COPPE/UFRJ

DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE MÁSCARA ESPAÇO-TEMPORAL BAYESIANA PARA AVALIAÇÃO DE EFEITOS AMBIENTAIS DECORRENTE DO DESCARTE DE ATIVIDADES DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO.

Fernando Hepp Pulgati

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Luiz Landau

Jandyra Maria Guimarães Fachel

Rio de Janeiro

Março de 2009

DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE MÁSCARA ESPAÇO-TEMPORAL BAYESIANA PARA AVALIAÇÃO DE EFEITOS AMBIENTAIS DECORRENTE DO DESCARTE DE ATIVIDADES DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO.

Fernando Hepp Pulgati

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

_____
Prof. Luiz Landau, D.Sc.

_____
Profa. Jandyra Maria Guimarães Fachel, D.Sc.

_____
Prof. Dr. Robin Thomas Clarke, D.Sc.

_____
Prof. Elírio Ernestino Toldo Junior, D.Sc.

_____
Prof. Nelson Fransisco Favilla Ebecken, D.Sc.

_____
Prof. Alexandre Gonçalves Evsukoff, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2009

Pulgati, Fernando Hepp

Desenvolvimento do conceito de Máscara Espaço-Temporal Bayesiana para avaliação de efeitos ambientais decorrente do descarte de atividades de exploração e produção/ Fernando Hepp Pulgati. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXIV, 176 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luiz Landau

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 152-155.

1. Análise Bayesiana. 2. Geoestatística. 3. BACI. I. Landau, Luiz *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Titulo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE) e ao Programa de Engenharia Civil (PEC) pela oportunidade de realizar o curso de Pós Graduação.

À Universidade Federal de Santa Maria, representada pelo Departamento de Estatística, pelo apoio prestado no período em que precisei me dividir entre aluno e professor.

Aos meus pais pelo apoio incondicional ao longo de toda a trajetória de minha carreira professional, marcada agora por mais uma conquista.

À minha esposa Letícia e meu enteado Fernando pela compreensão e carinho nos intermináveis finais de semana dedicados ao estudo.

Ao meu orientador, Luiz landau (UFRJ), pela determinação e esforço em proporcionar sempre as melhores condições para o desenvolvimento do presente estudo.

À minha orientadora e querida amiga professora Jandyra M. G. Fachel, pelos investimentos pessoais, paciência e compreensão necessários para a conclusão desta etapa em minha carreira profissional.

Ao professor Elírio E.Toldo Junior e ao Instituto Brasileiro de Petróleo pela disponibilização dos bancos de dados que possibilitaram a realização deste estudo.

A todos os colegas da equipe do Projeto MAPEM pela oportunidade do exercício de um trabalho multidisciplinar que contribui para troca e ampliação do conhecimento entre diversas áreas do saber, exigidos num estudo de tamanha magnitude e de caráter inovador.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE MÁSCARA ESPAÇO-TEMPORAL BAYESIANA PARA AVALIAÇÃO DE EFEITOS AMBIENTAIS DECORRENTE DO DESCARTE DE ATIVIDADES DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO.

Fernando Hepp Pulgati

Março/2009

Orientadores: Luiz Landau
Jandyra Maria Guimarães Fachel.

Programa: Engenharia Civil

Este estudo descreve o conceito de máscara espaço temporal usando modelos Bayesianos com o objetivo de definir as reais áreas de Controle e Impacto possibilitando a avaliação de mudanças na meiofauna e macrofauna exposta aos descartes da atividade de perfuração, ao longo do tempo, aplicando a estratégia conhecida como BACI (*Before-After Control_Impact*). Para se de determinar os efeitos de fluidos e cascalhos da perfuração de poços de óleo e gás, é crucial conhecer não somente o real destino do material descartado, mas também as concentrações a que a biota foi exposta durante e após a perfuração. O bário e a soma dos hidrocarbonetos C14-C20 incluindo suas misturas complexas não resolvidas (UCM C14-C20) foram usadas como traçadores dos fluidos aquosos e não aquosos numa locação de água rasa na Bacia de Campos (Brasil). Esta área apresentou evidências de já ter sido exposta a descartes de perfurações pretéritas e desta forma, a análise teve que considerar a concentração basal destes contaminantes. Os procedimentos estatísticos adotados permitem a comparação entre áreas amostradas e a previsão da concentração de contaminantes em áreas não amostradas, distinguindo as regiões que receberam o aporte dos descartes das fases perfuradas com fluidos de base aquosa e não aquosa, em áreas prístinas ou previamente contaminadas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF "BAYESIAN SPATIO-TEMPORAL MASK" FOR THE ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL EFFECTS OF OFFSHORE EXPLORATION AND PRODUCTION DISCHARGES.

Fernando Hepp Pulgati

Março/2009

Advisors: Luiz Landau

Jandyra Maria Guimarães Fachel.

Department: Civil Engineering

This study describes the use of Bayesian spatial models to develop the concept of a spatial-temporal mask for the purpose of identifying areas in which before and after-drilling effects are most clearly defined and from which the consequences of exposure of macrofauna and meiofauna to the release of drilling discharges can be evaluated over time. The method uses the approach termed BACI (Before-After Control-Impact). To determine the effects of drilling fluids and drill-cuttings on the marine benthic community, it is essential to know not only where discharged materials ended up within the possible impact area, but also the chemical concentrations to which biota were exposed during and after drilling. Barium and light hydrocarbons were used as chemical tracers for water-based and non-aqueous-based fluids in a shallow water site in the Campos Basin, off the coast of Brazil, but since the site showed evidence of exposure to waste material from earlier drilling, the analysis needed to take into account the background concentrations of these compounds. Using the statistical models described, comparisons were made among sampled areas and concentrations at unsampled sites were predicted.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

1. Introdução..... 1

1.1. O Projeto MAPEM..... 6

1.2. Objetivo do estudo..... 11

CAPÍTULO 2..... 11

2. Inferência Bayesiana e o modelo geoestatístico..... 11

2.1. O Teorema de Bayes..... 12

2.2. Estimação do Intervalo de Credibilidade Bayesiano..... 14

2.3. Predição Bayesiana: a Distribuição Preditiva..... 15

2.4. Métodos de simulação empregados para realizar Inferência Bayesiana….. 16

2.4.1. O método de Monte Carlo..... 17

2.4.2. Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC)..... 20

2.5. Modelo Geoestatístico..... 24

2.5.1. Suposições do modelo Geoestatístico..... 25

2.5.1.1. Estacionariedade……. 25

2.5.1.2. Estacionariedade de Segunda ordem..... 26

2.5.1.3. Estacionariedade Intrínseca..... 27

2.5.1.4. Ergodicidade..... 28

2.5.1.5. Isotropia……. *28*

2.5.1.5. Anisotropia..... 29

2.5.1.6. Processo Gaussiano..... 29

CAPÍTULO 3..... 34

3. Estratégia de amostragem..... 34

3.1. Delineamento experimental BACI *(Before-After Control-Impact)*..... 34

CAPÍTULO 4..... 49

4 MAPEAMENTO DAS ÁREAS COM REGISTROS DA ATIVIDADE DE PERFURAÇÃO: FORMULAÇÃO DO CONCEITO DE MÁSCARA -*MASK* 49

4.1. Análises geoestatísticas dos indicadores das fases de perfuração no MS1. 51

4.1.1. n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}; ppm)…….. 51

4.1.2. Bário – MS1; ppm..... 61

4.2. Análises geoestatísticas dos indicadores das fases de perfuração no MS2. 71

4.2.1. n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}; ppm)…….. 71

4.2.2. Bário (ppm)..... 81

4.2.3. Unificação das regiões alteradas em MS1 e MS2..... 89

4.3 Análises geoestatísticas dos indicadores das fases de perfuração no MS3.... 92

4.3.1 n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}; ppm)…….. 92

4.3.2 Bário MS3 (Ba; ppm)..... 102

CAPÍTULO 5..... 113

5. Integração das regiões alteradas no MS1, MS2 e MS3..... 113

5.1.Área total predita relativa às regiões delimitadas pela modelagem geoestatística…….. 118

CAPÍTULO 6..... 119

6. MODELO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA): DEFINIÇÃO DO MODELO E COMPONENTES DE VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL... 119

6.1. Componentes de variação espaço-temporal..... 119

6.1.1. Modelo hierárquico cruzado..... 119

CAPÍTULO 7..... 129

7. DEMONSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DA ABORDAGEM BACI UTILIZANDO O CONCEITO DE MÁSCARA ESPAÇO-TEMPORAL NA AVALIAÇÃO DE EFEITOS DOS DESCARTES DA PERFURAÇÃO SOBRE A BIOTA..... 129

7.1. Fundamentos da análise BACI aplicada ao Número de famílias da meiofauna……. 130

7.2. Fundamentos da análise BACI aplicada indicador biológico da macrofauna Vágeis Detritívoros……. 136

7.3. Fundamentos da análise BACI aplicada indicador biológico da macrofauna *Polychaeta*/*Crustacea* (NPO/NCRP)…….. 138

CAPÍTULO 8……. 142

8. Conclusão..... 142

BIBLIOGRAFIA..... 135

ANEXO I..... 147

ANEXO II..... 149

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 Delineamento amostral centrado no poço de exploração e/ou produção..... 4

Figura 1.2. Localização da área de estudo. Fonte: UFRGS/IGEO/CECO..... 7

Figura 1.3. Localização da área de estudo; Bloco BO. Fonte: PETROBRAS..... 7

Figura 1.2. Delineamento amostral especificado para o Projeto MAPEM……..... 8

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Localização das estações amostrais em cada radial de distância e a respectiva numeração. A distância entre as regiões Controle e Impacto não está na escala real……...… 36

Figura 3.2. Localização das estações amostrais seguindo o delineamento BACI, com localização georeferenciada das estações de controle …...……..... 37

Figura 3.3. Plataformas de produção localizadas no entorno da área estudada….. 38

Figura 3.4. Delineamento amostral junto aos dutos e demais equipamento característicos de uma área de produção de hidrocarbonetos……. 39

Figura 3.5. Mapa das estações amostradas no MS1 e da área de exclusão definida pela presença de poços de produção e dutos de transporte de hidrocarbonetos…… 41

Figura 3.6. Delineamento amostral previamente planejado para MS2, considerando os dois poços perfurados, BO-22 e BO-23. As estações de referência não estão representadas. Figura construída com informações da PETROBRAS…… 42

Figura 3.7. Delineamento amostral previamente planejado para o MS2, considerando os poços BO-22 e BO-23, e áreas de exclusão definidas pelos poços, "árvores-de-natal" e dutos instalados no local do estudo. Obs: As estações de referência não estão representadas na figura…….…….. 43

Figura 3.8. Delineamento amostral executado no MS2, a partir das áreas de exclusão definidas pelos poços BO-22 e BO-23, árvores-de-natal e dutos instalados no local do estudo. Obs.: as estações de referência não estão representadas na figura..... 43

Figura 3.9. Delineamento amostral executado no MS3, a partir das áreas de exclusão definidas pelos poços BO-22 e BO-23, árvores-de-natal e dutos instalados no local do estudo. Obs.: as estações de referência não estão representadas na figura…… 44

Figura 3.10. Áreas não amostradas em pelo menos uma dentre as três operações de amostragem (MS1, MS2 e MS3)..... 45

Figura 3.11. Delineamento amostral conforme estratégia BACI…… 46

Figura 3.12. Foto do Box Core utilizado no projeto MAPEM..... 48

Figura 3.13. Foto do equipamento de amostragem *(Box Core)* sendo içado para a superfície trazendo a amostra de sedimento do fundo oceânico……... 48

Figura 3.14. Retirada da água que foi coletada junto com o sedimento de fundo. A presença da água garante que a amostra não foi "lavanda" durante o içamento para a superfície……... 49

Figura 3.15. Fracionamento da amostra realizado para atender os diferentes procedimentos de coleta (Biologia, Química, Geologia e arquivo)……. 49

CAPÍTULO 4 42

Figura 4.1.1. Concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS1, incluindo as estações de referência (a), e em (b), descrevendo a localização geográfica da "árvore-de-natal" e dutos instalados antes da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23……... 52

Figura 4.1.2. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 com os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em relação à variável n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), no MS1…….... 54

Figura 4.1.3. Gráfico descritivo da superfície de tendência fornecida pelo modelo de regressão não-paramétrico Local *(loess)*.…… 55

Figura 4.1.4. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas w. …….. 55

Figura 4.1.5. Gráfico descritivo com a distribuição espacial do logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local *(loess)*.……. 56

Figura 4.1.6. Descrição da evolução da cadeia referente ao parâmetro β…… 57

Figura 4.1.7. Descrição das evoluções das cadeias referentes aos parâmetros β(a), τ(b), e ϕ(c). A Figura (d) descreve a densidade a posteriori para o parâmetro ϕ…… 58

Figura 4.1.8. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS1…… 59

Figura 4.1.9. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS1…… 59

Figura 4.1.10. Pixels (vetores de coordenadas) com probabilidade maior que 0,95 de serem superiores à mediana local para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS1…….. 60

Figura 4.1.11. Concentrações de bário (ppm) observadas no MS1, incluindo as estações de referência (a), e em (b), descrevendo a localização geográfica da "árvore-de-natal" e dutos instalados antes da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23…… 62

Figura 4.1.12. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 para as concentrações de bário no MS1 e os valores ajustados pelo modelo de regressão local…….. 63

Figura 4.1.13. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador bário. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$…… 64

Figura 4.1.14. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas w…… 64

Figura 4.1.15. Gráfico descritivo com a distribuição espacial das concentrações de bário ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico Local. 65

Figura 4.1.16. Descrição das evoluções das cadeias e densidade correspondente ao parâmetro ϕ…… 66

Figura 4.1.17. Distribuição do efeito espacial (a) e em (b), a superfície estocástica para os resíduos do logaritmo das concentrações de bário em MS1…. 67

Figura 4.1.18. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência do logaritmo das concentrações de bário em MS1…….. 67

Figura 4.1.19. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações bário em MS1……... 68

Figura 4.1.20. Pixels (vetores de coordenadas) com probabilidade maior que 0,95 de serem superiores a mediana local para o bário…… 69

Figura 4.1.21. Regiões estatisticamente diferentes dentro do MS1…… 70

Figura 4.1.22. Regiões alteradas por atividades pretéritas, definidas a partir dos traçadores dos fluidos de perfuração, bário e n-parafinas…… 70

Figura 4.2.1. Concentrações n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS2; variável original (a), variável suavizada *(trimmed)* (b), variável transformada (c)……. 72

Figura 4.2.2. Concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS2, mostrando a localização geográfica da "árvore-de-natal", dutos instalados antes da atividade monitorada e ligados aos poços BO-22 e BO-23. No centro da malha, à esquerda, o poço BO-23 e a direita, o poço BO-22, ambos conectados a dutos de escoamento……... 74

Figura 4.2.3. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 com os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em relação à variável n-parafinas no MS2……. 75

Figura 4.2.4. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador n-parafinas. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$. 76

Figura 4.2.5. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas (Leste e Norte)…….. 76

Figura 4.2.6. Gráfico descritivo com a distribuição espacial dos intervalos das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local……. 77

Figura 4.2.7. Descrição da evolução da cadeia e densidade correspondente ao parâmetro ϕ ……. 78

Figura 4.2.8. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS2……..... 79

Figura 4.2.9. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no MS2……. 80

Figura 4.2.10. Região alterada (cor cinza) pela variável n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período compreendido entre o primeiro e o Segundo cruzeiro (MS1 e MS2)……. 81

Figura 4.2.11. Concentrações de bário observadas no MS2 com a localização geográfica da "árvore-de-natal" e dutos instalados antes da atividade monitorada (Norte) e os poços BO-22 e BO-23, com dutos na direção Sudoeste, instalados após a perfuração dos poços…… 82

Figura 4.2.12. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações de bário +1 e os valores ajustados pelo modelo de regressão local, no MS2…… 83

Figura 4.2.12. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador bário. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$ ……. 84

Figura 4.2.13. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetores de coordenadas (Leste e Norte)……. 85

Figura 4.2.14. Gráfico descritivo da superfície ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local. As concentrações de bário foram discretizadas em quatro intervalos……. 85

Figura 4.2.15. Descrição da evolução da cadeia e densidade correspondente ao parâmetro ϕ…… 86

Figura 4.2.16. Distribuição espacial da superfície estocástica dos resíduos do logaritmo das concentrações de bário em MS2, visualizada em 2 ângulos (a) e (b)…… 87

Figura 4.2.17. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência do logaritmo das concentrações de bário em MS2…… 87

Figura 4.2.18. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações bário em MS2…… 88

Figura 4.2.19. Região alterada (cor cinza) pelo marcador bário no período compreendido entre o primeiro e o segundo cruzeiro (MS1 e MS2)…… 89

Figura 4.2.20. Regiões alteradas por bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período entre o MS1 e o MS2…….. 90

Figura 4.2.21. Regiões alteradas, definidas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23, e regiões com Estímulo de Base…….. 90

Figura 4.2.22. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23 e regiões com Estímulo de Base com redução de três para dois grupos…… 91

Figura 4.2.23. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23 e regiões com Estímulo de Base com redução de três para dois grupos…… 92

Figura 4.3.1. Concentrações n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS3; variável original (a), suavizada *(trimmed)* (b), e variável transformada (c)…….. 93

Figura 4.3.2. Concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS3, mostrando a localização geográfica da "árvore-de-natal", dutos instalados antes da atividade monitorada e dutos ligando os poços BO-22 e BO-23…… 94

Figura 4.3.3. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) e os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em MS3……. 96

Figura 4.3.4. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão local. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$…….. 97

Figura 4.3.5. Regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; Leste e Norte…….. 97

Figura 4.3.6. Gráfico descritivo da superfície ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local. As concentrações de n-parafinas foram discretizadas em quatro intervalos……. 98

Figura 4.3.7. Descrição das evoluções das cadeias e densidade correspondente aos parâmetros β e ϕ…… 99

Figura 4.3.8. Distribuição espacial da superfície estocástica, mostrando o Intervalo Bayesiano com 95% de credibilidade para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS3…… 99

Figura 4.3.9. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) para cada pixel. 100

Figura 4.3.10. Região alterada por n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período entre o MS1 e o MS3……. 101

Figura 4.3.11. Região alterada (preenchimento cinza) nas concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período compreendido entre o MS1 e o MS3, e uma segunda região (hachurada), sinalizando o retorno no MS3 aos níveis observados no MS1……. 102

Figura 4.3.12. Concentrações de bário observadas no MS3 com a localização geográfica da "árvore-de-natal" e dutos instalados antes da atividade monitorada (Norte) e os poços BO-22 e BO-23, com dutos na direção Sudoeste, instalados após a perfuração dos poços…… 103

Figura 4.3.13. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 com os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em relação à variável bário no terceiro cruzeiro…….. 104

Figura 4.3.14. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador bário no MS3..…….. 105

Figura 4.3.15. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas (Leste e Norte)……. 106

Figura 4.3.16. Gráfico descritivo da superfície ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico Local. As concentrações de bário foram discretizadas em quatro intervalos…… 107

Figura 4.3.17. Descrição da evolução da cadeia e densidade correspondente ao parâmetro ϕ…….. 108

Figura 4.3.18. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência para o logaritmo das concentrações de bário em MS3…… 108

Figura 4.3.19. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações de bário em ppm…….. 109

Figura 4.3.20. Região alterada pela variável bário no período entre o MS1 e o MS3 (preenchimento cinza)…….. 110

Figura 4.3.21. Região alterada (preenchimento cinza) nas concentrações do bário no período entre o MS1 e o MS3, e região (preenchimento hachurado) com retorno, no MS3, aos níveis observados no MS1…….. 111

Figura 4.3.22. Região alterada (preenchimento cinza) nas concentrações do bário no período entre o MS2 e o MS3, destacando, a Nordeste, o aumento significativo do bário no MS2, em relação ao MS3…….. 112

Figura 4.3.23. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos de perfuração…. 112

CAPÍTULO 5…….. 115

Figura 5.1. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos de perfuração no MS1 (a), MS2 (b) e MS3 (c)…….. 115

Figura 5.2. Grupos definidos a partir dos indicadores dos fluidos de perfuração no MS1 (a), MS2 (b) e MS3 (c)…… 117

CAPÍTULO 6…….. 122

Figura 6.1.1. Regiões Controle, Impacto e EB no MS1 e MS2. Figura modelo para a descrição dos níveis dos fatores do modelo…… 122

Figura 6.1.2. Regiões Controle, Impacto e EB no MS3…… 122

Figura 6.1.30. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23…….. 129

CAPÍTULO 7..... 129

Figura 7.1.1. Gráfico de perfis da interação Cruzeiro × C_I para a raiz quadrada variável Número de famílias da meiofauna (médias destransformadas)…… 131

Figura 7.1.2. *Boxplot* para a variável Número de famílias da meiofauna (ME_SF), considerando a interação Cruzeiro × C_I……. 132

Figura 7.1.3. Descrição espacial da raiz quadrada da variável Número de famílias (ME_SF) da meiofauna no MS3, com as respectivas áreas de Impacto, Controle e Estímulo de Base. Obs.: O método de interpolação é descritivo. ……. 133

Figura 7.1.4. Gráfico das comparações múltiplas de médias para a raiz quadrada da variável Número de famílias da meiofauna (ME_SF), considerando a interação dos fatores Cruzeiro × Fluido(C_I) (médias destransformadas)…… 135

Figura 7.1.5. *Boxplot* para a variável Número de famílias da meiofauna (ME_SF), considerando a interação Cruzeiro × Fluido(C_I)……. 135

Figura 7.1.6. Gráfico de perfis da interação Cruzeiro × C_I para a variável Densidade de Vágeis Detritívoros (VA_DET)…… 137

Figura 7.1.7. Distribuição espacial da densidade de Vágeis Detritívoros na região Impacto no MS2 (interpolação *krigeagem* para fins descritivos da raiz cúbica de Vágeis Detritívoros)……. 138

Figura 7.1.8. Gráfico de perfis da interação Cruzeiro × C_I para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea*…… 139

Figura 7.1.9. Distribuição espacial da intensidade da Razão de *Polychaeta*/*Crustacea* no MS2, considerando os níveis do fator C_I (interpolação descritiva da razão NPO/NCRP)…….. 140

Figura 7.1.10. Gráfico das comparações múltiplas de médias para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea*, considerando a interação Cruzeiro × Fluido(C_I)…… 141

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 3.....

Tabela 3.1. Número de pontos amostrais analisados em suas concentrações de bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20})…….. 47

Tabela 3.2. Número de pontos amostrais coincidentes nas operações de amostragem e analisados em suas concentrações de bário e n-parafinas…… 47

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1. Estatísticas descritivas para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm……. 51

Tabela 4.2. Estatísticas descritivas para as concentrações de n-parafinas, observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$……. 53

Tabela 4.3. Estatísticas descritivas correspondentes as concentrações de bário observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm…… 61

Tabela 4.4. Estatísticas descritivas para as concentrações de bário observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$…… 62

Tabela 4.5. Estatísticas descritivas para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm…….. 71

Tabela 4.6. Estatísticas descritivas referente às concentrações de n-parafinas observadas no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$…… 73

Tabela 4.7. Estatísticas descritivas da variável bário, observada no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm…… 82

Tabela 4.8. Estatísticas descritivas das concentrações de bário observadas no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$…… 83

Tabela 4.9. Estatísticas descritivas das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm…….. 93

Tabela 4.10. Estatísticas descritivas das concentrações de n-parafinas observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$…… 95

Tabela 4.11. Estatísticas descritivas das concentrações de bário observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm…….. 103

Tabela 4.12. Estatísticas descritivas do logaritmo das concentrações de bário observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm do $y = \ln(x+1)$……. 104

CAPÍTULO 5……... 118

Tabela 5.1. Área correspondente a cada região delimitada pela modelagem geoestatística……. 118

Tabela 5.2. Variação na área de cada região durante o período compreendido pelo MS1, MS2 e MS3…… 118

CAPÍTULO 6……... 119

Tabela 6.1.1. Estrutura do modelo ANOVA aplicado a partir da estratégia BACI descrevendo o Fator Cruzeiro e o Fator Controle Impacto……. 124

Tabela 6.1.2. Estrutura do modelo ANOVA aplicado a partir da estratégia BACI descrevendo o Fator Fluido, hierárquico ao Fator Controle-Impacto…… 125

CAPÍTULO 7……... 129

Tabela 7.1. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × C_I para a raiz quadrada da variável Número de famílias da meiofauna (médias destransformadas)……. 131

Tabela 7.2. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × Fluido(C_I) para a raiz quadrada da variável Número de famílias da meiofauna... 133

Tabela 7.3. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × C_I para a variável Densidade de Vágeis Detritívoros…….. 136

Tabela 7.4. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × C_I para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea*…… 139

Tabela 7.5. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × Fluido(C_I) para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea*…… 141

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos efeitos das atividades de exploração e produção de óleo e gás em regiões costeiras e oceânicas ainda representa um dos principais focos de interesse de órgãos ambientais, da sociedade e da academia, particularmente no que se refere aos impactos crônicos impostos por estas atividades aos ecossistemas marinhos.

Dentre os principais fatores de estresse, os descartes contínuos das atividades de desenvolvimento e produção de óleo e a deposição e acúmulo de materiais sólidos da perfuração no assoalho oceânico são normalmente apontados como potenciais agentes causadores de mudanças na qualidade da água, sedimento e biota

Desta forma, para a efetiva gestão ambiental existe a necessidade de se elucidar e distinguir efeitos potenciais, normalmente descritos em estudos de avaliação de impacto ambiental (EIA), daqueles efetivamente observados nos estudos de monitoramento em campo.

A exploração e produção de óleo e gás consistem em um conjunto de atividades dentre as quais se destaca a de construção de poços que além de permitir a coleta de dados e informações sobre o reservatório representa também, a via que conduz óleo e gás à superfície.

Nas operações de perfuração, duas fases podem ser caracterizadas: a fase de perfuração exploratória e a fase de desenvolvimento (OGP, 2003). A fase exploratória é executada com o objetivo de determinar a presença ou não de hidrocarbonetos. Uma vez descobertos, são perfurados poços adicionais para avaliar a viabilidade comercial. Quando positiva, inicia-se a fase de desenvolvimento com a perfuração de novos poços, agora de produção. Os processos de perfuração exploratória e de produção são

semelhantes, porém seus efeitos sobre o meio ambiente podem ser diferentes devido aos volumes e condições de descarte e assentamento dos rejeitos no assoalho oceânico, quer para as operações de longo prazo como as de curto prazo.

Na perfuração de um poço, utiliza-se uma broca presa a extremidade de um tubo, conhecido como coluna de perfuração, que perfura a formação triturando a rocha. Durante este processo, são utilizados fluidos de perfuração que tem os seguintes objetivos: remover os pequenos fragmentos de rocha produzidos pela ação da broca, conhecidos como cascalhos de perfuração *(cuttings)*, resfriar a broca de perfuração e, finalmente, manter o controle sobre a pressão do poço (OGP, 2003).

Existem duas classificações para os fluidos de perfuração: os fluidos de base água, conhecidos como WBF *(Water Base Fluid)* e os fluidos de base não aquosa conhecidos como NAFs *(non aqueous fluid)*. Os WBFs são constituídos por água misturada com bentonita e outros aditivos tais como, sulfato de bário ou baritina, sais de sódio e potássio, entre outros. Já os NAFs formam o grupo de fluidos de baixa solubilidade em água. De uma maneira geral, os fluidos WBFs são empregados para perfurar a fase rasa do poço enquanto que os NAF são empregados nas fases profundas, incluindo poços direcionais e horizontais, frequentemente associados com desenvolvimento em ambientes marinhos ou *offshore*. Normalmente, uma parcela significativa do total de NAF empregado no poço é recuperada para reciclagem, pois padrões mundiais não permitem a descarga dos mesmos no ambiente, além das razões econômicas motivadoras de tal procedimento (OGP, 2003).

Os fragmentos de rocha perfurada genericamente denominado cascalho de perfuração, são trazidos a plataforma pelo fluido de perfuração. Neste momento incia-se o processo de separação dos sólidos que envolvem peneiramento e centrifugação, permitindo desta forma que o fluido possa ser reinjetado no poço. Alguns finos

continuarão presentes no fluido, o que exigirá no futuro uma nova reciclagem. Ainda assim, uma parcela do fluido continuará aderida aos cascalhos.

Se o cascalho gerado e tratado atender aos padrões locais de descarte, estes poderão ser lançados no ambiente continuamente durante a atividade de perfuração. De modo geral, acredita-se que a deposição do cascalho da perfuração com fluidos de base água (WBFs) possa apresentar fatores físicos de estresse biológico, enquanto que os cascalhos gerados com o uso de fluidos não aquosos (NAFs), possam apresentar fatores físicos e químicos de estresse biológico.

São muitas as preocupações ambientais relacionadas à descarga de cascalhos revestidos de fluidos não aquosos em ambientes marinhos, dentre as quais se destaca:

- Persistência de substâncias não degradáveis no ambiente
- Soterramento das comunidades bentônicas, também a associado aos cascalhos com fluidos WBFs.
- Enriquecimento orgânico e depleção de oxigênio nos sedimentos devido à biodegradabilidade da base orgânica dos NAF's.
- Toxicidade
- Bioacumulação

As características físicas e químicas das deposições do cascalho dependerão das condições hidrodinâmicas locais, quantidade de material descarregado, composição dos fluidos e concentração de NAFs. Quando descarregados na coluna d'água, e sob as mesmas condições, cascalhos associados a fluidos WBFs tendem a se dispersar com mais facilidade, diferentemente dos cascalhos associados a fluidos NAFs. Cascalhos envoltos por fluidos NAFs tendem a se agregar e ter maior velocidade de queda

depositando-se em áreas menores, aumentando a probabilidade da formação de pilhas deste material, de forma heterogênea, no entorno da sonda de perfuração.

Estudos de avaliação e monitoramento de impactos ambientais dos descartes das atividades de exploração e produção de óleo e gás em ambientes marinhos frequentemente adotam delineamentos amostrais centrados nos poços ou plataformas (Figura 1.1).

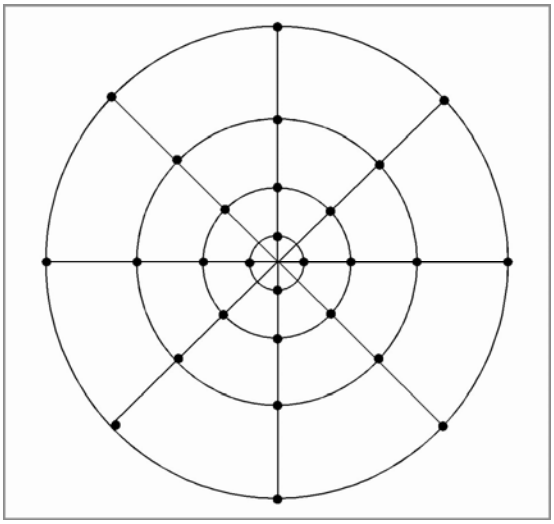


Figura 1.1. Delineamento amostral centrado no poço de exploração e/ou produção.

Estes desenhos são constituídos de círculos concêntricos com radiais a diferentes distâncias do ponto de descarte, que podem variar de 50 m até 10.0000 m, conforme o local de estudo ou transectos partindo do centro em direções previamente determinadas. Os pontos de amostragem são então distribuídos de acordo com a localização das radiais e/ou transectos. Existem casos em que as estações de coleta ficam localizadas sobre as radiais e caso em que as estações de coleta ficam localizadas entre as radiais. A mesma estratégia é aplicada nos caso de transectos.

Definida a configuração da malha, as estações são distribuídas de forma aleatória ou mesmo determinística. Por ocasião da análise dos dados, onde o objetivo é avaliar os efeitos biológicos decorrentes do descarte da perfuração, os pontos amostrais são agrupados por similaridade segundo os fatores empregados na malha amostral como, radiais em relação ao centro da malha, quadrantes tomados com base na direção das correntes ou mesmo os alinhamentos dado pelos transectos.

No entanto, considerando o fato de que a deposição dos cascalhos depende de diversos fatores hidrodinâmicos e das características específicas do material descartado tais como, densidade e granulometria da partícula, supor que a deposição sempre ocorra de forma homogênea em torno do poço ou predominantemente segundo a direção das correntes não é, portanto, a maneira adequada para abordar o problema.

A heterogeneidade se verifica tanto pela variação na distribuição espacial das manchas como também na espessura das coberturas e na concentração dos contaminantes (metais e compostos orgânicos) normalmente associados aos descartes das atividades de exploração e produção. Como resultado da prática de se agrupar estações seguindo algum dos critérios *a priori* como distância do ponto de descarte ou direção da corrente, é que, possivelmente os efeitos biológicos procurados poderão ser anulados nos casos onde as estações amostrais que receberam o material descartado forem agrupadas a estações que não receberam tais descargas.

Por conseguinte, se o propósito é avaliar o estresse biológico decorrente da deposição dos elementos químicos e físicos marcadores da atividade de perfuração, torna-se necessária a implementação de uma estratégia de análise dos dados para definir, *a posteriori*, os pontos amostrais que realmente foram alterados pela deposição dos agentes estressores de interesse associados à atividade monitorada. A implementação desta estratégia possibilita então a construção de modelos dose-resposta que viabiliza a avaliação de impactos decorrentes dos descartes da atividade definindo

fatores com base não somente no tipo de agente estressor, mas também na intensidade ou níveis dos mesmos.

Como resultado final, a análise dos efeitos dos agentes estressores sobre a biota, representados pelos diferentes agentes químicos e físicos em diferentes intensidades de concentrações, permite identificar as respostas dos organismos efetivamente expostos, atribuindo corretamente, as possíveis causas dos efeitos observados em campo.

Este tipo de abordagem amplia a capacidade de detecção de efeitos, e por conseqüência, a robustez de métodos de estudos ambientais e experimentos de campo como o tradicional método conhecido como BACI, *Before-After Control-Impact*.

1.1 O Projeto MAPEM

O Projeto MAPEM - "Monitoramento Ambiental em atividades de Perfuração Exploratória Marítima" teve início em 2001 e foi estabelecido para avaliar os efeitos ambientais sobre as comunidades bentônicas (meiofauna e macrofauna) decorrente do descarte de cascalhos *(cuttings)* envoltos por fluidos não aquosos (NAFs, *non-aquous fluid)*, tanto em ambiente de águas rasas como de águas profundas. Para tanto, foram selecionados dois locais para serem avaliados: o primeiro em lâmina d'água de 900 m e um segundo em lâmina d'água de aproximadamente 200 m de profundidade (Toldo e Zouain, 2008). A seleção dos poços foi realizada segundo critérios ambientais, logístico e de segurança resultando na escolha do poço Eagle, da operadora UNOCAL para o ambiente de águas profundas e para águas rasas, os poços BO-22 e BO-23, da Petrobras, localizados no Campo de Bonito, ambos na Bacia de Campos. A Figura 1.2 descreve a localização da área de estudo em águas rasas, enquanto que a Figura 1.3 descreve na margem continental, a localização dos municípios de Macaé, Arraial do Cabo e Cabo Frio e no Ocenao Atlântico, o Bloco BO, onde foram realizadas as perfurações dos poços BO-22 e BO23.

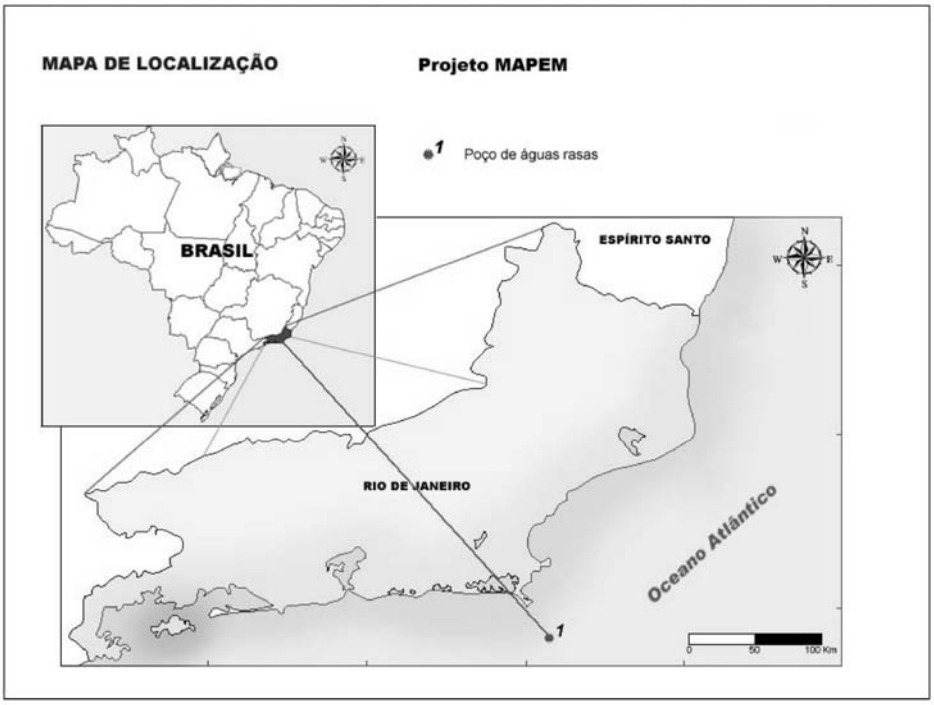


Figura 1.2. Localização da área de estudo. Fonte: UFRGS/IGEO/CECO

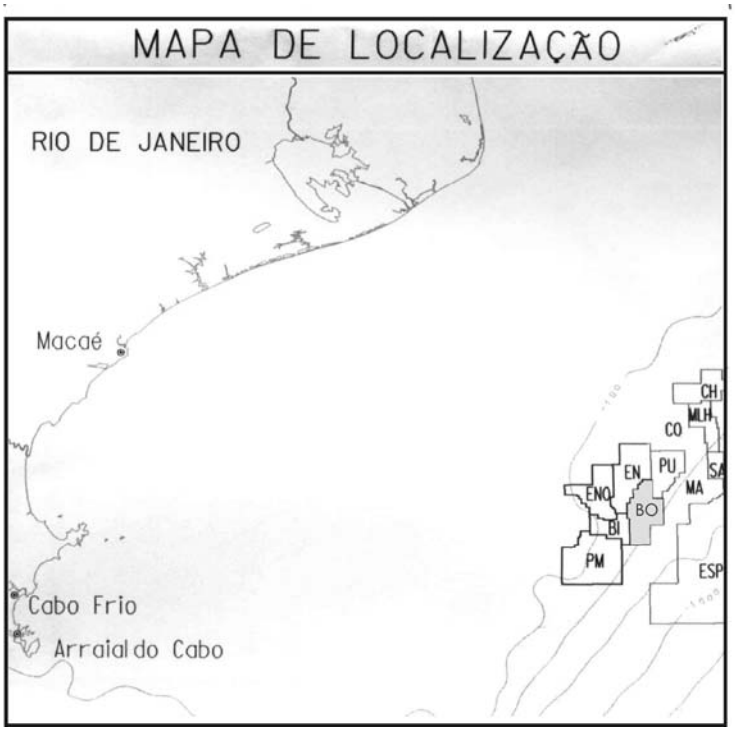


Figura 1.3. Localização da área de estudo; Bloco BO. Fonte: PETROBRAS.

As condições ambientais foram observadas em áreas de conhecimento específico como Geologia, Química e Biologia em três períodos amostrais identificados pelas siglas MS1, MS2 e MS3. A Figura 1.4 descreve o delineamento amostral inicialmente idealizado para o Projeto MAPEM. A estratégia compreendia replicar a mesma estrutura de distribuição espacial das amostras em três ocasiões distintas, sendo uma antes e duas após a atividade de perfuração.

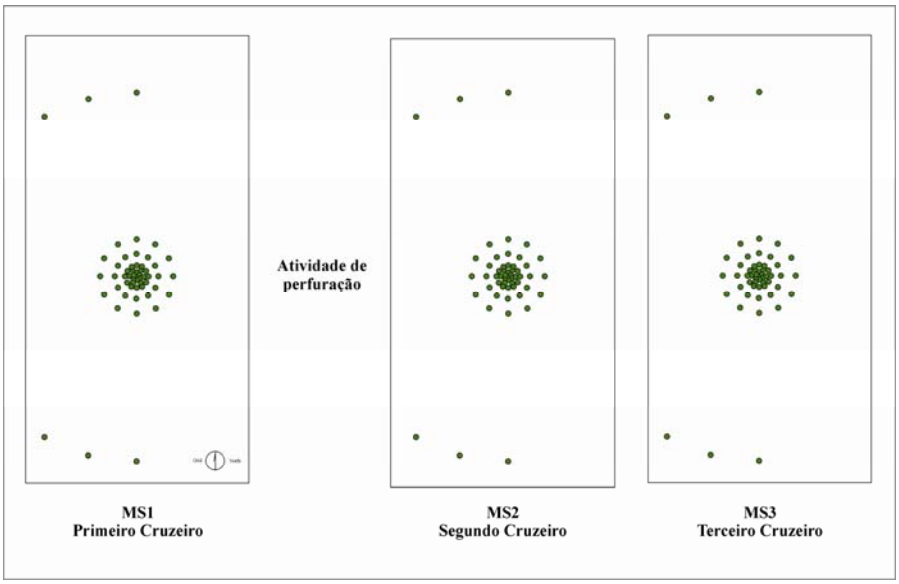


Figura 1.4. Delineamento amostral especificado para o Projeto MAPEM.

O primeiro ocorreu antes da atividade de perfuração e teve como objetivo principal investigar as características ecológicas da área antes da atividade antrópica. O segundo, após a atividade de perfuração, teve por objetivo geral investigar possíveis mudanças no ambiente em face dos parâmetros de avaliação adotados no presente estudo. E finalmente o terceiro, aproximadamente vinte e dois meses após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23, com o propósito de acompanhar a evolução das mudanças.

O presente estudo utilizou os dados coletados no ambiente de águas rasas do Projeto MAPEM junto aos poços da PETROBRAS, BO-22 e BO-23 localizados no Campo de Bonito. O propósito é desenvolver uma metodologia de cunho probabilístico para mapear regiões amostrais que apresentam deposição de contaminantes desconhecidas *a priori*, com isto, abordar o desafio de analisar dados de estudos de monitoramento ambiental aplicando a estratégia BACI em regiões de deposição e de distribuição de contaminantes espaço-temporal heterogênea.

Na operação destes poços foram utilizados fluidos aquosos (WBF) e fluidos não aquosos (NAF), este, uma parafina linear composta principalmente por hidrocarbonetos na faixa de C_{14} a C_{20}. O estudo de águas rasas do Projeto MAPEM foi particularmente notável pelo fato de terem sido perfurados dois poços ao invés de apenas um como inicialmente planejado, além dos poços terem sido perfurados em um campo já em desenvolvimento implicando em um plano amostral de maior complexidade devido a regiões de exclusão de amostragem na malha amostral originalmente proposta.

O Capítulo 2 aborda os fundamentos da Inferência Bayesiana, dos métodos computacionais de Monte Carlo Via Cadeias de Markov (MCMC), e modelos Geoestatísticos.

O Capítulo 3 apresenta o delineamento amostral tal como foi planejado originalmente BACI (*Before-After Control-Impact*) e as modificações introduzidas no decorrer dos trabalhos em face de novos elementos inseridos no cenário da região adotada para o estudo, decorrentes da logística da atividade de perfuração.

O Capítulo 4 descreve a metodologia para definir as regiões alteradas pelos diferentes indicadores dos fluidos, considerando as atividades pretéritas já existentes no local e a estratégia BACI (*Before-After Control-Impact*), que serviu de base para avaliação dos dados biológicos. São apresentadas as delimitações das áreas geográficas

com registros de atividades de perfuração dentro do espaço amostral definido para o estudo.

As informações obtidas após o MS1 revelaram um histórico de atividades pretéritas ligadas à exploração de hidrocarbonetos na região, indicando heterogeneidade espacial em alguns elementos físicos e químicos do sedimento marinho, como por exemplo, a presença de bário e de hidrocarbonetos lineares de C_{14} a C_{20}, objetos do presente estudo. A estratégia de análise consistiu em identificar regiões alteradas por atividades pretéritas e regiões alteradas pelas atividades de perfuração dos poços BO-22 e BO-23. A modelagem desenvolvida permitiu controlar diferentes componentes de variações das três operações de amostragem e avaliar mudanças na macrofauna e meiofauna bêntica, comparando-as simultaneamente com variações espaço-temporais naturais ao ambiente estudado, descritas pelo grupo definido como Controle.

O capítulo 5 conclui a estratégia de definição das áreas alteradas, integrando os três cruzeiros, MS1, MS2 e MS3.

O Capítulo 6 complementa o estudo apresentando as definições dos componentes de variações controlados no estudo de águas rasas do Projeto MAPEM. Posteriormente, é definido o modelo estatístico de análise de variância (ANOVA). A complexidade da estrutura dos componentes de variação espaço-temporal, somada às hipóteses de pesquisa definidas *a priori*, obrigaram a implementação de um modelo multifatorial hierárquico cruzado, com modelagem mista de efeitos fixos e aleatórios.

O Capitulo 7 apresenta como exemplo, a estratégia definida como Máscara *(Mask)* sendo empregada para avaliar os efeitos nos indicadores biológicos, estes decompostos em variações associadas às causas naturais, e causas antrópicas. Os efeitos associados às atividades antrópicas foram decompostos em duas fontes: a pretérita e uma segunda associada à perfuração dos poços BO-22 e BO-23. Complementarmente,

foram isolados os efeitos associados ao uso dos diferentes fluidos, base aquosa (WBF) e não-aquosa (NAF).

1.2 Objetivo do Estudo

O presente estudo teve por objetivo desenvolver uma estratégia para a delimitação de diferentes áreas alteradas por elementos normalmente adotados como traçadores dos fluidos de perfuração, agrupando as estações amostrais segundo critérios probabilísticos, permitindo desta forma mensurar no tempo e no espaço, as conseqüências da exposição de organismos da comunidade bentônica aos rejeitos da atividade de perfuração. Tal estratégia foi denominada Máscara Espaço-Temporal, tendo sido construída a partir da aplicação de técnicas geoestatísticas Bayesiana no banco de dados levantados no estudo conhecido como Projeto MAPEM.

CAPÍTULO 2

2. INFERÊNCIA BAYESIANA E O MODELO GEOESTATÍSTICO

Diferentemente da abordagem clássica, a abordagem Bayesiana incorpora na análise de dados toda a informação disponível existente a respeito de um determinado problema, seja ela histórica ou presente, atualizando desta forma, a incerteza inerente aos processos de inferência e de tomada de decisão. O mecanismo formal usado para combinar as informações pretéritas as atuais é conhecido como *Teorema de Bayes*. O Teorema de Bayes envolve o uso de probabilidades logo os resultados obtidos pelos métodos de inferência Bayesiana são baseados em especificações probabilísticas. Estas especificações são realizadas condicionalmente a uma amostra observada, relacionados de alguma forma com as quantidades de interesse.

2.1 O Teorema de Bayes

A descrição apresentada a seguir define o Teorema de Bayes no contexto da Inferência Bayesiana (Gamerman e Lopes, 2006).

Ambos os processos de inferência, Clássica e Bayesiana, são desenvolvidos na presença das observações $x = (x_1, \Lambda\ , x_n)'$, cujos valores são inicialmente representados pela função de probabilidade $f(x/\theta)$.

A quantidade θ expressa a família de possíveis distribuições e representa a característica de interesse que buscamos conhecer para obter a mais precisa descrição do problema em estudo.

Frequentemente existe algum conhecimento preliminar ainda que precário sobre esta quantidade, que sob o enfoque Bayesiano, é incorporado na análise na forma da densidade $p(\theta)$, conhecida como distribuição *a priori*.

Desta forma, a inferência Bayesiana é realizada combinando duas componentes: a distribuição observacional (amostral) $f(x \mid \theta)$ e a distribuição $p(\theta)$.

Na especificação de $p(\theta)$, os parâmetros da distribuição são denominados hiperparâmetros, isto é, os hiperparâmetros (constantes) são os parâmetros da distribuição dos parâmetros. Assumem-se os hiperparâmetros como conhecidos.

A primeira componente da inferência Bayesiana, também conhecida como função de verossimilhança de θ, $l(\theta) = f(x/\theta)$ representa a distribuição condicional de X dado θ. A segunda componente, conhecida como *priori* ou densidade a *priori*, descreve a densidade de θ antes de x ser observado.

