrações de I-Pentano.	206
Apêndice I 13 – Histograma Linear das concentrações de N-Pentano.	206
Apêndice II 1 – Mapa de concentração do Etano – dados da gasometria.	207
Apêndice II 2 – Mapa de concentração do Eteno – dados da gasometria.	208
Apêndice II 3 – Mapa de concentração do Propano – dados da gasometria.	209
Apêndice II 4 – Mapa de concentração do Propeno – dados da gasometria.	210
Apêndice II 5 – Mapa de concentração do I-Butano – dados da gasometria.	211
Apêndice II 6 – Mapa de concentração do N-Butano – dados da gasometria.	212
Apêndice II 7 – Mapa de concentração do 2-Buteno-Trans – dados da gasometria.	213
Apêndice II 8 – Mapa de concentração do 1-Buteno – dados da gasometria.	214
Apêndice II 9 – Mapa de concentração do 2-Buteno-Cis – dados da gasometria.	215

Apêndice II 10 – Mapa de concentração do Neo-Pentano – dados da gasometria.

216

Apêndice II 11 – Mapa de concentração do I-Pentano – dados da gasometria.217

Apêndice II 12 – Mapa de concentração do N-Pentano – dados da gasometria.

218

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Alguns efeitos devido à exposição à concentrações distintas de CO ₂	69
Tabela 2.2 Estimativa de armazenamento de CO ₂ . Modificado de IPCC, (2005)	71
Tabela 3.1 - Tabela gerada pelo programa com as concentrações dos hidrocarbonetos presentes na amostra pelo Laboratório de Estudos Marinhos e Ambientais da PUC - Rio - LABMAN.	102
A Tabela 4.2, definida por Landim, (2000) apresenta algumas vantagens e limitações deste método de interpolação. Tabela 4.1 – Vantagens e desvantagens do interpolador inverso ponderado da distância (Landim, 2000)	125
Tabela 4.1 – Vantagens e desvantagens do interpolador inverso ponderado da distância (Landim, 2000)	126
Tabela 4.2 – Vantagens e desvantagens do interpolador Superfície de Tendência Polinomial (Landim, 2000).	127
Tabela 4.3 – Vantagens e desvantagens do interpolador Triangulação (Landim, 2000).	128
Tabela 4.4 – Vantagens e desvantagens do interpolador Krigagem (Landim, 2000).	132
Tabela 4.5 – Comparação entre os Métodos de Interpolação (Modificado de Krajewski e Gibbs, 1966).	134
Tabela 5.1 – Estatística Descritiva Clássica dos dados coletados em campo.	138
Tabela 5.2 – Estatística Descritiva Clássica dos dados obtidos com a gasometria.	139
Tabela 5.2 Continuação– Estatística Descritiva Clássica dos dados obtidos com a gasometria.	140
Tabela 5.3 – Correlação Linear Simples dos dados coletados em campo.	141
Tabela 5.4 – Coeficientes dos Semivariogramas de CO ₂ .	154
Tabela 5.5 – Coeficientes dos Semivariogramas de CH ₄ .	161
Tabela 5.6 – Valores de R ² para linhas de tendência de valores de Rn x CO ₂ por tipo de solo.	165
Tabela 5.7 – Coeficientes dos Semivariogramas de Rn.	168
Tabela 5.8 – Coeficientes dos Semivariogramas de NMP.	173
Tabela 5.9 – Valores de porosidade para algumas amostras.	180