É natural imaginarmos que o procedimento de inferência deva ser baseado na distribuição de θ após observar x. Esta nova distribuição, conhecida como distribuição a *posteriori* pode ser obtida a partir da aplicação do teorema de Bayes

$$p(\theta \mid x) = \frac{f(x \mid \theta) p(\theta)}{f(x)} \tag{2.1}$$

onde

$$f(x) = \int f(x \mid \theta) p(\theta) d\theta \,. \tag{2.2}$$

Desta forma, em (2.1), o termo à esquerda é uma densidade para θ, pois a observação x é constante, bem como $f(x)$. Assim, o teorema de Bayes pode ser escrito de outra maneira, a saber, mais compacto

$$\pi(\theta) \propto l(\theta) p(\theta) \tag{2.3}$$

Os conceitos de *priori e posteriori* são sempre relativos a observação considerada em um dado momento. Assim, após observarmos x e por conseqüência, obtermos a *posteriori* para θ dado a observação x, uma nova observação y também relacionada à θ pode produzir uma nova função de verossimilhança, diferente da anterior. Neste caso, a *posteriori*, em relação à x, é a priori em relação a y, e uma nova *posteriori* pode ser obtida pela aplicação do teorema de Bayes.

O resultado apresentado em (2.3) é a base de todos os procedimentos de inferência Bayesiana tendo sido empregado nos modelos Geoestatísticos desenvolvidos no presente estudo e amplamente utilizados para definir estatisticamente as regiões alteradas pelos marcadores dos fluidos de perfuração. As distribuições de probabilidade *a priori*, bem como os hiperparâmetros associados e adotados no presente estudo, foram

estabelecidas com base nos resultados obtidos na primeira etapa do Projeto MAPEM (poço de águas profundas).

2.2. Estimação do intervalo: A abordagem Bayesiana

Os procedimentos de estimação de um parâmetro podem assumir duas formas: estimação pontual e estimação por intervalo.

A estimação pontual apresenta algumas características inconvenientes como simplificar a magnitude de informação de uma distribuição em um simples valor numérico.

Nos procedimentos de inferência, é relevante associar alguma informação da precisão sobre a especificação deste número. Uma alternativa é associar uma medida de incerteza ao estimador pontual. Por exemplo, para a média, associamos a variância ou o coeficiente de variação. Para a moda, a informação sobre a curvatura na moda e para a mediana, a distância interquartílica. Em uma abordagem Bayesiana, a forma mais adequada para expressar e avaliar uma informação sobre parâmetros desconhecidos é fazendo uso da distribuição a *posteriori.*

A condução do processo passa por estabelecer um compromisso entre a distribuição a *posteriori* e um número extraído dela. Este compromisso é estabelecido através de um determinado conjunto de valores extraídos da densidade a posteriori, isto é, de uma amostra da *posteriori.*

Estes valores são extraídos de uma determinada região que tipicamente apresenta uma probabilidade associada. A região ideal deve apresentar simultaneamente o menor intervalo e a maior probabilidade possível. O tamanho do intervalo informa sobre a dispersão dos valores de θ.

Com as informações obtidas da *posteriori,* torna-se possível construir um Intervalo de Credibilidade Bayesiano, formalizado da seguinte maneira:

Definição. Seja θ uma quantidade desconhecida definida em Θ, onde Θ é o espaço de parâmetros. A região $C \subset \Theta$ é um Intervalo de Credibilidade Bayesiano $100(1-\alpha)\%$ para θ se $P(\theta \in C / x) \geq 1-\alpha$ (Migon e Gamerman, 1999).

2.3. Predição Bayesiana: a distribuição preditiva.

Consideremos a quantidade X relacionada a uma quantidade não observada θ, embora observada por meio de $f(x/\theta)$. No problema da predição, interessa produzir afirmações sobre outra quantidade aleatória Y, relacionada a X e θ. Depois de observar $X = x$, a informação é atualizada permitindo produzir inferência sobre Y. Esta informação está contida na distribuição $Y \mid X$. Supondo independência entre X e Y dado θ, a distribuição de $Y \mid X = x$ é

$$f(y \mid x) = \int f(y, \theta \mid x)\, d\theta$$

$$= \int f(y \mid \theta)\, \pi(\theta)\, d\theta \qquad (2.4)$$

isto é, a densidade é definida como a esperança da distribuição amostral com respeito a posteriori de θ. A independência condicional entre x e y é obtida, por exemplo, se $x = (x_1, \Lambda\ , x_n)'$ e $y = (x_{n+1}, \Lambda\ , x_{n+m})'$ são amostras de $f(x \mid \theta)$ (Migon e Gamerman, 1999). Para o caso multivariado, $\theta = (\theta_1, \Lambda\ , \theta_d)'$, as distribuições marginais e condicionais das componentes θ_i são obtidas da densidade conjunta $\pi = (\theta_1, \Lambda\ , \theta_d)$. Neste caso, a densidade marginal a posteriori de θ_i é

$$\pi(\theta_i) = \int \pi(\theta_1, \Lambda\ , \theta_d)\, d\theta_{-i} \qquad (2.5)$$

onde $\theta_{-i} = (\theta_1, \Lambda\ , \theta_{i-1}, \theta_{i+1}, \Lambda\ , \theta_d)$, é o vetor θ com a i-ésima componente removida, $i = 1, \Lambda\ , d$. Para cada θ_i, a distribuição condicional é

$$\pi(\theta_i \mid \theta_j, j \in C) = \pi(\theta_i, \theta_j, j \in C) / \pi(\theta_j, j \in C)$$

para todo $C \subset (1, \Lambda\ , i-1, i+1, \Lambda\ , d)$. A distribuição condicional de $\theta_i \mid \theta_{-i}$ é conhecida como condicional completa de θ_i com densidade denotada por $\pi_i(\theta_i)$.

2.4 Métodos de simulação empregados para realizar Inferência Bayesiana

Técnicas de simulação proporcionam soluções para muitos problemas estatísticos onde cálculos complexos não podem ser desenvolvidos analiticamente. Nos procedimentos de inferência, técnicas de simulação são implementadas para gerar amostras aleatórias de alguma distribuição de interesse. Na inferência clássica, o alvo é a distribuição amostral e no caso Bayesiano, a distribuição a *posteriori*. Estas simulações podem ser baseadas em métodos iterativos e não-iterativos. Detalhes sobre estas técnicas podem ser encontradas em Evans e Swartz (1995). Descreveremos brevemente os métodos aplicados neste estudo também conhecidos como Método de Monte Carlo (Migon e Gamerman, 1999) e sua extensão aplicado à técnicas baseadas em cadeias de Markov descrito em Gamerman e Lopes (2006).

Consideremos I a quantidade de interesse dada pela integral

$$I = \int t(\theta)\pi(\theta)d\theta. \tag{2.6}$$

A expressão (2.6) fornece a média a posteriori para alguma transformação $\psi = t(\theta)$. Assim sendo, para estimar a média a posteriori de θ, temos que $t(\theta) = \theta$, para estimar a mediana c de um escalar θ, $t(\theta) = I(c > \theta)$, $I = 1/2$, resolvendo (2.6) para c. De forma análoga, regiões de credibilidade são obtidas pela solução de (2.6) para C com $t(\theta) = I(\theta \in C)$ e $I = 1 - \alpha$. A matriz de variância a posteriori é obtida tomando $t(\theta) = \theta\theta'$. Quando $\theta = (\theta_1, \Lambda\ , \theta_d)'$, com componentes θ_i, para $i = 1, \Lambda\ , d$, a densidade marginal de θ_i dada por (2.5), pode ser reescrita como

$$\pi(\theta_i) = \int \pi(\theta_i \mid \theta_{-i})\pi(\theta_{-i})\, d\theta_{-i} \tag{2.7}$$

Em (2.7), a integração sobre a densidade a posteriori requer $t(\theta_{-i}) = \pi(\theta_i \mid \theta_{-i})$. Além disto, outra importante integral definida como distribuição preditiva (2.4), pode ser facilmente reescrita como uma integral em (2.6) com $t(\theta) = f(y \mid \theta)$.

Técnicas determinísticas fornecem bons resultados para modelos com baixa dimensionalidade. Já, com o aumento da dimensionalidade e, por conseqüência da complexidade, técnicas de Monte Carlo poderão ser adotadas. Nos casos em que a dimensionalidade é demasiadamente grande, somente simulações de cadeias de Markov fornecem soluções adequadas.

2.4.1 O Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo consiste em definir a integral desejada como um valor esperado com respeito a esta mesma distribuição de probabilidade.

Supomos o calculo da integral de uma função definida em um intervalo conhecido (a, b)

$$I = \int_a^b g(\theta) d\theta$$

esta mesma integral pode ser re-escrita como

$$I = \int_a^b [(b-a)g(\theta)] \frac{1}{b-a} d\theta$$

Este problema pode ser visto com a evolução da esperança de $[(b-a)g(\theta)]$ com respeito à distribuição uniforme no intervalo (a, b)

$$I = E_{U(a,b)} [(b-a)g(\theta)]$$

onde $U(a, b)$ representa uma distribuição uniforme em (a, b). Neste caso, o método dos momentos fornece a média para a quantidade I

$$\hat{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (b-a)g(\theta_i)$$

onde $\theta_1,\Lambda\ ,\theta_n$ é uma amostra aleatória selecionada de uma distribuição uniforme em (a,b). Um algoritmo para a simulação de Monte Carlo pode ser descrito pelos seguintes passos:

a) Gere $\theta_1, \theta_2,\text{K}\ ,\theta_n$ de uma distribuição Uniforme $U(a,b)$ **;**

b) Calcule $g(\theta_1), g(\theta_2),\text{K}\ , g(\theta_n)$;

c) Obtenha a média amostral: $\overline{g} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} g(\theta_i)$;

d) Determine: $\hat{I} = (b-a)\overline{g}$.

A generalização pode ser obtida de forma direta. Considere $I = E_p\left[g(\theta)\right]$ o valor esperado de $g(\theta)$ com respeito a densidade $p(\theta)$. O algoritmo será similar o descrito acima alterando a amostragem no passo 1 de uma $U(a,b)$ para $p(.)$

Consideremos a expressão (2.6) e uma amostra aleatória $\theta_1,\Lambda\ ,\theta_n$ de π, observada. Então o estimador para a quantidade I, comumente chamado de estimador Simples de Monte Carlo (MC), será

$$\hat{I} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} t(\theta_j) \qquad (2.8)$$

Outros métodos de simulação de Monte Carlo estão descritos na literatura como a técnica desenvolvida para reduzir a variância do estimador conhecida como Monte Carlo com Importância Amostral.

2.4.2 O Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov.

A área da estatística conhecida como MCMC *(Markov Chain Monte Carlo)* ou simulação de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) emprega uma estratégia para resolver problemas envolvendo simulação de distribuições de probabilidade com alta dimensionalidade. O objetivo é extrair amostras de uma determinada função densidade em um cenário onde as quantidades de interesse são desconhecidas e onde frequentemente as funções não possuem forma conhecida.

Uma cadeia de Markov é um tipo especial de processo estocástico que trata da caracterização de sequência de variáveis aleatórias com interesse especial no comportamento limite desta sequência. Em linhas gerais, são processos que descrevem trajetórias onde sucessivas quantidades são descritas probabilisticamente de acordo com o valor de seu antecessor. A idéia básica do método é construir uma cadeia de Markov cuja distribuição de equilíbrio é igual a distribuição de interesse. É esperado que, após um número finito de simulações, o processo convirja para a distribuição de equilíbrio. Ao final, poderão ser extraídas amostras da distribuição de equilibro ou distribuição de interesse, que é a distribuição de todas as quantidades desconhecidas do modelo.

Existem inúmeras maneiras de se construir uma cadeia Markov. Dentre os métodos mais empregados, temos o amostrador de Gibbs proposto por Geman and Geman (1984) e popularizado por Gelfand and Smith (1990) e o algoritmo conhecido como Metropólis-Hastings proposto por Metrópolis *et al*. (1953) e depois estendido por Hastings (1970).

Consideremos a distribuição de interesse $\pi(\theta)$ onde $\theta = (\theta_1, \Lambda\ , \theta_d)'$. A questão resume-se na dificuldade de gerar amostras diretamente de π em problemas onde é possível a geração de amostras a partir de π_i.

O amostrador de Gibbs é um método MCMC onde as probabilidades de transição estão estabelecidas pelas distribuições condicionais completas,

$\pi_i(\theta_i) = \pi_i(\theta_i \mid \theta_{-i}),\ i = 1,\Lambda\ ,d$, que devem ser completamente conhecidas, portanto, possíveis de serem amostradas. O algoritmo pode ser descrito da seguinte forma (Gamerman e Lopes, 2006)

a) Inicialize a iteração com o contador da cadeia $j = 1$ e um conjunto inicial de valores $\theta^{(0)} = \left(\theta_1^{(0)},\mathrm{K}\ ,\theta_d^{(0)}\right)'$;

b) Obtenha novos valores $\theta^{(j)} = \left(\theta_1^{(j)},\mathrm{K}\ ,\theta_d^{(j)}\right)'$ de $\theta^{(j-1)}$ a partir de sucessivas gerações de valores

$$\theta_1^{(j)} \sim \pi\left(\theta_1 \mid \theta_2^{(j-1)},\mathrm{K}\ ,\theta_d^{(j-1)}\right),$$

$$\theta_2^{(j)} \sim \pi\left(\theta_2 \mid \theta_1^{(j)}, \theta_3^{(j-1)},\mathrm{K}\ ,\theta_d^{(j-1)}\right),$$

M

$$\theta_d^{(j)} \sim \pi\left(\theta_d \mid \theta_1^{(j)},\mathrm{K}\ ,\theta_{d-1}^{(j)}\right),$$

c) Altere o contador j para $j+1$ e retorne para o passo (b) até que a convergência seja atingida.

Quando a convergência é atingida, os valores $\theta^{(j)}$ são extraídos de π, isto porque, sob certas condições de regularidade, a distribuição limite de $\theta^{(j)}$ tende a $\pi(\theta)$. Outro método utilizado para a construção da cadeia é conhecido como Metropolis-Hastings. Consideremos a distribuição π da qual uma amostra deve ser retirada via cadeia de Markov. Uma função de transição *Kernel* $p = (\theta, \phi)$ deve ser construída de forma que π seja a distribuição de equilíbrio da cadeia. Uma forma de atingir este objetivo é considerar a reversibilidade da cadeia onde a função *Kernel* p satisfaz

$$\pi(\theta)p(\theta,\phi) = \pi(\phi)p(\phi,\theta), \forall(\theta,\phi). \quad (2.9)$$

A função de transição $p = (\theta,\phi)$ é constituída de dois elementos: Uma transição *Kernel* arbitrária $q = (\theta,\phi)$ e uma probabilidade $\alpha = (\theta,\phi)$ de modo que

$$p(\theta,\phi) = q(\theta,\phi)\,\alpha(\theta,\phi), \; se\; \theta \neq \phi .$$

Desta forma, a função de transição Kernel define uma densidade $p = (\theta,.)$ para todos os valores possíveis do parâmetro, diferente de θ. Consequentemente existe uma probabilidade positiva para a cadeia permanecer em θ dada por

$$p(\theta,\theta) = 1 - \int q(\theta,\phi)\alpha(\theta,\phi)\,d\phi.$$

Estas duas formas podem ser agrupadas em uma única expressão

$$p(\theta, A) = \int_A q(\theta,\phi)\alpha(\theta,\phi)d\phi + I(\theta \in A)\left(1 - \int q(\theta,\phi)\alpha(\theta,\phi)\,d\phi\right) \quad (2.10)$$

para algum subconjunto A do espaço de parâmetros. Com isto, a função de transição *Kernel* define uma distribuição mista para o novo estado ϕ da cadeia.

Hastings (1970) propôs a expressão para a probabilidade de aceitação como

$$\alpha = (\theta,\phi) = \min\left\{1, \frac{\pi(\phi)\,q(\phi,\theta)}{\pi(\theta)\,q(\theta,\phi)}\right\}. \quad (2.11)$$

O algoritmo baseado em uma cadeia com transição Kernel (2.10) e probabilidade de aceitação (2.11) é conhecido como Metropolis-Hastings. Em termos práticos, o método de simulação para extrair amostras de π usando a cadeia de Markov definida pela transição (2.10) segue os passos abaixo:

a) Inicialize a iteração com o contador da cadeia $j = 1$e um conjunto inicial de valores $\theta^{(0)}$.

b) Mova a cadeia para um novo valor ϕ, gerado da densidade $q\left(\theta^{j-1}, .\right)$.

c) Avalie a probabilidade de aceitação do movimento proposto $\alpha\left(\theta^{j-1}, \phi\right)$ dada por (2-11). Se o movimento for aceito, $\theta^{j} = \phi$. Se o movimento não for aceito, $\theta^{j} = \theta^{j-1}$, mantendo a cadeia sem movimento.

d) Mude o contador de j para $j+1$ e retorne para o passo (b) até que a convergência da cadeia.

Uma dificuldade na aplicação do método MCMC refere-se à convergência necessária para a extração das amostras da posteriori. Alguns resultados teóricos e muitos diagnósticos estatísticos podem ser avaliados. Um método prático é monitorar a trajetória da cadeia durante a simulação mediante inspeção visual da série história. Alguns aspectos metodológicos do MCMC podem ser encontrados em Gamerman (1997) e Gilks *et al.* (1996). Além da convergência, é necessária avaliar a autocorrelação existente entre θ^{j} e θ^{j-1}. Para a obtenção da amostra, deve se considerar a retirada sistemática dos valores. Esta forma de amostragem pode ser definida com base na análise visual do gráfico de autocorrelação da cadeia.

Assegurada a convergência da cadeia e autocorrelação nula entre amostras, aplica-se a estratégia de Monte Carlo para se obter o valor esperado das quantidades desconhecidas do modelo.

2.5 O modelo Geoestatístico

Modelos geoestatísticos têm sido aplicados em muitos campos da ciência com o objetivo de avaliar dados espacialmente contínuos (Journel and Huijbregts, 1978; Cressie, 1991; Diggle and Ribeiro Jr., 2006). Estes modelos foram usados neste estudo para predizer a distribuição geográfica das variáveis observadas e mapear as áreas com altas e baixas concentrações dos contaminantes. Os níveis basais (valores de background) dos indicadores da atividade de perfuração foram estimados para na área estudada, antes e após a atividade, permitindo separar efeitos decorrentes de atividades pretéritas realizadas no local, dos efeitos decorrentes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23.

O conjunto de valores observados de uma variável em locais ou pontos no espaço contínuo pode ser tratado como uma realização de um processo estocástico. Algumas suposições para a construção de um modelo Geoestatístico são necessárias, pois na maioria dos casos o tamanho da amostra é relativamente pequeno e pode se apresentar como uma restrição no momento de realizarmos inferência. A forma básica para dados geoestatísticos é o conjunto

$$(w_i, x_i) : i = 1,..., n \qquad (2.12)$$

onde w_i identifica a localização espacial e x_i a medida observada em w_i. Uma característica clássica em Geoestatística é que a medida para a variável x pode ser generalizada, por inferência, para uma região de estudo contínua. Além disto, nós

devemos assumir que o delineamento amostral das locações w_i é determinística ou estocasticamente independente do processo que gerou as medidas.

De acordo com Diggle e Ribeiro (2006), a forma básica de um modelo geoestatístico decorre de um processo estocástico $X(w): w \in D$, que é uma realização parcial de um processo estocástico $X(w): w \in R^2$. A medida X_i pode ser considerada como uma versão ruído do processo estocástico subjacente $S(w_i)$, sendo o valor para a locação w_i, de um processo $S(w): w \in R^2$. Assim o modelo básico pode ser estendido para um modelo com duas componentes: um processo estocástico $S(w)$ e um modelo estatístico para as medidas $X = (X_1,..., X_n)$ condicional a $S(w): w \in R^2$.

Da mesma forma podemos pensar nos dados Geoestatísticos como uma realização de um processo aleatório $\{X(w): w \in D\}$, onde D é um subconjunto fixo de R^d, d-dimensional positivo, e w, variando continuamente sobre a região dada por D.

2.5.1 Suposições do modelo Geoestatístico

2.5.1.1 Estacionariedade

A primeira suposição do modelo Geoestatístico é que as amostras representam uma realização do processo estocástico. Para realizarmos inferência estatística com segurança, seria necessária uma amostra suficientemente grande que representasse a esperança média do fenômeno observado. Entretanto, aqui nós observamos somente uma realização do processo aleatório, o que naturalmente é limitado. Poderíamos pensar que se realizássemos repetidas amostras sobre a mesma função aleatória, isto é, exatamente sobre o mesmo lugar no espaço nós poderíamos assumir que a esperança média descrita para as diversas realizações do processo aleatório seria uma medida aproximada para a superfície.

Com o objetivo de enfatizar a origem da aleatoriedade de $\{X(w): w \in D\}$, é possível escrever como $\{X(w;\omega): w \in D; \omega \in \Omega\}$, onde (Ω, F, P) é o espaço de probabilidade. A realização $\{x(w): w \in D\}$, corresponde a um valor particular de ω. Nós assumimos que o processo estocástico $\{X(w): w \in D\}$ é estacionário sobre D. Matheron (1962) denominou a quantidade $x(.)$ como uma variável regionalizada como forma de caracterizar a continuidade espacial indicada em D.

Supondo que $\mu(w) \equiv E(X(w))$ existe para todo $w \in D$, chamamos $\mu(.)$ a tendência, algumas vezes denominada *"drift"*. A existência da var$(X(w))$ para todo $w \in D$ permite definir estacionariedade de segunda ordem e estacionariedade intrínseca.

2.5.1.2 Estacionariedade de Segunda ordem

Estacionariedade de Segunda Ordem é também conhecida com estacionariedade fraca. Para isto, algumas suposições sobre X precisam ser produzidas:

$$E(x(w)) = \mu \text{, para todo } w \in D \tag{2.13}$$

$$\text{cov}(X(w_1), X(w_2)) = C(w_1 - w_2) \text{, para todo } w_1, w_2 \in D, \tag{2.14}$$

Definição: Se uma função aleatória $X(.)$ satisfaz as condições $E(x(w)) = \mu$ e $\text{cov}(X(w_1), X(w_2)) = C(w_1 - w_2)$, ela pode ser definida como sendo estacionária de Segunda Ordem. Se $C(w_1 - w_2)$ é somente função da distância euclidiana $\|w_1 - w_2\|$ então $C(.)$ é classificada de "isotrópica". O assunto isotropia será discutido posteriormente.

A detecção da continuidade espacial através de métodos descritivos facilita o estudo da superfície, buscando entender o comportamento do processo, identificando indícios sobre a homogeneidade da região. Quando a estacionariedade não pode ser

confirmada, métodos alternativos podem ser aplicados como, a subdivisão de áreas em regiões mais homogêneas, ou mesmo, a remoção de tendências determinísticas existentes nos dados. Assim, se a amostra é suficientemente grande para fazer inferências, funções aleatórias podem ser modeladas baseadas na estacionariedade de Segunda Ordem.

2.5.1.3 Estacionariedade Intrínseca

Supondo que os pontos no R^2 são uma realização de um processo aleatório $\{X(w): w \in D\}$ e que estas observações estão localizadas em w_i pontos para $i = 1,2,3,...,n$, então a estacionariedade intrínseca é definida pelas condições:

$$E(X(w+h) - X(w)) = 0, \tag{2.15}$$

$$\text{var}(X(w+h) - X(w)) = 2\gamma(h). \tag{2.16}$$

A hipótese de estacionariedade intrínseca é aplicável, quando o variograma existe. A variabilidade entre duas observações depende somente da distância entre eles, isto é se $C(w_1 - w_2)$ é somente função da distância euclidiana $\|w_1 - w_2\|$. A quantidade $2\gamma(h)$ é conhecida como variograma e é de extrema importância na Geoestatística (Matheron, 1963b) e está definida por,

$$2\hat{\gamma}(h) \equiv \frac{1}{|N(h)|}\sum_{N(h)} (X(w_i) - X(w_j))^2, \tag{2.17}$$

onde a quantidade $2\gamma(h)$ também pode ser calculada pelo estimador Robusto dado por,

$$2\bar{\gamma}(h) \equiv \frac{\left\{\frac{1}{|N(h)|}\sum_{N(h)}\left|X(w_i)-X(w_j)\right|^{\frac{1}{2}}\right\}^4}{\left(0.457+\frac{0.494}{|N(h)|}\right)} \qquad (2.18)$$

Obs.: Quando extraímos pares dos dados amostrais, originalmente estamos supondo que os dois pontos são originários de uma mesma distribuição. Se cada par é tratado como uma realização, então podemos usar todas as combinações possíveis de pares, criando um conjunto de repetições. Desta forma. a estacionariedade da função aleatória é assumida, embora limitada a distância entre os pontos amostrais observados *(lags)*.

2.5.1.4 Ergodicidade

Processos caracterizados pela estacionariedade de segunda ordem são ergódigos. Ergodicidade é uma propriedade que permite uma estimação consistente a partir de amostras retiradas de uma única realização para um fenômeno contínuo gerado aleatoriamente. É assumida a suposição de que uma única realização é igual à média de todas as outras possíveis realizações do processo estocástico. Isto permite usarmos os dados amostrais para modelar a função aleatória e realizar estimação de parâmetros não tendenciosos bem como predição de valores para a característica estudada em locais não observados da superfície. Estas informações e mais detalhes sobre ergodicidade podem ser encontrado em Cressie (1991).

2.5.1.5 Isotropia

Supomos que $\{X(w): w \in D\}$ satisfaz $E(X(w)) = \mu$, para todo $w \in D$ e $\text{var}(X(w_1) - X(w_2) = 2\gamma(w_1 - w_2)$, para todo $w_1, w_2 \in D$. Então $X(.)$ satisfaz a hipótese intrínseca de estacionariedade. Alem disto, se $2\gamma(w_1 - w_2)$ é uma função somente de

$\|w_1 - w_2\|$, então $2\gamma(.)$ é chamado isotrópico. Na condição de isotropia, o variograma é o mesmo para todas as direções. Obtendo variogramas para diversas direções, é possível investigar se eles coincidem com o variograma "omnidirecional" que é calculado pela média ponderada dos variogramas para todas as direções. Se esta condição se realizar, nós podemos dizer que estamos com um processo isotrópico. Neste caso, as variações de pequena escala dependem somente da distância Euclidiana entre dois pontos.

2.5.1.5 Anisotropia

Quando um processo X é anisotrópico, ou seja, $X(w)$ e $X(w+h)$ é função da distância e direção de h, o variograma não é somente uma função da distância entre duas observações localizadas espacialmente. Anisotropias são causadas por processos físicos subjacentes envolvendo diferenciação no espaço segundo Cressie (1991). Algumas vezes a anisotropia pode ser corrigida por uma transformação linear dos vetores de lag (h). No caso de considerar estacionariedade e evitar a suposição de isotropia, pode-se modelar a função de correlação para diferentes vetores entre locações amostrais, $(u_1, u_2) = w - w'$.

2.5.1.6 Processo Gaussiano

Quando nós temos um processo Gaussiano a estacionariedade de Segunda-Ordem e a estacionariedade forte coincidem. Um processo é fortemente estacionário quando sua lei de distribuição de probabilidade é invariante com a translação (Ferreira, 2002). Este processo é identificado pela média e pela função de covariância. A condição necessária para a suposição de ergodicidade é que $C(h) \to 0$, quando $\|h\| \to \infty$.

Processos Gaussianos são importantes por duas razões. A primeira é que, reconhecendo um processo Gaussiano, impreterivelmente toda a análise objetivando

predições, estimações e teoria de distribuições são facilitadas. A segunda razão diz respeito a considerações assintóticas onde efeitos de pequenas escalas podem ser aproximadamente normais pelas propriedades do teorema do limite central (Lindgren, 1976).

Um processo estocástico $S(w)$ é Gaussiano se a distribuição conjunta de $S(w_1),...,S(w_n)$ é Gaussiana multivariada. O processo é estacionário se a esperança e a variância de $S(w)$ é a mesma para todo w e a correlação entre $S(w)$ e $S(w')$ depende somente de $w-w'$. O processo é estacionário e isotrópico se, a correlação depende somente da distância euclidiana, $u=\|w-w'\|$.

Então um modelo Gaussiano estacionário para um conjunto de dados $(w_i, x_i): i=1,...,n$ fica definido pelas seguintes suposições (Diggle & Ribeiro,2000)

a) $\{S(w): w \in R^2\}$ é um processo Gaussiano com média μ variância σ^2 e função de correlação $\rho(u)=Corr\{S(w),S(w')\}$, onde $u=\|w-w'\|$ denota a distância entre dois pontos.

b) Condicional a $\{S(w): w \in R^2\}$ os x_i são realizações de variáveis aleatórias X_i mutuamente independentes, normalmente distribuídas com média condicional $E[X_i/S(.)]=S(w_i)$ e variâncias condicionais τ^2.

O modelo pode então ser formalizado como

$$X_i = S(w_i) + Z_i : i = 1,\text{K}\ , n$$

onde, $\{S(w): w \in R^2\}$ é definido acima pela suposição (a) e os Z_i são variáveis aleatórias $N(0, \tau^2)$, mutuamente independentes.

Em muitas aplicações, o formato básico dos dados geoestatísticos $(w_i, x_i): i = 1, \Lambda, n$ pode ser aprimorado de duas maneiras: primeiramente, estabelecendo uma resposta multivariada, $z_i = \{z_{i1}, \text{K}, z_{id}\}$, ou de outra forma, introduzindo um conjunto formado por varáveis explicativas (independentes) $\{d_k(w): w \in A\}$, onde A é uma região contínua, alvo do estudo. A diferença entre as duas abordagens está na especificação de um vetor de valores do processo estocástico sobre a região de estudo *A*, tratando desta forma a resposta multivariada como estocástica, enquanto que no segundo caso, como quantidades determinísticas (variáveis explicativas). Uma conseqüência disto é que, para a predição de valores da resposta de interesse em localizações não observadas w , a especificação do modelo com variáveis explicativas requer a observação delas em localizações onde a resposta não foi observada, o que não ocorreu no presente estudo. Alternativamente, é possível especificar modelos multivariados. No entanto, as fracas correlações existentes entre os traçadores de interesse e as demais variáveis aleatórias, físicas e químicas, observadas em todos os tempos estudados, limitaram a aplicação desta estratégia. Note que, em ambos os casos, deve existir alguma relevância científica para estabelecer tais relações ou correlações. Estes modelos são conhecidos como modelos de *tendência externa*.

Em nenhum dos três cruzeiros, MS1, MS2 and MS3, a estacionariedade do processo estocástico pode ser assumida. Este cenário pode ser atribuído as atividades de perfuração desenvolvidas no passado e no presente que definiram uma distribuição espacialmente heterogênea para as concentrações dos traçadores dos fluidos de perfuração, que em condições naturais, deveriam apresentar distribuição espacial estocásticas com características de um processo estacionário.

Segundo Diggle e Ribeiro (2006), uma forma de contornar a suposição estacionariedade dos modelos é permitir uma variação espacial na média da resposta de interesse $\mu(w)$. Em geoestatística, a variação da média é denominada de *tendência espacial*, podendo ser tratada com modelos de *tendência externa*. Na impossibilidade de aplicar tais modelos, $\mu(w)$ pode ser modelada diretamente como função de w a partir da aplicação de modelos de regressão polinomial empregando o vetor de coordenadas w, como variáveis explicativas. Em geoestatística, eles são denominados como modelos de *superfície de tendência*. No presente estudo foram aplicados modelos de *superfície de tendência* com o objetivo foi remover tendências não lineares observadas nas superfícies dos traçadores químicos dos fluidos associados às atividades de perfuração. As concentrações esperadas para estes traçadores em locais não observados dentro da região de interesse *A*, foram obtidas com a aplicação de modelos geoestatísticos Bayesianos. Para isto, foi assumido que as medidas tomadas em diferentes locais seguem uma distribuição multivariada Gaussiana para qual a matriz de variâncias e covariâncias é expressas como uma função exponencial da distância entre pares de pontos (Diggle *et al*., 1998).

Mais especificamente, a correlação entre as observações S_i e S_j do vetor $S = (S_1, \mathrm{K}, S_n)$ de variáveis aleatórias é definida por:

$$\rho(\upsilon) = \exp\left\{-(\upsilon/\phi)^k\right\}, \tag{2.19}$$

onde $\phi > 0$ e $0 < k \leq 2$; $\rho(\upsilon)$ é a função de correlação, υ é a distância entre duas estações amostrais e ϕ é o parâmetro que descreve a razão de decréscimo da correlação em função do aumento da distância entre dois pontos observados e κ é o parâmetro escalar que controla a suavização especial.

Formalmente, o modelo geoestatísticos condicional a $S(w)$ para os dados $(w_i, x_i): i = 1, \Lambda, n$ podem ser escritos como:

$$\left[X_i \,/\, \left\{ S(w): w \in R^2 \right\} \right] \sim N\left(\mu\left(w_i\right), \tau^2\right) \tag{2.20}$$

Se o processo é estacionário, como para os resíduos do modelo de regressão não paramétrico (regressão local), o vetor de médias é dado por

$$\mu\left(w\right) = \beta + S\left(w\right) \tag{2.21}$$

e para o estudo da variável bário em MS1, considerado um processo não-estacionário estabelecido como função de variáveis explicativas independentes

$$\mu\left(w\right) = \sum_{k=1}^{p} d_k\left(w\right)\beta_k + S\left(w\right). \tag{2.22}$$

Na primeira expressão (2.20), X_i é a observação da variável aleatória $X\left(w\right)$ na *i*-ésima localização amostral, para (*i=1,…,n*) determinado pelo vetor de cordenadas w_i. Nas expressões (2.21) e (2.22), $\mu(w)$ é o vetor que descreve a posição central da distribuição de probabilidade em ***w***. Em (2.21), β é o parâmetro scalar para a média espacial. Em (2.22), β_k é o parâmetro escalar associado a *k*-ésima variável explicativa (independente) $d_k(w)$, a qual pode ser definida pelo valor de uma variável ambiental na localização com coordenadas ***x***. Desta forma, na equação acima (2.22), $d_k(w)$ (*k=1…p*) é a variabilidade espacial conhecida dos dados e $S(w)$ é a variabilidade espacial

desconhecida. O parâmetro τ^2 em (2.20) representa a variabilidade desconhecida não espacial.

Em MS1, a alta correlação existente entre bário, arsênio e cobalto conduziu à hipótese de que a média $\mu(w)$ do processo espacial para as concentrações de bário é uma função das variáveis explicativas arsênio e cobalto. Este modelo representa uma estrutura eficiente para a decomposição da variabilidade especial, pois minimiza a componente de variabilidade desconhecida, não espacial, representada por τ^2. Infelizmente, esta estrutura não pode ser aplicada a todas as variáveis em todos os tempos em decorrência da falta de covariáveis significativas. Por este motivo, optou-se por aplicar o método de regressão local à variável bário no MS1, preservando desta forma, o compromisso de analisar os dados de forma singular em todos os tempos (MS1, MS2 e MS3), minimizando possíveis problemas na definição das áreas alteradas.

A predição nos locais de interesse foi obtida pelo uso dos métodos de inferência Bayesiana para estimar o conjunto de parâmetros θ, onde $\theta = (\beta, \tau, \phi, \sigma^2, \kappa)$; as distribuições a posteriori foram calculadas empregando o método de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) do qual foram construídos os intervalos Bayesianos de credibilidade. Os softwares empregados foram o *WinBUGS 1.4* (Lunn et al., 2000) e *R package* (2001).

CAPÍTULO 3

ESTRATÉGIA DE AMOSTAGEM

3.1. Delineamento experimental BACI *(Before-After Control-Impact)*.

Em estudos ambientais, o conhecimento prévio das condições locais é de grande interesse, pois permite o monitoramento e a comparação de mudanças naturais bem

como das alterações resultantes da atividade antrópica. Para tanto, as variabilidades espacial e temporal precisam ser observadas e controladas.

O delineamento amostral segundo a estratégia BACI (*Before-After Control-Impact)* pressupõe, preliminarmente ao estudo, a existência de uma região tida como "Controle" e outra tomada como "Impacto", que possam ser amostradas antes e depois da aplicação de um estímulo (neste estudo, a perfuração dos poços BO-22 e BO-23).

As regiões definidas *a priori* são posteriormente avaliadas para identificação de possíveis impactos com base na observação das variáveis, controlando as componentes, espacial e temporal, promovendo o delineamento real das áreas Controle-Impacto ao longo do tempo.

Com base nessa premissa, determinou-se preliminarmente uma região de "Impacto", localizada próximo ao poço, com abrangência máxima definida a partir do limite esperado para a deposição dos elementos selecionados como marcadores da atividade de perfuração: bário e n-parafinas (*Lineares* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}). A região de "Controle" foi estabelecida como estando localizada a uma distância suficientemente afastada para preservar as condições ambientais naturais ao longo do tempo, independente da atividade monitorada.

Assim, o Projeto MAPEM definiu na etapa de planejamento uma região de impacto putativa denominada "Impacto", limitada a 500 metros em torno do poço, observada através de 48 estações amostrais, e uma região de suposto controle denominada "Controle", localizada a 2500 metros do centro do poço, com três estações situadas ao Norte (N) e três estações ao Sul (S) do poço. Tais regiões foram previamente definidas como região de provável assentamento de material descartado e região onde o assentamento dos rejeitos seria pouco provável.

A distribuição das estações amostrais em cada radial de distância, bem como a respectiva numeração, é apresentada na Figura 3.1. De forma análoga ao estudo da etapa

de águas profundas do Projeto MAPEM, foram utilizados diferentes indicadores para as fases de perfuração com fluido base água (WBF) e fluido base não-aquosa (NAF), principalmente as variáveis bário e n-parafinas (*Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20})*, com o objetivo de separar possíveis efeitos ambientais atribuíveis às diferentes fases de perfuração.

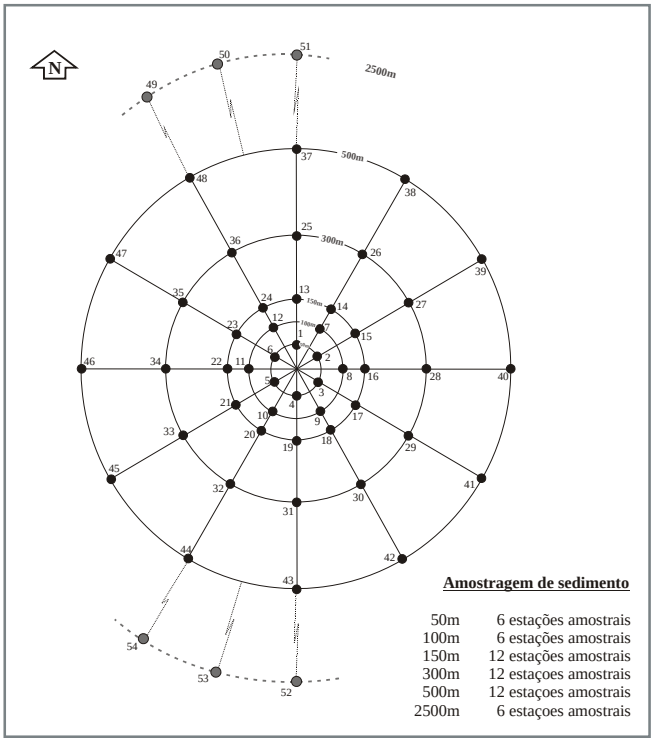


Figura 3.1. Localização das estações amostrais em cada radial de distância e a respectiva numeração. A distância entre as regiões Controle e Impacto não está na escala real.

A localização das estações amostrais e a distinção entre as duas regiões propostas estão descritas na Figura 3.2. Em um raio máximo de 500 metros, foram dispostos 48 pontos amostrais em uma região de denominada de área de impacto putativo. Já, afastados 2500 metros a norte e a Sul do centro da malha, encontram-se 6 pontos amostrais em uma região definida como área de referência.

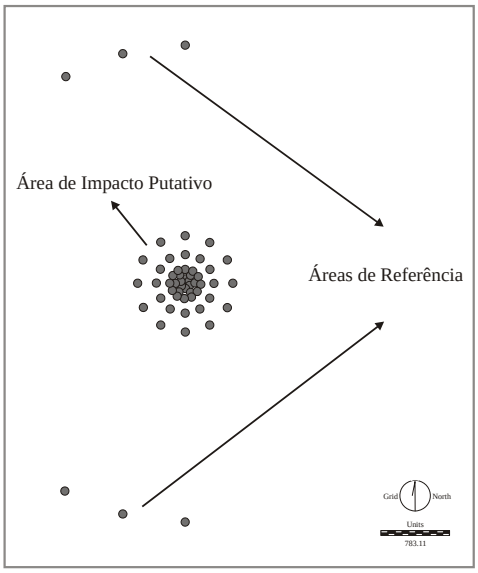


Figura 3.2. Localização das estações amostrais seguindo o delineamento BACI, com localização georeferenciada das estações de controle.

A proposta original do Projeto MAPEM para águas rasas previa a avaliação dos possíveis impactos do uso de fluidos base água (WBF) e não-aquosa (NAF) para apenas um poço de caráter exploratório, em região isenta de atividades antrópicas pretéritas e distante de fontes de interferências. Entretanto, como não se dispunha, à época do início dos estudos, de poços exploratórios com tais características, decidiu-se usar a perfuração de poços no Campo de Bonito, na Bacia de Campos, para completar os estudos do Projeto. A área de estudo apresenta um histórico de atividades de perfurações iniciadas na década de 70. A última atividade desenvolvida pela Petrobrás, antes da realização do primeiro Cruzeiro Oceanográfico do Projeto MAPEM em julho de 2001, foi no ano de 1998 com uma perfuração localizada a uma distância de 348 m a Oeste do Poço BO-23. A Figura 3.3 registra algumas plataformas de produção localizadas próximas a área de estudo. No momento das fotos, o navio estava localizado na área alvo do estudo.

Figura 3.3. Plataformas de produção localizadas no entorno da área estudada.

A malha amostral foi desenvolvida com a premissa de que a deposição do material oriundo da perfuração não apresentaria uma direção predominante, permitindo uma avaliação abrangente dos reais pontos de deposição e posterior comparação com as regiões previstas pelo modelo de dispersão OOC (*Offshore Operators Committe Mud and Produced Water Discharge Model*, Russel *et al.* (2005)), realizada pela equipe de modelagem do Projeto MAPEM.

No âmbito do Projeto MAPEM, as operações de amostragem foram denominadas "Cruzeiro". Para cada Cruzeiro em águas rasas foi atribuído um código. A sigla MS identifica o estudo em águas rasas – "MAPEM SHALLOW". As observações realizadas antes da perfuração foram denominadas de MS1 e aquelas após a perfuração, MS2 e MS3.

Desta forma, a amostragem do primeiro Cruzeiro Oceanográfico foi planejada com 54 estações, distribuídas na forma de uma malha concêntrica, sendo 06 amostras de sedimentos coletadas em círculos a 50 e 100 m a partir do poço de perfuração, e outras 12 amostras coletadas em círculos a distâncias de 150, 300 e 500 m. Adicionalmente, 06 amostras foram coletadas a uma distância de 2.500 m da área de perfuração. Esta malha teve como referência central às coordenadas do Poço BO-23 que seria perfurado posteriormente a realização do primeiro Cruzeiro Oceanográfico (MS1).

No entanto, verifica-se que em estudos de campo, não raras vezes, o delineamento planejado deve ser alterado, adequando-o às condições vigentes no momento, assegurando, desta forma, respostas às questões definidas no âmbito do Projeto. A Figura 3.4 descreve a área de estudo com a malha de amostragem do primeiro cruzeiro centrada no local demarcado para a perfuração do poço BO-23, evidenciando as atividades na região como poços e dutos de produção. A Figura 3.3 cita uma sequência de poços próximos a região de estudo (BOs).

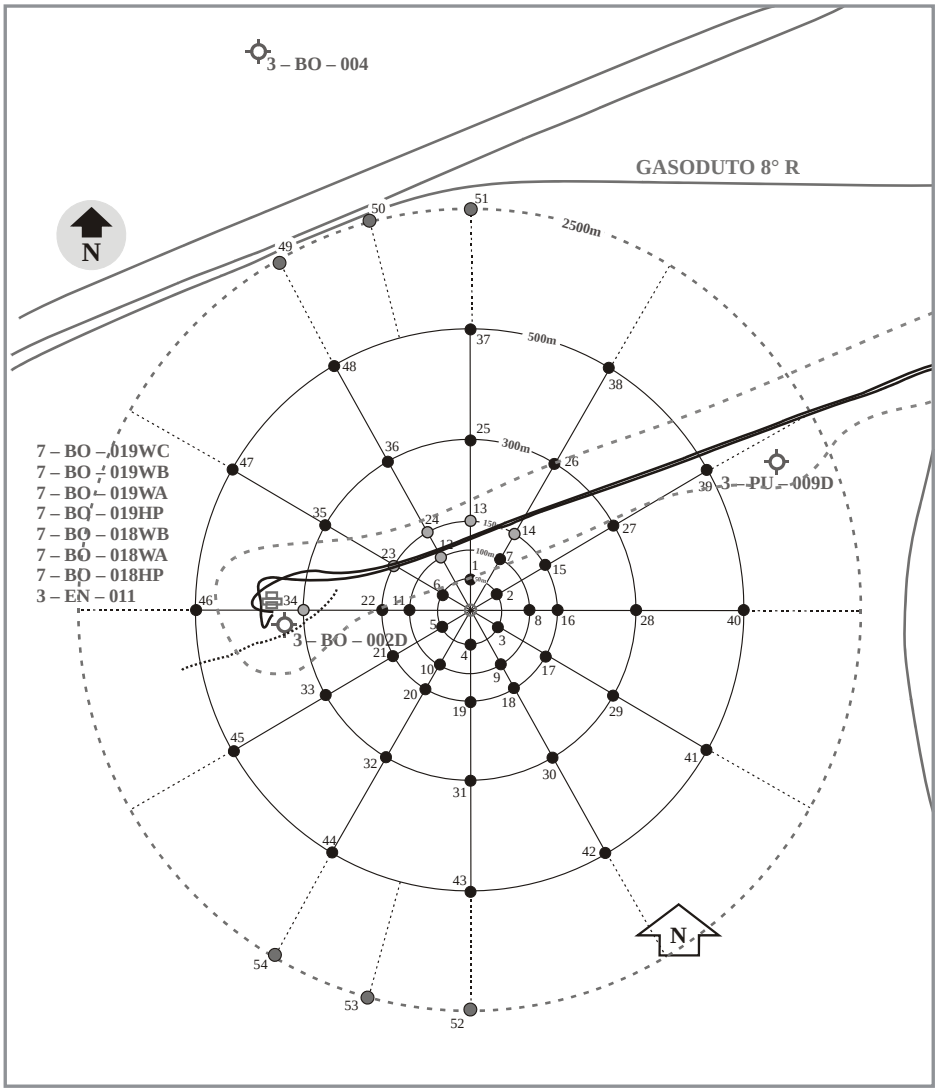


Figura 3.4. Delineamento amostral junto aos dutos e demais equipamento característicos de uma área de produção de hidrocarbonetos

Conectados ao poço perfurado em 1998, encontram-se alguns dutos representados no centro e ao Norte da malha amostral (Figura 3.4). As características inerentes a uma área de produção (presença de dutos e “árvore-de-natal”) levaram conseqüentemente a um processo de demarcação de uma área de exclusão, na qual não foi possível a extração das amostras de sedimento (Figura 3.5). A mudança na estratégia de amostragem não foi planejada previamente, tendo sido desenvolvida a bordo do navio durante o período de amostragem, baseada no conjunto de informações disponíveis naquele momento. As estações amostrais representadas na cor cinza na Figura 3.4 não foram coletadas, pois a localização geográfica definida previamente coincidiu com a zona de exclusão.

Observa-se que a maioria dos pontos amostrais não-realizados em MS1, localizavam-se a até 150 metros do poço que será perfurado, denominado BO-23, este com localização geográfica centrada na malha descrita na Figura 3.5. Essa região é considerada de alta relevância para o estudo, uma vez que, de modo geral, é esperado que a fase de perfuração sem retorno à plataforma (Fase WBF) introduza proporcionalmente as maiores quantidades de material associado aos fluidos WBF na zona próxima a sonda. Por este motivo, as estações amostrais localizadas a 50, 100 e 150 metros e até 300 metros desempenham papel fundamental em tais estudos.

A Figura 3.5 mostra, através dos pontos pretos, a localização geográfica das amostras coletadas no MS1. Na direção Oeste do poço BO-23 (identificado pelo **X**, no centro da malha), a uma distância de aproximadamente 350 metros, localiza-se pelo menos um poço de produção. Partindo da “árvore-de-natal”, ao menos dois dutos direcionam-se para Leste. A área de exclusão está delimitada pela linha tracejada. Devido à escala, as estações de referência (Controle) não estão representadas na Figura 3.5.

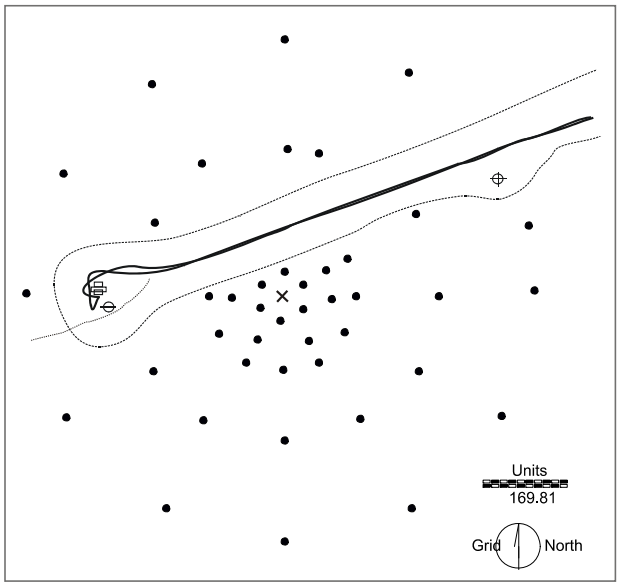


Figura 3.5. Mapa das estações amostradas no MS1 e da área de exclusão definida pela presença de poços de produção e dutos de transporte de hidrocarbonetos.

A malha de amostragem descrita na Figura 3.5, teve como referência central as coordenadas do Poço BO-23, que seria perfurado posteriormente à realização da primeira operação de amostragem (MS1). As atividades de perfuração do poço BO-23 tiveram início em fevereiro de 2002, com conclusão em abril de 2002. No entanto, segundo informações da PETROBRAS, entre o MS1 e o MS2 foram perfurados dois poços: o BO-23 (fevereiro a abril de 2002) e o BO-22 (maio a junho de 2002), situado a 199 m a Leste do Poço BO-23 (Figura. 3.6).

Diante deste novo cenário, objetivando acomodar as alterações logísticas da atividade de produção (perfuração de dois poços de produção e presença de dutos), uma nova malha de amostragem foi definida para o MS2, estruturada com 74 estações. Do total de 74 estações, 68 localizavam-se ao longo de sete radiais centrados nos poços BO-22 e BO-23, cobrindo uma distância aproximada de 500 m dos poços perfurados (figuras 3.6 e 3.7).

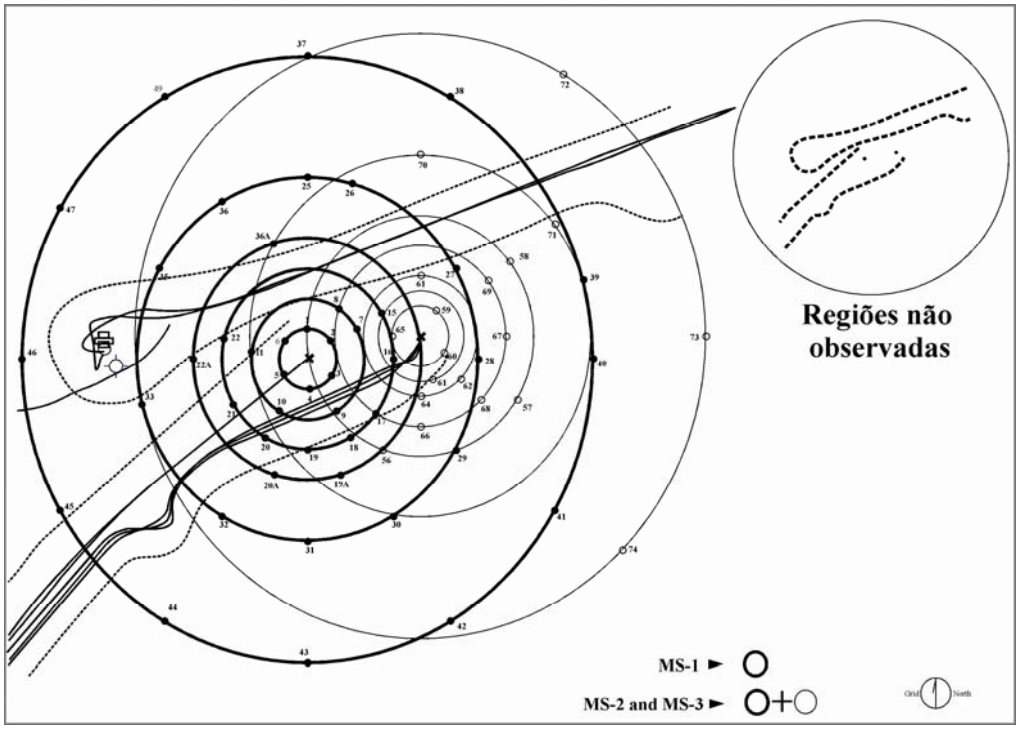


Figura 3.6. Delineamento amostral previamente planejado para MS2, considerando os dois poços perfurados, BO-22 e BO-23. As estações de referência não estão representadas. Figura construída com informações da PETROBRAS.

As seis estações amostrais complementares, identificadas como Controle não estão representadas nas figuras a seguir.

Em face da presença de um duto, lançado no período entre o MS1 e o MS2, o delineamento amostral teve de ser novamente alterado a bordo do navio. Por essa razão, uma segunda área de exclusão foi demarcada, localizada a Sul de BO-22 e BO-23, que foi então definida para o MS2 e o MS3, complementarmente à do MS1 (Figuras 3.7 e 3.8). Do total de 74 estações amostrais previamente definidas e descritas na Figura 3.6, apenas 61 foram coletadas no MS2 (Figura 3.8).

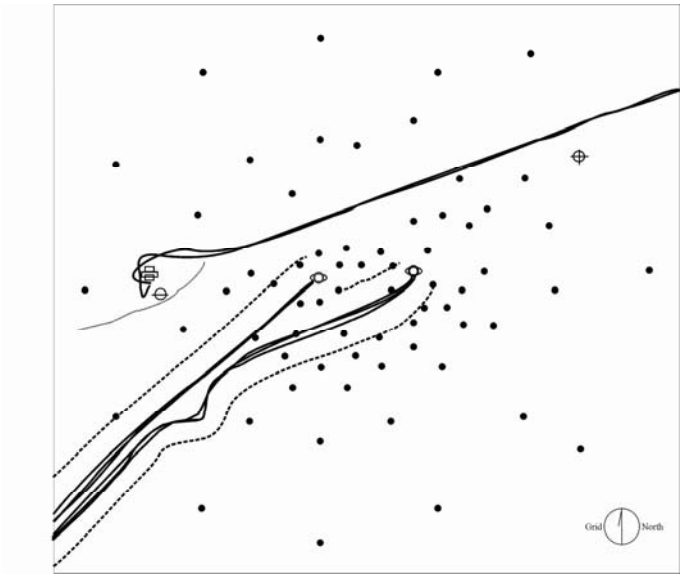


Figura 3.7. Delineamento amostral previamente planejado para o MS2, considerando os poços BO-22 e BO-23, e áreas de exclusão definidas pelos poços, “árvores-de-natal” e dutos instalados no local do estudo.

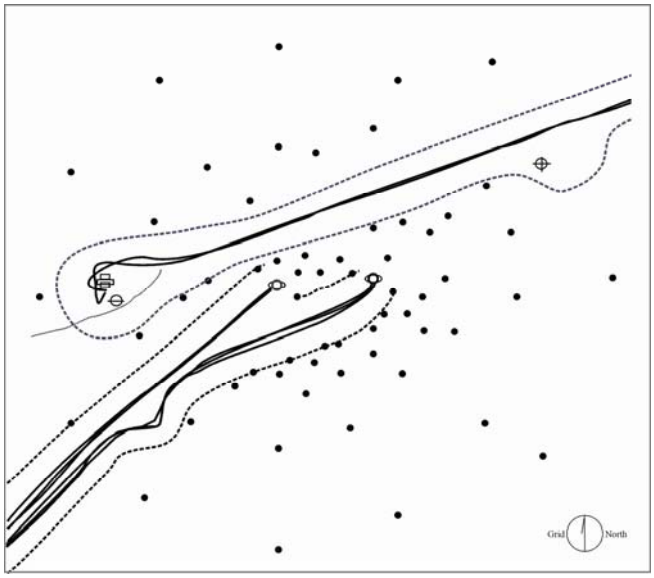


Figura 3.8. Delineamento amostral executado no MS2, a partir das áreas de exclusão definidas pelos poços BO-22 e BO-23, árvores-de-natal e dutos instalados no local do estudo. Obs.: as estações de referência não estão representadas na figura.

Para o MS3, as condições para operação no local já eram conhecidas e o delineamento amostral seguiu a distribuição espacial amostrada do MS2. No entanto, somente 54 amostras foram coletadas (Figura 3.9) em decorrência de problemas operacionais relacionados à qualidade na recuperação do sedimento de fundo.

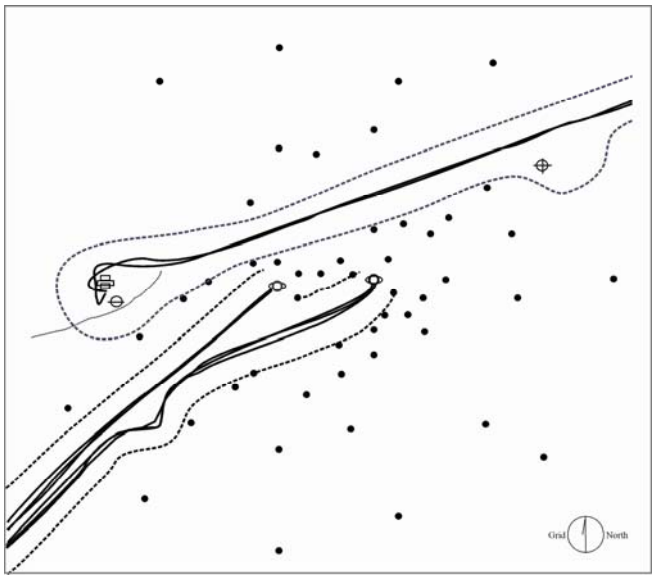


Figura 3.9. Delineamento amostral executado no MS3, a partir das áreas de exclusão definidas pelos poços BO-22 e BO-23, árvores-de-natal e dutos instalados no local do estudo. Obs.: as estações de referência não estão representadas na figura.

A Figura 3.10 mostra a delimitação de três regiões da malha amostral: a região 1, localizada a Noroeste, importante pela localização próxima ao(s) poço(s) perfurado(s) em atividades pretéritas, diretamente correlacionada na avaliação das condições ambientais já existentes no local. Complementarmente, as regiões 2 e 3 localizadas a Norte e a Sudoeste dos poços BO-22 e BO-23, localizadas a uma distância máxima de 300 metros do centro da malha. Em pelo menos um dos cruzeiros, não foi possível amostrar estas regiões, em virtude de serem áreas de exclusão.

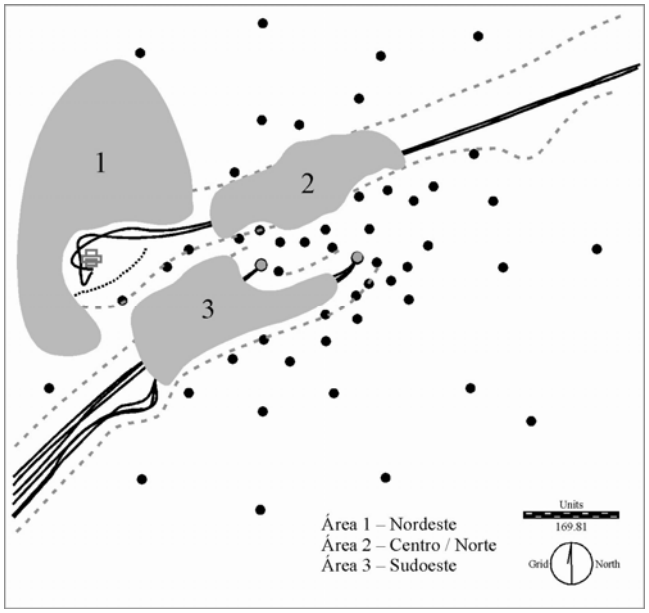


Figura 3.10. Áreas não amostradas em pelo menos uma dentre as três operações de amostragem (MS1, MS2 e MS3).

A estratégia de coleta e análise dos dados, seguindo a filosofia BACI, foi assegurada. A região-alvo do estudo foi observada em três ocasiões distintas, conforme Figura 3.10. O cruzeiro oceanográfico realizado no período compreendido entre 9 e 13 de setembro de 2003, que seria originalmente o MS3, foi cancelado (Figura 3.11 com a marca **X**), devido a diversos problemas na recuperação das amostras coletadas, que lhe comprometeram a qualidade.. Este marco reflete os procedimentos adotados durante todo o projeto que visaram garantir qualidade aos dados. Desta forma, as atividades de perfuração tiveram início em fevereiro e conclusão em abril de 2002, junto ao poço BO-22. No poço BO-23 as atividades de perfuração foram desenvolvidas entre maio e junho de 2002. As coletas foram realizadas em três cruzeiros oceanográficos nas seguintes datas:

1° Cruzeiro (MS1), de 28 a 31 de julho de 2001. Pré-perfuração do Poço BO-23,

2° Cruzeiro (MS2), de 16 a 24 de setembro de 2002. Pós-perfuração dos Poços BO-22 e BO-23, e 14 meses pós-1º cruzeiro, e três meses pós-perfuração, 3° Cruzeiro (MS3), de 16 a 19 de abril de 2004. 19 meses pós-2º cruzeiro, e 22 meses pós-perfuração (Figura 3.11).

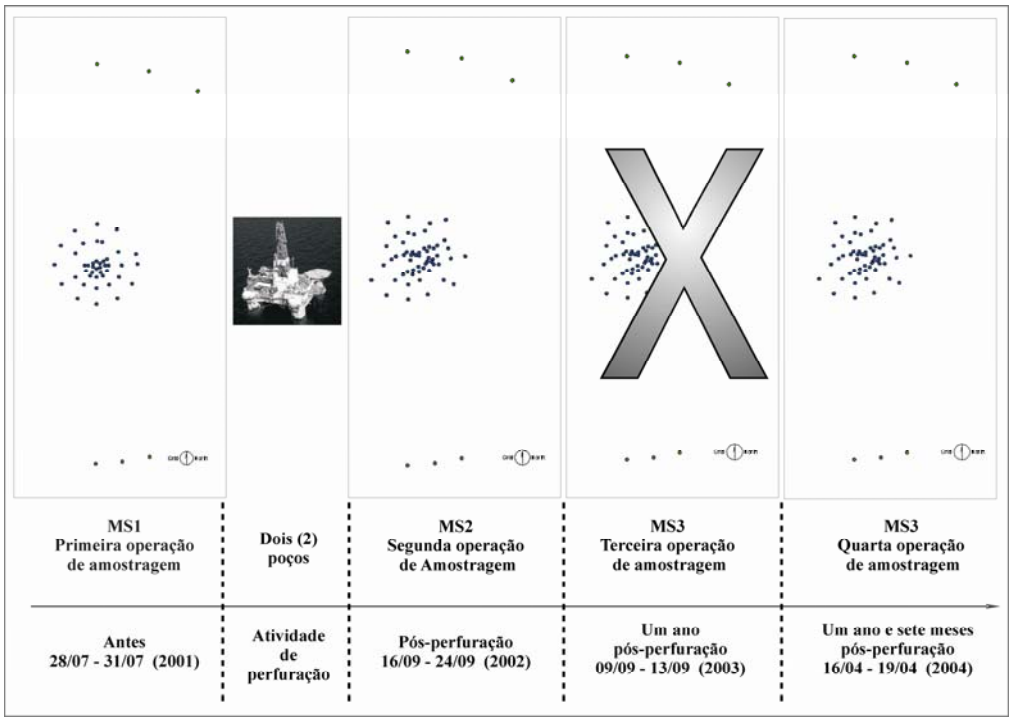


Figura 3.11. Delineamento amostral conforme estratégia BACI

A complexidade do estudo fica evidenciada no fato de que ele acontece em uma região na qual já haviam sido exploradas atividades de perfuração no passado. Além disso, a malha amostral executada delimitou áreas de exclusão localizadas em locais críticos para o estudo, próximo aos poços BO-22 e BO-23 e à "árvore-de-natal" localizada a Noroeste da região (Figura 3.10). Por essa razão, a estratégia para o modelo BACI precisou ser implementada para poder também controlar possíveis alterações decorrentes das atividades pretéritas.

Comparativamente à fase de águas profundas do MAPEM (Pulgati, *et al*., 2008), no estudo de águas rasas as estações amostrais não foram repetidas no tempo, uma vez que as malhas amostrais de cada cruzeiro não se repetem exatamente, nem quanto à localização geográfica de algumas estações amostrais, nem quanto à replicação de alguns pontos amostrais. A Tabela 3.1 descreve o número de pontos amostrais analisados em suas concentrações de bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em cada um dos cruzeiros oceanográficos. Já, a Tabela 3.2 descreve o número de pontos amostrais coincidentes e que tiveram as concentrações avaliadas em 2 cruzeiros oceanográficos. Somente 31 pontos amostrais foram avaliados quanto as suas concentrações de bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}),nos três cruzeiros oceanográficos. Os pontos 31 pontos avaliados em MS1, MS2 e MS3 não são os mesmos para ambos os traçadores.

Tabela 3.1. Número de pontos amostrais analisados em suas concentrações de bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}).

Pontos amostrais coletados em MS1		Pontos amostrais coletados em MS2		Pontos amostrais coletados em MS3	
Bário	n-parafinas	Bário	n-parafinas	Bário	n-parafinas
46	48	61	59	55	55

Tabela 3.2. Número de pontos amostrais coincidentes nas operações de amostragem e analisados em suas concentrações de bário e n-parafinas.

Pontos coincidentes MS1 e MS2		Pontos coincidentes MS1 e MS3		Pontos coincidentes MS2 e MS3	
Bário	n-parafinas	Bário	n-parafinas	Bário	n-parafinas
36	37	31	33	55	53

As amostras de sedimento foram coletadas com o equipamento denominado *Box Core*. (Figura 3.12). O equipamento é lançado ao fundo do oceano por um guincho do navio. Após tocar o fundo o içamento é iniciado fazendo com que o equipamento se feche trazendo para a superfície a amostra de sedimento (Figura 3.13). A caixa que contém a amostra deve estar preenchida com água do fundo. Este requisito garante qualidade à amostra coletada (Figura 3.14). Após a aprovação do controle de qualidade, a amostra é fracionada para atender os grupos de Biologia (macrofauna e meiofauna), Química, Geologia além de uma fração destinada para o arquivo do Projeto (Figura 3.15).

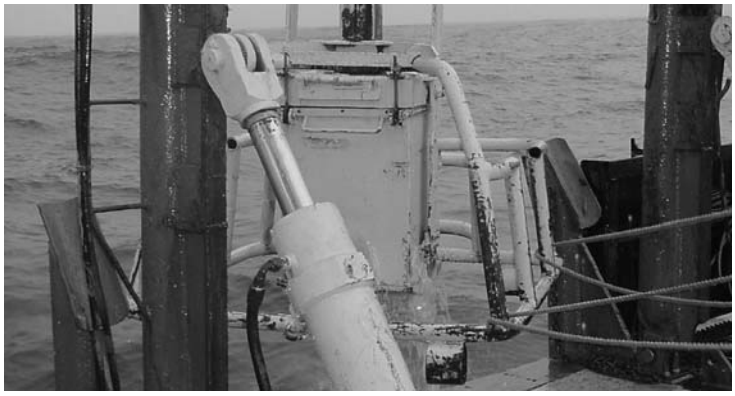


Figura 3.12. Foto do Box Core utilizado no projeto MAPEM.

Figura 3.13. Foto do equipamento de amostragem *(Box Core)* sendo içado para a superfície trazendo a amostra de sedimento do fundo oceânico.

Figura 3.14. Retirada da água que foi coletada junto com o sedimento de fundo. A presença da água garante que a amostra não foi “lavanda” durante o içamento para a superfície.

Figura 3.15. Fracionamento da amostra realizado para atender os diferentes procedimentos de coleta (Biologia, Química, Geologia e arquivo).

CAPÍTULO 4

MAPEAMENTO DAS ÁREAS COM REGISTROS DA ATIVIDADE DE PERFURAÇÃO: FORMULAÇÃO DO CONCEITO DE MÁSCARA *(MASK)*.

A primeira etapa do trabalho consistiu em identificar que elementos ou substâncias químicas poderiam ser usados como traçadores para mapeamento da

deposição do material descartado. Para isto, foram cruzadas informações disponíveis no estudo realizado em águas profundas com a composição dos fluidos empregados nas perfurações dos poços BO-22 e BO-23, realizados no ambiente de águas rasas. A estratégia adotada para o mapeamento das regiões alteradas pelos fluidos de perfuração com os dados obtidos no estudo de águas profundas conduzido na porção Norte da Bacia de Campos, encontram-se descritos em Pulgati *et al*. (2008).

Inicialmente, a atividade de perfuração realizada na área em estudo foi dividida em duas componentes: atividades pretéritas e atividades de interesse, voltadas para as perfurações dos poços BO-22 e BO-23. De acordo com os fluidos utilizados, a atividade de perfuração foi dividida em três fases: a primeira, caracterizada pelo uso de água no processo, conhecida como fase sem retorno; a segunda, com o emprego do fluido base água (WBF) composto principalmente por água misturada com argila de bentonita e aditivos, principalmente sulfato de bário, e a terceira, desenvolvida com fluido de base não-aquosa (NAF), contendo n-parafinas e igualmente, argila barita.

Assim, as variáveis associadas às atividades de perfuração que serviram de traçadores das fases de perfuração foram bário, associado à fase aquosa, e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), associada à fase não-aquosa.

Após explorar o banco de dados do MS1, foi observado que os indicadores dos diferentes fluidos, teoricamente ligados à atividade de perfuração, indicavam heterogeneidade espacial na região. O resultado preliminar apontava para uma provável alteração física e química na região, decorrente de atividades pretéritas. Esta constatação obrigou a implementação de uma estratégia que permitisse isolar as estações amostrais que apresentavam registros pretéritos da atividade de perfuração.

A segunda etapa do trabalho consistiu em modelar o cenário existente antes das atividades de perfuração dos poços BO-22 e BO-23 em relação aos dois indicadores escolhidos para representar as diferentes fases de perfuração.

Inicialmente, extraiu-se a média espacial para os dois indicadores da atividade de perfuração e, simultaneamente, realizou-se a predição das médias locais para cada vetor de coordenadas definido *a priori* por uma malha de interesse. Posteriormente, foi verificada a existência ou não de regiões com valores de bário e n-parafinas significativamente maiores que os da média local. Estas regiões poderiam estar vinculadas a alterações decorrentes de atividades pretéritas. Na confirmação desta hipótese, o modelo foi estruturado para controlar possíveis efeitos sobre as comunidades biológicas decorrentes de atividades pretéritas, em especificamente quanto ao uso dos diferentes fluidos, mantendo o foco de interesse principal do presente estudo, nas respostas biológicas decorrentes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23 com fluidos não aquosos (NAF).

4.1 Análises geoestatísticas dos indicadores das fases de perfuração no MS1.

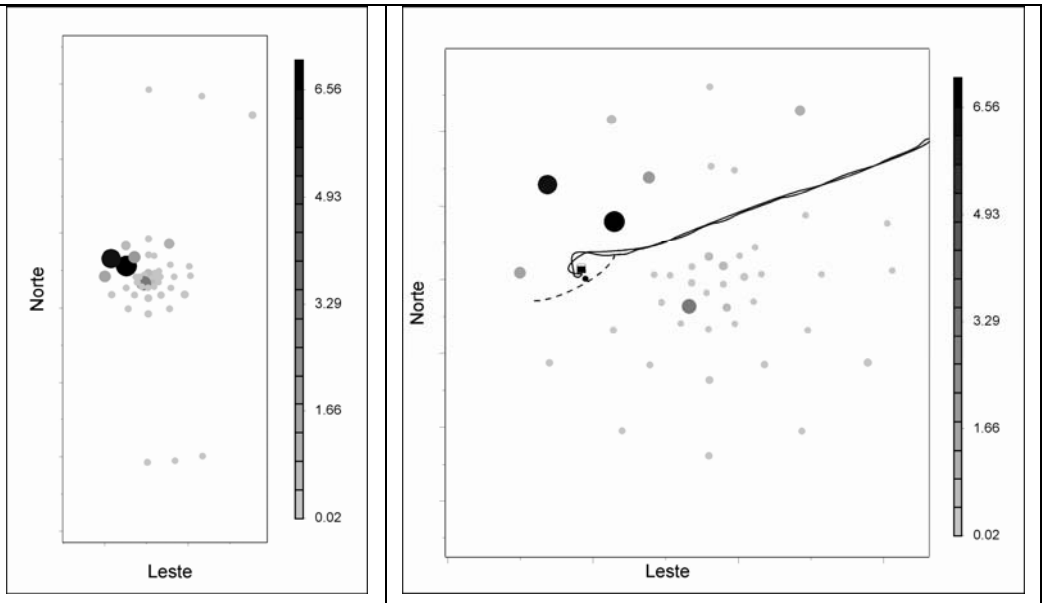
4.1.1 n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}; ppm)

Segundo a Tabela 4.1, as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) registraram no primeiro cruzeiro MS1, o valor mínimo de 0,02 e máximo de 6,56 ppm. Na Tabela 4.2 estão registradas as estatísticas descritivas da mesma variável, transformada na forma $y = \ln(x+1)$.

Tabela 4.1. Estatísticas descritivas para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm.

Estatísticas Descritivas	Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20} – ppm
Mínimo	0,02
Média	0,54
Mediana	0,09
Máximo	6,56
Desvio Padrão	1,31

As maiores concentrações medidas nas n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), antes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23, situam-se na porção Noroeste da área estudada. As estações de referência, localizadas a 2500 metros do centro da malha, revelaram concentrações em valores absolutos similares a observada para a média, embora maiores que a mediana local (Figura 4.1.1(a)).



a) com estações de referência	b) distribuição espacial até 500 m do centro da malha.

Figura 4.1.1. Concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS1, incluindo as estações de referência (a), e em (b), descrevendo a localização geográfica da "árvore-de-natal" e dutos instalados antes da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23.

A Figura 4.1.2 (b) descreve espacialmente as intensidades das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS1, localizadas em um raio de 500 metros. Com exceção de uma estação amostral localizada próxima ao

centro, é possível constatar que as maiores concentrações foram observadas a Noroeste dos dutos e do poço de produção já existentes no local de estudo. A hipótese a ser verificada determinará a necessidade de controlar variações biológicas em uma região que pode já estar alterada por atividades pretéritas, em específico, quanto ao traçador definido pela soma de n-parafinas. As análises subseqüentes utilizaram as concentrações de n-parafinas transformadas segundo estatísticas descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Estatísticas descritivas para as concentrações de n-parafinas, observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

Estatísticas Descritivas	**LN ((Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) +1)**
Mínimo	0,02
Média	0,31
Mediana	0,09
Máximo	2,02
Desvio Padrão	0,48

Para a correta aplicação do modelo geoestatístico, foi necessário t ratar os dados observados buscando atender as suposições de estacionariedade do processo estocástico.

Constatada a presença de tendência, o modelo de regressão local foi ajustado usando a latitude e a longitude como preditores da resposta de interesse, neste caso, as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS1. Com esta técnica, a curvatura em algum ponto no espaço depende da observação no ponto e de sua vizinhança geográfica. O ajuste produz uma estimativa para a resposta de interesse que é menos variável que a resposta observada original. O número de vizinhos empregado para estimar o valor em algum ponto no espaço foi especificado por um percentual do número total de pontos. No modelo empregado, o parâmetro que define o percentual é denominado *"span"* e a influência de cada vizinho na estimativa do ponto de interesse foi determinada pela função de pesos *"tri-cube"*. Para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), em MS1, o *span* utilizado foi $\lambda = 0{,}19$. Os resíduos do modelo foram

tratados através de técnicas geoestatísticas Bayesianas supondo observações de um processo estocástico estacionário.

A Figura 4.1.2 descreve a dispersão entre os valores ajustado pelo modelo de regressão local e os valores observados no primeiro cruzeiro. Os valores extremos, localizados geograficamente nas porções Noroeste e Norte da malha amostral (Figura 4.1.1) foram adequadamente captados pelo modelo de regressão, minimizando desta forma, os resíduos que serão analisados através do modelo geoestatístico.

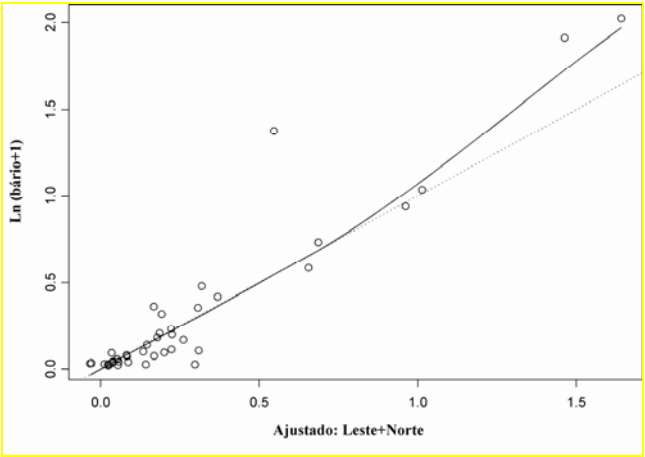


Figura 4.1.2. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 com os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em relação à variável n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), no MS1.

A Figura 4.1.3 descreve a superfície gerada pelos valores ajustados no modelo de regressão local. A análise visual dos resultados revela evidências de heterogeneidade espacial dentro do primeiro cruzeiro (MS1) considerando a variável n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), importante traçador do fluido de perfuração base não-aquosa (NAF).

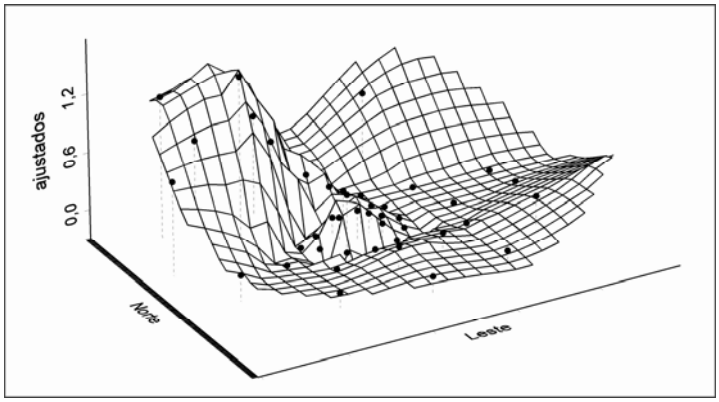


Figura 4.1.3. Gráfico descritivo da superfície de tendência fornecida pelo modelo de regressão não-paramétrico Local *(loess)*.

A Figura 4.1.4 descreve a dispersão dos resíduos como função do vetor de coordenadas geográficas cuja tendência não foi significativa *(p=0,5977)*.

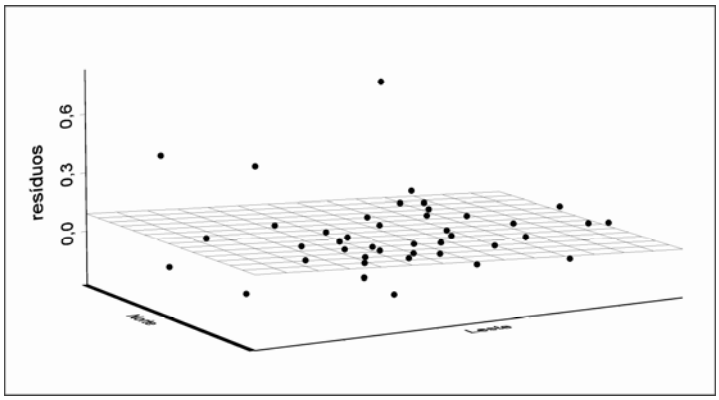


Figura 4.1.4. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas w.

A Figura 4.1.5 descreve a distribuição espacial do logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) discretizadas em intervalos. Elas foram divididas em quatro intervalos (concentrações em ppm): o primeiro de -0,6 a 0,1; segundo de 0,1 a 0,2; terceiro de 0,2 a 0,5 e finalmente, o intervalo contendo concentrações entre 0,5 a 1,8. A inspeção visual da Figura 4.1.5 permite verificar que

as concentrações representadas pelos dois primeiros intervalos apresentam padrões distribuídos em toda a região estudada. Já, os pontos amostrais com concentrações maiores que 0,2 ppm aparecem regionalmente localizados sugerindo possíveis registros de atividades pretéritas.

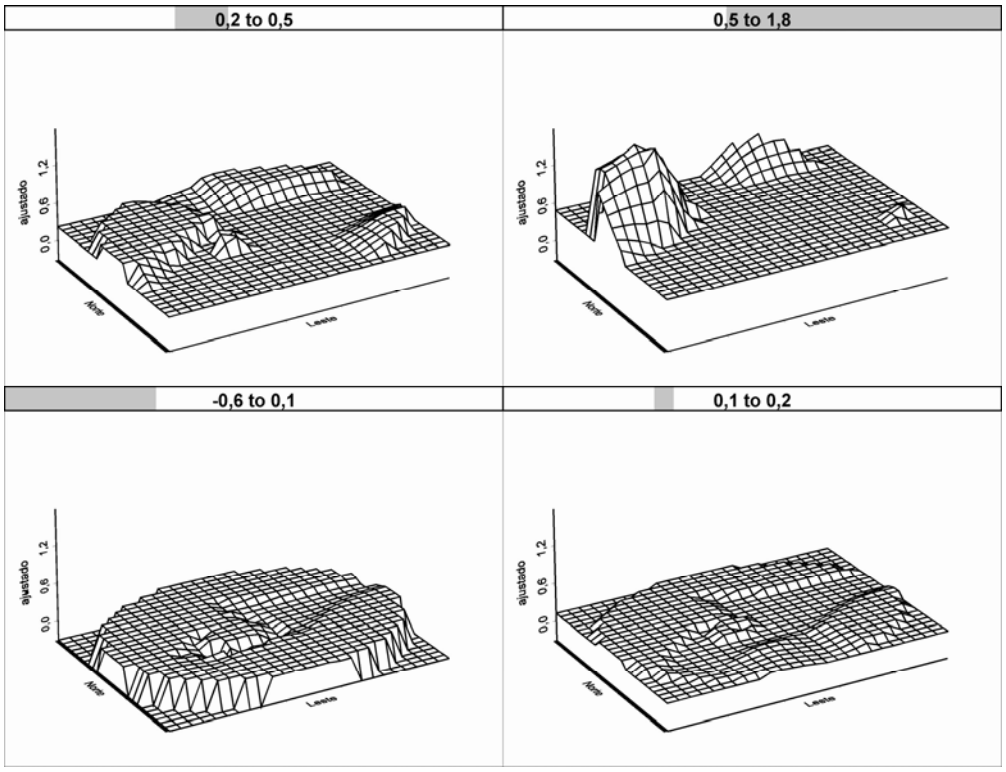


Figura 4.1.5. Gráfico descritivo com a distribuição espacial do logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local *(loess).*

Aplicando o modelo descrito no Capítulo 2.6, e verificadas as condições de convergência da cadeia de Markov, foram tomadas amostras da *posteriori* para cada parâmetro do modelo, obtidas como resultado da aplicação do modelo geoestatístico sobre os resíduos. Estes resíduos foram admitidos como tendo sido gerados por um processo estocástico subjacente, Gaussiano e estacionário, $S(x)$, que representa a

variabilidade especial desconhecida. A técnica foi empregada para estimar o espaço de parâmetros θ, onde $\theta = (\beta, \tau, \phi, \sigma^2, \kappa)$, que são por definição, os parâmetros do modelo teórico geoestatístico.

A seguir são descritas as séries históricas da simulação de Monte Carlo via Cadeia de Markov referente aos parâmetros do modelo. O critério adotado para verificar a convergência seguiu a estratégia de simular três vezes a mesma estrutura partindo de valores iniciais diferentes para cada caso. A Figura 4.1.6 descreve a evolução de uma das cadeias estabelecidas referente ao parâmetro β. Observa-se que após 3300 iterações a cadeia converge para a distribuição de equilíbrio. A avaliação das demais simulações tomadas com valores iniciais diferentes revelou o mesmo resultado. A composição da amostra foi realizada após a convergência da cadeia e após constatação de que não havia auto-correlação na série histórica.

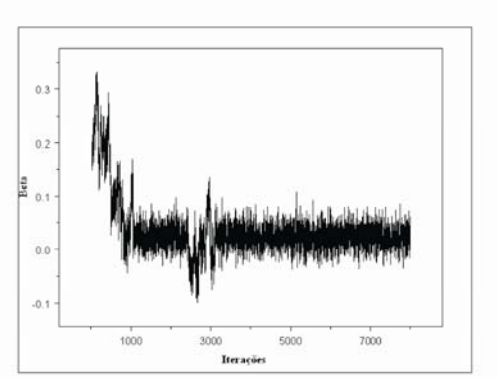


Figura 4.1.6. Descrição da evolução da cadeia referente ao parâmetro β.

Para efeito de ilustração, são descritas nas figuras 4.1.7 (a) e (b), a evolução da cadeia considerada adequada para a composição da amostra. A Figura 4.1.7 (d) descreve a densidade a posteriori referente ao parâmetro ϕ. Este parâmetro traduz a estrutura de dependência espacial (correlação especial) das observações em função da distância entre dois pontos. O intervalo com 95% de credibilidade a posteriori evidenciou efeito

significativo para este parâmetro. O limite inferior a posteriori é 51,52 m e o superior 262,2; a mediana é 78,5 m.

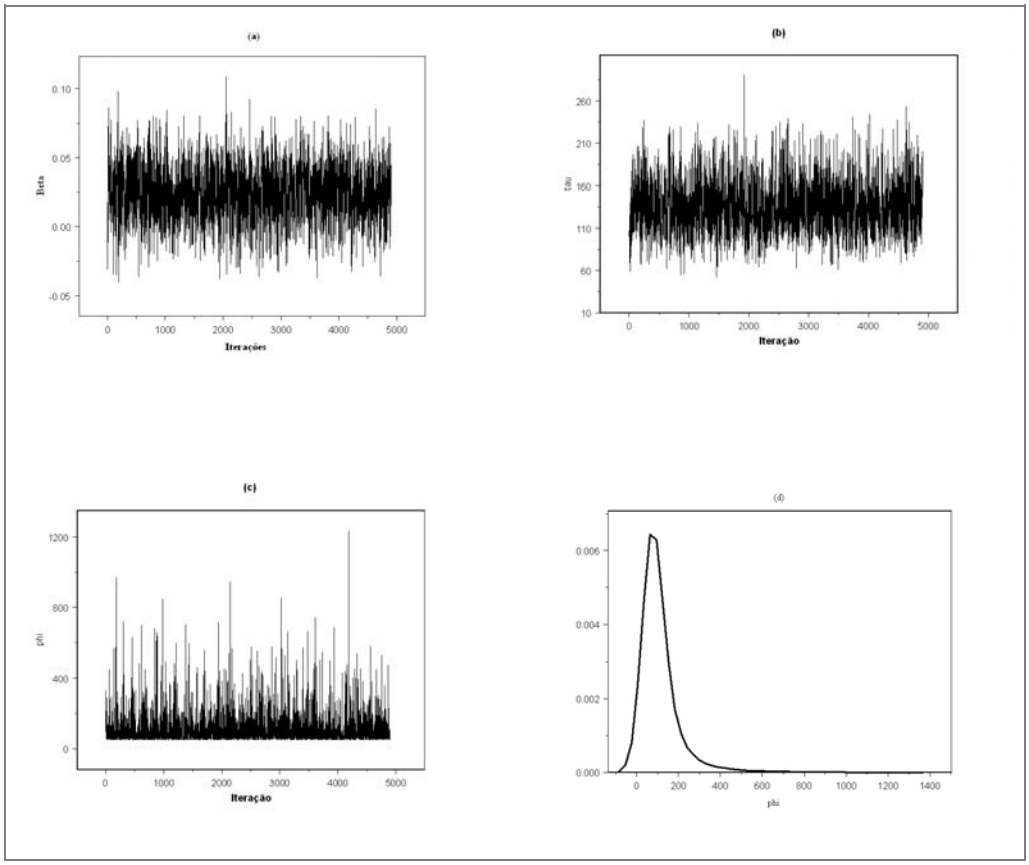
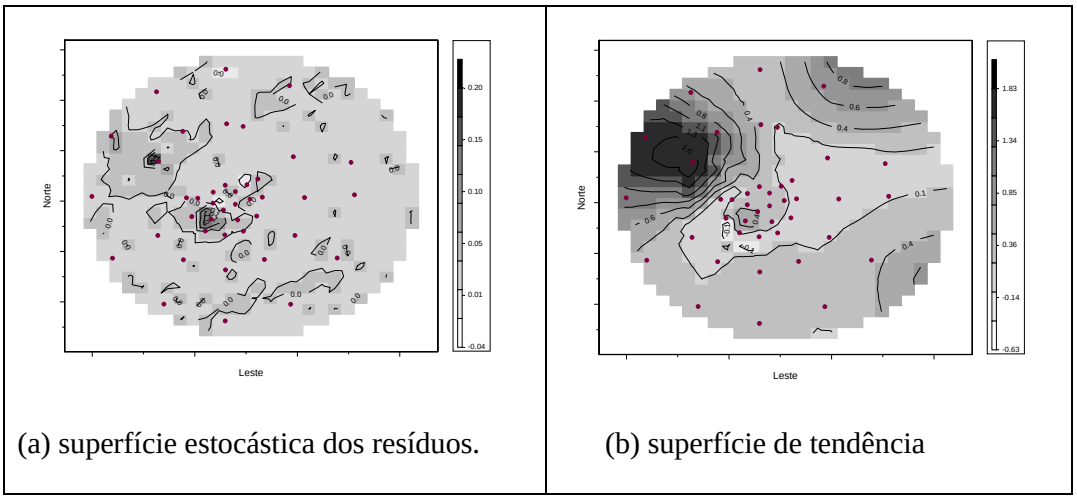


Figura 4.1.7. Descrição das evoluções das cadeias referentes aos parâmetros β (a), τ (b), e ϕ (c). A Figura (d) descreve a densidade a posteriori para o parâmetro ϕ.

Na sequência, a componente de variação espacial não estocástica, conhecida e isolada pelo modelo de regressão local (Figura 4.1.8(b)) foi adicionada à superfície estocástica predita pelo modelo geoestatístico (Figura 4.1.8(a)). Os resultados descritos na Figura 4.1.8(a) foram obtidos pelo método de predição multivariado, que considera o erro conjunto de predição para as médias da resposta de interesse $\mu(w)$ em todas as localidades da região de estudo *A*.



(a) superfície estocástica dos resíduos. (b) superfície de tendência

Figura 4.1.8. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS1.

A Figura 4.1.9 descreve a média a posteriori para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), que representa o valor esperado $\mu(w)$ centrado no *pixel* com uma área real de aproximadamente 50×50 m.

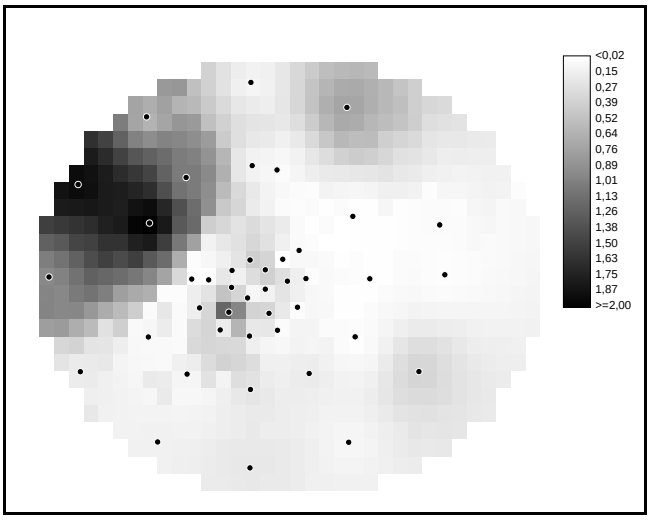


Figura 4.1.9. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS1.

Considerado o erro conjunto, foi possível comparar o limite inferior de cada localização geográfica predita com o limite superior da distribuição de probabilidade a posteriori para o valor de tendência central espacial, construindo desta forma, dois agrupamentos espaciais. (Fig. 4.1.10).

A Figura 4.1.10 apresenta a região inicialmente denominada “Impacto” antes da atividade de perfuração dos poços os BO-22 e BO-23 dividida em dois grupos distintos quanto ao marcador de n-parafinas: o primeiro grupo, representado pela região sem perecimento (cor branca), indica os locais onde as concentrações são iguais ou inferiores à mediana local; o segundo grupo, representado pela região com preenchimento (cinza hachurado), identifica os locais onde as concentrações são estatisticamente superiores à mediana local.

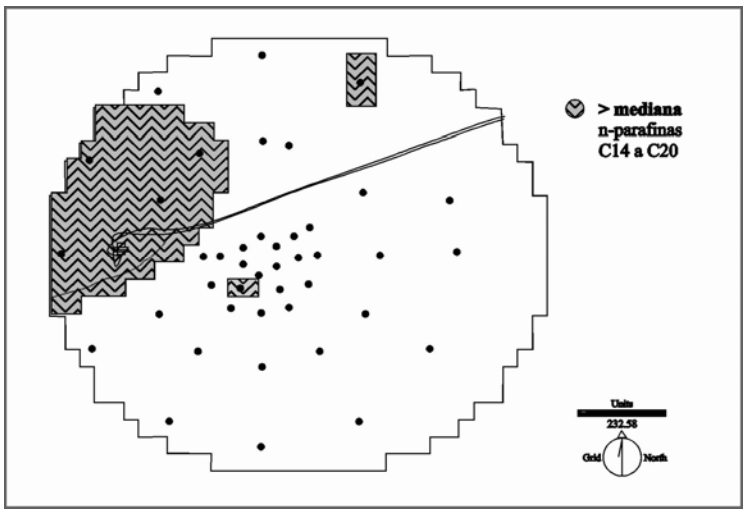


Figura 4.1.10. Pixels (vetores de coordenadas) com probabilidade maior que 0,95 de serem superiores à mediana local para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS1.

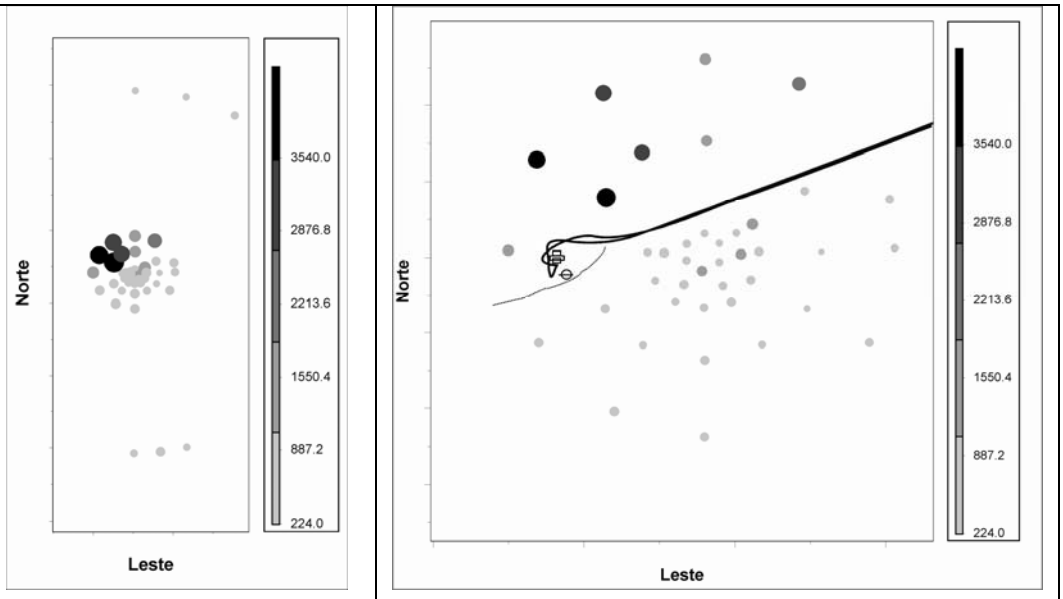
4.1.2. Bário – MS1; ppm

Segundo a Tabela 4.3, as concentrações de bário registraram no primeiro cruzeiro MS1, valor mínimo de 224,00 ppm e máximo de 3.540,00 ppm.

Tabela 4.3. Estatísticas descritivas correspondentes as concentrações de bário observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm.

Estatísticas Descritivas	Bário – ppm
Mínimo	224,00
Média	860,58
Mediana	627,15
Máximo	3540,00
Desvio Padrão	705,58

As maiores concentrações de bário observadas antes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23 estão localizadas nas porções Norte, Oeste e Noroeste da malha amostral. As estações de referência, localizadas a 2500 metros do centro da malha, revelaram concentrações similares as observadas para a mediana dos dados (Figura 4.1.11 (a)). Já a Figura 4.1.11(b) descreve a localização da “árvore-de-natal” na qual se conectam alguns dutos de produção. As maiores concentrações de bário estão localizadas a Norte e Noroeste dos dutos e poço de produção. A hipótese a ser verificada orientou quanto à necessidade de controlar variações nas comunidades bentônicas em uma região que pode estar alterada por atividades pretéritas, em relação ao indicador bário.



a) com estações de referência	b) distribuição espacial até 500 m do centro da malha.

Figura 4.1.11. Concentrações de bário (ppm) observadas no MS1, incluindo as estações de referência (a), e em (b), descrevendo a localização geográfica da "árvore-de-natal" e dutos instalados antes da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23.

Na Tabela 4.4 estão registradas as estatísticas descritivas da variável bário, transformada na forma $y = \ln(x+1)$.

Tabela 4.4. Estatísticas descritivas para as concentrações de bário observadas no primeiro cruzeiro (MS1). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

Estatísticas Descritivas	**LN (bario+1) – ppm**
Mínimo	5,41
Média	6,55
Mediana	6,44
Máximo	8,17
Desvio Padrão	0,59

Todas as análises subseqüentes utilizaram as concentrações de bário transformadas segundo estatísticas descritas na Tabela 4.4. De forma análoga ao

tratamento dispensado para variável n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), as concentrações de bário observadas em MS1 foram submetidas a uma análise de regressão não-paramétrica local. Para as concentrações de bário, em MS1, o *span* utilizado foi $\lambda = 0{,}23$. Os resíduos do modelo foram tratados adequadamente através do modelo Geoestatístico descrito em 2.6.

A Figura 4.1.12 descreve a dispersão entre os valores ajustado pelo modelo de regressão local e os valores observados no primeiro cruzeiro.

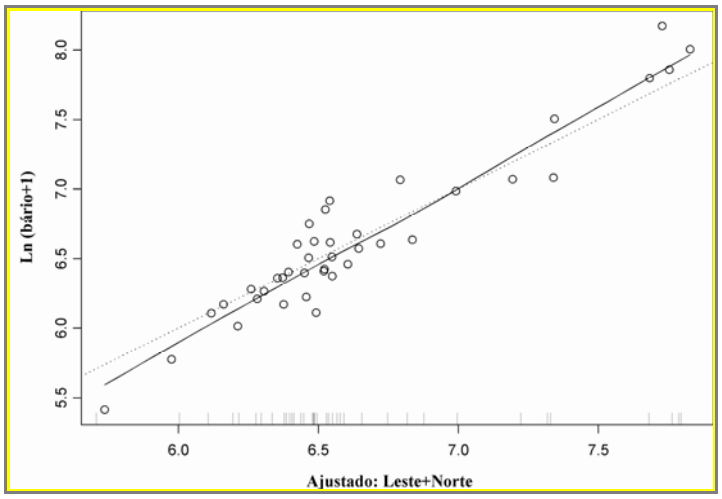


Figura 4.1.12. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 para as concentrações de bário no MS1 e os valores ajustados pelo modelo de regressão local.

A Figura 4.1.13 descreve a superfície gerada pelos valores ajustados no modelo conjuntamente com a intensidade das concentrações observadas no primeiro cruzeiro. A análise visual dos resultados revela evidências de heterogeneidade espacial dentro do primeiro cruzeiro (MS1) para este importante traçador do fluido de perfuração base aquosa (WBF) e não-aquosa (NAF).

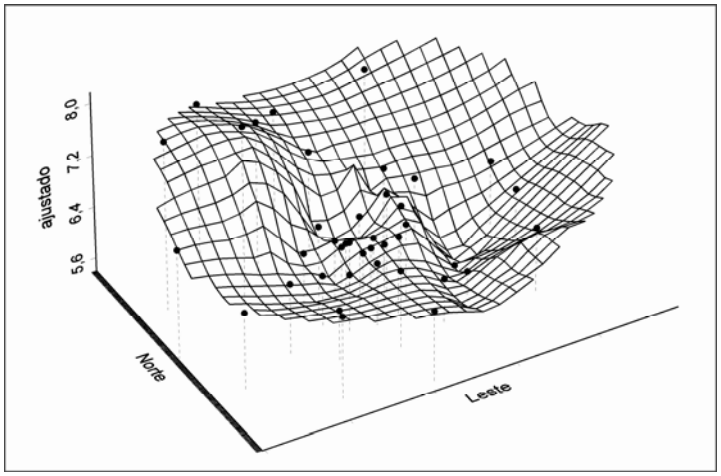


Figura 4.1.13. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador bário. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

A Figura 4.1.14 descreve a dispersão dos resíduos como função do vetor de coordenadas geográficas. O plano estimado pelo modelo de regressão linear múltipla não foi significativo *(p=0,3814)*.

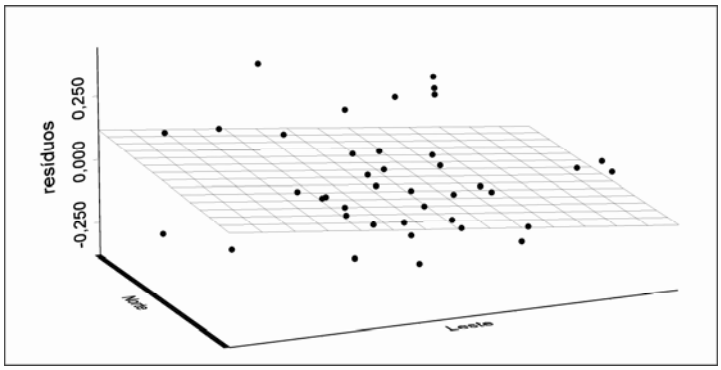


Figura 4.1.14. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas w.

A Figura 4.1.15 descreve a distribuição espacial das concentrações de bário transformadas e discretizadas em intervalos. Elas foram divididas em quatro intervalos

(concentrações em ppm): o primeiro de 5,7 a 6,4; segundo de 6,4 a 6,7; terceiro de 6,7 a 7,2 e finalmente, o intervalo contendo concentrações entre 7,2 a 8,0. De forma análoga ao registrado com as n-parafinas em MS1, o terceiro e o quarto intervalos revelam indícios de registros relacionados às atividades pretéritas. Este indício é revelado quando comparadas as informações contidas nas figuras 4.1.11 e 4.1.15. Ressalta-se que ambas são descritivas, tendo sido empregadas como ferramenta de análise exploratória dos dados. As interpolações descritas nas extremidades das superfícies da Figura 4.1.15 (cantos), não devem ser consideradas, pois não fazem parte da região *A*, definida como de interesse.

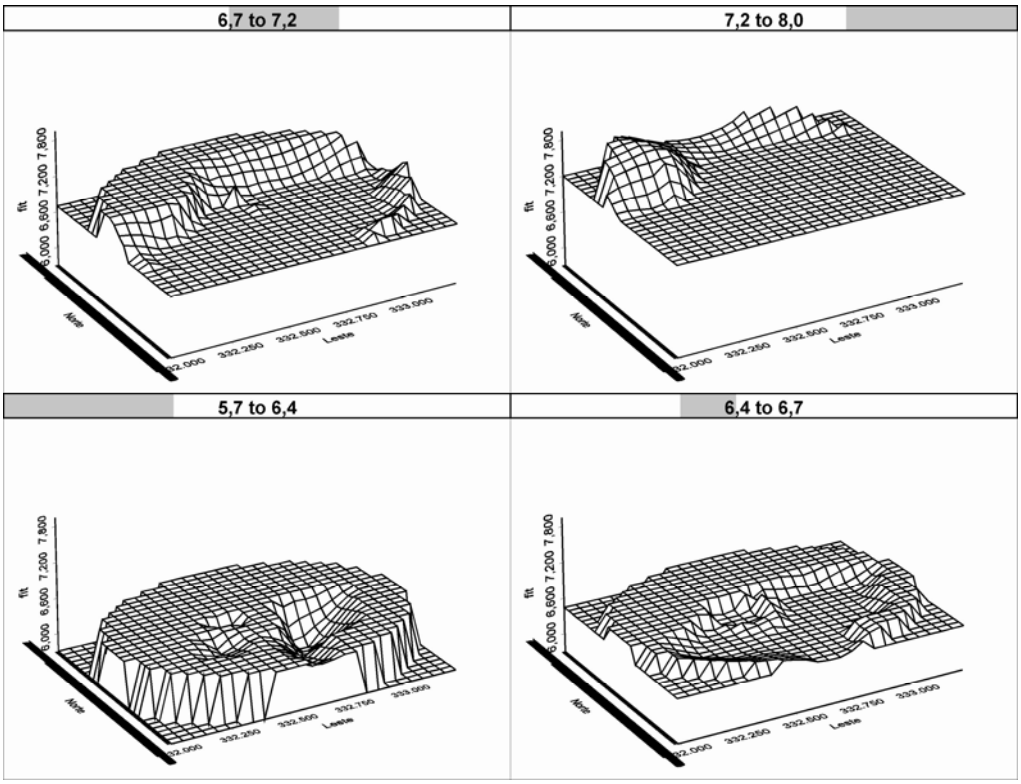


Figura 4.1.15. Gráfico descritivo com a distribuição espacial das concentrações de bário ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico Local.

Posteriormente, foram tomadas amostras da *posteriori* resolvidas através da aplicação do modelo geoestatísticos sobre os resíduos do modelo de regressão local. A

seguir, são descritas a evolução cadeia de Markov para os parâmetros do modelo. A composição da amostra foi realizada após a convergência da cadeia, e a análise da função de auto-correlação.

Para efeito de ilustração, são descritas nas figuras 4.1.16 (a) e (b), a evolução da cadeia considerada adequada para a composição da amostra bem com a densidade a posteriori para o parâmetro ϕ. O intervalo com 95% de credibilidade a posteriori evidenciou efeito significativo para o parâmetro ϕ, IC95% (63,78; 280,73).

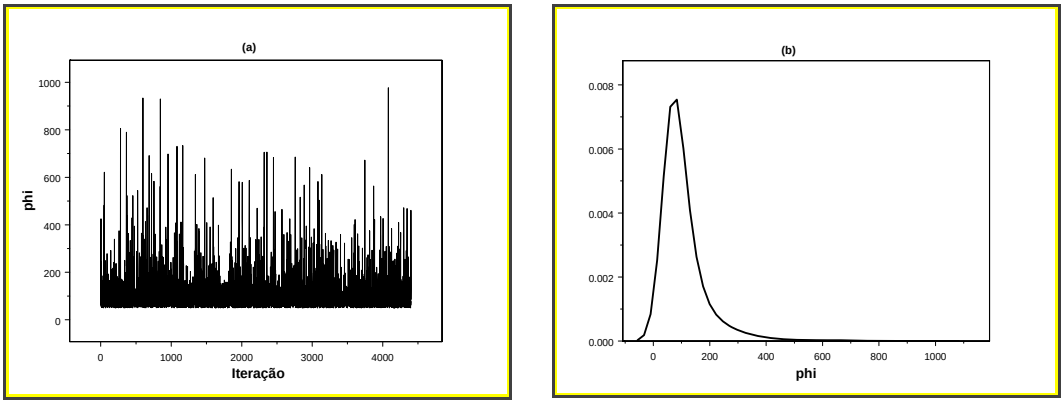
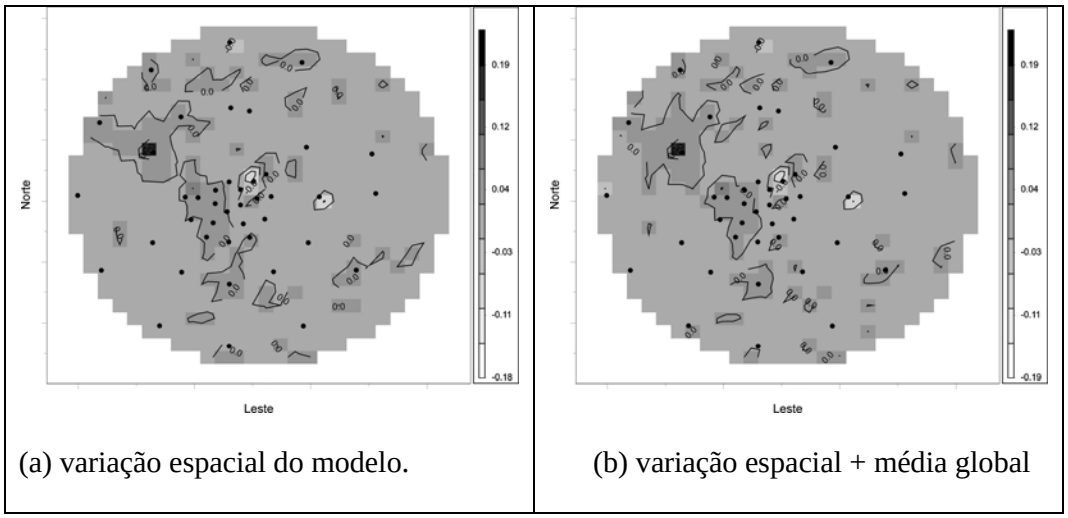


Figura 4.1.16 - Descrição das evoluções das cadeias e densidade correspondente ao parâmetro ϕ.

A Figura 4.1.17(a) descreve o efeito espacial significativo como resultado da modelagem estocástica dos resíduos. As curvas de isovalores delimitam regiões onde a estrutura espacial foi significativamente positiva (IC95%). Já a Figura 4.1.17 (b) descreve a superfície dos valores preditos para os resíduos do modelo de regressão local, descritos anteriormente na Figura 4.1.14.

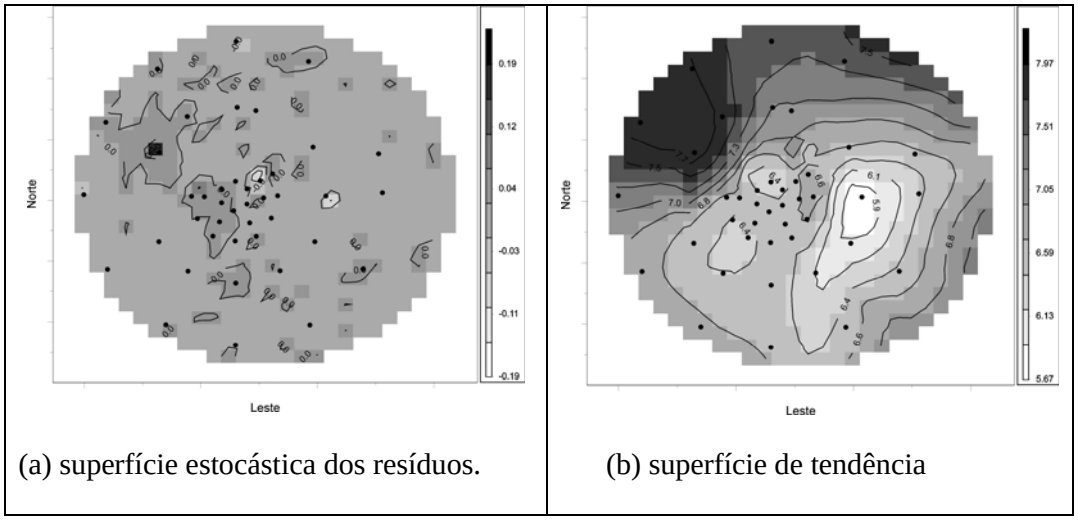


(a) variação espacial do modelo.

(b) variação espacial + média global

Figura 4.1.17. Distribuição do efeito espacial (a) e em (b), a superfície estocástica para os resíduos do logaritmo das concentrações de bário em MS1.

Na sequência, a componente de variação espacial não estocástica, conhecida e isolada pelo modelo de regressão local (Figura 4.1.18(b)) foi adicionada à superfície estocástica predita pelo modelo geoestatístico (Figura 4.1.18(a)).



(a) superfície estocástica dos resíduos.

(b) superfície de tendência

Figura 4.1.18. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência do logaritmo das concentrações de bário em MS1.

Os resultados descritos na Figura 4.1.18(a) foram obtidos pelo método multivariado, que considera o erro conjunto de predição para as médias da resposta de interesse $\mu(w)$ em todas as localidades da região de estudo A.

A Figura 4.1.19 descreve a média a posteriori para o logaritmo das concentrações de bário, que representa o valor esperado $\mu(w)$ centrado no *pixel* com uma área real de aproximadamente 50×50 m. Desta forma, foi possível comparar o limite inferior de cada localização geográfica predita com o limite superior da distribuição de probabilidade *a posteriori* para o valor de tendência central espacial, identificando regiões com alta probabilidade de terem sido alteradas por atividades de perfurações de poços no passado, este, um procedimento análogo a uma comparação múltipla de médias,

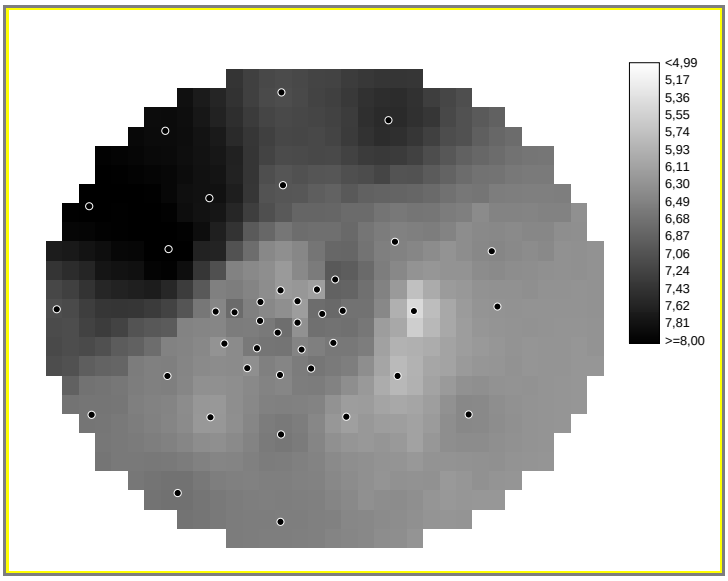


Figura 4.1.19. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações bário em MS1.

A Figura 4.1.20 descreve o resultado da variável bário, observada antes da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23 dividida em dois grupos distintos: o

primeiro grupo, representado pela ausência de preenchimento na figura (cor branca), indica os locais onde as concentrações de bário são iguais ou inferiores à mediana local; o segundo grupo, representado pelo preenchimento na figura (cor cinza), identifica os locais onde as concentrações de bário são significantemente maiores que a mediana local, considerando para isto, o IC95% de credibilidade.

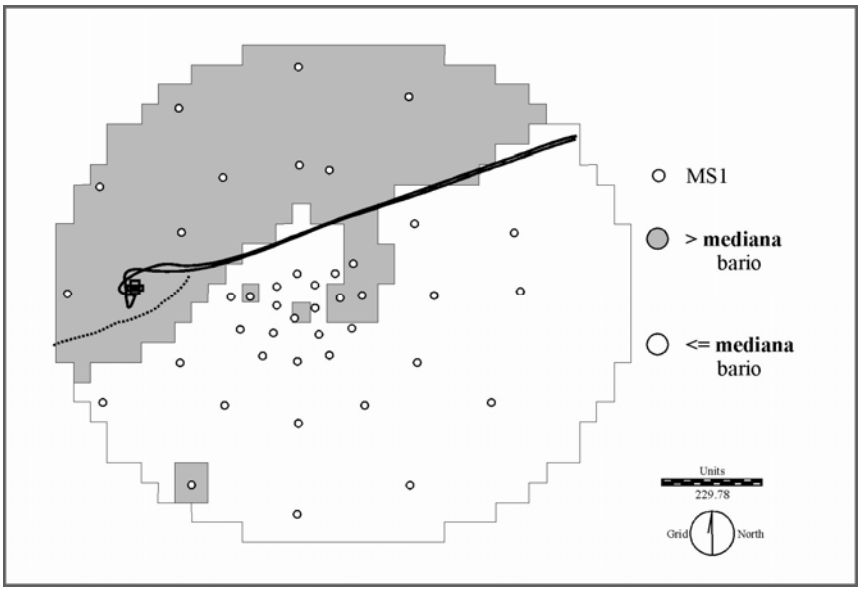


Figura 4.1.20. Pixels (vetores de coordenadas) com probabilidade maior que 0,95 de serem superiores a mediana local para o bário.

Sobrepondo as informações apresentadas nas figuras 4.1.10 e 4.1.20, é possível obter as regiões com altas probabilidades de terem sido alteradas por atividade pretéritas de perfuração. A Figura 4.1.21 descreve simultaneamente regiões com concentrações de bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) maiores que a mediana (IC95%). As diferenças encontradas no MS1 podem estar relacionadas com atividades de perfuração ocorridas no passado. Inicialmente, foram definidas cinco estações amostrais com concentrações acima da mediana local em bário e n-parafinas, dez estações amostrais com concentrações elevadas em bário, uma estação com alteração em n-

parafinas, e as restantes estabilizadas em torno da mediana local. Em decorrência do pequeno número de estações amostrais em cada um dos diferentes grupos, as regiões supostamente alteradas por atividades pretéritas foram unificadas (Figura 4.1.22).

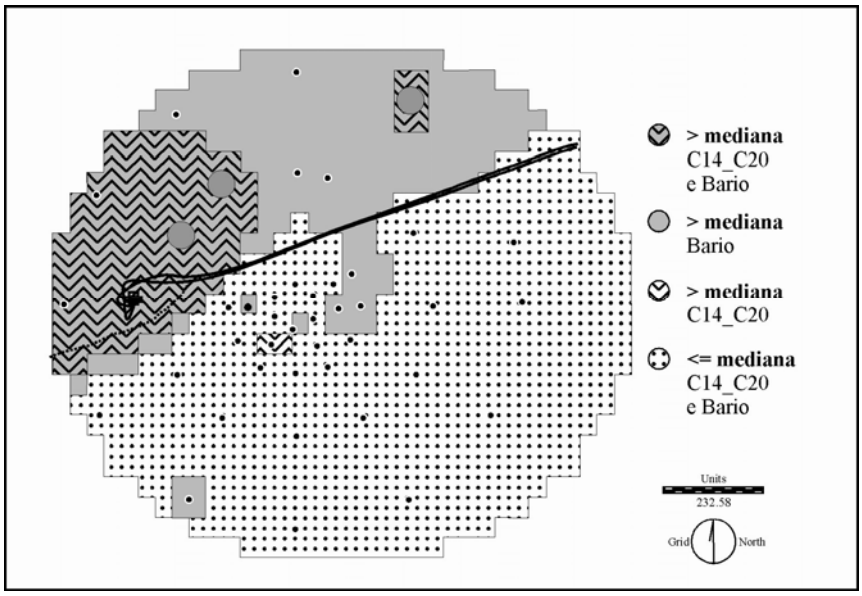


Figura 4.1.21. Regiões estatisticamente diferentes dentro do MS1.

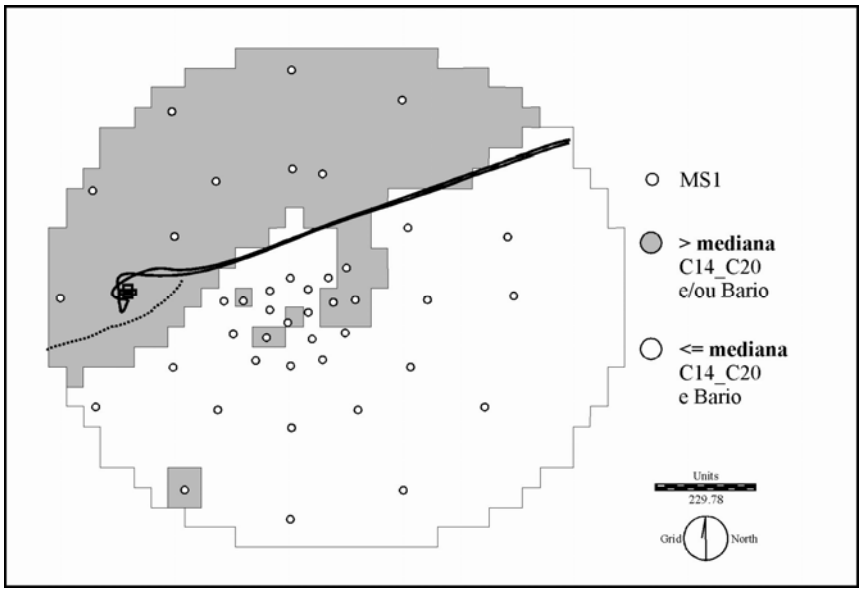


Figura 4.1.22 – Regiões alteradas por atividades pretéritas, definidas a partir dos traçadores dos fluidos de perfuração, bário e n-parafinas.

Fica assim definida, a heterogeneidade espacial no primeiro cruzeiro (MS1) em relação aos traçadores dos fluidos de perfuração selecionados para este estudo (Figura 4.1.22). Com esta abordagem, o modelo controlará possíveis alterações existentes nas comunidades bentônicas associadas a atividades pretéritas, de interesse secundário dentro do escopo do Projeto MAPEM.

4.2 Análises geoestatísticas dos indicadores das fases de perfuração no MS2.

4.2.1. n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}; ppm)

Conforme Tabela 4.5, as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) registraram no segundo cruzeiro MS2, o valor mínimo igual a 0,0293 ppm e máximo igual a 3.146,98 ppm. Um acréscimo substancial nas concentrações quando comparado aos valores observados no primeiro cruzeiro (MS1) onde a concentração máxima foi 6,56 ppm de n-parafinas. Os valores mínimos se mantiveram muito próximos nos dois primeiros cruzeiros. O menor valor observado em MS1 foi igual a 0,02 ppm.

Tabela 4.5. Estatísticas descritivas para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm.

Estatísticas Descritivas	Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20} – ppm
Mínimo	0,03
Média	148,99
Mediana	1,69
Máximo	3.146,98
Desvio Padrão	64,91

A distribuição espacial das concentrações observada para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) é mostrada na Figura 4.2.1 (a). Para melhor ilustrar os pontos de concentração e suas respectivas intensidades, as duas maiores

concentrações de n-parafinas observadas em MS2, a saber, 3.146,98 ppm e 1.897,84 ppm, foram substituídas por 1.126,87 ppm, valor do ponto que o antecede na escala de intensidade do mesmo parâmetro da malha amostral (Figura 4.2.1 (b)). Este artifício permite a melhor distinção dos pontos e, por esta razão, foi aplicado para outras figuras do documento. A Figura 4.2.1 (c) descreve a distribuição da transformação $y = \ln(x+1)$.

As maiores concentrações observadas do marcador n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) após a perfuração dos poços BO-22 e BO-23, localizaram-se próximas ao centro da malha amostral se estendendo para duas direções: Nordeste e Sudoeste. Já, as estações de referência, localizadas a 2500 metros do centro da malha, revelaram concentrações similares as observadas nestas regiões em MS1.

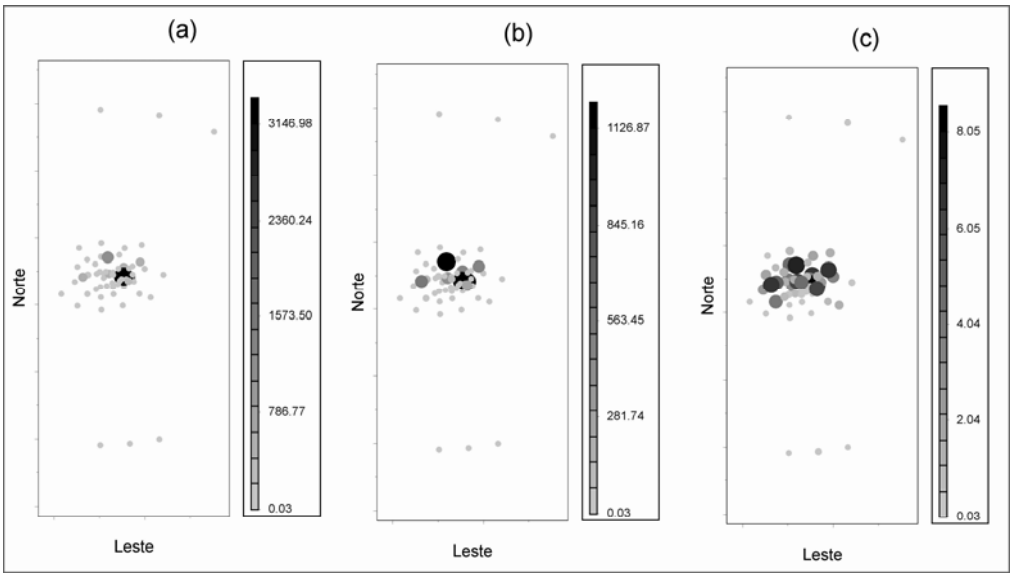


Figura 4.2.1. Concentrações n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS2; variável original (a), variável suavizada *(trimmed)* (b), variável transformada (c).

Par uma melhor visualização, as concentrações mostradas na Figura 4.2.2 foram transformadas segundo $y = \ln(x+1)$. Esta figura descreve espacialmente as intensidades das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS2 excluindo as regiões de referência. São apresentados os dutos já existentes antes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23, localizados na porção Norte da área estudada bem como novos dutos localizados no quadrante Noroeste da malha amostral, instalados na região após o término das atividades de perfuração dos poços BO-22 e BO-23. Na Tabela 4.6 se encontram registradas as estatísticas descritivas das concentrações de n-parafinas, transformada na forma $y = \ln(x+1)$.

Tabela 4.6. Estatísticas descritivas referente às concentrações de n-parafinas observadas no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

Estatísticas Descritivas	**LN (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20} +1) - ppm**
Mínimo	0,03
Média	1,93
Mediana	0,99
Máximo	8,05
Desvio Padrão	2,26

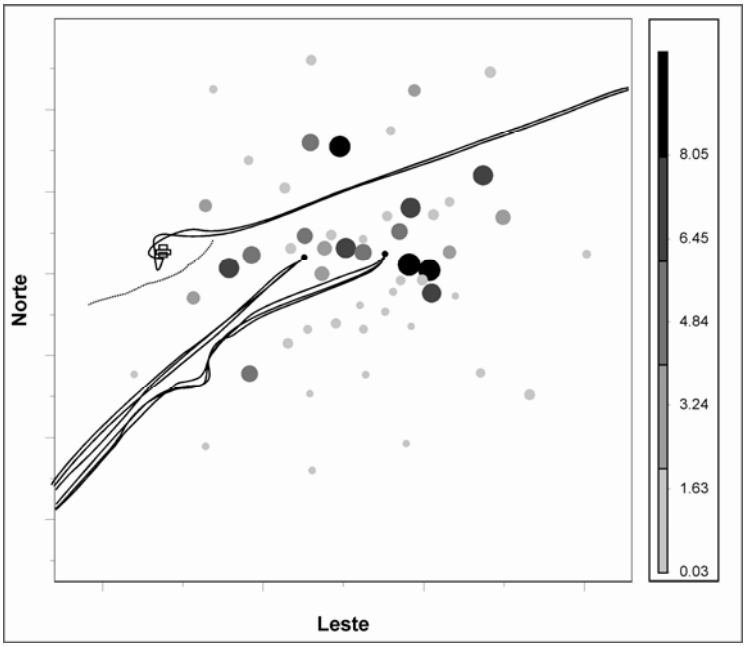


Figura 4.2.2. Concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS2, mostrando a localização geográfica da "árvore-de-natal", dutos instalados antes da atividade monitorada e dutos ligando os poços BO-22 e BO-23. Obs.: Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$. No centro da malha, à esquerda, o poço BO-23 e a direita, o poço BO-22, ambos conectados a dutos de escoamento.

As análises a seguir empregaram as concentrações de n-parafinas transformadas segundo estatísticas descritas na Tabela 4.6. Na sequência, estas concentrações foram submetidas a uma análise de regressão não-paramétrica local. Para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), em MS2, o *span* utilizado foi $\lambda = 0{,}23$. Os resíduos do modelo foram tratados adequadamente através do modelo Geoestatístico descrito em 2.6.

A Figura 4.2.3 descreve no lado esquerdo, a dispersão entre os valores ajustado pelo modelo de regressão contra os valores observados no primeiro cruzeiro. No lado direito, os valores atípicos. A ocorrência deste padrão esta relacionada com distribuição espacial heterogênea dos dados. O modelo de regressão local diferencia-se pela

capacidade em ajustar flutuações na variável independente dentro dos limites correspondentes as variáveis preditoras. No entanto, as concentrações de n-parafinas observadas no segundo cruzeiro revelaram padrões extremos de variação espacial. Isto é, considerando a amplitude do intervalo, o valor mínimo e o máximo apareceram localizados geograficamente como vizinhos entre outras situações.

Nesta etapa da análise foram mapeados, identificados e suavizados, dentro do possível, valores atípicos espaciais *(outliers)*. A análise da Figura 4.2.3, revela um padrão não aleatório nos resíduos. Valores superiores a média das concentrações, registraram resíduos maiores quando comparados com resíduos associados a valores menores que a média observada. Foram testadas inúmeras combinações de valores para os parâmetros nesta etapa da análise. Entre os resultados obtidos, este foi o mais adequado quando considerado o erro padrão residual do modelo conjuntamente com o número de parâmetros estimados para o polinômio e a abordagem dada para esta mesma variável nos outros cruzeiros.

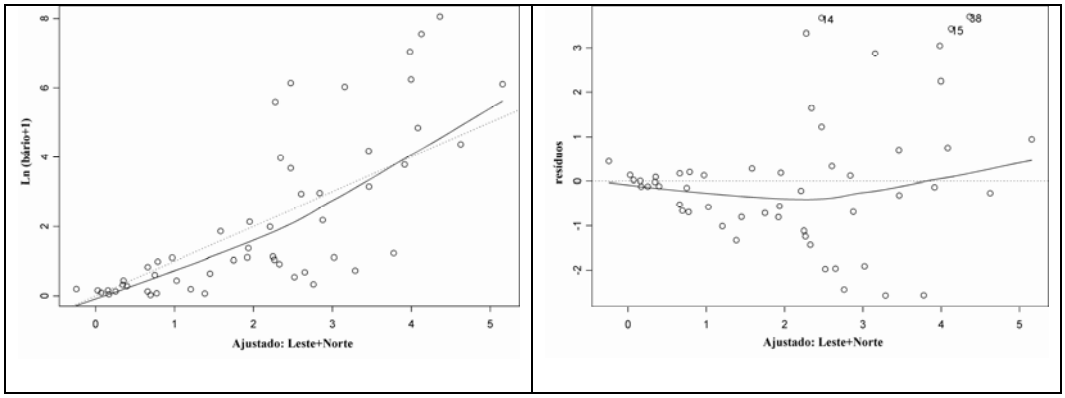


Figura 4.2.3 - Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 com os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em relação à variável n-parafinas no MS2.

A Figura 4.2.4 descreve a superfície gerada pelos valores ajustados no modelo conjuntamente com a intensidade das concentrações observadas no segundo cruzeiro. A análise visual revela fortes evidências de heterogeneidade espacial em MS2 para este importante traçador do fluido de perfuração base aquosa (WBF) e não-aquosa (NAF).

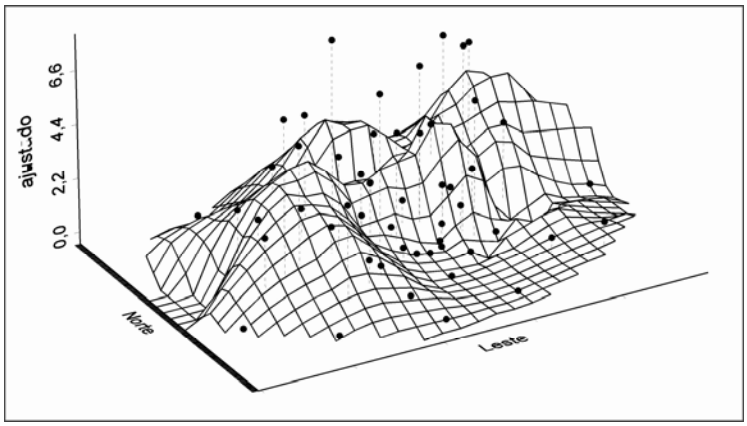


Figura 4.2.4. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador n-parafinas. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

A Figura 4.2.5 descreve a dispersão dos resíduos em função do vetor de coordenadas geográficas. Neste caso, o plano estimado pelo modelo de regressão linear múltipla não apresenta inclinação, confirmando a ausência de tendência nos resíduos.

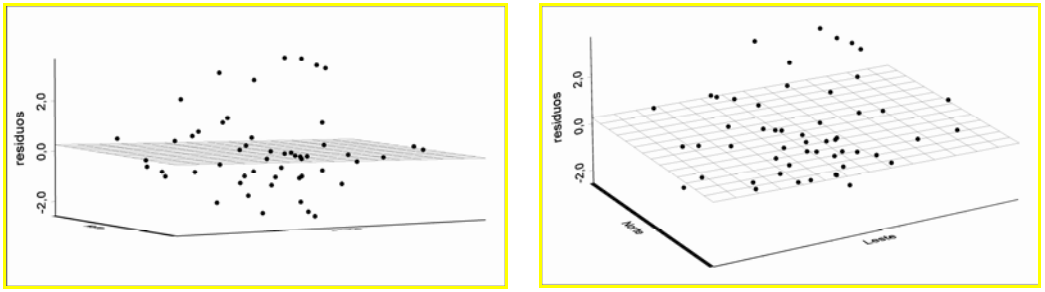


Figura 4.2.5 – Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas (Leste e Norte).

A Figura 4.2.6 descreve a distribuição espacial das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no MS2, discretizada em intervalos. Elas foram divididas em quatro intervalos (concentrações em ppm): o primeiro de -4,6 a 0,4; segundo de 0,4 a 1,1; terceiro de 1,2 a 2,5 e finalmente, o intervalo contendo concentrações entre 2,5 e 5,3. Valores negativos como descritos no primeiro intervalo encontram-se localizados nas regiões extremas da superfície mostrada na Figuras 4.2.6. Estes locais não fazem parte da região de interesse do estudo *A*.

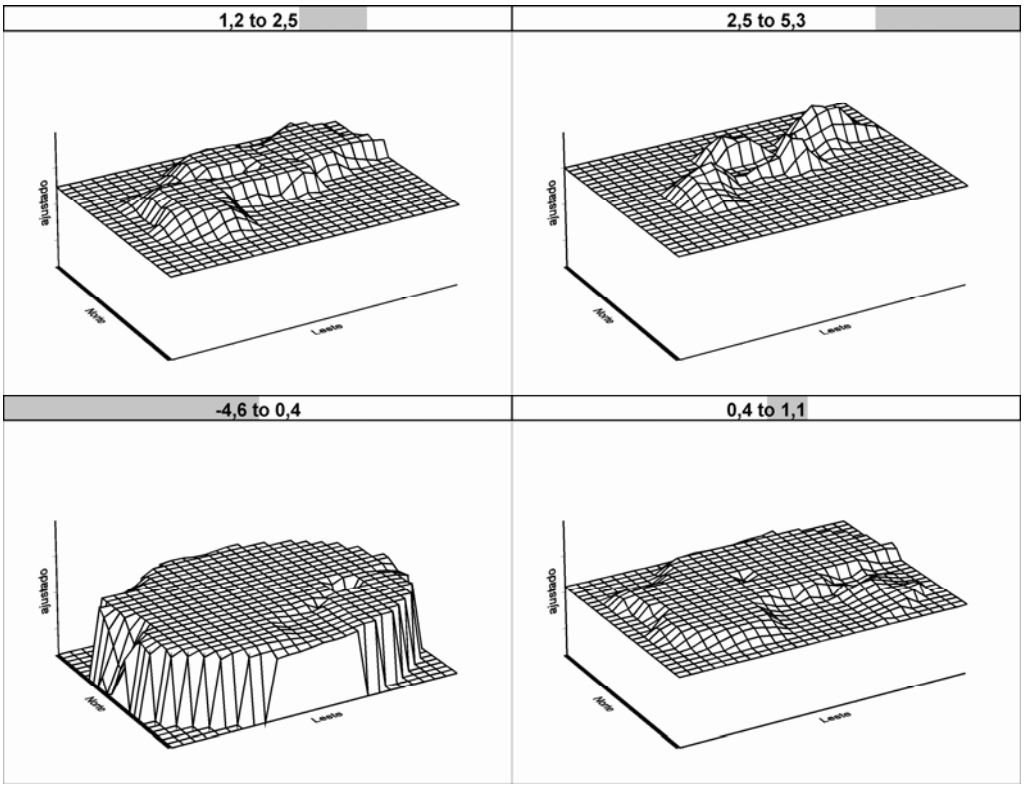


Figura 4.2.6 - Gráfico descritivo com a distribuição espacial dos intervalos das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local.

Na Figura 4.2.7 são descritas a evolução da cadeia e a densidade a posteriori para o parâmetro ϕ. As séries para os demais parâmetros foram igualmente consideradas adequadas para a composição da amostra a posteriori. O intervalo com 95% de credibilidade a posteriori evidenciou efeito significativo do parâmetro ϕ, confirmando desta forma, a necessidade da aplicação do modelo geoestatísticos para estimar a componente estocástica da superfície. O parâmetro ϕ descrito em (2.12) revela a dimensão da estrutura de correlação espacial existente na Região *A* como função da distância entre os vetores de coordenadas.

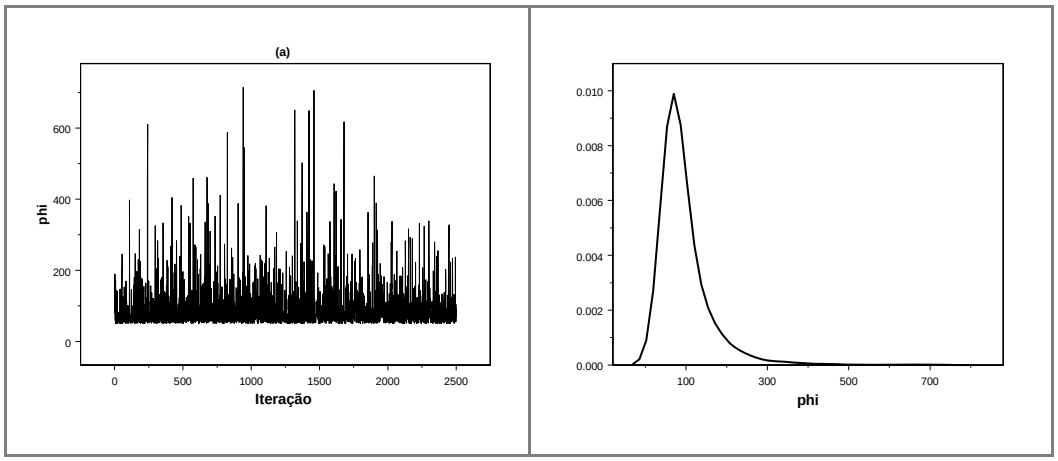
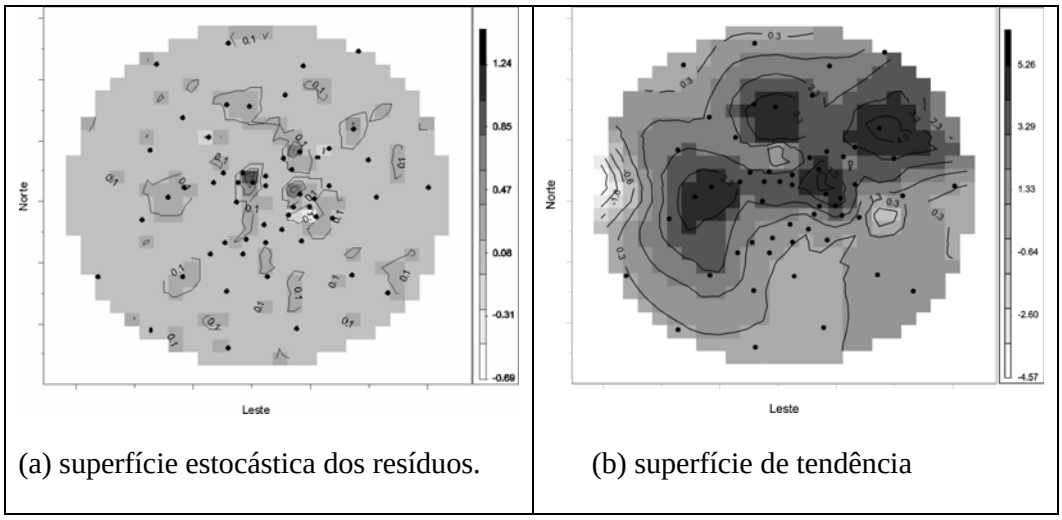


Figura 4.2.7 - Descrição da evolução da cadeia e densidade correspondente ao parâmetro ϕ.

A componente de variação espacial não estocástica, conhecida e isolada pelo modelo de regressão local (Figura 4.2.8(b)) foi adicionada à superfície estocástica predita pelo modelo geoestatístico (Figura 4.2.8(a)).



(a) superfície estocástica dos resíduos. (b) superfície de tendência

Figura 4.2.8. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS2.

De forma análoga ao MS1, os resultados descritos na Figura 4.2.8(a) foram obtidos pelo método de predição multivariado, que considera o erro conjunto de predição para as médias da resposta de interesse $\mu(w)$ em todas as localidades da região de estudo *A*. O resultado da adição das superfícies descritas na Figura 4.2.8 produziu a superfície descrita na Figura 4.2.9 que descreve a média a posteriori para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), que representa o valor esperado $\mu(w)$ centrado no *pixel*. O limite inferior de cada localização geográfica predita foi comparado com o limite superior da distribuição de probabilidade posteriori do MS1.

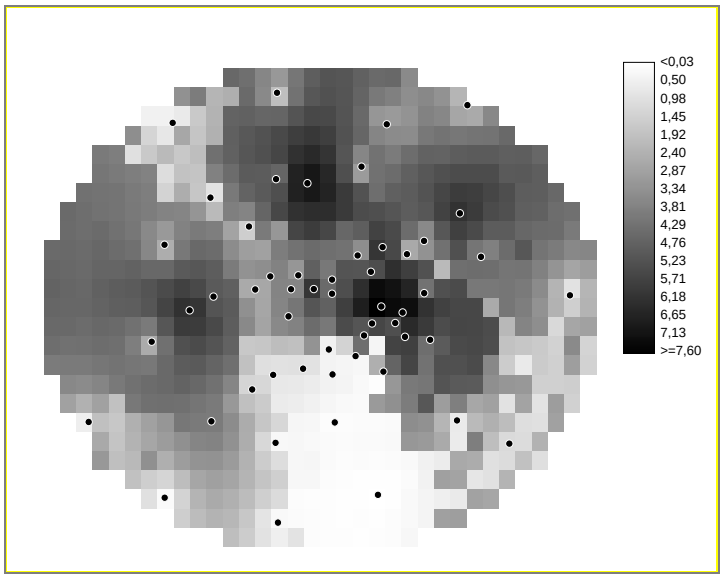


Figura 4.2.9. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no MS2.

Supondo independência entre o MS1 e o MS2, tomou-se o limite superior da distribuição de probabilidade a posteriori para cada pixel predito no MS1 e comparou-se com o limite inferior da distribuição a posteriori do processo estocástico em MS2. O procedimento de comparações múltiplas de médias, pixel a pixel, leva à delimitação da região estatisticamente alterada no parâmetro químico n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) definido como indicadores do uso do fluido de perfuração base não-aquosa (NAF).

A Figura 4.2.10 descreve a mudança nas concentrações de n-parafinas após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23, agora classificada em dois grupos distintos: o primeiro grupo, representado pela cor branca, indica os locais onde as concentrações de n-parafinas foram estatisticamente iguais em ambos os cruzeiros, MS1 e MS2. Este resultado permite afirmar, com 95% de credibilidade, que na região representada pela cor branca, as concentrações não se alteraram significativamente após a perfuração dos poços BO-22 e BO-23. O segundo grupo, representado pela cor cinza,

identifica os locais onde as concentrações de n-parafinas foram significativamente diferentes após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23 (MS2).

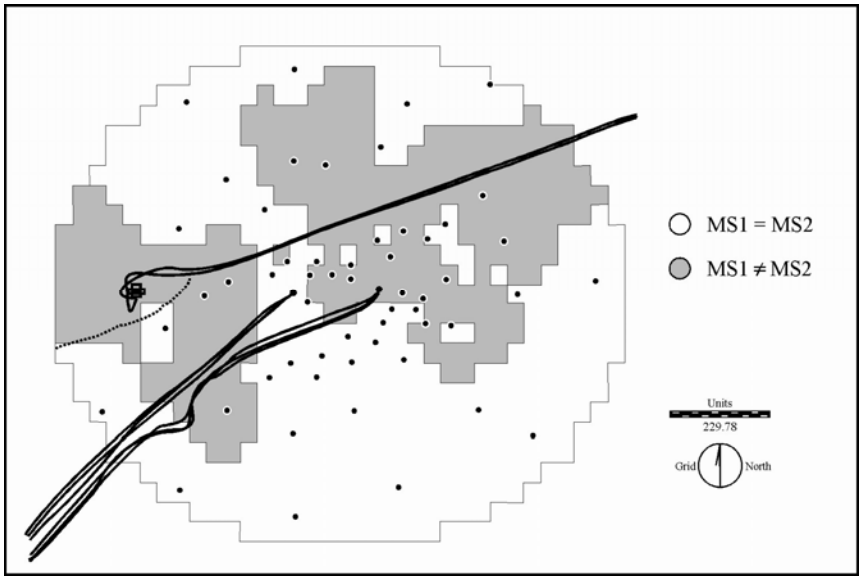


Figura 4.2.10. Região alterada (cor cinza) pela variável n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período compreendido entre o primeiro e o Segundo cruzeiro (MS1 e MS2).

4.2.2 - Bário (Ba; ppm)

A Tabela 4.7, registra as estatísticas descritivas da variável bário medidas no segundo cruzeiro MS2, A menor concentração observada foi 135,00 ppm e a maior 12.759,00 ppm. O traçador bário também apresentou acréscimo na concentração quando comparado com o valor máximo do primeiro cruzeiro (MS1) onde foi observado 3.540,00 ppm.

Tabela 4.7. Estatísticas descritivas da variável bário, observada no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm.

Estatísticas Descritivas	bário – ppm
Mínimo	135,00
Média	2.294,39
Mediana	960,60
Máximo	12.759,00
Variância	7.589.810,80
Desvio Padrão	2.754,96

A Figura 4.2.11 descreve as intensidades das concentrações de bário observadas no MS2. As maiores concentrações localizaram-se no entorno dos poços BO-22 e BO-23. As estações de referência mantiveram-se dentro do esperado para uma região que não recebeu, a priori, deposição significativa de material descartado pela plataforma de perfuração.

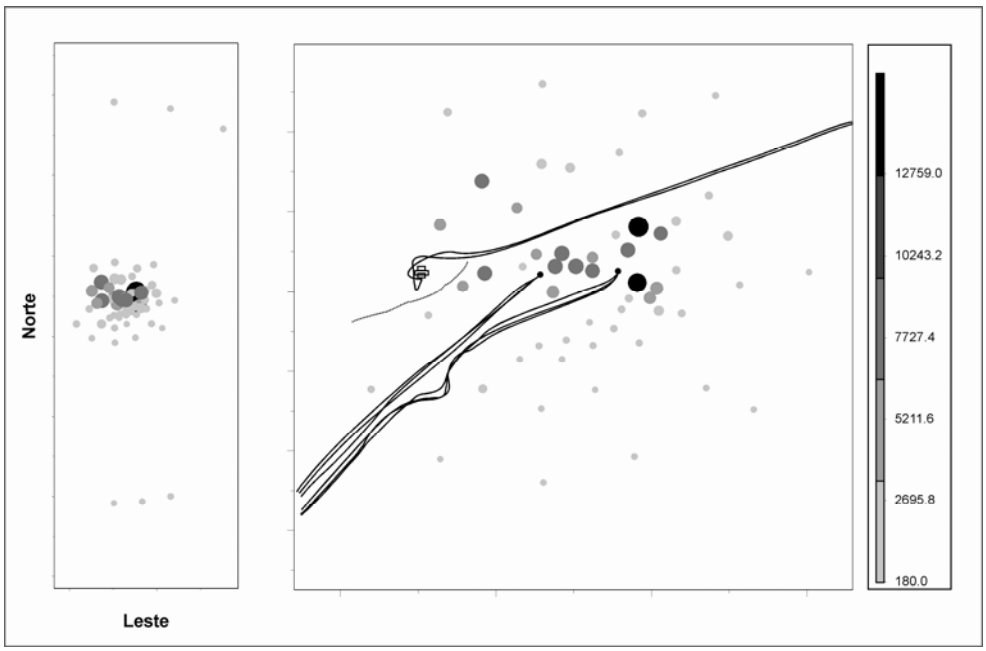


Figura 4.2.11. Concentrações de bário observadas no MS2 com a localização geográfica da “árvore-de-natal” e dutos instalados antes da atividade monitorada (Norte) e os poços BO-22 e BO-23, com dutos na direção Sudoeste, instalados após a perfuração dos poços.

A seguir, na Tabela 4.8, estão registradas as estatísticas descritivas da variável bário, transformada na forma $y = \ln(x+1)$.

Tabela 4.8. Estatísticas descritivas das concentrações de bário observadas no segundo cruzeiro (MS2). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

Estatísticas Descritivas	**LN (bário+1) – ppm**
Mínimo	5,20
Média	6,26
Mediana	7,01
Máximo	9,45
Desvio Padrão	1,15

Todas as análises subseqüentes utilizaram as concentrações transformadas segundo estatísticas descritas na Tabela 4.8. Na sequência, as concentrações de bário no segundo cruzeiro MS2 foram submetidas a uma análise de regressão não-paramétrica local. Para as concentrações de bário em MS2, o *span* utilizado foi $\lambda = 0{,}21$. Os resíduos do modelo foram tratados adequadamente através do modelo Geoestatístico descrito em 2.6.

A Figura 4.2.12 descreve a dispersão entre os valores ajustado pelo modelo de regressão local e os valores observados no primeiro cruzeiro

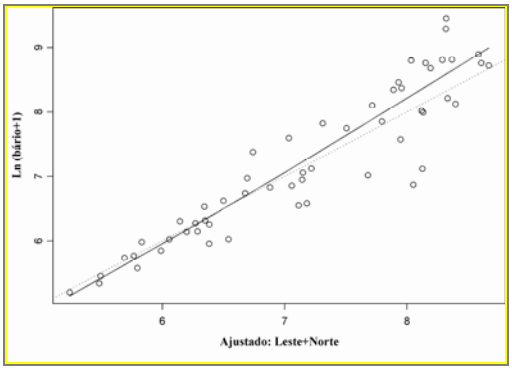


Figura 4.2.12. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações de bário +1 e os valores ajustados pelo modelo de regressão local, no MS2.

A Figura 4.2.12 descreve a superfície gerada pelos valores ajustados no modelo conjuntamente com a intensidade das concentrações observadas no segundo cruzeiro. A análise visual revela fortes evidências de heterogeneidade espacial em MS2 para este importante traçador do fluido de perfuração base aquosa (WBF) e não-aquosa (NAF).

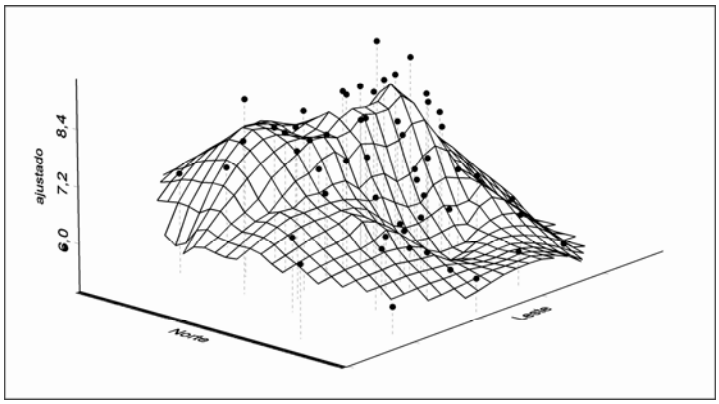


Figura 4.2.12. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador bário. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

A Figura 4.2.13 descreve a dispersão dos resíduos em função do vetor de coordenadas geográficas. Não foi constatada tendência linear significativa nos resíduos (*p=0,9270)*.

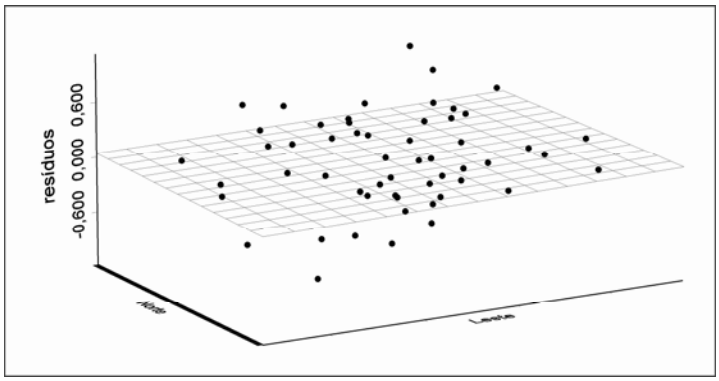


Figura 4.2.13. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetores de coordenadas (Leste e Norte).

A Figura 4.2.14 descreve, em intervalos de concentrações, a distribuição espacial do bário no segundo cruzeiro. Elas estão divididas em quatro intervalos (concentrações em ppm): o primeiro variando de 5,2 a 6,3; segundo de 6,3 a 7,1; terceiro de 7,1 a 8,1 e finalmente, o intervalo contendo concentrações entre 8,1 a 8,7.

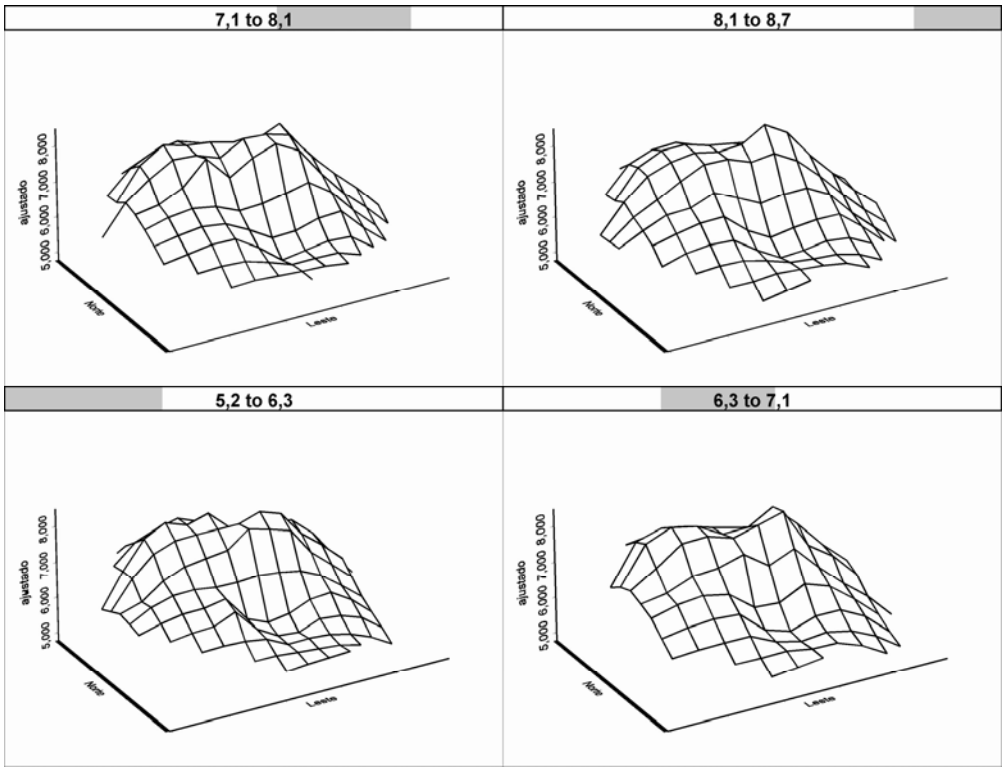


Figura 4.2.14. Gráfico descritivo da superfície ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local. As concentrações de bário foram discretizadas em quatro intervalos.

Na Figura 4.2.15 são descritas a evolução da cadeia e a densidade a posteriori para o parâmetro ϕ. As séries para os demais parâmetros foram consideradas adequadas para a composição da amostra a posteriori. O intervalo com 95% de credibilidade a posteriori, evidenciou efeito significativo do parâmetro ϕ.

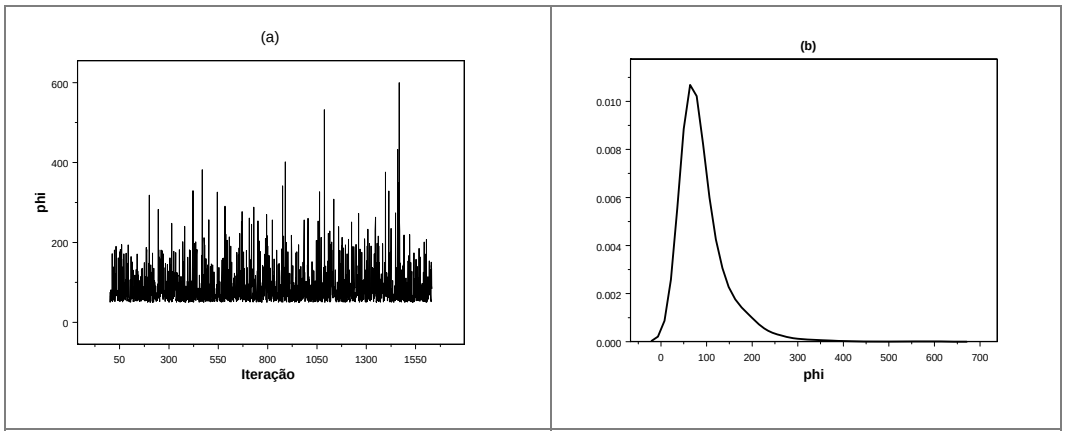
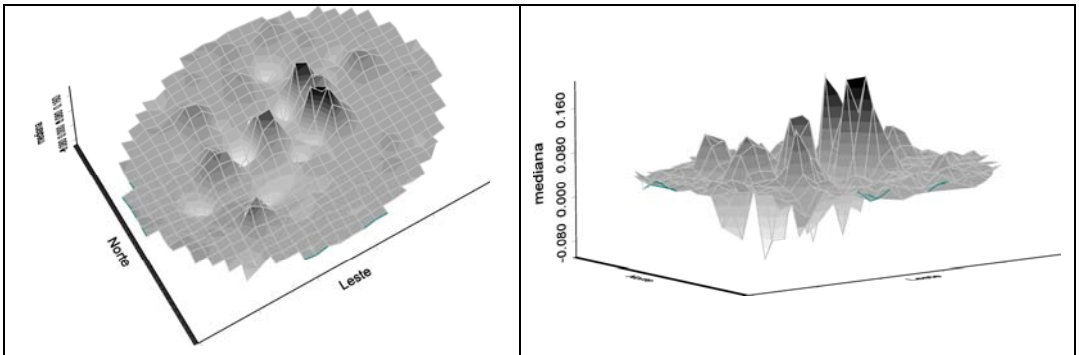


Figura 4.2.15. Descrição da evolução da cadeia e densidade correspondente ao parâmetro ϕ.

A Figura 4.2.16 descreve a superfície estocástica para os resíduos do modelo de regressão local sendo visualizada em um gráfico tri-dimensional (3D). Em (a) a superfície visualizada em sua porção superior e em (b) a flutuação em torno da média global, ressaltando os padrões espaciais da superfície, positivos e negativos. A superfície estocástica será adicionada a superfície de tendência (determinística) para produzir a distribuição espacial do logaritmo das concentrações de bário em MS2.

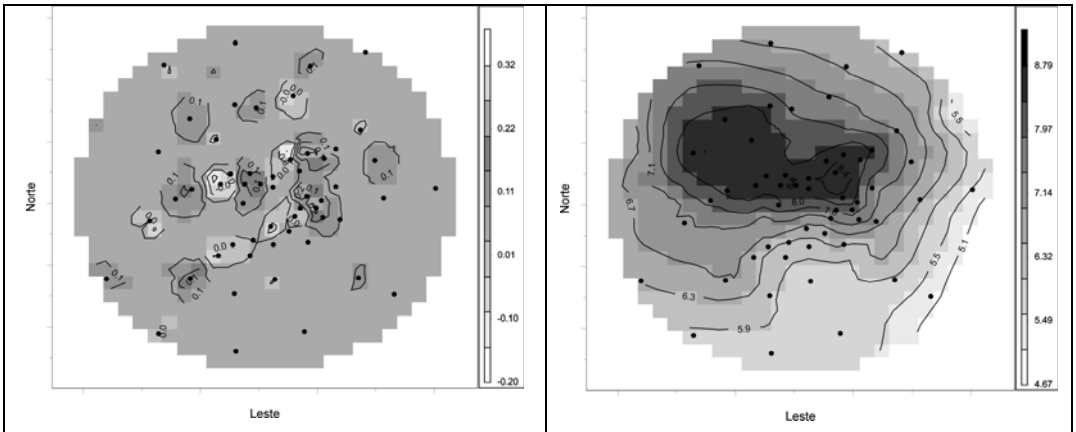


(a) superfície estocástica do modelo 3D.

(b) superfície estocástica do modelo 3D

Figura 4.2.16. Distribuição espacial da superfície estocástica dos resíduos do logaritmo das concentrações de bário em MS2, visualizada em 2 ângulos (a) e (b).

Na sequência, a componente de variação espacial não estocástica, conhecida e isolada pelo modelo de regressão local (Figura 4.2.17(b)) foi adicionada à superfície estocástica predita pelo modelo geoestatístico (Figura 4.2.17(a)).



(a) superfície estocástica dos resíduos.

(b) superfície de tendência

Figura 4.2.17. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência do logaritmo das concentrações de bário em MS2.

Os resultados descritos na Figura 4.2.17(a) foram obtidos pelo método multivariado, que considera o erro conjunto de predição para as médias da resposta de interesse $\mu(w)$ em todas as localidades da região de estudo *A*.

A Figura 4.2.18 descreve a média a posteriori para o logaritmo das concentrações de bário, que representa o valor esperado $\mu(w)$ centrado no *pixel* com uma área real de aproximadamente 50×50 m.

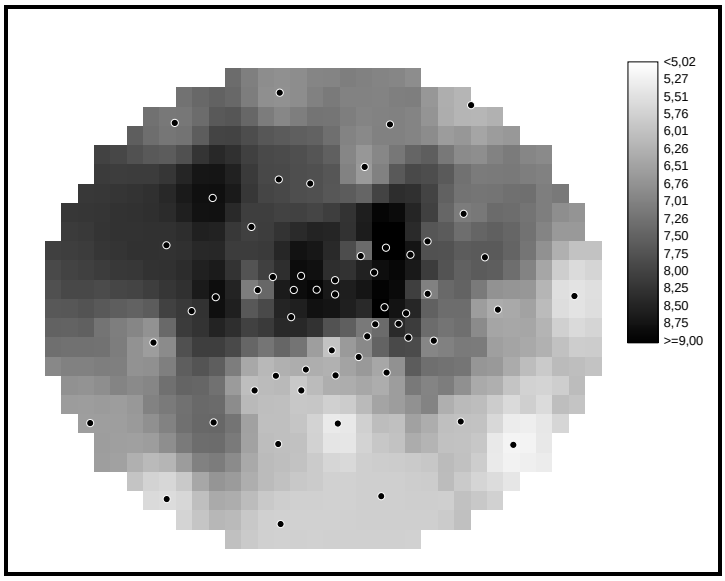


Figura 4.2.18. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações bário em MS2.

O limite inferior do IC95% de cada localização geográfica predita em MS2 foi comparado com o limite superior da distribuição de probabilidade a posteriori em MS1. Este procedimento leva à delimitação da região estatisticamente alterada no parâmetro químico bário, definido previamente como marcador do uso de ambos os fluidos, aquoso (WBF) e não aquoso (NAF).

A Figura 4.2.19 revela a mudança nas concentrações de bário após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23, agora classificada em dois grupos distintos: o primeiro grupo, representado pela cor branca, indica os locais onde as concentrações de bário foram estatisticamente iguais em ambos os cruzeiros, MS1 e MS2. Este resultado permite afirmar, com 95% de credibilidade, que as concentrações existentes na região representada pela cor branca, não se alteraram significativamente após a perfuração dos poços BO-22 e BO-23. O segundo grupo, representado pela cor cinza, identifica os locais onde as concentrações de bário foram significativamente diferentes após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23 (MS2).

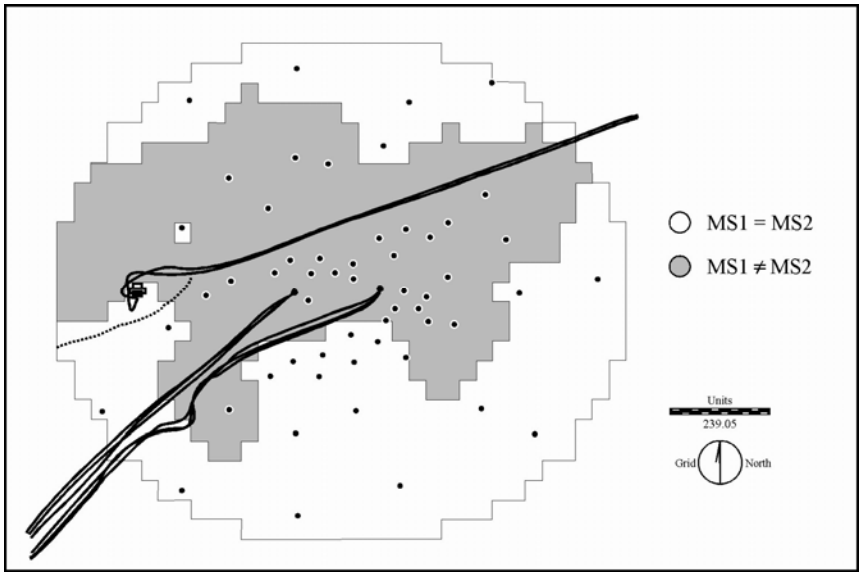


Figura 4.2.19. Região alterada (cor cinza) pelo marcador bário no período compreendido entre o primeiro e o segundo cruzeiro (MS1 e MS2).

4.2.3 Unificação das regiões alteradas em MS1 e MS2.

A Figura 4.2.20 indica as regiões alteradas pelos indicadores da atividade de perfuração, bário e bário com n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), refletindo as fases da perfuração com fluido base água (WBF) e base não-aquosa (NAF), respectivamente. Verifica-se a partir dessa figura, que a dispersão encontrada nas concentrações de n-parafinas acontece na mesma região onde foi observada alteração por bário, porém espacialmente descontínua, revelando comportamentos distintos quanto à dinâmica de deposição do material associado à fase de perfuração com fluido não-aquoso. Além disto, estes resultados evidenciam que a deposição de cascalho da atividade de perfuração não está necessariamente relacionada com a distância dos poços, como se acreditava que ocorreria inicialmente.

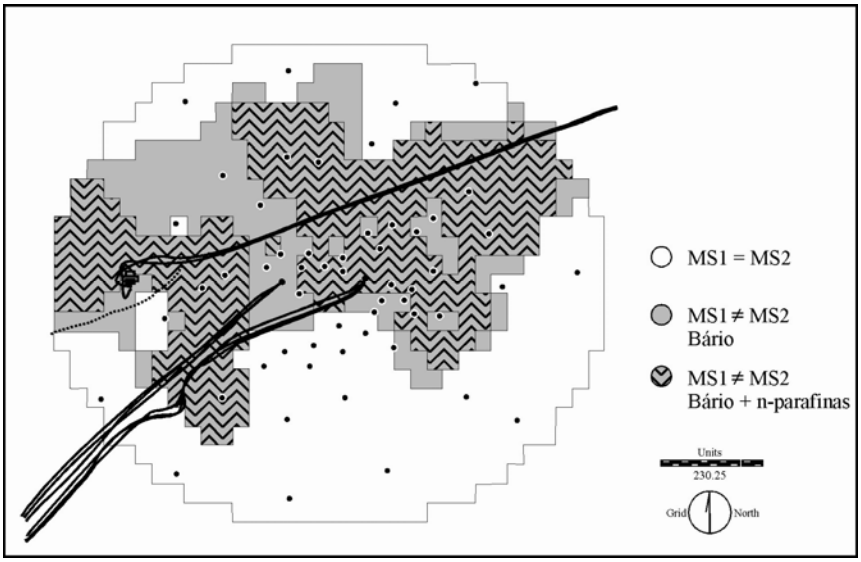


Figura 4.2.20. Regiões alteradas por bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período entre o MS1 e o MS2.

A Figura 4.2.21 descreve as diferentes regiões que definiram os agrupamentos de pontos amostrais relacionados aos dois marcadores dos fluidos de perfuração para o período definido pelo primeiro e segundo cruzeiros (MS1 e MS2).

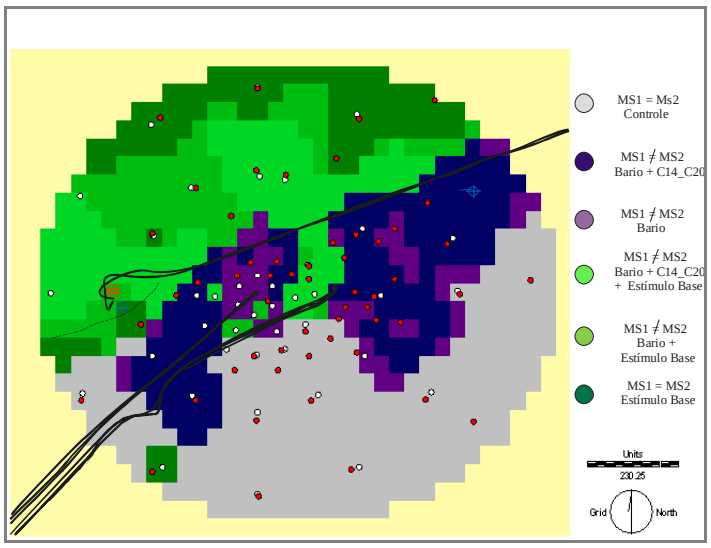
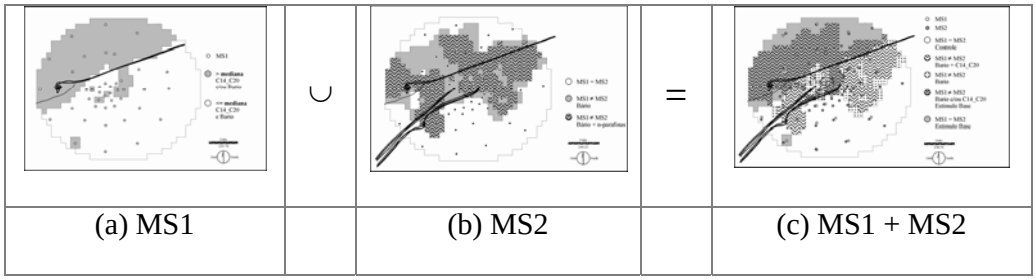


Figura 4.2.21. Regiões alteradas, definidas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23, e regiões com Estímulo de Base.

A estratégia de modelagem desenvolvida controlou as componentes de variações temporais e espaciais, ambos decompostos em causas naturais e/ou causas antrópicas (Figura 4.2.22).

O resultado destacou seis grupos distintos no período compreendido entre o MS1 e o MS2. No entanto, o problema do agrupamento com base nas regiões mostradas na Figura 4.2.21 decorre do reduzido número de estações amostrais alocadas dentro de cada grupo, inviabilizando qualquer procedimento de análise futura que contemple os três cruzeiros simultaneamente. Por essa razão, optou-se pela unificação de duas áreas. Elas têm como característica comum, o fato de estarem ambas na região com registros de atividades pretéritas no MS1, e terem recebido estímulo suplementar de bário e/ou bário + n-parafinas decorrentes da atividade da perfuração dos poços BO-22 e BO-23, objetos do presente estudo (Figura 4.2.22(c) e Figura 4.2.23).



(a) MS1 | (b) MS2 | (c) MS1 + MS2

Figura 4.2.22. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23 e regiões com Estímulo de Base com redução de três para dois grupos.

O grupo resultante da unificação, representado na Figura 4.2.23, ficou definido com sendo o local onde foi encontrado registro de atividades pretéritas no MS1, e que registrou o aporte de bário ou o aporte simultâneo de bário e/ou bário + n-parafinas, evidenciados no MS2. Esta região representada na Figura 4.2.22 foi utilizada para

controlar o componente de variação associado à presença de estímulo decorrente da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23 em uma região que já apresentava indícios significativos do uso de fluido de perfuração em atividades pretéritas.

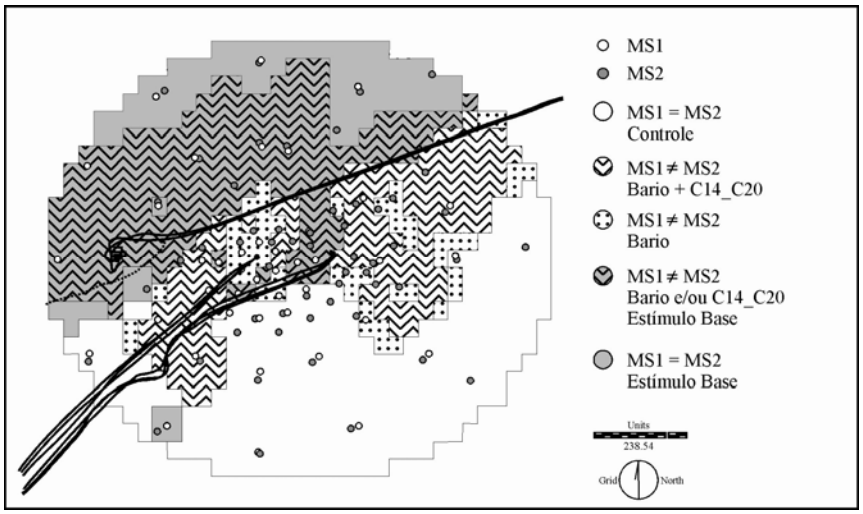


Figura 4.2.23. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23 e regiões com Estímulo de Base com redução de três para dois grupos.

4.3 Análises geoestatísticas dos indicadores das fases de perfuração no MS3.

4.3.1. n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}; ppm)

A Tabela 4.9 registra as estatísticas descritivas das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) medidas nos pontos amostrais realizados no terceiro cruzeiro MS3. O valor mínimo observado em MS3 foi 0,01 ppm e o máximo de 51,74 ppm. O intervalo em MS1 foi [0,02 ; 6,56] e em MS2 [0,03 ; 3146,98]. Enquanto que as concentrações mínimas de n-parafinas apresentaram-se estabilizadas no período compreendido pelos três cruzeiros, as concentrações máximas variaram substancialmente.

Tabela 4.9. Estatísticas descritivas das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm.

Estatísticas Descritivas	**Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20} – ppm**
Mínimo	0,008
Média	2,06
Mediana	0,24
Máximo	51,74
Desvio Padrão	7,17

A distribuição espacial das concentrações observadas para as n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) é mostrada na Figura 4.3.1 (a). Para melhor ilustrar, a maior concentração observadas em MS3 (Tabela 4.9) foi substituídas por 19,21 ppm, valor do ponto que o antecede na escala de intensidade do mesmo parâmetro da malha amostral (Figura 4.3.1 (b)). A Figura 4.3.1 (c) descreve a distribuição da transformação $y = \ln(x+1)$. As maiores concentrações observadas na variável n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}), um ano e sete meses após a perfuração dos poços BO-22 e BO-23, localizaram-se no entorno do poço BO-22.

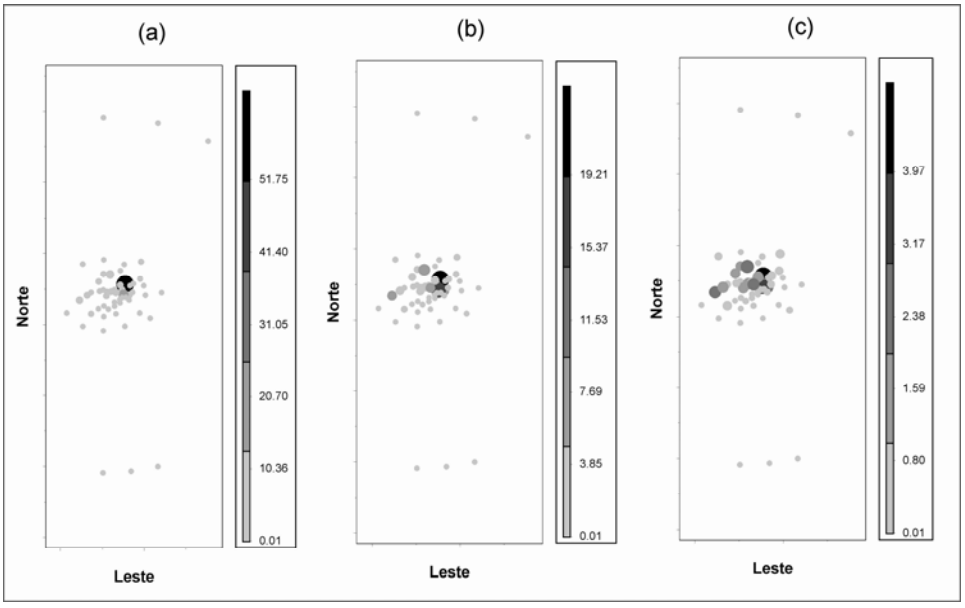


Figura 4.3.1. Concentrações n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS3; variável original (a), suavizada *(trimmed)* (b), e variável transformada (c).

A Figura 4.3.2 descreve as intensidades das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS3 excluindo as regiões de referência. A inspeção visual revela a heterogeneidade espacial presente na região um ano e sete meses após o término das atividades de perfuração. De forma descritiva, constata-se a existência de um padrão decrescente das concentrações de n-parafinas na direção Nordeste - Sudoeste partindo de uma região situada no entorno do poço BO-22, este localizado a Leste do Poço BO-23. O Norte está localizado na parte superior da figura.

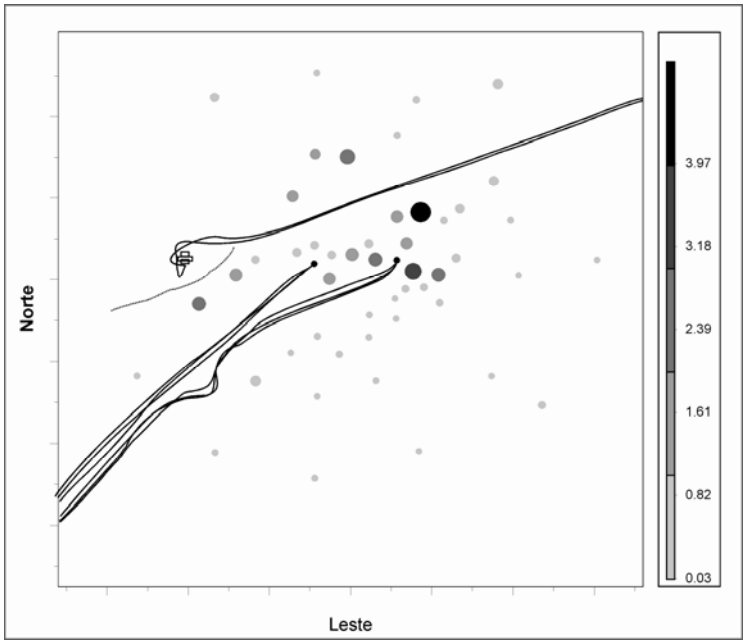


Figura 4.3.2. Concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) observadas no MS3, mostrando a localização geográfica da "árvore-de-natal", dutos instalados antes da atividade monitorada e dutos ligando os poços BO-22 e BO-23.

A Tabela 4.10 registra as estatísticas descritivas para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}); transformação: $y = \ln(x+1)$.

Tabela 4.10. Estatísticas descritivas das concentrações de n-parafinas observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm; transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

Estatísticas Descritivas	**LN (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20} +1) - ppm**
Mínimo	0,008
Média	0,57
Mediana	0,22
Máximo	3,97
Desvio Padrão	0,77

De forma análoga aos procedimentos adotados até o presente momento, os dados foram submetidos ao tratamento estatístico para remover a componente determinística como função do vetor de coordenadas. Para as concentrações n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS3, o *span* utilizado foi $\lambda = 0{,}22$. Os resíduos foram analisados pelo modelo geoestatístico.Todas as análises subseqüentes utilizaram as concentrações transformadas segundo estatísticas descritas na Tabela 4.10. Na sequência, as concentrações de n-parafinas no MS3 foram submetidas a uma análise de regressão não-paramétrica local. A Figura 4.3.3 descreve a dispersão entre os valores ajustado pelo modelo de regressão local e os valores observados no primeiro cruzeiro. Posteriormente, os resíduos do modelo foram tratados adequadamente através de técnicas geoestatísticas, A análise de resíduos descrita na Figura 4.3.3 descreve o ajuste possível. Apesar da presença de valores espacialmente atípicos, dentre inúmeras tentativas de ajuste, este apresentou os melhores resultados conjuntos.. As análises geoestatísticas não foram comprometidas pelo resultado.

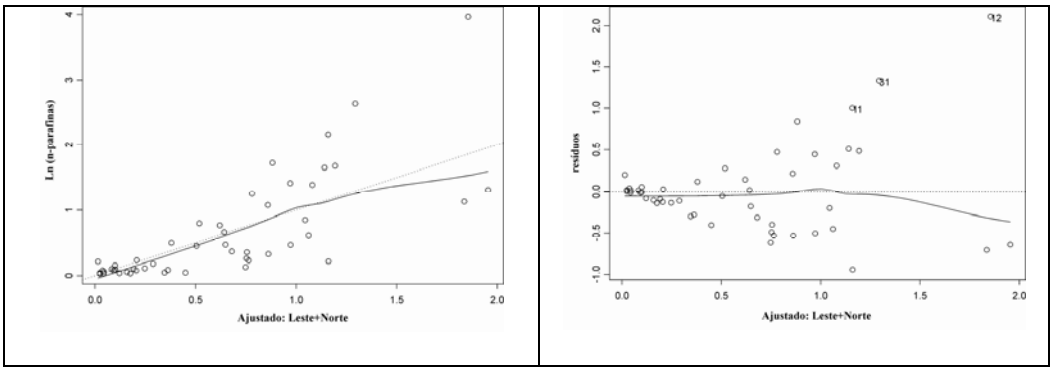


Figura 4.3.3 - Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) e os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em MS3.

A Figura 4.3.4 descreve a superfície gerada pelos valores ajustados no modelo conjuntamente com a intensidade das concentrações observadas no terceiro cruzeiro. A inspeção revela fortes evidências de heterogeneidade espacial em MS3 para este importante traçador do fluido de perfuração base não-aquosa (NAF), embora em concentrações absolutas menores que em MS2. A variação aleatória resultante da relação de causa e efeito estabelecida entre preditores e preditos sempre esteve extremamente influenciada pela estrutura de vizinhança, expressa de forma indireta pelos preditores. De forma análoga aos padrões observados em MS2 os valores, mínimo e máximo apareceram localizados geograficamente como vizinhos. Estes padrões descritos na Figura 4.3.4, localizados no entorno dos poços BO-22 e BO-23, são semelhantes aos verificados no MS2 (Figura 4.2.4), se diferenciado de forma nítida, pela mudança na média temporal. Baseado em uma inspeção visual da Figura 4.3.4, o padrão observado na região Norte em MS2, não se repete em MS3. Era esperado que a hidrodinâmica do fundo oceânico promovesse um espalhamento do material, estabelecendo desta forma, novos padrões um ano e sete meses após o término das atividades de perfuração. Testes posteriores, empregando os resultados geoestatísticos

revelarão as reais diferenças entre MS2 e MS3, considerando para isto, o Intervalo de credibilidade Bayesiano, IC95%. Nesta etapa da análise, foram mapeados, identificados e suavizados valores atípicos espaciais *(outliers)* que posteriormente receberam tratamento para se adequar à análise geoestatística.

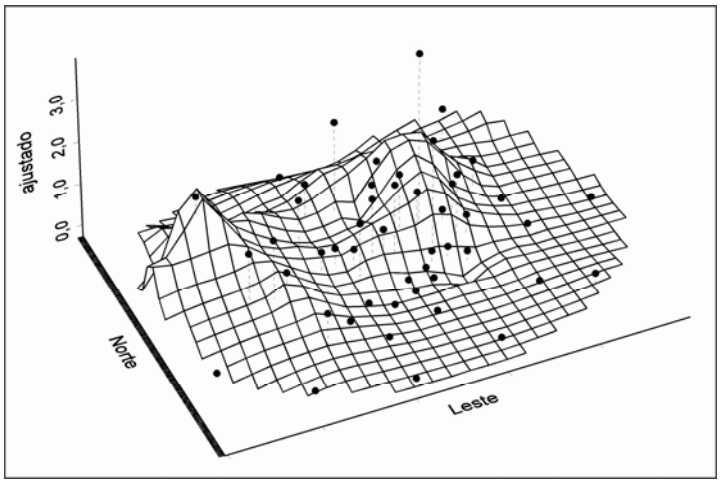


Figura 4.3.4. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão local. Transformação aplicada: $y = \ln(x+1)$.

A Figura 4.3.5 descreve a dispersão dos resíduos em função do vetor de coordenadas geográficas.

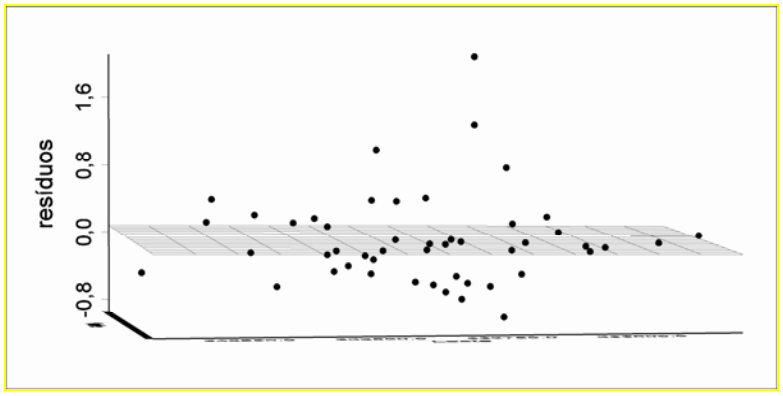


Figura 4.3.5. Regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; Leste e Norte.

A Figura 4.3.6 descreve, em intervalos de concentrações, a distribuição espacial das n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no MS3. Elas estão divididas em quatro intervalos (concentrações em ppm): o primeiro variando de -0,4 a 0,1; segundo de 0,1 a 0,4; terceiro de 0,4 a 0,8 e finalmente, o intervalo contendo concentrações entre 0,8 a 3,8.

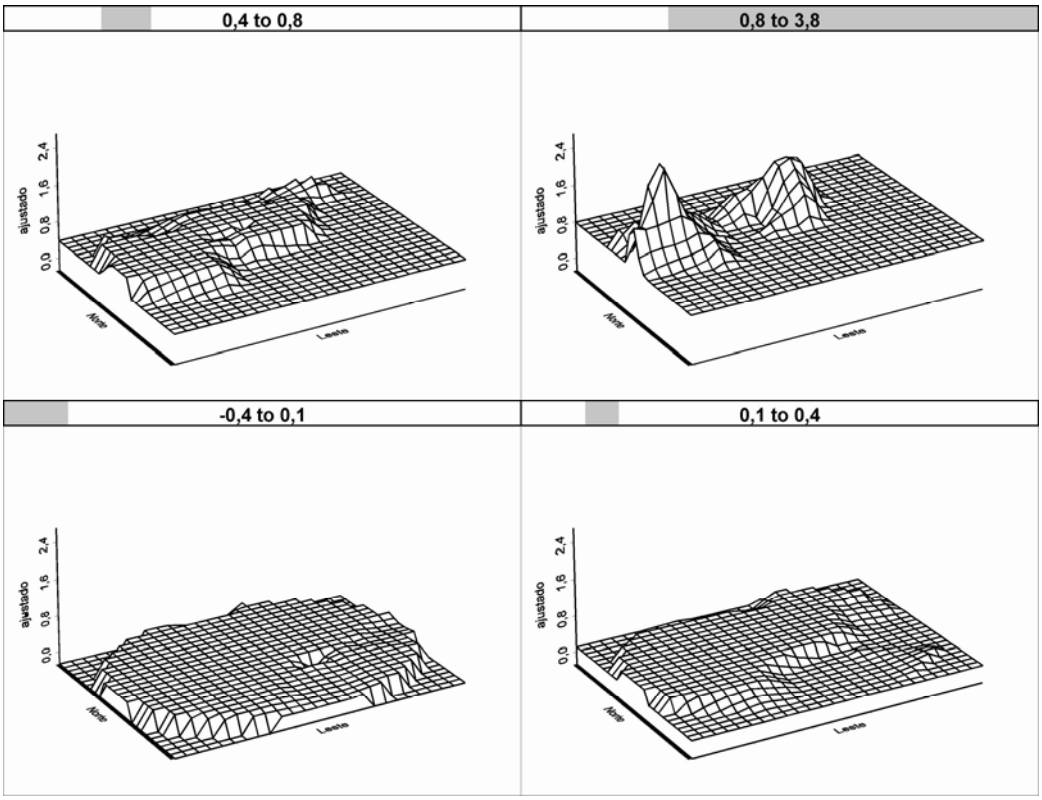


Figura 4.3.6. Gráfico descritivo da superfície ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico local. As concentrações de n-parafinas foram discretizadas em quatro intervalos.

Na Figura 4.3.7 são descritas a evolução da cadeia e a densidade a posteriori para o parâmetro ϕ. As séries para os demais parâmetros foram consideradas adequadas para a composição da amostra a posteriori. O intervalo com 95% de credibilidade a posteriori, evidenciou efeito significativo do parâmetro ϕ.

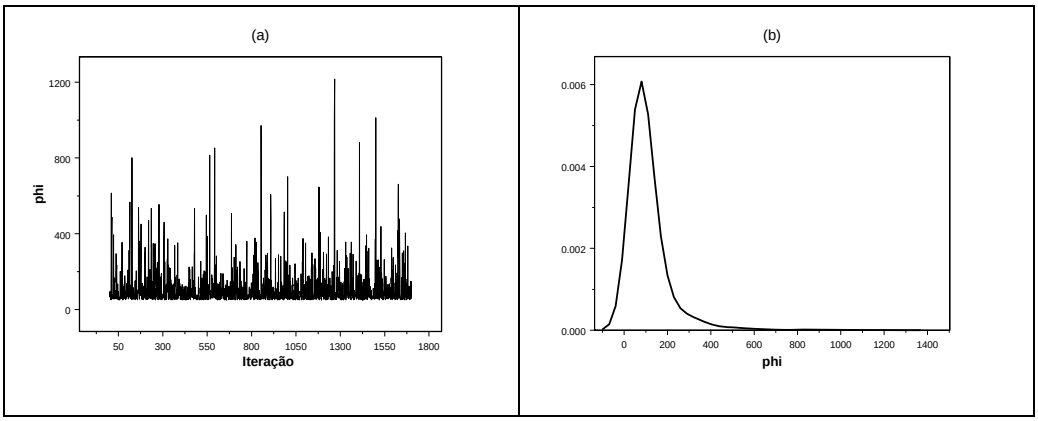


Figura 4.3.7. Descrição das evoluções das cadeias e densidade correspondente aos parâmetros β e ϕ.

A Figura 4.3.8 descreve a superfície estocástica predita a partir dos resíduos obtidos da análise de regressão local. São apresentadas 3 superfícies, acima o limite superior, na posição intermediária a descrição da superfície mediana e abaixo, o limite inferior do intervalo bayesiano com 95% de credibilidade.

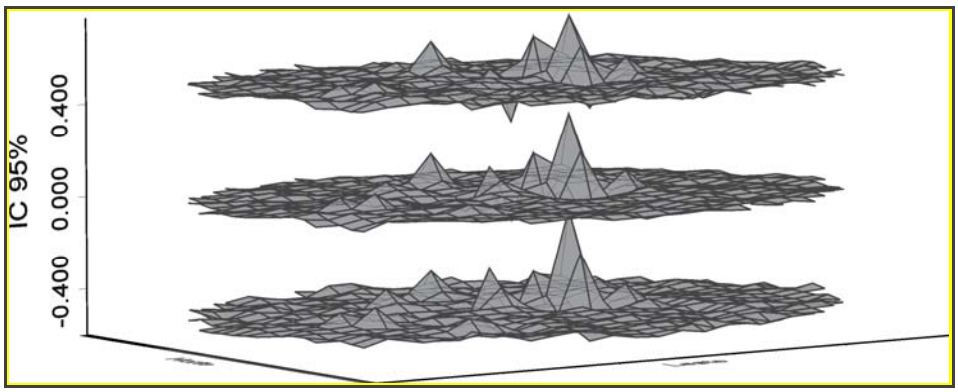


Figura 4.3.8. Distribuição espacial da superfície estocástica, mostrando o Intervalo Bayesiano com 95% de credibilidade para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) em MS3.

A Figura 4.3.9 descreve a média a posteriori para o logaritmo das concentrações de n-parafinas no MS3. O limite inferior do IC95% de cada localização geográfica

predita foi comparado com o limite superior da distribuição de probabilidade a posteriori do MS1.

O resultado permite controlar possíveis componentes de variação, definindo mudanças nas comunidades biológicas. O período entre o MS1 e o MS3 controla alterações decorrentes das atividades pretéritas, alterações decorrentes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23 e alterações provindas de fatores ambientais ou naturais.

O período entre o MS2 e o MS3 controla as mesmas componentes, permitindo avaliar informação sobre respostas biológicas localizadas em uma região que retornou no MS3, aos mesmos níveis de estímulo observados no MS1. O detalhamento da estratégia de análise das respostas biológicas, controlando os componentes de variações com a modelagem BACI, é discutido no Capítulo 6.

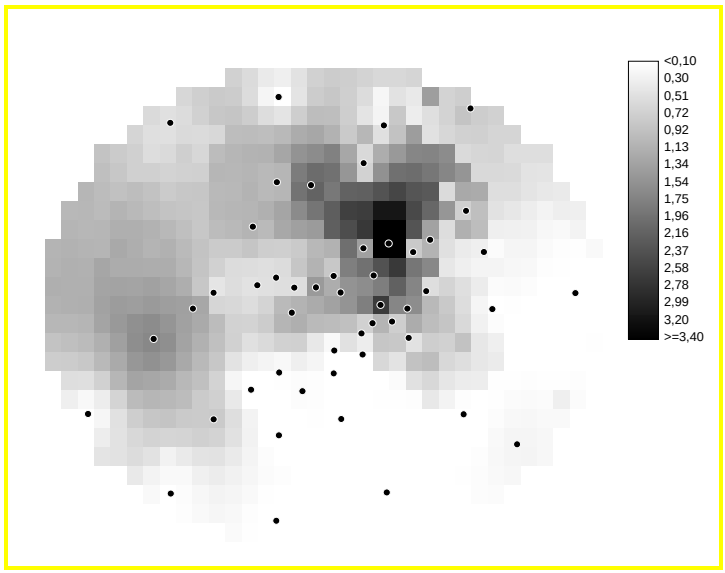


Figura 4.3.9. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) para cada pixel.

A Figura 4.3.10 descreve o resultado da comparação entre concentrações de n-parafinas observadas em dois momentos distintos: o primeiro cruzeiro (MS1) e o

terceiro cruzeiro (MS3). As regiões foram classificadas em dois grupos: o primeiro, identificado pela ausência de preenchimento na Figura 4.3.9, define os locais onde as concentrações de n-parafinas no MS3 não foram significativamente diferentes das concentrações observadas no MS1 (IC95%). O segundo grupo, representado pela região preenchida pela cor cinza, identifica os locais onde as concentrações de n-parafinas foram significativamente maiores no MS3 quando comparadas com as concentrações verificadas antes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23.

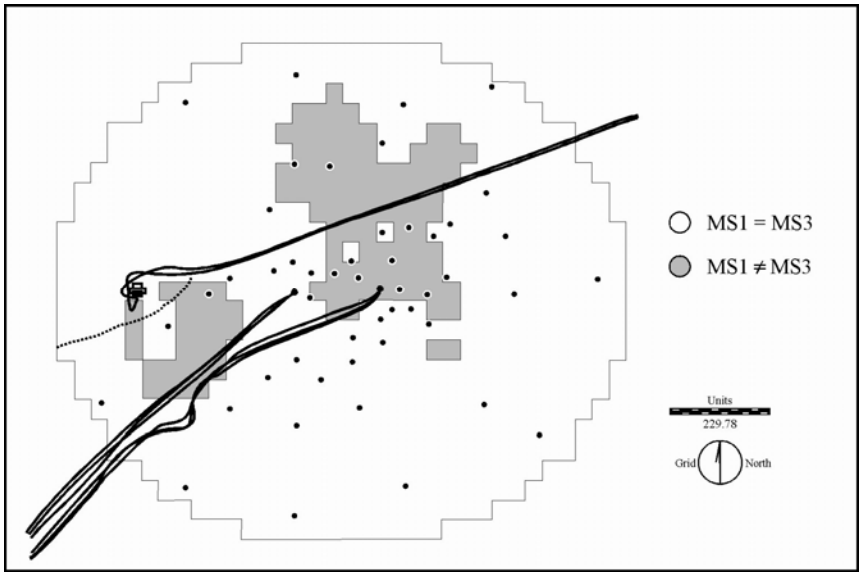


Figura 4.3.10. Região alterada por n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período entre o MS1 e o MS3.

A Figura 4.3.11 descreve como resultado, três regiões que apresentaram comportamentos distintos em relação às concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) quando comparados MS1, MS2 e MS3. Primeiramente, a região que apresentou aumento significativo de n-parafinas no período compreendido entre o MS1 e o MS3 (preenchimento cinza); em seguida, sem preenchimento, é mostrada a região que durante todo o estudo não registrou mudança significativa nas concentrações de n-

parafinas. Finalmente, um terceiro grupo representado pela região hachurada, caracterizado por ter recebido aporte significativo de n-parafinas após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23, tendo retornando no MS3, aos níveis observados em MS1, indicando em termos químicos, uma tendência de retorno aos níveis anteriores à perfuração dos poços.

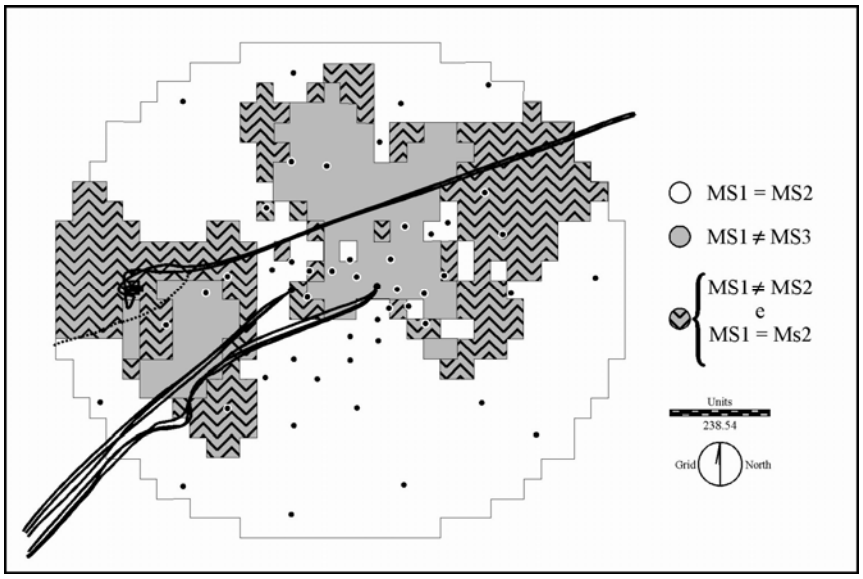


Figura 4.3.11. Região alterada (preenchimento cinza) nas concentrações de n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) no período compreendido entre o MS1 e o MS3, e uma segunda região (hachurada), sinalizando o retorno no MS3 aos níveis observados no MS1.

4.3.2 Bário MS3 (Ba;ppm)

A Tabela 4.11, mostra as estatísticas descritivas das concentrações de bário observadas terceiro cruzeiro (MS3). A menor concentração foi 52,95 ppm e a maior 9.534,00 ppm. A inspeção das estatísticas descritivas indica que as concentrações do traçador bário ainda são maiores quando comparadas com o primeiro cruzeiro (MS1) onde o máximo observado foi 3.540,00 ppm .

Tabela 4.11. Estatísticas descritivas das concentrações de bário observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm.

Estatísticas Descritivas	Bário – ppm
Mínimo	52,95
Média	1.329,31
Mediana	540,74
Máximo	9.534,00
Desvio Padrão	1.740,68

A Figura 4.3.12 descreve as intensidades das concentrações de bário observadas no MS3. As maiores concentrações foram observadas no entorno do poço BO-22, situado na porção leste do centro da malha.

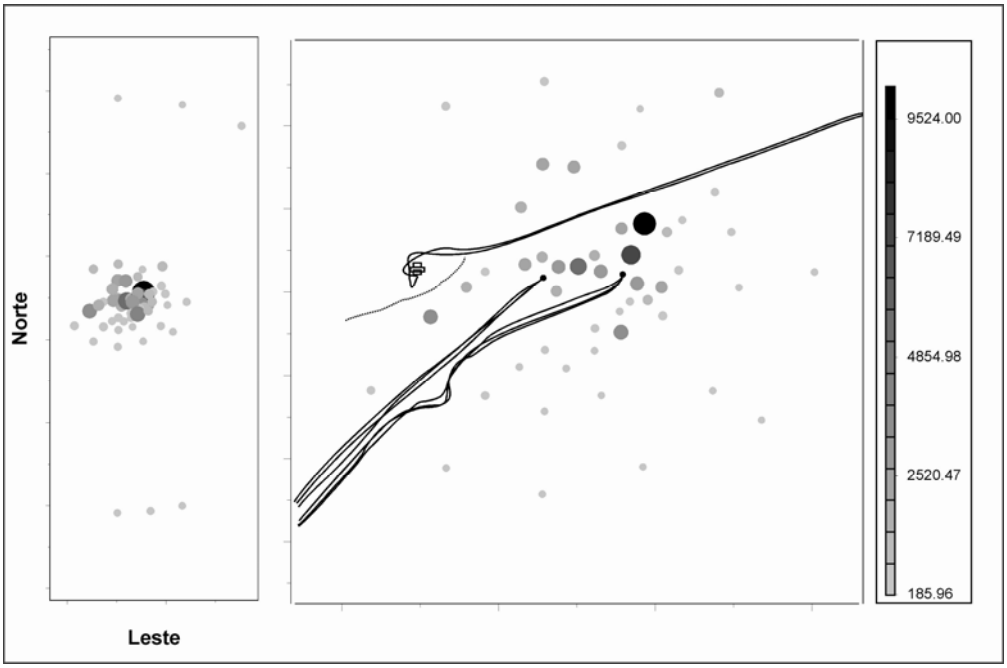


Figura 4.3.12. Concentrações de bário observadas no MS3 com a localização geográfica da “árvore-de-natal” e dutos instalados antes da atividade monitorada (Norte) e os poços BO-22 e BO-23, com dutos na direção Sudoeste, instalados após a perfuração dos poços.

Tabela 4.12. Estatísticas descritivas do logaritmo das concentrações de bário observadas no terceiro cruzeiro (MS3). Valores em ppm do $y = \ln(x+1)$.

Estatísticas Descritivas	LN (bário+1) – ppm
Mínimo	5,23
Média	6,75
Mediana	6,53
Máximo	7,58
Desvio Padrão	1,02

De forma análoga, os dados transformados foram submetidos ao tratamento para remover a tendência e suavizar os valores atípicos (Figura 4.3.13). Para as concentrações de bário em MS3, o *span* utilizado foi $\lambda = 0{,}23$. Os resíduos do modelo foram tratados adequadamente através do modelo Geoestatístico descrito em 2.6.

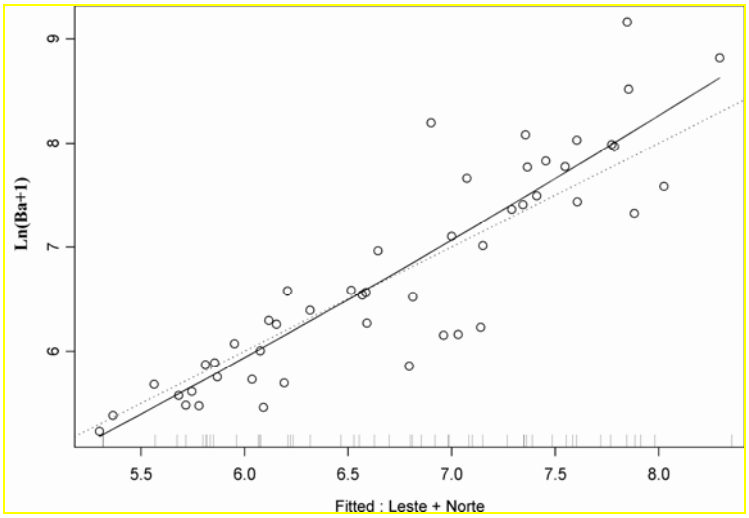


Figura 4.3.13. Gráfico de dispersão entre o Logaritmo das concentrações +1 com os valores ajustados pelo modelo de regressão local, em relação à variável bário no terceiro cruzeiro.

A Figura 4.3.14 descreve a superfície gerada pelos valores ajustados no modelo de regressão local conjuntamente com a intensidade das concentrações observadas no terceiro cruzeiro. As regiões, a oeste bem como no entorno dos poços perfurados

apresentam concentrações de bário maiores, quando comparado com a porção leste da região *A*.

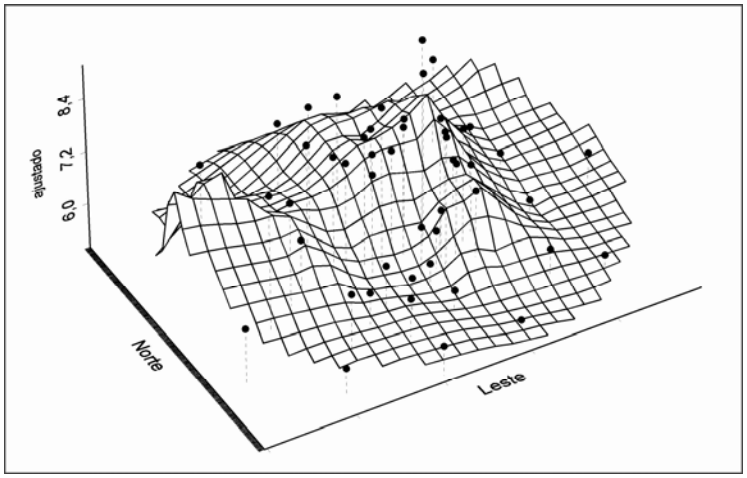


Figura 4.3.14. Gráfico da superfície gerada com os valores ajustados pelo modelo de regressão não-paramétrico, descrevendo conjuntamente as intensidades observadas para o marcador bário no MS3.

A Figura 4.3.15 descreve a dispersão dos resíduos como função do vetor de coordenadas geográficas. O plano estimado pelo modelo de regressão linear múltipla revela uma pequena inclinação, apenas visual, porém não significativa, cujo nível descritivo amostral foi *p=0,7845*. Desta forma, é possível afirmar que a probabilidade de que não exista uma tendência espacial, linear nos resíduos é igual a 0,7845.

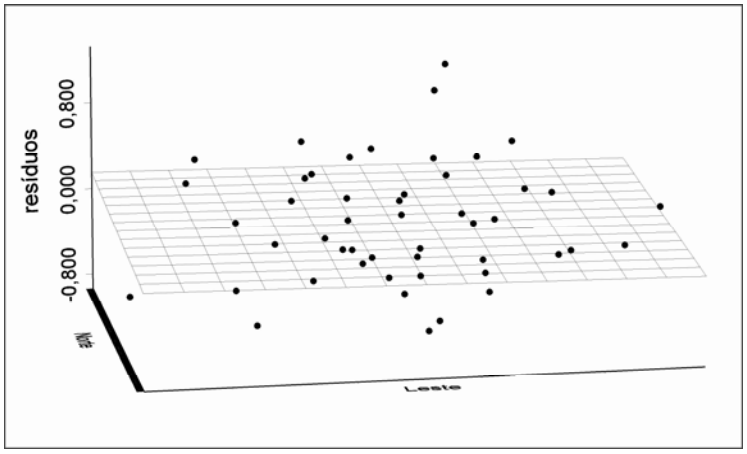


Figura 4.3.15. Gráfico da regressão linear múltipla dos resíduos sobre os preditores; vetor de coordenadas (Leste e Norte).

A Figura 4.3.16 descreve a distribuição espacial do bário no terceiro cruzeiro. As concentrações foram divididas em quatro intervalos (concentrações em ppm): o primeiro variando de 5,0 a 5,8; segundo de 5,8 a 6,4; terceiro de 6,4 a 7,0 e finalmente, o intervalo contendo concentrações entre 7,0 e 9,1. Os valores negativos expressos no primeiro intervalo referem-se às extremidades da superfície que devem ser omitidas na análise visual, pois não fazem parte do *grid* proposto para o estudo. A inspeção visual da Figura 4.3.16 indica que as concentrações contidas nos intervalos entre 6,4 e 9,1 ppm, podem estar diretamente associadas às atividades de perfuração. Estas regiões localizam-se a oeste bem como no entorno dos poços perfurados. As concentrações de bário são visualmente maiores, quando comparado com a porção leste da região *A*. 6,4

Este indício é revelado quando comparadas as informações contidas nas figuras 4.3.16 e 4.3.12 Ressalta-se que ambas são descritivas, tendo sido empregadas como ferramenta de análise exploratória dos dados. As interpolações descritas nas extremidades das superfícies da Figura 4.3.16 (cantos) não devem ser consideradas, pois não fazem parte da região *A*, definida como de interesse.

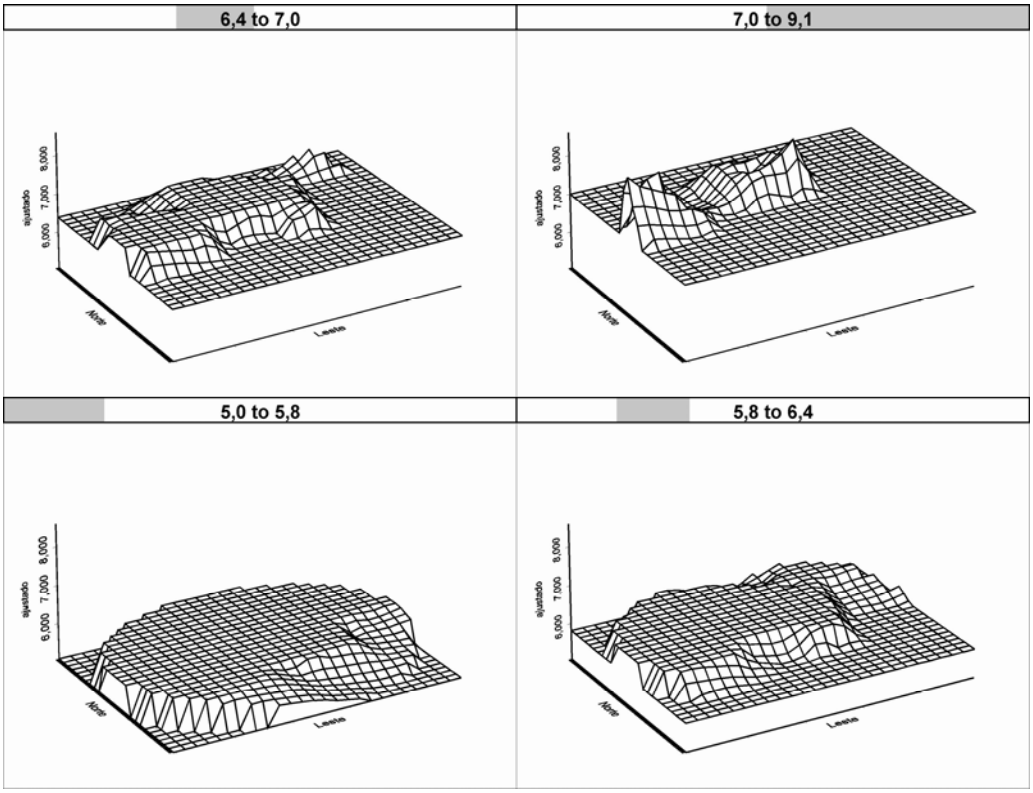


Figura 4.3.16. Gráfico descritivo da superfície ajustada pelo modelo de regressão não-paramétrico Local. As concentrações de bário foram discretizadas em quatro intervalos.

Na Figura 4.3.17 Na Figura 4.2.7 são descritas a evolução da cadeia e a densidade a posteriori para o parâmetro ϕ. As séries para os demais parâmetros foram igualmente consideradas adequadas para a composição da amostra a posteriori. O intervalo com 95% de credibilidade a posteriori evidenciou efeito significativo do parâmetro ϕ, confirmando desta forma, a necessidade da aplicação do modelo geoestatísticos para estimar a componente estocástica da superfície. O parâmetro ϕ descrito em (2.12) revela a dimensão da estrutura de correlação espacial existente na Região *A* como função da distância entre os vetores de coordenadas.

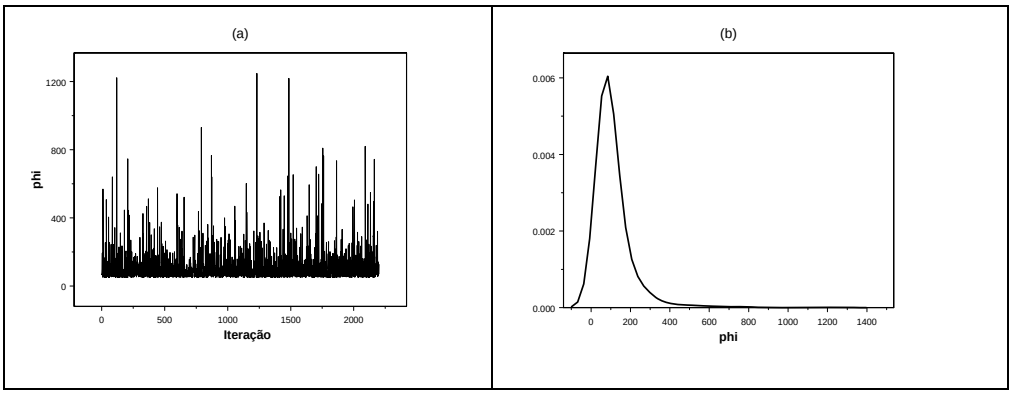
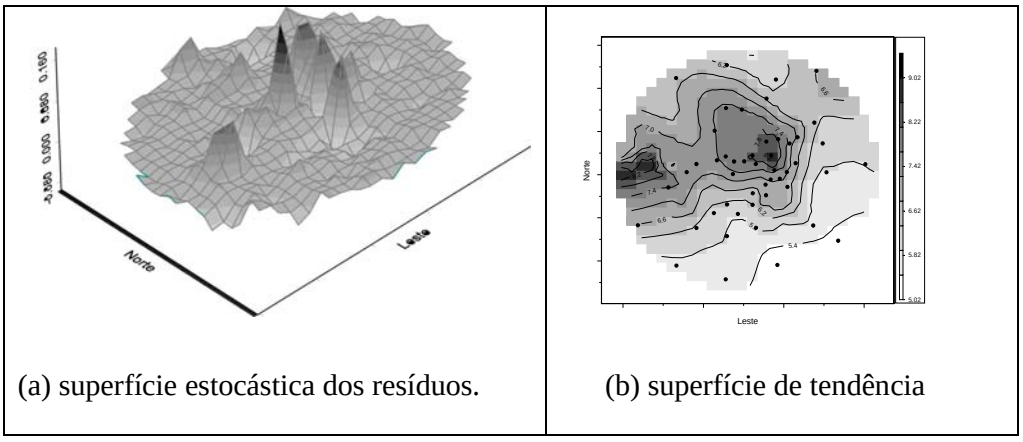


Figura 4.3.17. Descrição da evolução da cadeia e densidade correspondente ao parâmetro ϕ.

A componente de variação espacial não estocástica, conhecida e isolada pelo modelo de regressão local (Figura 4.3.18(b)) foi adicionada à superfície estocástica predita pelo modelo geoestatístico (Figura 4.3.18(a)).



(a) superfície estocástica dos resíduos. (b) superfície de tendência

Figura 4.3.18. Distribuição espacial estocástica dos resíduos do modelo de regressão (a) e em (b), a superfície de tendência para o logaritmo das concentrações de bário em MS3.

A Figura 4.3.19 descreve a média a posteriori para o logaritmo das concentrações de bário no MS3. O limite inferior do IC95% de cada localização geográfica predita foi comparado com o limite superior da distribuição de probabilidade a posteriori do MS1.

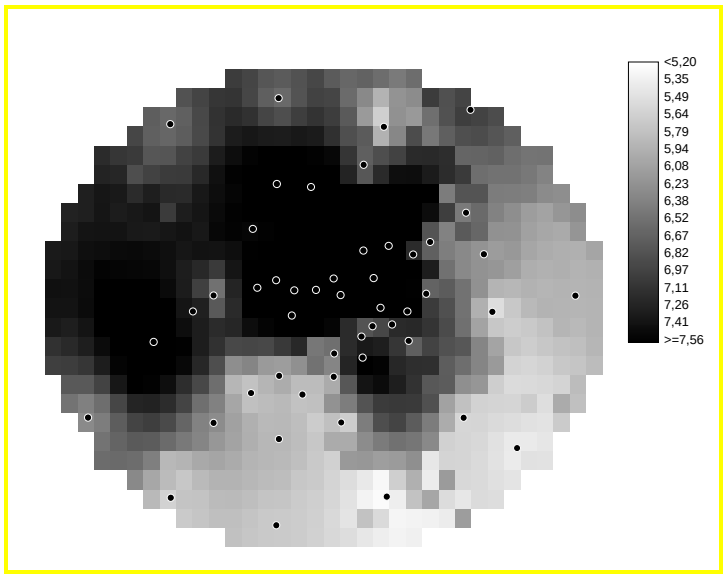


Figura 4.3.19. Distribuição espacial da média a posteriori para o logaritmo das concentrações de bário em ppm.

O procedimento de comparações múltiplas de médias, pixel a pixel, resulta na delimitação da região estatisticamente alterada na variável química Bário.

A Figura 4.3.20 descreve o resultado da alteração por bário observada após 33 meses, período compreendido entre o MS1 e o MS3. As regiões foram classificadas em dois grupos distintos: o primeiro grupo, com ausência de preenchimento, indica os locais onde as concentrações de bário no MS1 não foram significativamente diferentes daquelas das concentrações de bário verificadas no MS3. O segundo grupo, representado pela região com preenchimento na cor cinza, identifica os locais onde as concentrações de bário foram significativamente maiores no período compreendido

entre o MS1 e o MS3. Este resultado permite afirmar, com 95% de credibilidade, que as concentrações de bário mantiveram-se alteradas no MS3, na referida região.

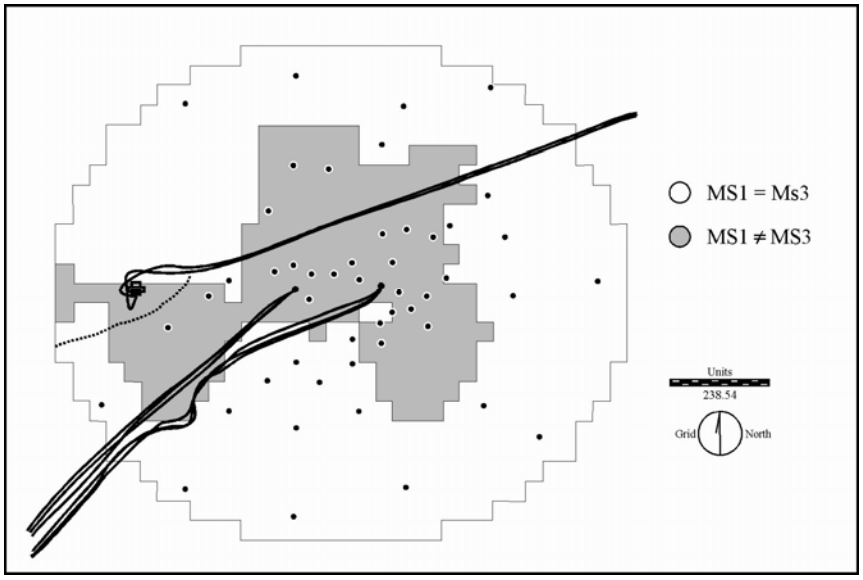


Figura 4.3.20. Região alterada pela variável bário no período entre o MS1 e o MS3 (preenchimento cinza).

A Figura 4.3.21 indica com o preenchimento na cor cinza, a região que registrou aumento significativo de bário no período compreendido entre o MS1 e o MS3; sem preenchimento, a região que durante todo o estudo desenvolvido em águas rasas, não registrou mudança significativa nas concentrações de bário. O terceiro grupo, representado pelo desenho hachurado na Figura 4.3.21, define uma região que após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23, recebeu aporte significativo de bário tendo retornando no MS3 aos níveis observados em MS1. Essa região aponta recuperação da área em relação ao indicador químico do uso de fluido base água (WBF). A recuperação aqui citada refere-se às concentrações do indicador observadas antes das atividades monitoradas pelo Projeto MAPEM.

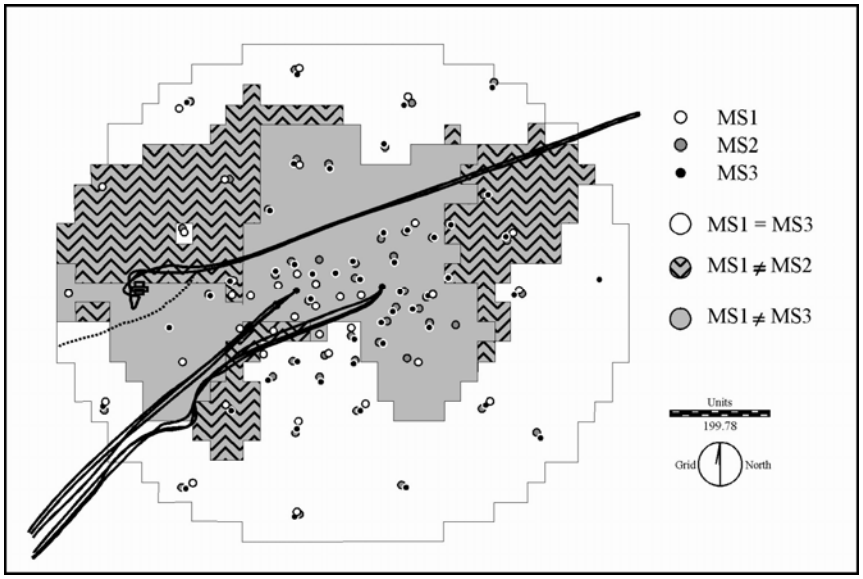


Figura 4.3.21. Região alterada (preenchimento cinza) nas concentrações do bário no período entre o MS1 e o MS3, e região (preenchimento hachurado) com retorno, no MS3, aos níveis observados no MS1.

A Figura 4.3.22 mostra a comparação entre o MS2 e o MS3. O preenchimento cinza delimita a região que preservou o aumento significativo de bário no período compreendido entre o MS2 e o MS3. Verifica-se que a diferença entre as figuras 4.3.21 e 4.3.22 localiza-se particularmente a Nordeste da malha amostral, com destaque para a estação número 72, cujos valores de bário preditos no MS1 não diferiram estatisticamente dos valores de bário no MS2. No entanto, os valores de bário no MS3 foram significativamente superiores aos valores observados no MS2.

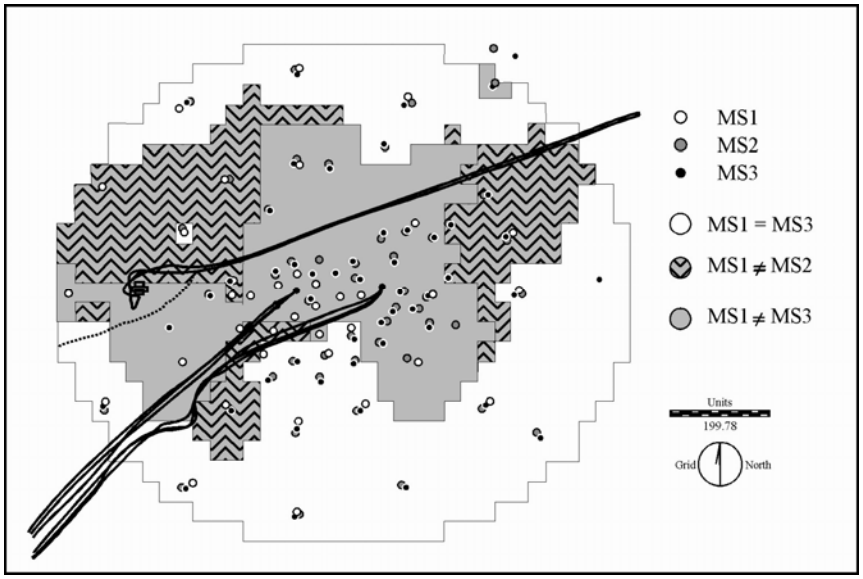


Figura 4.3.22. Região alterada (preenchimento cinza) nas concentrações do bário no período entre o MS2 e o MS3, destacando, a Nordeste, o aumento significativo do bário no MS2, em relação ao MS3.

Finalmente, a Figura 4.3.23 indica as diferentes regiões que definem os grupos de estações amostrais no MS3, classificados conforme o padrão temporal (MS1, MS2 e MS3) dos marcadores para os fluidos base água (WBF) e base não-aquosa (NAF).

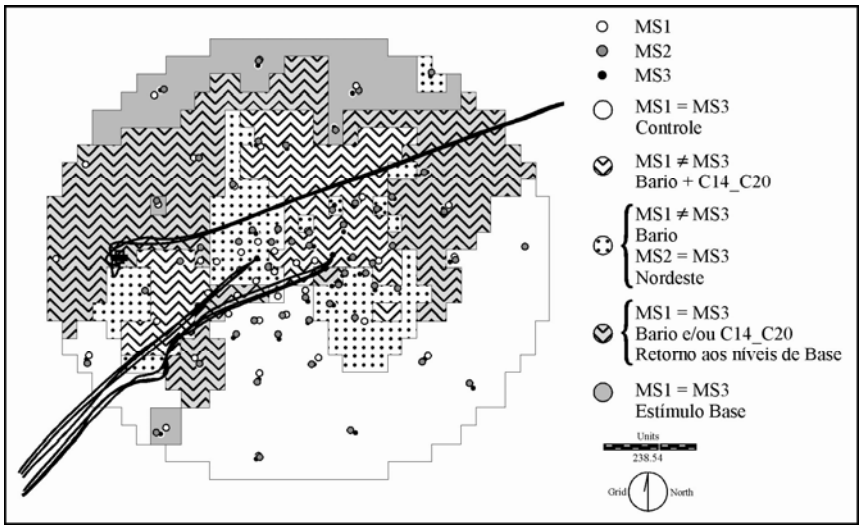


Figura 4.3.23. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos de perfuração.

CAPÍTULO 5

INTEGRAÇÃO DAS REGIÕES ALTERADAS NO MS1, MS2 E MS3

Em face do exposto, e tendo como objetivo principal controlar os diferentes componentes de variação temporal e espacial, ambos decompostos em causas naturais e/ou causas antrópicas, todas as análises descritas foram necessárias e fizeram parte da estratégia empregada para definir e delimitar as regiões dos diferentes grupos. A Figura 5.1 mostra as regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos de perfuração base água (WBF) e base não-aquosa (NAF) no MS1 (a), MS2 (b) e MS3 (c).

Concluída a modelagem geoestatística, foi possível estabelecer grupos de estações amostrais que apresentavam características semelhantes em relação aos indicadores escolhidos para discriminar as diferentes fases da perfuração. O conjunto de estações amostrais localizadas na região identificada pela cor cinza (Fig.5.1(a)) não registrou mudança significativa ao longo dos três cruzeiros. A região foi definida como **CONTROLE**.

O conjunto de estações amostrais localizadas na região identificada pelo preenchimento cinza (Figura 5.1(a)) apresentou registros de atividades pretéritas no local estudado. Esta região foi dividida em duas sub-regiões (Figura 5.1(b)). A região com preenchimento cinza identifica o conjunto de estações amostrais que apresentam estímulo de base (**EB**), à exceção do ponto amostral número 72, localizado a Nordeste da malha amostral, por não registrar alterações decorrentes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23.

A região com preenchimento cinza e hachura (Figura 5.1(b)) identifica a região que apresentou estímulo de base (EB) no MS1 e com contribuição de bário e/ou n-parafinas decorrente das operações realizadas no local no MS2. A sigla determinada

para esta região é **EB_WBF_NAF** (Estímulo de Base mais contribuição do fluido base água e base não-aquosa).

O mesmo grupo no MS3, representado pelo mesmo preenchimento (fundo cinza com hachura) (Fig.5.1(c)), é caracterizado pelo retorno aos níveis de base observados no MS1, em relação às concentrações de bário e/ou n-parafinas. A região EB_WBF_NAF no MS3 caracteriza-se pela variação temporal em duas direções: o aumento constatado no MS2 e o retorno aos níveis de base no MS3. Este grupo foi usado para controlar, no MS1, o componente de variação nas comunidades biológicas decorrentes de atividades pretéritas. No MS2, fica acrescentada ao estímulo de base (EB) a contribuição de Ba e/ou Lin1. No MS3, as respostas biológicas estarão, portanto, vinculadas às condições de recuperação dos níveis de base observados no MS1 após os estímulos bário e/ou n-parafinas, decorrentes de atividades pretéritas e atividades relacionadas com os poços BO-22 e BO-23.

A região identificada pelo fundo branco com hachura listrada (Figura 5.1(b)) não apresentava registro de atividades pretéritas no MS1; no MS2, passa a caracterizar-se pela contribuição significativa de bário e n-parafinas associada às operações de perfuração. No MS3 (Figura 5.1(c)), a região mantém as contribuições de bário e n-parafinas relacionadas à perfuração dos poços BO-22 e BO-23. A sigla determinada para esta região é **WBF_NAF** (Contribuição da fase base água e não-aquosa)

As regiões identificadas pelo preenchimento claro com hachura em círculos preenchidos (pontos pretos) não apresentavam registros de atividades pretéritas no MS1 (Figura 5.1(b)); no MS2, caracteriza-se pela contribuição significativa de bário associado às operações de perfuração de BO-22 e BO-23, e finalmente, no MS3 (Figura 5.1(c)), mantém a contribuição de bário decorrente das atividades monitoradas.

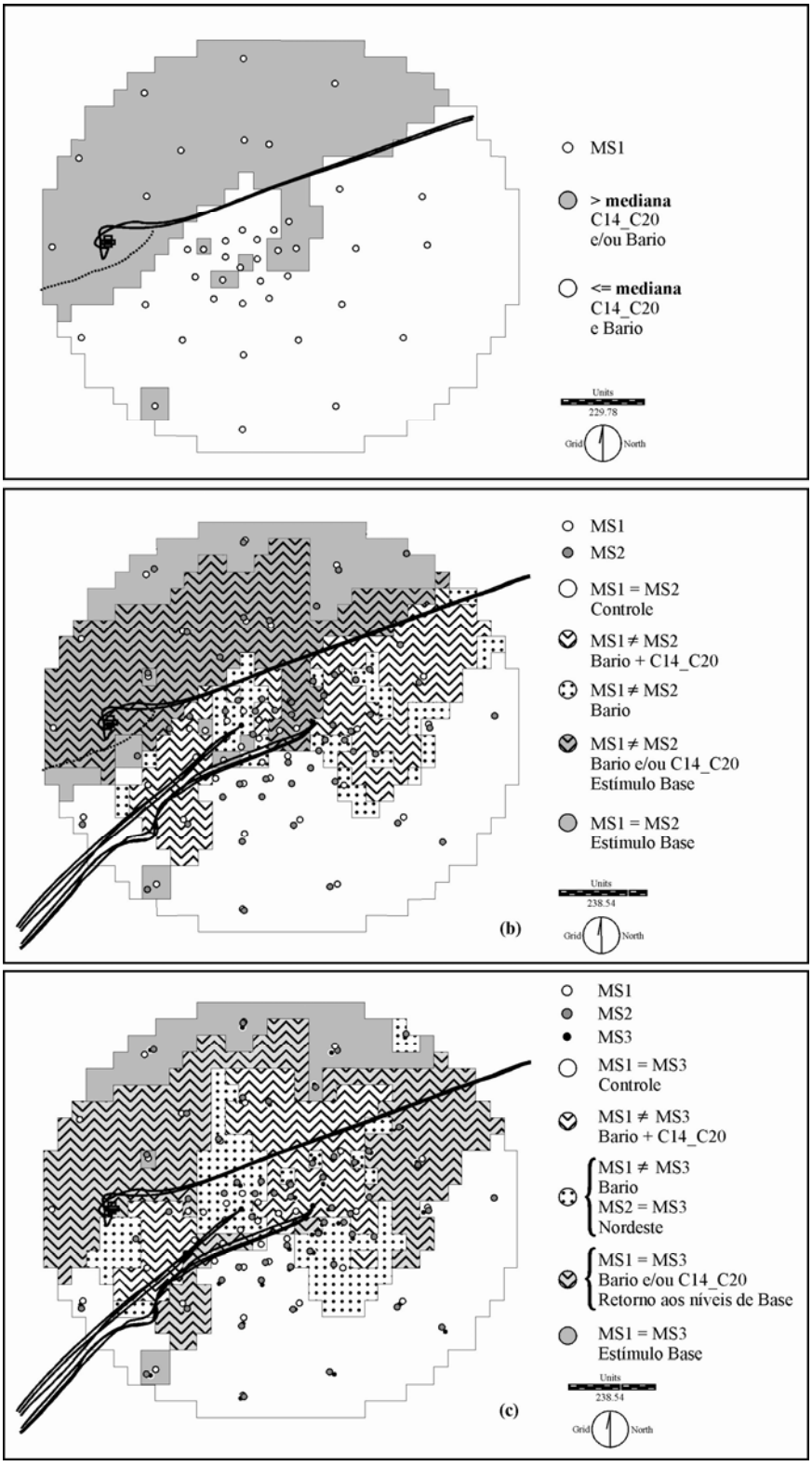


Figura 5.1. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos de perfuração no MS1 (a), MS2 (b) e MS3 (c).

As regiões definidas nas Figuras 5.2 (b) e 5.2(c) consideram as variações temporais e espaciais observadas em todos os três cruzeiros. As regiões definidas na Figura 5.2(b) são testadas no MS1 e no MS2. Com isso, o modelo controla possíveis variações espaciais sobre as comunidades biológicas existentes antes das operações de perfuração dos poços.

Os grupos são definidos igualmente para o MS1 e o MS2. No entanto, a definição no MS3 não é exatamente a mesma. Por definição, a região ou grupo EB_WBF_NAF apresenta registros de atividades pretéritas recebendo, de modo suplementar, no MS2, contribuição de bário e/ou n-parafinas decorrente da perfuração dos poços BO-22 e BO-23. No MS3, esta região caracteriza-se pelo retorno às concentrações observadas no MS1, confundindo estímulos de base no MS1 com estímulos de base no MS3.

O ANEXO I apresenta a classificação das estações amostrais nas regiões da Máscara com as respectivas concentrações de Bário e n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) (ppm).

A complexidade do cenário exigiu um detalhamento maior na estrutura dos componentes de variação espaço-temporal. Para tanto, as regiões mostradas na Figura 5.2 foram hierarquizadas, delimitando as que apresentavam, por definição, características iguais entre os cruzeiros, para verificar hipóteses de impacto ao longo do tempo. Para isso, é necessário testar grupos, com componentes de variação controlados nos três cruzeiros.

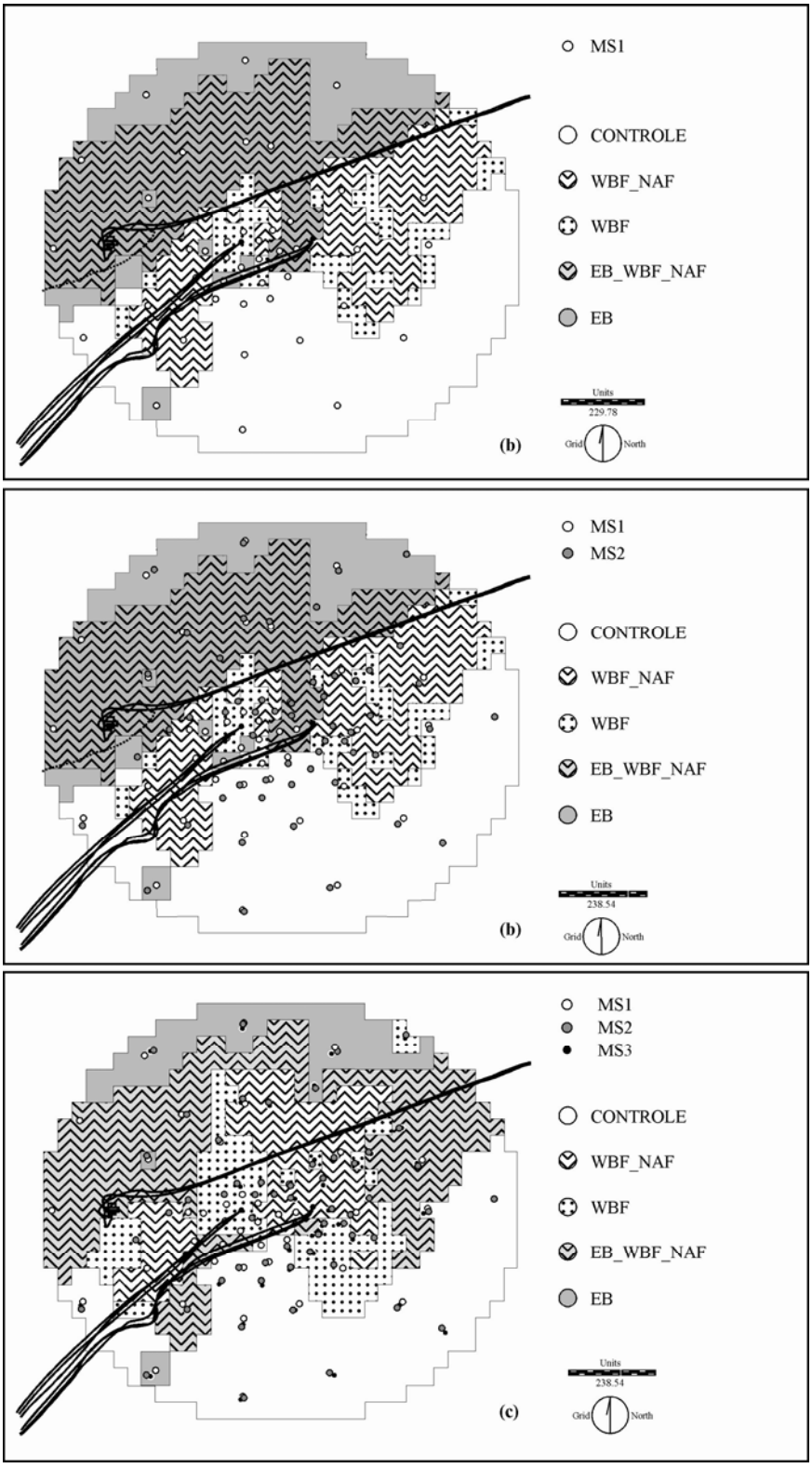


Figura 5.2. Grupos definidos a partir dos indicadores dos fluidos de perfuração no MS1 (a), MS2 (b) e MS3 (c).

5.1. Área total predita relativa às regiões delimitadas pela modelagem geoestatística

A área total estudada compreende aproximadamente 1.170.833,40 m2. A Tabela 5.1 descreve a área correspondente a cada região delimitada pela modelagem geoestatística. A Tabela 5.2 descreve a variação das áreas para cada região ao longo dos cruzeiros.

Tabela 5.1. Área correspondente a cada região delimitada pela modelagem geoestatística.

ÁREA (m^2) / GRUPO	MS1	MS2	MS3
CONTROLE	714.378,06	417.427,56	386.884,08
EB	456.455,34	142.536,24	117.083,34
WBF	----------	84.843,00	147.626,82
WBF_NAF	----------	212.107,50	167.989,14
EB_WBF_NAF	----------	313.919,10	351.250,02

- **Área total estudada: 1.170.833,40 (m^2)**
- **Não foram computadas as áreas compreendidas pelas estações de referência**

Tabela 5.2. Variação na área de cada região durante o período compreendido pelo MS1, MS2 e MS3.

ÁREA (m^2) / GRUPO	Variação MS-1 MS-2	Variação MS-1 MS-3	Variação MS-2 MS-3
CONTROLE	(-) 296.950,50	(-) 327.493,98	(-) 30.543,48
EB	(-) 313.919,10	(-) 339.372,00	(-) 25.452,90
WBF	(+) 84.843,00	(+)147.626,82	(+) 62.783,82
WBF_NAF	(+) 212.107,50	(+)167.989,14	(-) 44.118,36
EB_WBF_NAF	(+) 313.919,10	(+)351.250,02	(+) 37.330,92

A região CONTROLE diminui no período entre o MS1 e o MS3. Em compensação, no MS3, a região EB_WBF_NAF totaliza uma área de aproximadamente 351.250,02 m2. Esse cálculo corresponde, de forma aproximada, à dimensão da região

que retornou aos níveis de base observados no MS1, após receber contribuição de bário e/ou n-parafinas (Lineares C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}) provenientes da perfuração de BO-22 e BO-23. Da área total de 1.170.833,40 m2 predita pelo modelo, no MS3, permaneceu modificada predominantemente por Bário uma área de 147.626,82 m2, e, alterada pela contribuição conjunta de bário e n-parafinas, uma área aproximada de 167.989,14 m2. Da área total considerada no modelo, 610.869,6 m2 foram alterados após a perfuração dos poços, dos quais 315.615,95m2 no MS3 permaneceram modificados por algum dos indicadores dos fluidos.

CAPÍTULO 6

MODELO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA): DEFINIÇÃO DO MODELO E COMPONENTES DE VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL

6.1 Componentes de variação espaço-temporal

6.1.1 Modelo hierárquico cruzado

O modelo de análise de variância deve estar estruturado para testar hipóteses sobre possíveis mudanças com respeito às variáveis físicas, químicas e biológicas. As características inerentes ao estudo em águas rasas, realizado pelo Projeto MAPEM, revelam um cenário altamente dinâmico.

A delimitação das regiões alteradas pelas atividades pretéritas, bem como as alterações físicas e químicas decorrentes da perfuração dos poços BO-22 e BO-23 definidas no Capítulo 3, resultaram em um conjunto de componentes de variações que não se repetem em todos os três cruzeiros. A solução encontrada foi hierarquizar os componentes associados aos indicadores dos fluidos, dentro de regiões maiores, que pudessem caracterizar efeito fixo ao longo do tempo.

Em delineamentos multifatoriais, como o caso da etapa águas rasas do Projeto MAPEM, quando os níveis de um fator são similares, mas não idênticos, para diferentes níveis de outro fator, é apropriado adotar um delineamento hierárquico, onde os níveis de determinado fator estarão alocados dentro dos níveis do outro fator (Montgomery, 1997).

No presente estudo, dois fatores com seus respectivos níveis podem ser preliminarmente destacados:

Fator Cruzeiro

- Nível 1 – Cruzeiro 1 (MS1);
- Nível 2 – Cruzeiro 2 (MS2);
- Nível 3 – Cruzeiro 3 (MS3).

Fator Fluido

- Nível 1 – Controle (CONTROLE);
- Nível 2 – Estímulo de Base (EB);
- Nível 3 – Indicador fluido fase água (WBF);
- Nível 4 – Indicador fluido fase aquosa e fase não-aquosa (WBF_NAF);
- Nível 5 – Indicador fase aquosa e não-aquosa + EB (EB_WBF_NAF).

O Fator Cruzeiro representa o componente temporal do modelo, e é descrito pelos cruzeiros MS1, MS2 e MS3. Já o fator Fluido representa o componente de estímulo, caracterizado pela ausência de fluido (CONTROLE), pela presença pretérita de bário e/ou n-parafinas no MS1 (EB), pelo estímulo de bário em regiões que não apresentavam estímulo de base no MS1 (WBF), pelo estímulo de bário e n-parafinas em regiões que não apresentavam estímulo de base no MS1 (WBF_NAF) e pelo estímulo

de bário e/ou n-parafinas em regiões que apresentavam estímulo de base no MS1 (EB_WBF_NAF).

Conforme Figura 6.1.1, destaca-se que os níveis do fator Fluido não são os mesmos para todos os três níveis do Fator Cruzeiro. Por exemplo, o nível 5 do fator Fluido, definido como EB_WBF_NAF no MS1, não é exatamente o mesmo definido no MS3.

Assim sendo, foi preciso detalhar a estrutura de componentes de variação, identificando as regiões que possuem características idênticas no MS1, MS2 e MS3.

O nível 1 do Fator Fluido, que é definido de forma idêntica no MS1, MS2, MS3, ficou identificado como **CONTROLE**. De forma análoga, o nível 2 do fator Fluido, definido como **Estímulo de Base (EB)**, mostra comportamento idêntico nos três cruzeiros e foi mantido como tal. Os níveis 3, 4 e 5, que representam as diferentes formas de estímulo, foram então agrupados em um único nível, que passou a ser denominada de Impacto, unificando as regiões que receberam em algum momento, contribuição de bário e/ou n-parafinas decorrente das atividades pretéritas e/ou perfuração dos poços BO-22 e BO-23.

A descrição detalhada dos fatores e seus níveis correspondentes são mostrados nos Quadros 6.1.1 e 6.1.2, em três tons de cinza, claro, intermediário e escuro

A Figura 6.1.1 indica na cor cinza intermediária , a região Impacto definida para o MS1 e o MS2. A Figura 6.1.2 indica na cor cinza intermediária, a região Impacto no MS3.

O aumento de bário no MS3, localizado a Nordeste, notadamente pelo ponto amostral 72, e o espalhamento do material na direção Oeste modificam sensivelmente a delimitação espacial da região **Impacto** no MS3. No entanto, a diferença apresentada entre as figuras 6.1.1 e 6.1.2 não impõe restrições na utilização do modelo estatístico quanto à identidade desse grupo no MS1, MS2 e MS3.

Destaca-se que o referido espalhamento na direção Oeste, constatado somente na porção Sul da malha amostral (Figura 6.1.2), pode estar associado a possíveis operações executadas em dutos entre o MS2 e o MS3. No entanto, não há informações sobre atividades realizadas nesse período.

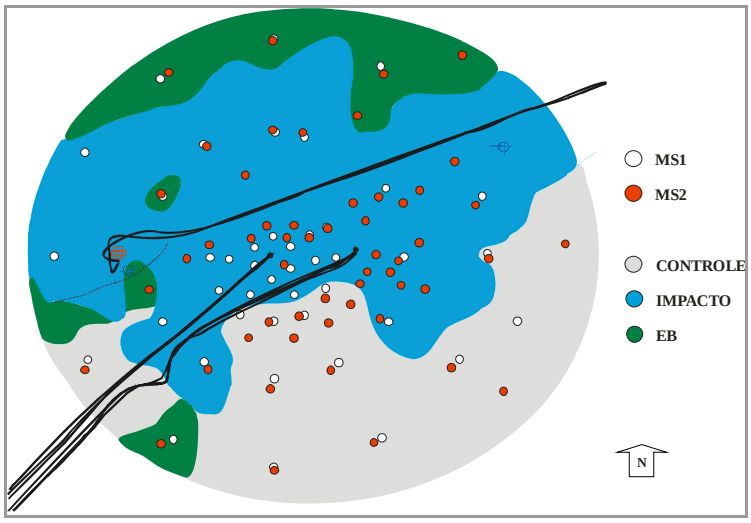


Figura 6.1.1. Regiões Controle, Impacto e EB no MS1 e MS2. Figura modelo para a descrição dos níveis dos fatores do modelo.

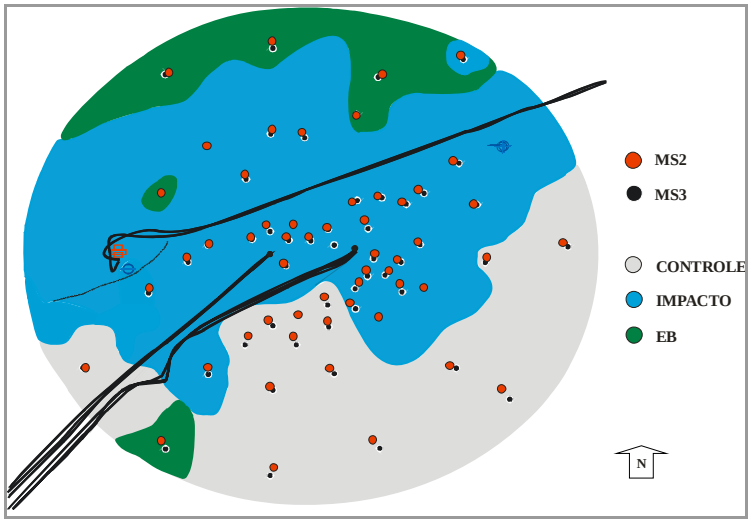


Figura 6.1.2. Regiões Controle, Impacto e EB no MS3

A partir de então, ficaram definidos três fatores com seus respectivos níveis para a aplicação da ANOVA:

Fator Cruzeiro

- Nível 1 – Cruzeiro 1 (MS1);
- Nível 2 – Cruzeiro 2 (MS2);
- Nível 3 – Cruzeiro 3 (MS3).

Fator C_I

- Nível 1 – Controle (CONTROLE);
- Nível 2 – Estímulo de Base (EB);
- Nível 3 – Impacto (IMPACTO).

Fator Fluido

- Nível 1 – Controle (CONTROLE);
- Nível 2 – Estímulo de Base (EB);
- Nível 3 – Indicador fluido fase aquosa (WBF);
- Nível 4 – Indicador fluido fase aquosa e fase não-aquosa (WBF_NAF);
- Nível 5 – Indicador fase aquosa e não-aquosa + EB (EB_WBF_NAF).

Obs: O Fator Fluido é hierárquico ao Fator CI (Controle-Impacto).

Tabela 6.1.1. Estrutura do modelo ANOVA aplicado a partir da estratégia BACI descrevendo o Fator Cruzeiro e o Fator Controle Impacto.

Fatores do Modelo	Observação
Fator Cruzeiro - **MS1**: antes da perfuração; - **MS2**: 3 a 7 meses apos a perfuração; - **MS3**: 22 meses apos a perfuração.	O fator Cruzeiro representa o componente temporal do modelo, e é descrito pelos períodos de amostragem, sendo o primeiro antes, e o segundo e terceiro depois da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23.
Fator C_I (Controle-Impacto) - **CONTROLE**: região que, ao longo dos cruzeiros, permaneceu na condição de ausência do estímulo Fluido; - **EB (Estímulo de Base)**: região que apresentou evidências da presença de Ba e/ou n-parafinas antes da atividade de perfuração e que não recebeu aporte de WBF ou NAF após a perfuração de BO-22 e BO-23; - **IMPACTO**: região que recebeu aporte de Ba e NAF após a perfuração de BO-22 e BO-23 em regiões com ou sem evidência da presença pretérita desses estímulos em relação à perfuração dos poços.	O fator C_I representa o componente espacial do modelo, representado pelas regiões da malha amostral que mantiveram características comparáveis entre si ao longo do tempo (MS1, MS2 e MS3), em face do aporte de fluidos base água e não-aquosos após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23.

Tabela 6.1.2. Estrutura do modelo ANOVA aplicado a partir da estratégia BACI descrevendo o Fator Fluido, hierárquico ao Fator Controle-Impacto.

Fator Fluido - **CONTROLE**: ausência de fluido; - **EB**: estímulo de base; - **WBF**: fluido base água; - **WBF_NAF**: fluido base água e não-aquoso; - **EB_WBF_NAF**: estímulo de base + contribuição de fluido base água e/ou não-aquoso.	O fator Fluido representa o componente de estímulo decorrente da atividade monitorada, evidenciada pelos elementos indicadores das diferentes fases de perfuração. Nesse fator, destacam-se 5 níveis: **CONTROLE** – caracterizado pela ausência de estímulo; **EB** – definido pela presença pretérita de Ba e/ou n-parafinas no MS1; **WBF** – definido pela evidência do aporte de Ba em regiões que não apresentavam estímulo de base no MS1; **WBF_NAF** – definido pela evidência do aporte de Ba e n-parafinas em regiões que não apresentavam estímulo de base no MS1; **EB_WBF_NAF** – definido pela estímulo de Ba e n-parafinas em regiões que apresentavam estímulo de base no MS1;

A análise de variância utilizou métodos baseados em modelos mistos com estruturas paramétricas especiais nas matrizes de covariâncias. O modelo escolhido permitiu avaliar em três ocasiões (MS1, MS2 e MS3) o comportamento dos grupos de unidades amostrais, localizadas nas regiões de Controle, Impacto e Estímulo de Base. Simultaneamente, foi possível avaliar, através do fator Fluido, as respostas biológicas

aos diferentes indicadores das fases de perfuração. O modelo estatístico empregado é detalhado a seguir conforme os objetivos da análise assim resumidos:

- Comparação das regiões Controle, Impacto e Estímulo de Base quanto ao padrão de variação das respostas nos três cruzeiros, isto é, a verificação da existência de interação entre o fator que define os três grupos (Controle, Impacto e EB) e o fator que define os três momentos observados no tempo (MS1, MS2 e MS3);

- Comparação dos grupos hierárquicos ao fator C_I quanto ao padrão de variação das respostas nos três cruzeiros, isto é, a verificação da existência de interação entre o fator que define os grupos Controle, EB, WBF, WBF_NAF e EB_WBF_NAF e o fator que define os três momentos observados no tempo (MS1, MS2 e MS3);

- Comparação dos grupos Controle, Impacto e EB quanto às suas distribuições médias em relação aos diferentes tempos observados, verificando a existência de efeito do fator que define os grupos (componente espacial do fator C_I);

- Comparação dos grupos hierárquicos ao fator C_I (Controle, EB, WBF, WBF_NAF e EB_WBF_NAF) quanto às suas distribuições médias em relação aos diferentes tempos observados, verificando a existência de efeito do fator que define os grupos (componente espacial do fator Fluido hierárquico ao fator C_I);

- Comparação dos diferentes tempos (MS1, MS2 e MS3) quanto às suas distribuições médias em relação aos diferentes grupos, verificando a existência de efeito do fator que os define (componente temporal).

Para alcançar os referidos objetivos, foi utilizado o modelo de ANOVA (Análise de Variância) usando modelos mistos, o qual tem a forma a seguir especificada (PROC MIXED, SAS Institute Inc., 1999-2001):

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{k(j)} + \tau\beta_{ij} + \tau\gamma_{ik(j)} + \delta_{l(k)} + \varepsilon_{(ijk)l} \qquad (6.1)$$

onde,

$i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3 \quad k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad l = 1, n$

y_{ijkl} é a resposta biológica de interesse decomposta nas componentes do modelo

μ é a média final;

τ_i é o efeito do fator Cruzeiro;

β_j é o efeito do fator C_I;

$\gamma_{k(j)}$ é o efeito do fator Fluido hierárquico ao fator C_I;

$\tau\beta_{ij}$ é o efeito da interação dos fator Cruzeiro com o fator C_I;

$\tau\gamma_{ik(j)}$ é o efeito da interação do fator Cruzeiro com o fator Fluido dentro de C_I;

$\delta_{l(k)}$ é o erro para o teste do efeito de fluido, representando a variação de repetições (estações) dentro dos níveis do fator Fluido;

$\varepsilon_{(ijk)l}$ é o erro aleatório não-observável associado à observação.

A técnica de ANOVA apresenta como resultado final o nível descritivo amostral para cada um dos efeitos propostos pelo modelo. Foi adotado o nível de significância $\alpha = 0{,}05$.

O efeito dado por $\tau\beta_{ij}$ avalia a existência de interação entre o fator Cruzeiro e o fator C_I. O efeito dado por $\tau\gamma_{ik(j)}$ avalia a existência de interação entre o fator Cruzeiro e o fator Fluido hierárquico ao fator C_I. O efeito dado por τ_i avalia o componente temporal. Já o efeito identificado por β_j avalia a presença ou não do componente espacial relacionado ao fator C_I. O efeito identificado por $\gamma_{k(j)}$ avalia a presença ou não do componente espacial relacionado ao fator Fluido dentro dos níveis do fator C_I. A interação significativa entre dois fatores indica que um deles modifica-se conforme a categoria do outro fator.

Para exemplificar a estrutura do modelo, a Figura 6.1.3 ilustra os níveis do fator Fluido hierárquico ao fator C_I no MS3. Inicialmente, fica definido o fator C_I com seus três níveis: Controle, Impacto e EB. A interação entre o Fator Cruzeiro e o Fator C_I testa hipótese a respeito da igualdade de médias cruzando os grupos Controle, Impacto e EB decompostos no MS1, MS2 e MS3. Ressalta-se nessa estrutura a região Impacto, (Figura 6.1.3) análoga a região descrita na Figura 6.1.2. Nesta região (Impacto) encontram-se alocados três níveis do fator Fluido.

A interação entre o fator Cruzeiro e o fator Fluido testa hipótese a respeito da igualdade de médias, cruzando os grupos WBF, WBF_NAF e EB_WBF_NAF na região Impacto, decompostos no MS1, MS2 e MS3. As hipóteses testadas a partir das duas interações definidas no modelo permitem a verificação simultânea de possíveis impactos decorrentes das atividades antrópicas, detalhando a origem dos impactos em relação aos diferentes indicadores das diferentes fases de perfuração associadas às atividades pretéritas e à perfuração de BO-22 e BO-23.

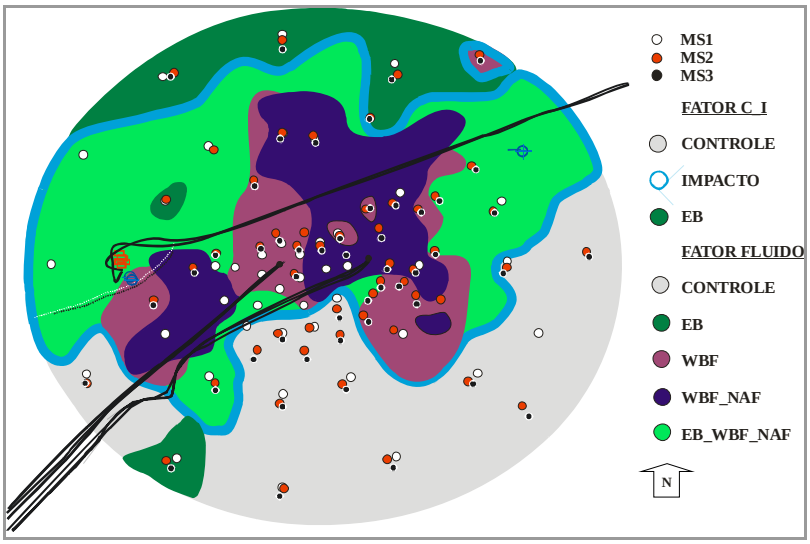


Figura 6.1.3. Regiões alteradas pelos indicadores dos fluidos empregados na perfuração dos poços BO-22 e BO-23

O modelo (6.1) é conhecido como modelo hierárquico cruzado com efeitos fixos e aleatórios. A denominação “hierárquico” refere-se à condição imposta ao fator Fluido de ser alocado dentro dos níveis do fator C_I. O termo “cruzado” refere-se à condição de interação entre os níveis do fator C_I com os níveis do fator Cruzeiro e a interação do fator Fluido(C_I) com o fator Cruzeiro.

Os efeitos estão decompostos em fixos e aleatórios. Entende-se por efeitos fixos os efeitos principais de Cruzeiro, C_I, Fluido (C_I) e os efeitos de interação Cruzeiro × C_I e Cruzeiro × Fluido(C_I). O efeito aleatório representa a variação de repetições (estações) dentro dos níveis do fator Fluido(C_I).

CAPÍTULO 7

DEMONSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DA ABORDAGEM BACI UTILIZANDO O CONCEITO DE MÁSCARA ESPAÇO-TEMPORAL NA AVALIAÇÃO DE EFEITOS DOS DESCARTES DA PERFURAÇÃO SOBRE A BIOTA.

Os dados da estrutura da comunidade bentônica adotados como exemplo para a aplicação do método estatístico desenvolvido no presente estudo foram gerados pela equipe de Biologia no âmbito do Projeto MAPEM e estão publicados na íntegra nos relatórios técnicos do Projeto MAPEM

7.1. Fundamentos da análise BACI aplicada ao Número de famílias da meiofauna.

Uma vez definidos os fatores do modelo e seus respectivos níveis, avaliaram-se inúmeros indicadores biológicos. Como exemplo, será descrito o resultado obtido com o número de famílias da meiofauna (ME_SF), e para a macrofuana, os indicadores Vágeis Detritívoros (VA_DET) e Diversidade.

A análise do número de famílias da meiofauna (ME_SF) resulta em duas interações significativas. Inicialmente, constatou-se a interação entre os fatores Cruzeiro e C_I *(p=0,0056)*. A segunda interação significativa ocorre entre os fatores Cruzeiro e Fluido(C_I) *(p=0,0031)*. As comparações múltiplas para as médias da interação entre os fatores Cruzeiro e C_I, descritas na Tabela 7.1, indicam que a região estudada apresenta homogeneidade espacial antes das atividades de perfuração dos poços BO-22 e BO-23. No MS2, as médias das regiões Impacto e EB revelam diferença significativa da média observada para a região Controle. No MS3, foi constatada a manutenção do cenário verificado após a atividade de perfuração monitorada (MS2) (Fig. 7.1.1). Analisando a flutuação das médias ao longo do tempo, é possível constatar que a região Controle não varia significativamente ao longo do tempo. A mesma constatação pode ser estendida para a região definida pelo Estímulo de Base (EB), que apresenta um número reduzido de pontos amostrais, e por conseqüência, menos poder para identificar diferenças significativas. Diferentemente do comportamento observado nas regiões Controle e EB, o número de famílias da meiofauna diminui significativamente na região Impacto, após a atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23. Dezenove meses após o término da perfuração de BO-23, não é constatado aumento significativo, preservando desta

forma, a média verificada no MS2, significativamente inferior à média observada no MS1 (figuras 7.1.1 e 7.1.2). Complementarmente, a análise das médias na Tabela 7.1 revela que, embora não tenha sido possível detectar mudança significativa na região EB ao longo do tempo, a análise detectou mudanças significativas entre as regiões dentro de um mesmo tempo. Por exemplo, em MS1 a comparação entre as médias das três regiões não revelaram diferença significativas, enquanto que em MS2 e MS3 as regiões EB e Impacto diferiram significativamente da região Controle.

Tabela 7.1. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × C_I para a raiz quadrada da variável Número de famílias da meiofauna (médias destransformadas).

Cruzeiro / C_I	MS1		MS2		MS3	
CONTROLE	A 10.95	a	A 12.74	a	A 12.76	a
EB	A 8.93	a	A 7.23	b	A 8.62	b
IMPACTO	A 11.43	a	B 7.46	b	B 8.90	b

Obs: Letras maiúsculas comparam médias dentro de linhas; letras minúsculas comparam médias dentro de colunas.

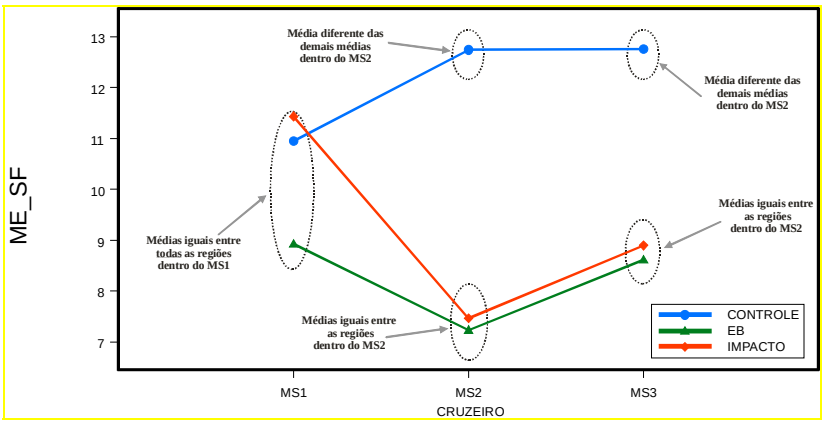


Figura 7.1.1. Gráfico de perfis da interação Cruzeiro × C_I para a raiz quadrada variável Número de famílias da meiofauna (médias destransformadas).

A Figura 7.1.2 mostra o gráfico *Box Plot* do indicador biológico ME_SF, decomposto nos grupos Controle, Impacto e EB, ao longo dos três cruzeiros oceanográficos. O gráfico descreve os quartis a a mediana dentro de cada um dos grupos.

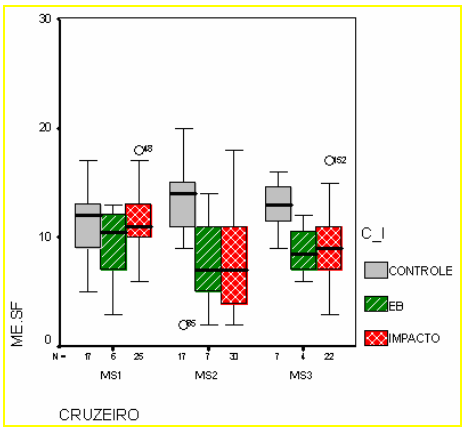


Figura 7.1.2 *Boxplot* para a variável Número de famílias da meiofauna (ME_SF), considerando a interação Cruzeiro × C_I.

Variáveis discretas como número de famílias (ME_SF) devem ser representadas no espaço como contagem. No entanto, apenas para efeito de ilustração, a Figura 7.1.3 mostra a intensidade da distribuição espacial do número de famílias da meiofauna (ME_SF) no MS2.

Verifica-se então, que a média (ME_SF) da região Impacto foi significativamente inferior à média deste indicador para o conjunto de estações Controle. As evidências da relação entre o decréscimo do número de famílias (ME_SF) e a presença de registros da atividade de perfuração estão descritas na Figura 7.1.3

Em MS3 a porção Leste da região Impacto, que responde pela região EB_WBF_NAF, mostra sinais de recuperação com um retorno dos níveis basais dos traçadores químicos observados no MS1. No entanto, a porção Norte, central e Sudeste da região de Impacto permanecem claramente modificadas, indicando uma forte relação

entre a diminuição do número de famílias e o contorno que delimita a região Impacto (Figura 7.1.3).

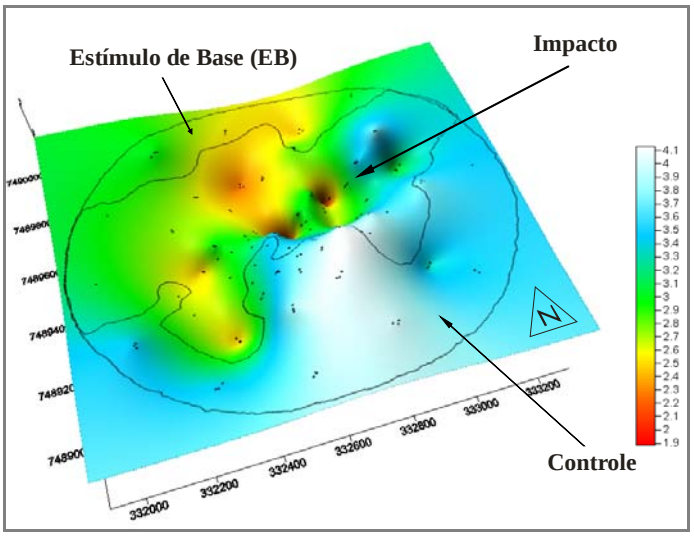


Figura 7.1.3. Descrição espacial da raiz quadrada da variável Número de famílias (ME_SF) da meiofauna no MS3, com as respectivas áreas de Impacto, Controle e Estímulo de Base. Obs.: O método de interpolação é descritivo.

A análise das comparações múltiplas da segunda interação do modelo dado pelos fatores Cruzeiro e Fluido(C_I), descrita na Tabela 7.2 permite compreender melhor os componentes de variação relacionados às fases de perfuração.

Tabela 7.2. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × Fluido(C_I) para a raiz quadrada da variável Número de famílias da meiofauna.

Cruzeiro / Fluido (C_I)	MS1	MS2	MS3
WBF	11.25 **a**	9.21 **a**	9.48 **a**
WBF_NAF	11.74 **a**	8.23 **a**	6.11 **b**
EB_WBF_NAF	11.28 **a**	4.43 **b**	10.69 **a**

Obs. Letras minúsculas comparam médias dentro de colunas. Médias destransformadas.

No MS1, as áreas WBF, WBF_NAF e EB_WBF_NAF na região Impacto registraram densidades médias iguais, porém no MS2, a área EB_WBF_NAF é, em média, menor quanto ao número de famílias nesta região (Figura 7.1.4 (MS2)). No MS3, a área WBF_NAF difere significativamente da área EB_WBF_NAF e WBF. A média do número de famílias na área WBF no MS3 não difere da média da área EB_WBF_NAF (Figura 7.1.4 (MS3)).

Em resumo, a análise global indica um decréscimo médio significativo do número de famílias da meiofauna (ME_SF) na região Impacto, não havendo indício de recuperação média desta região no MS3. Observa-se que nesta região, a área já alterada por atividades pretéritas e que, em decorrência da perfuração de BO-22 e BO-23, recebeu aporte dos indicadores dos fluidos de base água e de base não-aquosa (EB_WBF_NAF) registra uma média significativamente menor no MS2. Este fato evidencia uma resposta biológica diferenciada entre as diferentes áreas alocadas dentro da região Impacto. No MS3, a área WBF_NAF difere significativamente da área onde as concentrações de bário e n-parafinas (NAF) retornam aos níveis de base observados antes da atividade monitorada (EB_WBF_NAF) e da região WBF alterada por indicador de fluido base água (Fig. 7.1.5).

Torna-se aparente o comportamento diverso do número de famílias para as diferentes áreas na região Impacto. Enquanto se define uma tendência de aumento médio do número de famílias para o grupo EB_WBF_NAF no MS3, observa-se simultaneamente um decréscimo na média do número de famílias no grupo WBF_NAF (Figura 7.1.4).

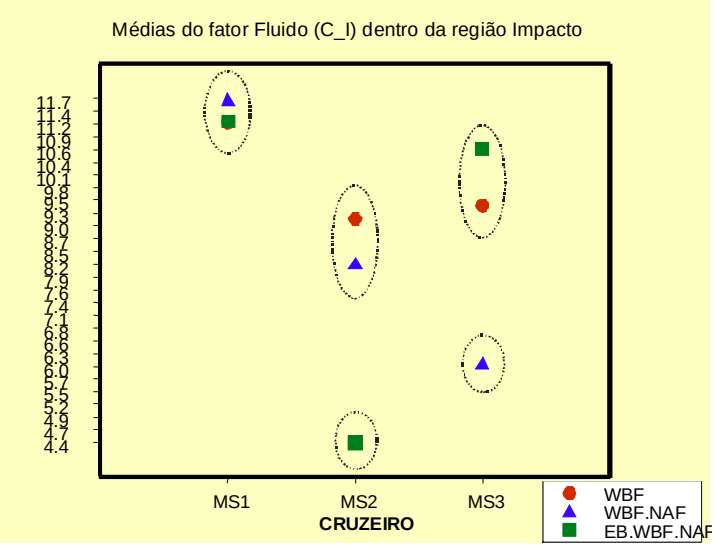


Figura 7.1.4. Gráfico das comparações múltiplas de médias para a raiz quadrada da variável Número de famílias da meiofauna (ME_SF), considerando a interação dos fatores Cruzeiro × Fluido(C_I) (médias destransformadas).

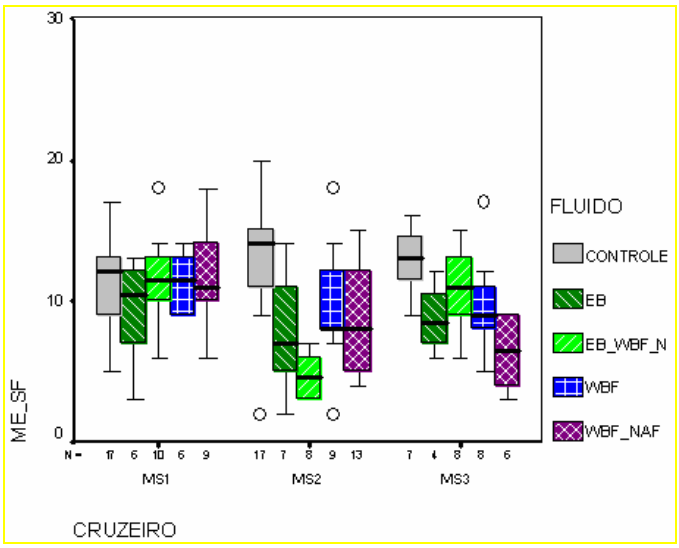


Figura 7.1.5. *Boxplot* para a variável Número de famílias da meiofauna (ME_SF), considerando a interação Cruzeiro × Fluido(C_I).

7.2. Fundamentos da análise BACI aplicada indicador biológico da macrofauna Vágeis Detritívoros.

Para um segundo indicador utilizado como exemplo, o modelo detectou efeito significativo de interação na densidade do grupo trófico Vágeis Detritívoros (VA_DET) da macrofauna. Este resultado indica que deve haver pelo menos uma diferença significativa entre as regiões definidas no Fator C_I ao longo dos três cruzeiros. Na Tabela 7.2, são indicadas as diferenças significativas da interação do Fator Cruzeiro e do Fator C_I.

Tabela 7.3. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × C_I para a variável Densidade de Vágeis Detritívoros.

Cruzeiro / C_I	MS1		MS2		MS3	
CONTROLE	A 26.33	a	A 30.86	a	A 39.30	a
EB	A 28.67	a	A 37.33	a	A 38.00	a
IMPACTO	A 22.64	a	B 65.38	b	C 46.81	a

Obs. Letras maiúsculas comparam médias dentro de linhas; letras minúsculas comparam médias dentro de colunas.

A análise da densidade de Vágeis Detritívoros revelou interação significativa entre os fatores Cruzeiro e C_I *(p=0,0002)*. O resultado revela homogeneidade espacial significativa entre as regiões Controle, EB e Impacto, no MS1.

No MS2, não foram constatados aumentos significativos nas médias de VA_DET das regiões Controle e EB, revelando evidências suficientes para afirmar, com 95% de confiança, que a densidade de Vágeis Detritívoros não apresenta variabilidade temporal nas regiões Controle e EB. Entretanto, a média observada para este mesmo indicador biológico, na região Impacto, foi significativamente superior àquelas observadas nas regiões Controle EB no MS2 (Tabela 7.3 e Figura 7.1.6). Apesar de ter

sido constatado um decréscimo da densidade de Vágeis Detritívoros em MS3, não foi verificado retorno aos níveis observados antes da atividade de perfuração (MS1).

Ressalta-se, porém, que uma vez não constatada interação significativa entre os fatores Cruzeiro e Fluido(C_I), não sendo possível atribuir a alteração verificada na densidade de Vágeis Detritívoros a uma fase específica da perfuração em relação ao tipo de fluido, embora tenha havido alteração em uma região com WBF, EB_WBF_NF e WBF_NAF.

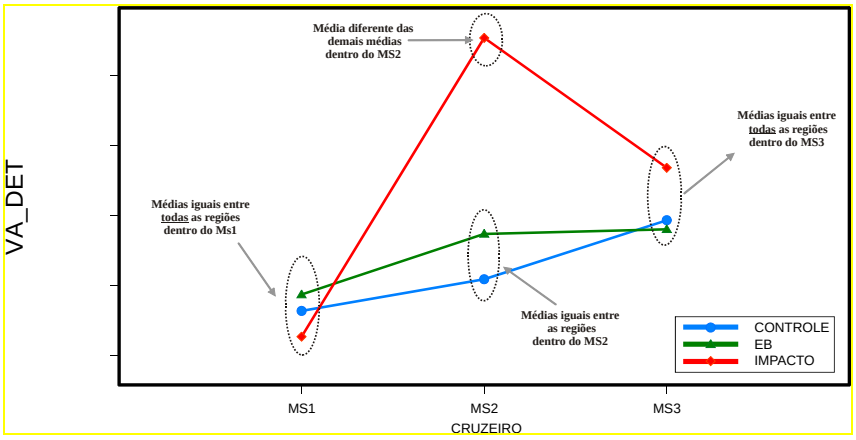


Figura 7.1.6. Gráfico de perfis da interação Cruzeiro × C_I para a variável Densidade de Vágeis Detritívoros (VA_DET).

A Figura 7.1.7 evidencia o comportamento espacial da variável Vágeis Detritívoros. A transformação aplicada foi $\sqrt[3]{VA_DET}$. As maiores ocorrências são observadas na região Impacto, particularmente a Leste e no entorno dos poços BO-22 e BO-23.

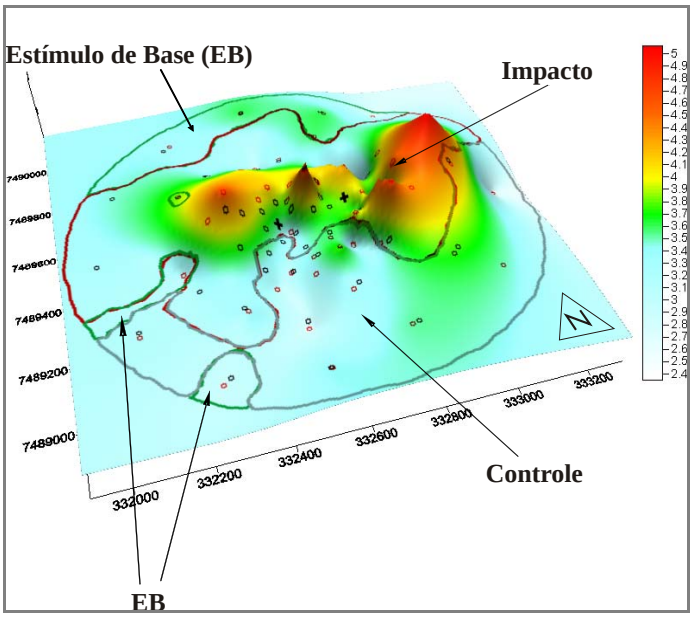


Figura 7.1.7. Distribuição espacial da densidade de Vágeis Detritívoros na região Impacto no MS2 (interpolação *krigeagem* para fins descritivos da raiz cúbica de Vágeis Detritívoros).

7.3. Fundamentos da análise BACI aplicada indicador biológico da macrofauna *Polychaeta*/*Crustacea* (NPO/NCRP).

A análise da razão de *Polychaeta*/*Crustacea* (NPO/NCRP) resultou em duas interações significativas: a primeira entre os fatores Cruzeiro e C_I *(p=0,0008)*, e a segunda, entre os fatores Cruzeiro e Fluido(C_I) *(p=0,0255)*, indicando que existe pelo menos uma diferença significativa entre regiões definidas pelos indicadores dos diferentes fluidos (WBF, WBF_NAF e EB_WBF_NAF) na região Impacto, ao longo dos três cruzeiros.

De acordo com a Tabela 5.4, as médias da interação entre o Fatore Cruzeiro e o Fator C_I revelaram homogeneidade espacial na região antes das atividades de perfuração dos poços BO-22 e BO-23. Comportamento similar não foi verificado no MS2, onde a média da região Impacto é significativamente maior que as médias observadas para as regiões Controle e EB (Figura 7.1.8). Desta forma, é possível

constatar que, na região Impacto, a razão de *Polychaeta*/*Crustacea* aumenta significativamente no MS2 e em MS3 retorna ao nível observado antes da atividade de perfuração de BO-22 e BO-23. (Tabela 7.4 e Figura 7.1.8).

Tabela 7.4. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × C_I para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea*.

Cruzeiro / C_I	MS1		MS2		MS3	
CONTROLE	**A** 12.66	**a**	**A** 8.05	**a**	**A** 11.60	**a**
EB	**A** 12.40	**a**	**A** 19.79	**a**	**A** 8.58	**a**
IMPACTO	**A** 11.66	**a**	**B** 52.06	**b**	**A** 12.41	**a**

Obs: Letras maiúsculas comparam médias dentro de linhas; letras minúsculas comparam médias dentro de colunas.

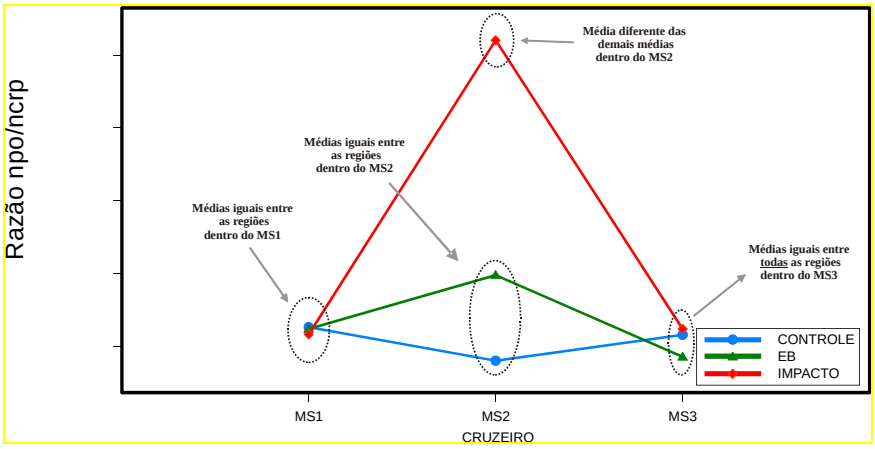


Figura 7.1.8. Gráfico de perfis da interação Cruzeiro × C_I para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea*.

Desta forma, a média da região Impacto para a razão entre *Polychaeta*/*Crustacea* aumenta com a presença dos traçadores da atividade de perfuração.

A Figura 7.1.9 descreve a maior intensidade da razão de *Polychaeta*/*Crustacea*, localizadas no entorno dos poços BO-22 e BO-23. Um segundo nível de aumento,

menos intenso, é registrado na maior parte da região definida como Impacto. Diferentemente das respostas obtidas para as outras variáveis, a razão aumenta nas direções Norte, Noroeste e Oeste. A segunda interação do modelo, entre os fatores Cruzeiro e Fluido(C_I), permite a compreensão do fenômeno em relação aos diferentes indicadores utilizados para discriminar os fluidos.

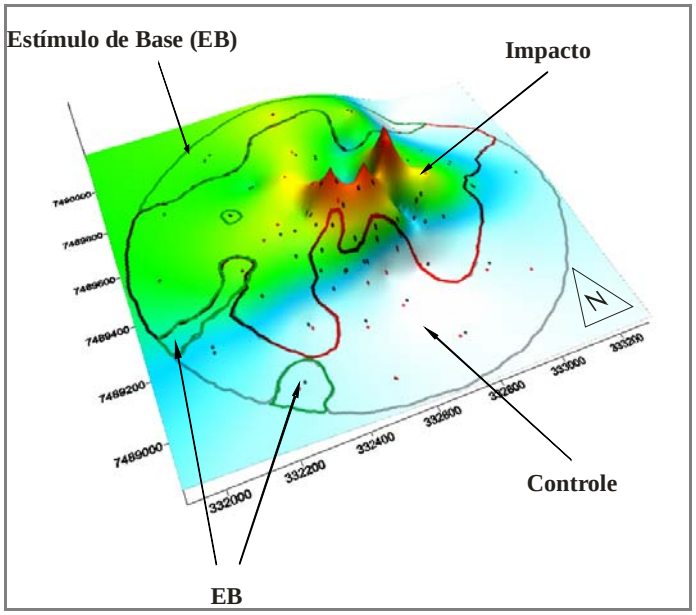


Figura 7.1.9. Distribuição espacial da intensidade da Razão de *Polychaeta*/*Crustacea* no MS2, considerando os níveis do fator C_I (interpolação descritiva da razão NPO/NCRP).

A análise das comparações múltiplas da segunda interação do modelo, dado pelos fatores Cruzeiro e Fluido(C_I), permite compreender melhor os componentes de variação alocados dentro do fator C_I, particularmente na região Impacto.

Tabela 7.5. Comparações múltiplas de médias da interação Cruzeiro × Fluido(C_I) para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea.*

Cruzeiro / Fluido (C_I)	MS1	MS2	MS3
WBF	5.94 **a**	21.95 **a**	11.92 **a**
WBF_NAF	15.50 **a**	58.95 **b**	12.76 **a**
EB_WBF_NAF	11.63 **a**	78.41 **b**	12.70 **a**

Obs. Letras minúsculas comparam médias dentro de colunas.

No MS1, as regiões WBF, WBF_NAF e a região EB_WBF_NAF registram densidades médias similares na região Impacto. No MS2, as médias observadas na região EB_WBF_NAF e na região WBF_NAF diferem significativamente da média na região WBF. No MS3, as regiões alocadas na região Impacto registram homogeneidade espacial. Em resumo, a análise global mostra diferença significativa entre as regiões WBF_ NAF e a região que registrou somente indicadores da fase de perfuração WBF.

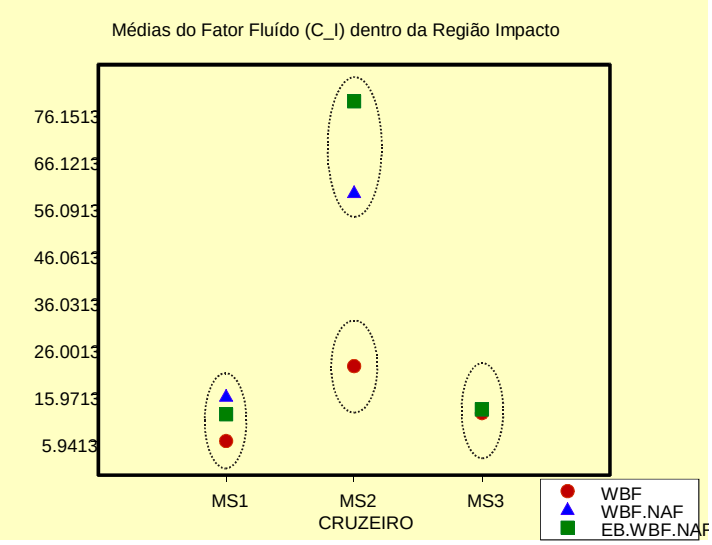


Figura 7.1.10. Gráfico das comparações múltiplas de médias para a variável Razão de *Polychaeta*/*Crustacea*, considerando a interação Cruzeiro × Fluido(C_I).

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO

A determinação e delimitação das regiões alteradas pelos traçadores dos descartes da atividade de perfuração, estabelecida através de modelagem geoestatística Bayesiana, foi eficiente para diferenciar as regiões de deposição, associadas ao uso de diferentes fluidos de perfuração. e determinou o agrupamento, a posteriori, dos pontos amostrais, permitindo comparar as intensidades médias dos indicadores bióticos entre as regiões

A estratégia de definição da região de Impacto, à posteriori, nos moldes adotados no presente estudo possibilita o sucesso na aplicação da abordagem BACI *(Before After-Control Impact)* uma vez que se demarca não uma região de impacto putativo, mas sim uma região de fato alterada pelos estímulos de interesse após a atividade em questão.

Este agrupamento permite entender as inter-relações entre as diferentes variáveis do projeto em todas as fases da análise estatística.

A estratégia para isolar os componentes de variação espaço-temporal a partir do delineamento BACI, diferenciando-se as diferentes fases da atividade de perfuração dos poços BO-22 e BO-23, somados à detecção de alterações decorrentes de atividades pretéritas no local e de variações naturais, permitiu a condução das análises com critérios de confiança satisfatórios acerca dos resultados e das inferências.

A distribuição espacial não-homogênea dos elementos traçadores dos diferentes fluidos de perfuração (Bário e Soma de Lineares C_{14} a C_{20}) determinou respostas distintas dos indicadores biológicos dos dois componentes bióticos: meiofauna e macrofauna.

Os resultados obtidos através da aplicação da Máscara mostraram que as respostas biológicas do presente estudo dependem de diferentes concentrações de Bário e n-

parafinas (Soma de Lineares C_{14} a C_{20}), bem como da combinação destes dois elementos, sugerindo uma relação de dose-resposta não-linear.

Constatou-se que alterações na concentração de Bário e n-parafinas (Soma de Lineares C_{14} a C_{20}) nem sempre implicam em alterações na comunidade biológica. Verifica-se pela observação dos resultados que os riscos de ocorrência de alterações biológicas na comunidade bentônica variam espacialmente e temporalmente para diferentes grupos biológicos e estão associados à interação entre os fatores bióticos e abióticos dos processos a que os componentes dos fluidos estão submetidos.

Diferentes processos espaciais de iteração física e química parecem ser responsáveis pela complexidade e variedade de resultados obtidos ao final do estudo.

Um segundo fator, não menos importante, foi observado nas respostas biológicas dentro da região EB, caracterizada por ter indicativos de atividades pretéritas e não ter recebido contribuição das atividades de perfuração do BO-22 e BO-23. Nessa região, as respostas da comunidade bentônica variaram significativamente ao longo do período amostral, em contraste com a homogeneidade de comportamento desta mesma comunidade na região Controle no mesmo período. Esses efeitos, no entanto, foram isolados eficientemente pelo modelo e atribuídos a atividades não-estudadas no escopo do Projeto MAPEM.

9. BIBLIOGRAFIA

Cressie, N. (1991). *Statistics for Spatial Data*. New York: John Wiley & Sons.

Diggle, P.J., Ribeiro Jr.,P.J., 2006. Model-Based Geostatistics. Springer Series in Statistics; Springer Verlag NY.

Diggle, P.J. and Ribeiro Jr, P.J. (2000). *Model Based Geostatistics*. 14° SINAPE, Associação Brasileira de Estatística – ABE.

Evans,M. and Swartz, T. (1995). Methods for approximating integrals in statistics with special enphasis on Bayesian integration problems. Statistical Science, 10, 254-72.

Gamerman, D. and Lopes, H.F., (2006). Markov Chain Monte Carlo: Stochastic Simulation for Bayesian Inference. 2th. Ed. Chapman & Hall/CRC.

Gamerman, D. (1997). Efficient sampling from the posterior distribution in generalized linear mixed models. *Statistics and Computing*, 7, 57-68.

Gelfand, A. E. and Smith, A.F.M. (1990) Sampling-based approaches to calculating marginal densities. Journal of the American statistical Association, 85, 398-409.

Geman, S. and Geman, D. (1984) Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6, 721-41.

Gilks, W. R. and Roberts, G.O. (1996) Strategies for improving MCMC. In Markov Chain Monte Carlo in Practice (Eds W. R. Gilks, S. Richardson and D.J Spiegelhalter), Chapman & Hall, London.

Hastings, W.K. (1970). Monte Carlo sampling methods using Markov chain and their applications. Biometrika,57, 97-109.

Journel, A.G. e Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geostatistics.* London: Academic Press.

Lindgren, B.W. (1976*). Statistical Theory*, 3rd ed., New York: MacMillan.

Lunn, D.J., Thomas, A., Best, N. and Spiegelhalter, D., 2000. WinBUGS: A Bayesian modelling framework: concepts, structure and extensibility. Statistics and Computing, 10:325--337.

Matheron, G. (1962). Traite de Geostatistique Apliquée, Tome I. *Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres,* No. 14, Editions Technip, Paris.

Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246-1266.

Metropolis, N., Rosenbluth, A. W. Rosenbluth, M. N., Teller, A.H. and Teller, E. (1953) Equation of State calculation by fast computing machine. Journal of chemical Physics, 21, 1087-91

Migon, H.S. & Gamerman, D.,(1999). Statistical Inference: An integrated Approach. Arnold.

Montgomery, D.C. (1997). *Design and Analysis of Experiments*. 4th Ed. New York: John Wiley & Sons

OGP, International Association of Oil and Gas Producers, (2003). Environmental aspects of the use and disposal of non aqueous drilling fluids associated with offshore oil & gás operations. Report No 342.

Pulgati, F.H., Fachel, J.M.G., Ayup-Zouain, R.N., Landau, L., 2008. Bayesian spatial prediction of the area affected by drilling discharges from an exploratory well using water-based and non aqueous-based fluids in Campus Basin, Brazil. Deep-Sea Research II.

R Reference Index. *Manual de Referência do Software R*, versão 1.3.0. (2001).

SAS INSTITUTE (2001). Proprietary Software Release 8.2. Cary, NC: SAS Institute Inc.

Russel, M. Webster, P. Walsham, G. Packer, E.J. Dalgarno, A.D. McIntosh, C.F. Moffat (2005). The effects of oil exploration and production in the Fladen Ground: Composition and concentration of hydrocarbons in sediments samples collected

during 2001 and their comparison with sediment samples collected in 1989. *Marine Pollution Bulletin*, 50, 638-651.

Toldo, E. E., Ayup, R.N.Z. (2008) Environmental monitoring of offshore drilling for petroleum exploration (MAPEM): A brief overview. Deep-Sea Research II

ANEXO I

Este Artigo descreve o uso de modelos espaciais Bayesianos no desenvolvimento de uma máscara espaço temporal com o propósito de identificar áreas de deposição de descartes da atividade de perfuração de poços de óleo e gás e assim aplicar o método BACI (Before-After Control-Impact). Ao invés de tomar como base uma região de impacto putativo, delimitou-se uma região onde de fato organismos da meiofauna e macrofauna estiveram expostos a estes rejeitos, ao longo do tempo de estudo.

Para determinar os efeitos de fluidos e cascalhos da perfuração é essencial conhecer onde os rejeitos da perfuração se depositam, mas também a que concentrações a biota esteve exposta durante e após a operação de perfuração do poço.

O elemento bário e os hidrocarbonetos lineares C14_C20 e suas misturas complexas não resolvidas foram usados como traçadores químicos para os fluidos de base aquosa e base não aquosa em um estudo realizado em uma locação rasa na Bacia de Campos na costa do Brasil.

O estudo considerou os níveis de base da concentração destes traçadores no ambiente, uma vez que a região já apresentava indícios de atividades pretéritas à perfuração dos poços BO22 e BO23, alvos do presente estudo.

O modelo estatístico adotado neste estudo permitiu predizer concentrações de áreas não amostradas com base nas concentrações dos pontos amostrados e delimitar e avaliar os efeitos de regiões submetidas à deposição de rejeitos da fase de perfuração usando fluido de base aquosa e não aquosa em regiões limpas e regiões previamente expostas a estes rejeitos em atividades pretéritas.

Development of the concept of spatial-temporal mask for testing effects of discharge from well-drilling activities on biological communities

F.H. Pulgati*[a], R.N.Ayup-Zouain [b], L. Landau [a], J. M. G. Fachel[c]

[a]*Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, COPPE-UFRJ,*

Rio de Janeiro, RJ 21945.970, Brazil

[b]*Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, UFRGS,*

CP15001, Porto Alegre, RS 91509.900, Brazil

[c] *Departamento de Estatística, Instituo de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS 91509.900, Brazil*

[*]Corresponding author Tel / fax 55-21-25628418

E-mail-address: pulgati@lamce.coppe.ufrj.br

Abstract

This paper describes the use of Bayesian spatial models to develop the concept of a spatial-temporal mask for the purpose of identifying areas in which before and after-drilling effects are most clearly defined and from which the consequences of exposure of macrofauna and meiofauna to the release of drilling discharges can be evaluated over time. The method uses the approach termed BACI (Before-After Control-Impact).

To determine the effects of drilling fluids and drill-cuttings on the marine benthic community, it is essential to know not only where discharged materials ended up within the possible impact area, but also the chemical concentrations to which biota were exposed during and after drilling. Barium and light hydrocarbons were used as chemical tracers for water-based and non-aqueous-based fluids in a shallow water site in the Campos Basin, off the coast of Brazil, but since the site showed evidence of exposure to waste material from earlier drilling, the analysis needed to take into account the background concentrations of these compounds.

Using the statistical models described, comparisons were made among sampled areas and concentrations at unsampled sites were predicted. The models also allowed areas to be identified that were affected by the water-based and non-aqueous-based fluids used to drill two wells (BO22 and BO23) in clean and previously contaminated areas.

Keywords: **Bayesian spatial analysis; geostatistics; BACI; nested ANOVA model; mapping; affected area from drilling activities.**

1. INTRODUCTION

Environmental impact studies commonly evaluate the response of biological communities before and after their exposure to one or more agents of stress, relative to the response of communities not exposed to them. In this strategy, termed BACI (Before-After Control Impact), two areas must be identified *a priori* , one as an area that might be affected, whilst another, supposedly a control area. Both of them must be studied over time, at least once before and once after exposure to the stressing agents.

Since the distribution of contaminants in the environment is not uniform and considering that natural variation in biotic and abiotic factors serves as added noise when evaluating the response of biota to antropogenic factors,, the main challenge when using BACI strategy is to select and group sampling stations correctly in terms of the different factors of interest and to exclude effects that have arisen from the random elements that interfere.

This paper describes the statistical methodologies adopted in order to evaluate the effects of the discharge of cutting from oil and gas wells drilling activities on the marine benthic communities in the project "Environmental Monitoring of Offshore Drilling for Petroleum Exploration", named by its Portuguese acronym- MAPEM. The objective of this project was to evaluate the outcome of the discharges of cuttings from wells drilled with non aqueous drilling fluids (NAF) on both the meiofauna and the macrofauna at the Campus Basin in Brazil in two different locations, one in deep water an another one in shallow water column. The n-paraffin (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) was used as the organic base for the non aqueous drilling fluid.

The results from the deep waters have been described in Pulgati et al. (2008) while the present papers is based on the shallow water fidings.

The shallow area studied is located in the Bonito oil field, where wells BO-22 and BO-23 are operated by the company PETROBRÁS. The wells are at depths of 216 and

212 m respectively, mostly in the southern portion of the Campos sedimentary basin, over the upper continental slope, adjacent to the State of Rio de Janeiro, Brazil.

Usually, wells are drilled using different fluids, some water-based and others non-aqueous-based (denoted by WBFs and NAFs respectively) Many of the compounds present in them may also occur naturally in marine environments. For the purpose of identifying and distinguishing contributions from the well-drilling fluids, light hydrocarbons from C_{14} to C_{20} plus the unresolved complex mixture (UCM) denoted in this paper by *Linear C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}*, and barium (Ba) (Pozebon et al., 2008).were used as tracers for the drilling discharges for water based and the non aqueous fluid.

Biotic and abiotic variables were studied in three sampling periods extending over two years. The first cruise (MS1) preceded well-drilling and looked at the initial state of the environment before well-drilling began. The second cruise (MS2), three months after drilling, was to study possible environmental changes, whilst the third and final cruise (MS3), 22 months after drilling, was undertaken to look at the evolution in environmental conditions.

Chemical analyses of sediment samples collected on the first cruise showed that barium and light hydrocarbons were present at various sampling sites (Peralba et al., in this issue), at levels considerably higher than those observed at reference sites, indicating that the region under study had already been affected by previous drilling activities. This significantly increased the complexity of the study, so that it became necessary to set up two different regions to study the effects of drilling fluids and cuttings: namely areas that were relatively clean and those that had been previously exposed to the stress factors of interest. In the first of these, barium and light hydrocarbons represented new stimuli to a benthic community not adapted to them,

while in the second area a community already exposed to such contaminants was subject to additional applications.

The objective of the study reported here was to use Bayesian geostatistical models to map the regions described above. The spatial definition resulted in the development of a concept termed a spatial-temporal mask by which it was possible to observe and distinguish between natural and anthropogenic changes in benthic community structure resulting both from earlier well-drilling and, in particular, from drilling wells BO22 and BO23 using WBFs and NAFs.

In addition, a two-way hierarchical statistical model with fixed and random effects was set up to analyze the responses of benthic macrofauna and meiofauna structures in regions subject to drilling-fluid effects and simultaneously to compare these responses with the natural variation in the control or reference areas.

According to Green and Montagna (1996), “the design of an impact/monitoring study and statistical approaches to interpretation of results from that study are inseparable”. The authors present the methods used in the Gulf of Mexico Offshore Operations Monitoring Experiment (GOOMEX) for relating biological response variables to environmental predictor variables (see also Kennicutt et al.,1996). The scientific concept of the GOOMEX project was important to the configuration of a similar study at the Brazilian coast.

2. SAMPLING SCHEME AND THE BACI APPROACH

2.1 – Initial assumptions

The initial MAPEM proposal for shallow waters was to explore the possible effects from the use of WBFs and NAFs in just a single exploratory well in a region free from the effects of earlier activity and well away from sources of interference. The

sampling scheme involved sample collection at a network of sites on radii centered on the well and at distances 50, 100, 300, 500 e 2500 m from it, without assuming any region of preferential deposition of drilling waste, so that on the second and third cruises a broad picture of the real points of deposition and redistribution of waste material would be obtained, together with a comparison between the true regions of deposition and those predicted by the Offshore Operators Committee (OOC) dispersion model, that allows estimating the fate of drilling discharges (Pivel et al.,2008 in this issue)

Using the BACI approach, the region of possible impact (labeled “Impact”) was defined and limited to 500 meters around the well, for observation at 48 sampling sites whilst the “Control” region was taken to be at 2500 meters from the well head, with three sites to the north (N) and three to the south (S) at a distance sufficiently large for natural environmental conditions to be maintained over time, independent of drilling activity (Figure 1).

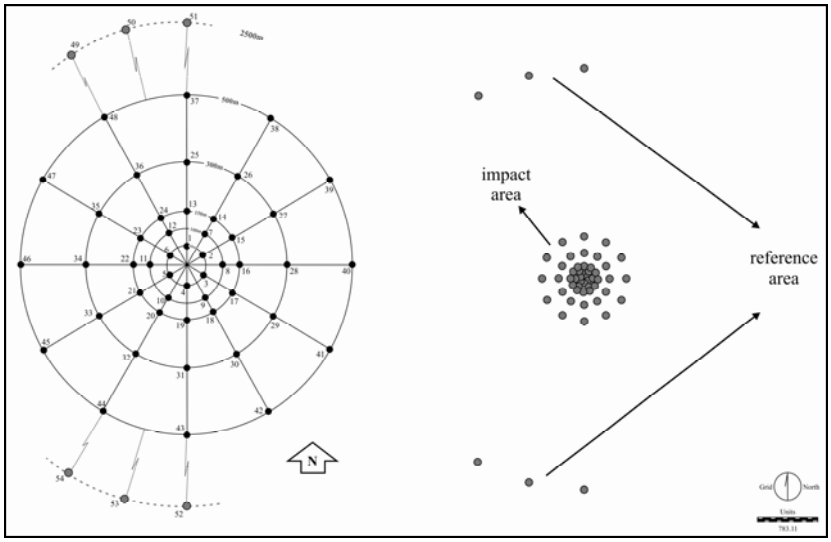


Figure 1. Planned sampling scheme set up using BACI (*Before-After Control-Impact)* scheme.

2.2 Sampling scheme actually adopted

The central reference point of the sampling scheme shown in Figure 1 was the well BO-23, to be drilled after the first sampling cruise MS1. Contrary to what was planned, however, two production wells were drilled, one at the site of BO-23 between February and April 2002 and the other BO-23 between May and June 2002 at a point 199m east of BO-23. Results obtained from samples collected on MS1 showed that in the study area there already existed evidence of earlier exploration and production activity that was sufficient to show up statistically significant differences between various sampling sites in analyses of barium and light hydrocarbons. It was therefore necessary to change the sampling strategy and analysis of data to that reported in the present paper, no longer assuming that the area was initially uniformly clean and typical of what would be found before drilling an exploratory well, but taking account of the reality in which the area was initially heterogeneous and already affected by the presence of chemical compounds common to drilling fluids.

In this new scenario and with the need to accommodate logistic changes resulting from production activities, a new sampling network with 74 sites was devised for the MS2 cruise. Of these 74 sites, 68 were located along seven radii centered on wells BO-22 and BO-23, extending to a distance of about 500 m (Figure 2). Six complementary sites identified as a Control or Reference region were at 2500 m from the center of the well area.

Faced with presence of pipelines laid down in the period between MS1 and MS2 the sampling design was therefore changed. The characteristic installations in a production area (pipelines, Christmas-tree structures) defined exclusion areas within which it was not possible to collect sediment samples for security reasons, despite the fact that such areas were highly relevant to the study. Of the 74 sampling sites defined

earlier, only 61 were sampled in MS2. For MS3, operating conditions in the locality were known and the MS3 sampling scheme was the same as that of MS2. However only 54 samples were collected as a consequence of operational problems related to the recovery of bottom sediments (Figure 2)

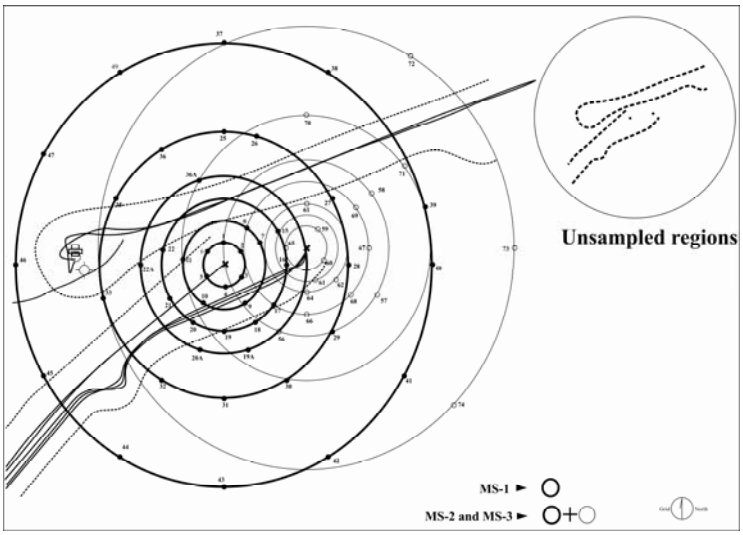


Figure 2. Sampling scheme designed for cruises MS2 and MS3, allowing for the two drilled wells BO-22 and BO-23 with pipelines and non-sampled exclusion areas. Reference sites are not shown.

Despite these difficulties, it was still possible to follow the strategy for sample collection and data analysis using the BACI approach (*Before-After Control-Impact)*, since the biotic and abiotic states in areas not directly sampled were estimated by using Bayesian geostatistical models.

3. THE GEOSTATISTICAL MODEL

Geostatistical models have been used in many fields of science for data varying continuously in space (Journel and Huijbregts, 1978; Cressie, 1991; Diggle and Ribeiro Jr., 2006). These models were used to predict the geographic distribution of the

variables observed in the MAPEM project and to identify and map areas of higher or lower concentrations. The background values of contaminants before drilling were estimated for the total area and areas altered by drilling activity were predicted, allowing for the residual effects from earlier drilling.

The basic notation for geostatistical data is $(x_i, z_i): i = 1, \Lambda, n$, where x_i is a vector of spatial co-ordinates and z_i denotes values observed at the location x_i. The model consists of an underlying stochastic process $S(x)$ and a statistical model for data $Z = (Z_1, \Lambda, Z_n)$, conditional on this stochastic process. The spatial stochastic process $S(x)$ is Gaussian if the joint distribution of $S(x_1), \Lambda, S(x_n)$ is multivariate Gaussian for any integer n and any set of locations x_i. The process is stationary if the mean and the variance of $S(x)$ are the same for every x_i and if the correlation between $S(x)$ and $S(x')$ depends only on $x - x'$, that is, depends only on the distance between two points in space (Diggle and Ribeiro, 2006).

In none of the three cruises MS1, MS2 and MS3, could stationarity be assumed because past and present drilling activity had altered the concentrations of tracers at specific locations. Different solutions were adopted for such cases. In the first study MS1, it is assumed that the spatial stochastic process for barium and light hydrocarbons is described by a model in which the explanatory (independent) variables are arsenic and cobalt. However in MS2 and MS3 trends were non-linear and different methods of nonparametric regression were used to remove them, resulting in “residuals” that could be considered as generated by a stationary Gaussian process. To estimate concentrations at sites where no measurements were taken, interpolated values were obtained by Bayesian Gaussian kriging. This assumes that the measurements at different sites are from a multivariate Gaussian distribution, for which the covariances in the variance-covariance matrix were expressed as exponential functions of the distances between

point-pairs (Diggle et al., 1998). More specifically, the correlation between the observations S_i and S_j of the vector $S = (S_1, \mathrm{K}, S_n)$ of random variables was defined by:

$$\rho(\upsilon) = \exp\{-(\upsilon/\phi)^k\},$$

where $\phi > 0$ and $0 < k \leq 2$; $\rho(\upsilon)$ is the correlation function, υ is the distance between two sample locations and ϕ is the parameter that describes the rate of decrease in correlation as the distance between observation points increases and κ is the scalar parameter that controls the spatial smoothing.

Formally, the geostatistical model conditional on $S(x)$ for the data $(x_i, z_i): i = 1, \Lambda, n$ can be written as:

$$\left[Z_i \;/\; \{S(x): x \in R^2\} \right] \sim N(\mu(x_i), \tau^2) \qquad \text{(a)}$$

where, if the process is stationary, as for the residuals from the non-parametric regression models in MS2 and MS3, the mean vector is given by

$$\mu(x) = \beta + S(x) \qquad \text{(b)}$$

and in MS1, where the process is non-stationary

$$\mu(x) = \sum_{k=1}^{p} f_k(x)\,\beta_k + S(x). \qquad \text{(c)}$$

In the first expression (a), Z_i is the observation of the random variable $Z(x)$ at the *i*-th sampling site (*i=1…n*) determined by the co-ordinate of vector x_i. In the expressions (b) and (c), $\mu(x)$ is a vector describing the central position of the probability distribution at **x**. In (b), β is the scalar parameter for the spatial mean. In (c), β_k is the scalar parameter associated with the *k*-th explanatory variable $f_k(x)$, which may, for example, define the value of an environmental variable at the site with co-ordinates **x**. Thus, in Equation (c) above, $f_k(x)$ (*k=1…p*) is the known spatial variability of the data and $S(x)$

is the unknown spatial variability. The parameter τ^2 in (a) represents the unknown, non-spatial variability.

In MS1, when earlier effects of drilling were observed, the mean $\mu(x)$ of the spatial process was a function of the explanatory variables arsenic and cobalt allowing efficient decomposition of spatial variability and minimizing the unknown non-spatial component represented by τ^2. The component $S(x)$ in (c) was used for identify the region affected by earlier exploration and hydrocarbon production. Spatial interpolation or predictions at locations of interest were obtained by use of Bayesian inference to estimate the set of parameters θ, where $\theta = (\beta, \tau, \phi, \sigma^2, \kappa)$; their posterior distribution was calculated using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) methods, from which 95% credible intervals (or probability intervals) were calculated for the set of parameters θ. The softwares WinBUGS 1.4 (Lunn et al., 2000) and R package (2001) were used for this purpose.

4. MAPPING THE AREA WITH RECORDS OF DRILLING

When mapping tracers of drilling activity, two aspects were considered: the earlier activities and the results of drilling wells BO-22 and BO-23. The drilling process was divided into three separate phases: the first, known as the non-return phase, is characterized by the use of water; the second, using water-based fluids WBFs, consisting of water, clays, principally barium sulphate together with some chemical additives; the third, using NAFs, in this case linear paraffins with low levels of aromatics.

Results from exploratory analyses showed wide variation in the values of the barium and light hydrocarbon tracers, possibly in consequence of earlier activities in the study area. This showed the need for a strategy which could identify which sampling

sites had been affected, by means of the analysis of tracer background levels. In MS1 regions were therefore identified that had previously received the tracers used to track drilling fluid dispersion, so that it was possible to measure the already-existing effects on biological communities.

Concentrations of (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) measured on the cruise MS1 varied from 0.02 ppm to 6.56 ppm, with the higher values occurring to the north of the sampling scheme. The remaining sites had values similar to those found in the reference regions.

Concentrations of barium in MS1 ranged from 224 ppm to 3540 ppm with the higher values at sites to the north, west and north-west of the sampling scheme. The remaining sites up to 500 m from the centre showed values similar to those of the reference area. Using the methods described in Section 2.2, tracer concentrations were estimated and the regions affected by earlier drilling activities in the study area were defined.

Figure 3 shows areas where concentrations of barium and/or light hydrocarbon tracers were significantly different from the values to be expected in the study area, using a 95% credibility region.

Thus the spatial heterogeneity in the tracers used in the study was determined in the first cruise MS1. With this approach the model indicates where possible changes in benthic communities associated with earlier drilling may occur, although this is of secondary interest in the MAPEM Project. The deposition of material originating from previous drilling occurred in areas to the north and northeast of the sampling network centre.

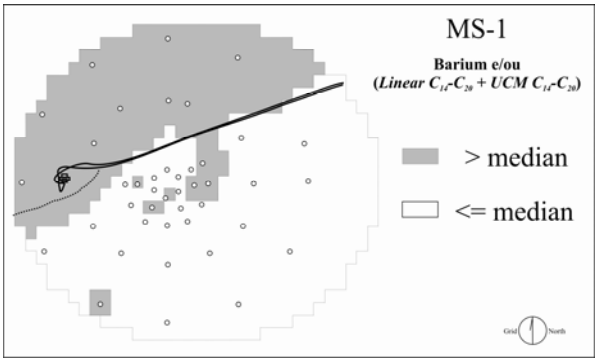


Figure 3 – Areas in which significantly different levels of the tracers (*Linear C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}*) and barium were found in MS1.

In MS2, the tracer (*Linear C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}*) showed concentrations of 0.03 ppm up to 3146.98 ppm. Using geostatistical analysis, the scenarios identified in MS1 and MS2 could be compared by multiple comparisons between the means of the two surfaces, pixel by pixel. This defined the region in which this tracer concentration had been significantly altered.

The second tracer, barium, showed concentrations in MS2 of 135 ppm up to 12759 ppm. Comparison of the MS1 and MS2 geostatistical surfaces defined by barium concentrations showed which region had been altered by drilling the wells BO-22 and BO-23.

The regions where tracer concentrations were altered illustrate the drilling phases in which WBFs and NAFs had been used. The changes seen in the tracer (*Linear C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}*) occur in the same region as the changes in barium, although in a less spatially continuous pattern, revealing distinct processes of dynamic deposition of material. The results show evidence that the deposition of waste material from drilling is not necessarily related to distance from the wells.

The sampling sites fell into six groupings with different characteristics between MS1 and MS2. After defining the regions, however, some groups were found to have

small numbers of sites, increasing the complexity of evaluating the biological responses by ANOVA when all three cruises are treated together.

For this reason, it was decided to combine two of the areas; they have common characteristics, both lying within in the region shown in MS1 to have been affected by earlier drilling activity and both having received additional barium and/or (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) when the wells BO-22 and BO-23 were drilled, as part of the present study.

The same modeling strategy was used in the third cruise MS3. The variable (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) showed concentrations varying from 0.01 ppm to 51.75 ppm. The period covered by the three cruises controls the same components, adding to the information about a region which, in MS3, returned to the level of background concentrations. Details of the components are set out in Section 3.4.

The barium tracer in MS3 occurred at concentrations between 52.95 ppm and 9524 ppm and regions with different characteristics were again defined: one in particular suggested a recovery in terms of barium levels, towards the concentration levels observed before the MAPEM Project monitoring began.

4.1 Integration of affected regions found in MS1, MS2 and MS3

The first objective was to distinguish between different components of temporal and spatial variation, whether natural or resulting from drilling activity. Figure 4 shows regions where tracer concentrations had been altered by WBFs and NAFs in drilling fluids, as identified in (a) MS1, (b) MS2 and (c) MS3.

After concluding the geostatistical modelling, it was possible to establish groups of sampling sites with similar characteristics in terms of the tracers, showing the different drilling phases (Figure 4). The Control region showed no significant change throughout the three cruises.

A second set of sampling sites showed evidence of previous activity. The region defined by this set was divided into two sub-regions. The first is a group of sites showing evidence of earlier activity but which did not receive contributions from the wells being monitored; this group was labeled **base stimulation (BS)** and was located towards the north of the sampling scheme. The second, which also showed evidence of earlier activity in MS1, registered barium and light hydrocarbon concentrations resulting from operations in the locality between MS1 and MS2. The label given to this region is BS_WBF_NAF (base stimulation plus WBFs plus NAFs).

The same group in MS3 is characterized by a return to baseline levels observed in MS1 for concentrations both of barium and (*Linear C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}*). The region BS_WBF_NAF in MS3 shows time variation of two kinds: the increase found in MS2 and the return to baseline levels in MS3. This group was used to identify the component of variation in MS1 for biological communities affected by prior activities. In MS2 it shows an additive effect of base stimulation **BS**. The biological response in MS3 is therefore linked to the recovery to initial baseline levels of MS1 after receiving additional tracer inputs arising from the wells being currently monitored, as well as the effects of earlier drilling activity.

The fourth group of sampling sites did not show any effects of earlier drilling in MS1 but was characterized in MS2 by significant levels of barium and (*Linear C_{14}-C_{20} + UCM C_{14}-C_{20}*) arising from the drilling of wells BO-22 and BO-23. The region continued to show effects in terms of the two tracers in MS3; the label given to this region is **WBF_NAF,** for contributions from both water-based and non-aqueous based phases of drilling.

The fifth region showed no evidence of earlier activity in MS1, but in MS2 there was a significant increase in barium concentration which continued in MS3. The label for this region is **WBF**, indicating contribution from the water-based drilling phase.

Figure 4 shows the groups in MS1, MS2 e MS3. Regions shown in this figure are defined by temporal and spatial variation observed in all three cruises. To test for biological responses using ANOVA, the regions defined in Figure 4 (b) were redefined for MS1, so that the model could deal with any possible spatial variation in biological communities existing before the wells were drilled.

The same groups are identified in MS1 and in MS2, but the definition in MS3 is not exactly the same. By definition, the group of sites in BS_WBF_NAF shows evidence of earlier activity supplemented in MS2 by concentrations of barium and (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) resulting from drilling the wells under study. This region is characterized in MS3 by a return to the levels of concentrations of MS1.

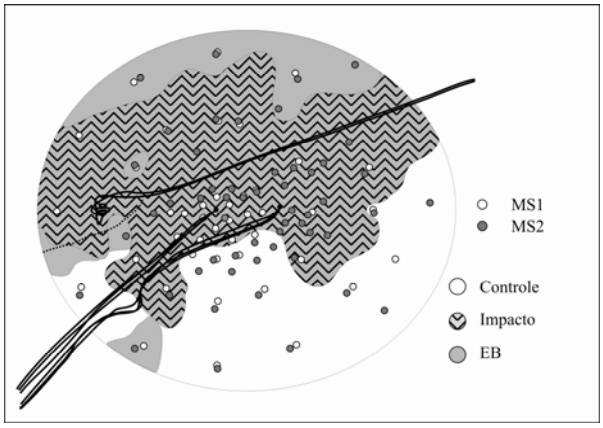


Figure 4 – Regions shown to be altered by drilling fluids in (a) MS1, (b), MS2, (c) MS3

5. ANALYSIS OF VARIANCE (ANOVA) MODEL: MODEL DEFINITION AND SPATIAL-TEMPORAL VARIANCE COMPONENTS.

With the spatial-temporal mask, the analysis of variance model was structured to test hypotheses about possible changes in biological response. The definition of regions

altered by earlier activity and physical and chemical changes resulting from drilling the new wells, resulted in components of variance which are not reproduced in all three sampling operations. The solution adopted was to construct a hierarchy of components associated with the tracers within each of the larger regions, which were treated as fixed over time. To do this, the regions shown in Figure 4 were allocated to a hierarchy, based on characteristics that were the same in all cruises. One region was identified as **CONTROL**; a second, showing the effects of previous drilling, was termed **BS** and a third, affected both by earlier drilling and by the new wells being monitored, was termed **IMPACT** (Figure 5).

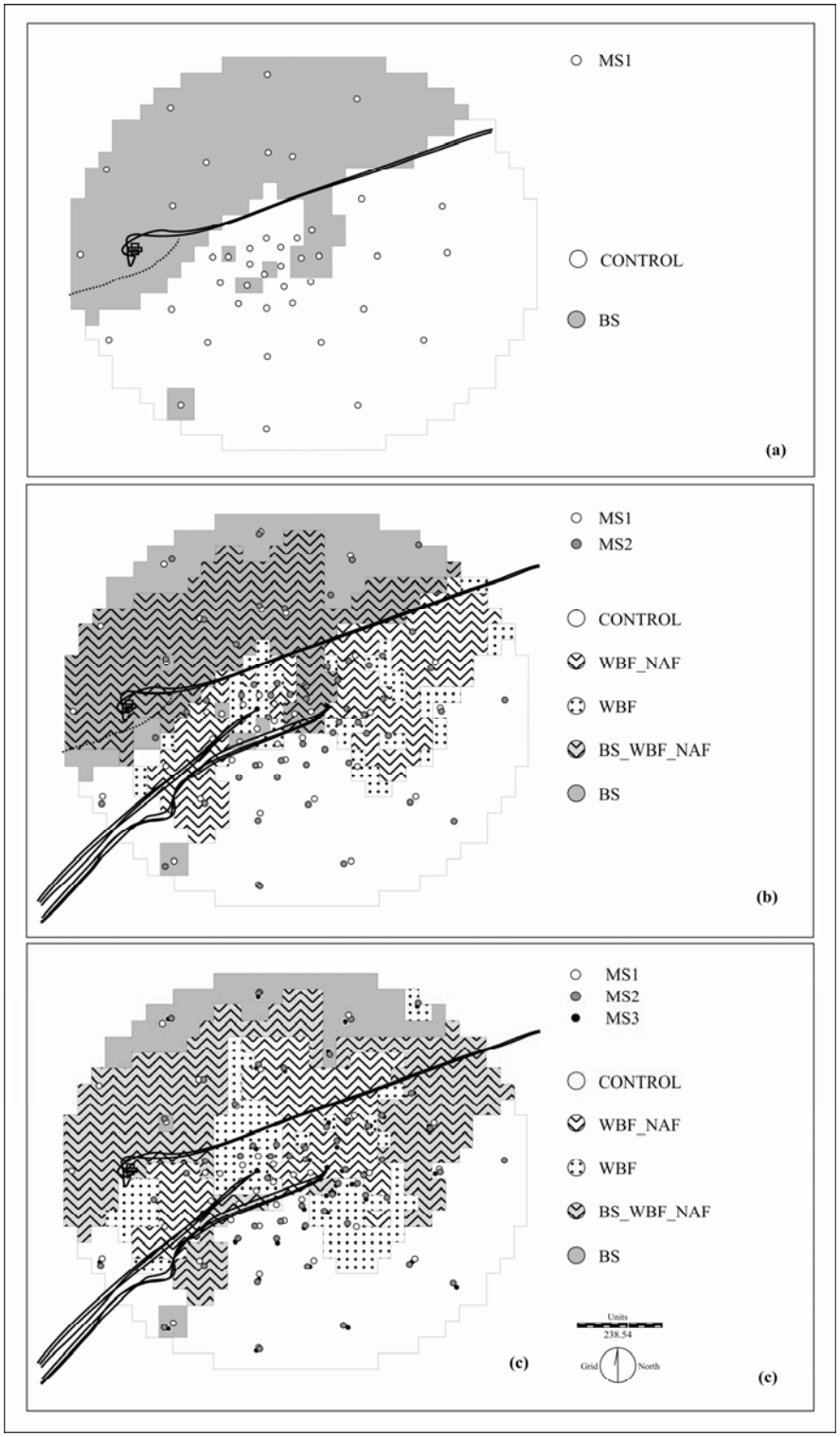


Figure 5 5. CONTROL, BS and IMPACT regions.

In some factorial designs, like that of the present study, the levels of the factors being tested are similar but not identical for different levels of another factor. In such cases, it is appropriate to use a nested design, in which the levels of one factor are allocated within the levels of another (Montgomery, 1997).

Table 1 presents the ANOVA factors considered and their respective levels. The factor Cruise represents the time component of the model, with three levels MS1, MS2 e MS3, the three cruises. The factor Fluid is the component of stimulus, characterized initially by the absence of drilling fluid (CONTROL); by the presence of barium and (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) in the first cruise MS1 (BS); by the presence of barium in regions which had none in MS1 (WBF); by the presence of both barium and (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) in regions which showed no evidence of previous drilling in MS1 (WBF_NAF) and by the presence of barium and (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) in regions which did show evidence of earlier drilling effects in MS1 (EB_WBF_NAF). Although they occur in all three cruises, the levels of the factor Fluid do not remain the same over time. For example the definition of BS_WBF_NAF in MS1 is not exactly the same as in MS3. The strategy was to repeat the regions described in Figure 4.1.1 over time, now identified as levels of the factor C-I (CONTROL-IMPACT).

Table 1 – Definition of the ANOVA factors and respective levels (nested model).

ANOVA Factors	**Levels of the Factors**
Factor **Cruise** - represents the temporal component in the model and is described by the three sampling periods MS1, MS2 and MS3	**1. MS1**: before drilling; **2. MS2**: 3 months after drilling; **3. MS3**: 22 months after drilling.
Fator **C_I (Control-Impact)** - represents the spatial component of the model, being made up of regions within the sampling network which retained their common characteristics over time (i.e., over all of MS1, MS2 e MS3), given the inputs of WBFs and NAFs after wells BO-22 and BO-23 were drilled	**1. CONTROL**: region showing no effects of drilling fluids in any of the three cruises; **2**. **BS (Baseline Stimulus)**: region showing evidence of barium and NAFs before drilling and which received neither WBFs or NAFs after BO-22 and BO-23 were drilled; **3. IMPACT**: region which received barium and NAFs after BO-22 and BO-23 were drilled, in regions with or without evidence of being affected by earlier drilling activity.
Factor **Fluid -** represents the component of stimulus resulting from current drilling activity, as shown by tracers from the different drilling phases. The levels of the factor Fluid do not remain the same over time	**1.CONTROL**: region with no evidence of drilling fluids; **2.BS**: defined by the presence of barium and or NAFs before drilling (baseline stimulus) **3.WBF**: region showing evidence of water-based drilling fluid in regions with no evidence of baseline stimulus before drilling; **4.WBF_NAF**: region defined by evidence of both water-based and non-aqueous-based drilling fluids in regions that showed no evidence of baseline stimulus before drilling **5.BS_WBF_NAF**: region with baseline stimulus plus contribution of WBFs and NAFs.after drilling

Table 5.1 – Definition of the factor Cruise, with three levels MS1, MS2 and MS3.

ANOVA: Factor Cruise **Cruise levels**	**Definition**
MS1: before drilling; **MS2**: 3 months after drilling; **MS3**: 22 months after drilling.	The factor Cruise represents the temporal component in the model and is described by the three sampling periods MS1, MS2 and MS3.

Table 5.2 – Definition of the factor Control-Impact with three levels CONTROL, BS and IMPACT.

ANOVA factor: C_I (Control-Impact) **Factor levels**	**Definition**
CONTROL: region showing no effects of drilling fluids in any of the three cruises; **BS (Baseline Stimulus)**: region showing evidence of barium and NAFs before drilling and which received neither WBFs or NAFs after BO-22 and BO-23 were drilled; **IMPACT**: region which received barium and NAFs after BO-22 and BO-23 were drilled, in regions with or without evidence of being affected by earlier drilling activity.	The factor **C_I** represents the spatial component of the model, being made up of regions within the sampling network which retained their common characteristics over time (i.e., over all of MS1, MS2 e MS3), given the inputs of WBFs and NAFs after wells BO-22 and BO-23 were drilled.

Table 5.3 – Definition of the factor Fluid and its five levels.

ANOVA factor: Fluid **Factor levels**	**Definition**
CONTROL: absence of drilling fluids; **BS**: baseline stimulus; **WBF**: water-based drilling fluid; **WBF_NAF**: both water-based and non-aqueous-based drilling fluid; **EB_WBF_NAF**: baseline stimulus + contribution of WBFs and NAFs.	The factor Fluid represents the component of stimulus resulting from current drilling activity, as shown by tracers from the different drilling phases. This factor has five levels:- **CONTROL** – characterized by the absence of stimulus; **BS** – defined by the presence of barium and or NAFs in MS1, from earlier drilling; **WBF** – defined by evidence of barium input in regions that showed no evidence of baseline stimulus in MS1; **WBF_NAF** – defined by evidence of inputs of barium and NAFs in regions that showed no evidence of baseline stimulus in MS1; **EB_WBF_NAF** – defined by evidence of inputs of barium and NAFs in regions that did show evidence of baseline stimulus in MS1.

A nested ANOVA model with factorial structure for main effects and certain two-factor interactions was used to test the effects of factors described in Tables 4.1, 4.2 e 4.3. Its specific form was as follows (PROC MIXED, SAS Institute Inc., 1999-2001):

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{k(j)} + \tau\beta_{ij} + \tau\gamma_{ik(j)} + \delta_{l(k)} + \varepsilon_{(ijk)l}$$

where the subscripts i refer to the Cruise factor level, j to the level of factor C-I, k to the level of factor Fluid and l to the n-th sampling site.

Thus, $i = 1,2,3$; $j = 1,2,3$; $k = 1...5$; $l = 1...n$.

The term $\tau\beta_{ij}$ represents the interaction between the factors Cruise and C_I; $\tau\gamma_{ik(j)}$ the interaction between factors Cruise and Fluid, nested within the factor C_I. The term τ_i refers to the temporal component, whilst β_j refers to the presence or otherwise of the spatial component relative to factor C_I. The term $\gamma_{k(j)}$ refers to the presence or otherwise of the spatial component of factor Fluid, within the levels of factor C_I. The term $\delta_{l(k)}$ gives the error variance appropriate for testing the significance of differences between levels of the factor Fluid and $\varepsilon_{(ijk)l}$ is the non-observable error in each observation.

The interaction between the factors Cruise and C_I tests the hypothesis that mean values do not differ significantly across the Control, Impact and BS groups, for each level MS1, MS2 and MS3 of factor Cruise.

The interaction between factors Cruise and Fluid tests the hypothesis that mean values do not differ significantly across the groups WBF, WBF_NAF and EB_WBF_NAF of the Impact region, for each Cruise level MS1, MS2 e MS3. The hypotheses tested by the two interaction terms in the model allow possible impacts of both past and recent drilling to be simultaneously verified, taking into account the release of tracers in the different drilling phases.

6. TOTAL AREA PREDICTED BY THE GEOSTATISTICAL MODEL FOR REGIONS, BASED ON THE CONCEPT OF SPATIAL-TEMPORAL MASK.

The total area of the study is approximately 1.170.833,40 m2. Table 2 shows the area of each region as determined by the geostatistical model. Table 6.3 shows the variation in area of each region, over the three cruises.

Table 6.2 – Area corresponding to each region defined by the geostatistical model

Área x 1000 (m^2) / Group	MS1	MS2	MS3
CONTROL	714.38	417.43	386.88
BS	456.45	142.54	117.08
WBF	----------	84.84	147.63
WBF_NAF	----------	212.11	167.99
BS_WBF_NAF	----------	313.92	351.25

Table 6.3 – Variation in area of each region, between cruises

Área x 1000 (m^2) / Group	Variation MS1 – MS2	Variation MS1 – MS3	Variation MS2 – MS3
CONTROL	(-) 296.95	(-) 327.49	(-) 30.54
BS	(-) 313.92	(-) 339.37	(-) 25.45
WBF	(+) 84.84	(+) 147.63	(+) 62.78
WBF_NAF	(+) 212.11	(+) 167.99	(-) 44.12
BS_WBF_NAF	(+) 313.92	(+) 351.25	(+) 37.33

The CONTROL region grew smaller between cruises MS1 and MS3. In compensation, in MS3 the region EB_WBF_NAF had an area of approximately 351.250,02 m^2. This corresponds approximately to the size of region giving baseline levels observed in MS1, but which received barium and (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}) from the new wells being monitored. Of the total area 1.170.833,40 m^2 predicted by the model in MS3, an area 147.626,82 m^2remained affected, primarily by barium, whilst an area of about 167.989,14 m^2remained jointly affected both by barium and by (*Linear* C_{14}-C_{20} + *UCM* C_{14}-C_{20}). Of the total area being modeled, 610.869,60 m^2 became affected after the new wells were drilled, of which 315.615,95m^2 remained affected by inputs of one or other of the tracers.

6. CONCLUDING REMARKS

The definition of regions affected by drilling activities in the Shallow Water Phase of the MAPEM Project, using Bayesian geostatistical modeling with the construction of a spatial-temporal mask, was shown to be efficient in terms of differentiating between the real effects that resulted from the use of different drilling fluids. This strategy of separating the regions determined the nature of subsequent analyses in the project (Santos et al; Netto et al., this issue), for comparing mean intensities of biotic variables between regions, in order to understand the inter-relationships between different variables in the project in all phases of statistical analysis.

The strategy of isolating components of spatial-temporal variation by using the BACI concept to distinguish between different phases of drilling wells BO-22 and BO-23, with detection of changes resulting from previous activity and natural variation, was shown to give satisfactory degrees of confidence in the statistical analysis of results.

The modeling strategy developed in the MAPEM Project for the spatial distribution of tracers for different drilling fluids - barium and the tracer (*Linear* C_{14}-C_{20} *+ UCM* C_{14}-C_{20}) – enabled non-linear models to be set up for biological indicators of the meiofauna and macrofauna components.

ACKNOWLEDGMENTS

Funding and support for this work was shared by FINEP/CTPETRO, IBP and FAURGS through agreement Edital N º 03 / 2000 and through a consortium between the Federal Universities of Rio Grande do Sul (UFRGS) and Santa Catarina (UFSC). We thank Robin T. Clarke for helpful comments on the manuscript.

References

Corrêa, I.C.S., Toldo Jr., E.E., Toledo, F.A., 2008. Seafloor geological impacts associated with a short-scale drilling disturbance. Deep-Sea Research II, in press.

Cressie, N.,1991. Modeling growth with random sets. In Possolo, A. (Ed.) Spatial Statistics and Imaging. Lecture Notes-Monograph Series, Vol. 20. Institute of Mathematical Statistics, Hayward, CA, 31-45.

Diggle, P.J., Moyeed, R.A., Tawn, J.A., 1998. Non-Gaussian Geostatistics (with Discussion). Applied Statistics, 47, 299-350.

Diggle, P.J., Ribeiro Jr.,P.J., 2006. Model-Based Geostatistics. Springer Series in Statistics; Springer Verlag NY.

Eastman J.R., 1999. Guide to GIS and Image Processing. Volume 2, Idrisi32 Release 2. Worcester, Clark University, USA.

Green, R.H. and Montagna, P., 1996. Implications for monitoring: study designs and interpretation of results. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 53: 2629-2636.

Handcock, M.S., Stein, M.L., 1993. A Bayesian analysis of kriging. Technometrics 35, 403-410.

Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 1978. Mining Geostatistics. London: Academic Press.

Kennicutt, M.C., Green, R.H., Montagna, P., Roscigno, P.F.,1996. Gulf of Mexico Offshore Operations Monitoring Experiment (GOOMEX), Phase I: Sublethal responses to contaminant exposure – introduction and overview. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 53: 2540-2553.

Lunn, D.J., Thomas, A., Best, N. and Spiegelhalter, D., 2000. WinBUGS: A Bayesian modelling framework: concepts, structure and extensibility. Statistics and Computing, 10:325--337.

Bernier, R., Garland, E., Glickman, A., Jones, F., Mairs, H., Melton, R., Ray, J., Smith, J., Thomas, D., Campbell, J, 2003**.** Environmental aspects of the use and disposal of non aqueous drilling fluids associated with offshore oil & gas operations. International Association of Oil & Gas Producers, Report No 342.

Montagna, P.A., Harper, D.E., 1996. Benthic infaunal long-term response to offshore production platforms in the Gulf of Mexico. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 53, 2567-2588.

Montgomery, D.C., 1997. Design and Analysis of Experiments. 4th Ed. New York: John Wiley.

Moyeed, R.A., Clarke, R.T. ,2005. The use of Bayesian methods for fitting rating curves, with case studies. Advances in Water Resources, 28, 807-818.

Netto, S.A., Fonseca, G. and Gallucci, F. Effects of drill cuttings discharge on meiofauna communities of a shelf break site in the Southwest Atlantic (this issue).

Pivel, M., A., G., Freitas, C., M.d. S, 2008.Evaluation of modeling as a tool to determine the potential impacts related to drilling wastes in the Brazilian offshore. Deep-Sea Research II, in press.

Pivel, M.A.G. and Freitas, C.M.S (2008) Evaluation of the OOC Model as a tool to determine the potential impacts related to drilling wastes in the marine environment in the Brazilian offshore, in this issue

Peralba et al. ,Monitoring hydrocarbons, metals and arsenic in marine sediments during drilling activities using non-aqueous fluids. . This issue

Pozebon, D., Peralba, M.C.R, Santos, J.H.C., Maia, S.M., Pizzolato, T.M., 2008. Metals, arsenic and hydrocarbons monitoring in marine sediment during drilling activities using NAFs. Deep-Sea Research II, in press.

Pulgati, F.H., Fachel, J.M.G., Ayup-Zouain, R.N., Landau, L., 2008. Bayesian spatial prediction of the area affected by drilling discharges from an exploratory well

using water-based and non aqueous-based fluids in Campus Basin, Brazil. Deep-Sea Research II, in press.

R Development Core Team (2005). R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. http://www.R-project.org.

Riboldi, J., Pretto, K., Feyh, M.H., Boffo, G., 2002. SAS Versão 8.2: Modelos Mistos e Medidas Repetidas. Cadernos de Matemática e Estatística, Série B, Nº64. Porto Alegre: Instituto de Matemática. UFRGS,.

Sampson, P.D., Guttorp, P., 1991. Power Transformation and Tests of Environmental Impact as Interaction Effects. The American Statistician, 45 (2), 83-89.

Santos, M.F.L., Lana, P.C., Fachel, J.M.G., Pulgati, F.H., 2008. Effects of non-aqueous fluids cuttings discharge from exploratory drilling activities on the deep-sea macrobenthic communities. Deep Sea Research II, in press

Santos, M.F.L., da Silva, J., Fachel, J.G. and Pulgati, F.H. Effects of non-aqueous drilling-fluid discharge on shelf-break macrobenthic communities in the Campos Basin, Brazil, in this issue.

Stewart-Oaten, A., Murdoch, W.W., Parker, K.R., 1986. Environmental Impact Assessment: “Pseudoreplication” in Time? Ecology, 67(4), 929-940.

Wiens, J.A., Parker, K.P., 1995. Analysing the effects of accidental environmental impacts: approaches and assumptions. Ecological Applications, 5(4), 1069-1083.

PROJETO MAPEM

* Concedente:

Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP

Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT

Plano Nacional de Ciência e Tecnologia do Setor Petróleo e Gás Natural – CTPETRO

* Conveniente:

Institutos de Geociências, Química, Matemática e Informática – UFRGS

Núcleo de Estudos do Mar – UFSC

* Interveniente:

Instituto Brasileiro do Petróleo- IBP