



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE POTENCIAL ESPONTÂNEO: ENSAIOS COMPUTACIONAIS

ANA CAROLINA DE CARVALHO MANÇUR

SALVADOR – BAHIA
SETEMBRO – 2017

**Modelagem e Interpretação de Dados de Potencial Espontâneo: Ensaios
Computacionais**

por

ANA CAROLINA DE CARVALHO MANÇUR

Orientador: Profa. Dra. Suzan Sousa de Vasconcelos

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

COMISSÃO EXAMINADORA

Dra. Suzan Sousa de Vasconcelos

Dr. Hédison Kiuity Sato

Dr. Joelson da Conceição Batista

DATA DA APROVAÇÃO: 05/09/2017

Aos meus pais.

Resumo

O estudo de modelos que simulam fontes geradoras de potencial espontâneo, bem como os resultados da modelagem direta e inversa dos mesmos, são úteis no mapeamento de fontes de corrente que estariam associadas a um ambiente de plumas de contaminação. Foram criados modelos simulando diferentes configurações de cargas e, posteriormente, aplicados diferentes vínculos de inversão para encontrar soluções únicas e estáveis, que reproduzissem a resposta de potencial espontâneo nesses modelos. Os diferentes vínculos de inversão aplicados foram comparados entre si com o objetivo de estabelecer quais obtiveram os melhores desempenhos na localização, determinação de polaridade e delineamento das cargas. Este estudo é uma importante ferramenta para a compreensão dos fenômenos geradores de anomalias de potencial espontâneo na hidrogeologia para o mapeamento de zonas de descarga e recarga de aquíferos e para a determinação de zonas ativas de biodegradação em aterros sanitários e áreas contaminadas, através da indicação de atividades de oxi-redução. O vínculo de inversão que impõe a informação *a priori* de fontes compactas apresentou, de forma geral, maior resolução no mapeamento das fontes.

Abstract

The study of models that simulate sources generating spontaneous potential, as well as the results of direct and inverse modeling, are useful in the mapping of current sources that would be associated to a contamination plume environment. We created models simulating different load configurations and later applied different inversion constraints to find unique and stable solutions that reproduced the spontaneous potential response in these models. The different inversion constraints applied were compared with each other in order to establish which ones obtained the best performance in the location, determination of polarity and load delineation. This study is an important tool for the understanding of the phenomena that generate spontaneous anomalies in hydrogeology for the mapping of zones of discharge and recharge of aquifers and for the determination of active zones of biodegradation in landfills and contaminated areas, through the indication of oxy-reduction activities. The inversion link that imposes the *a priori* information of compact sources presented, in general, greater resolution in the mapping of the sources.

Sumário

Resumo	3
Abstract	4
Introdução	10
1 Biogeologia e respostas elétricas	13
1.1 Contaminação por aterros de resíduos	13
1.2 Método do potencial espontâneo (PE)	14
1.2.1 Modelo de geobateria	15
1.2.2 Modelo de biogeobateria	16
1.2.3 Aquisição e fontes de ruído	17
1.3 Método da eletrorresistividade (ER)	18
1.3.1 Técnica e aquisição	18
1.3.2 Apresentação e interpretação dos dados	18
2 Modelagem direta e inversa aplicada a métodos elétricos	21
2.1 Formulação do problema direto	21
2.2 Formulação do problema inverso para dados de potencial espontâneo	23
2.2.1 Determinação da matriz de sensibilidade	24
2.2.2 Vínculo de Suavidade (VS) ou Mínima Norma	25
2.2.3 Vínculo do Inverso da Sensibilidade ou Sensibilidade Acumulada (VSA)	26
2.2.4 Inversão Compacta (IC)	26
2.3 Curva L e a escolha do parâmetro de regularização	27
3 Modelagem direta e inversa em dados sintéticos	29
3.1 Modelo 1	30
3.2 Modelo 2	32
3.3 Modelo 3	32
3.4 Modelo 4	33

3.5	Modelo 5	34
3.6	Modelo 6	34
3.7	Modelo 7	35
3.8	Modelo 8	36
3.9	Modelo 9	36
3.10	Modelo 10	37
3.11	Modelo 11	38
3.12	Resultados dos Ensaaios	38
4	Conclusões	63
	Agradecimentos	64
	Referências	65

Lista de Figuras

1.1	Esquema de uma fonte primária de contaminação: a disposição inadequada de resíduos no solo e sua consequente biodegradação gera uma pluma de contaminação, contrastante com o meio não contaminado. Fonte: Fachin, 2012.	14
1.2	Zonas redox ao longo de uma pluma de contaminação: zona de metanogênese, redução do sulfato, redução do ferro, redução do manganês, redução do nitrato e redução do oxigênio. Fonte: Fachin, 2012.	15
1.3	Modelo de biogeobateria em biofilme desenvolvido na interface da zona saturada, com material orgânico dissolvido. A variação abrupta do potencial redox na interface favorece a deposição de minerais condutivos e, com isto, a transferência de elétrons. Eh é o potencial redox. Fonte: Fachin, 2012.	16
1.4	Condução de elétrons no esquema de biogeobateria: reações anódicas envolvendo a oxidação de substrato orgânico são acopladas com reações catódicas de redução do oxigênio ou nitrato. O modelo propõe que a transferência de elétrons seria realizada a) por estruturas orgânicas condutivas, pilus, em conexão com minerais metálicos ou b) apenas por estruturas orgânicas formando uma malha condutiva. Fonte: Fachin, 2012.	17
1.5	Aquisição de eletorresistividade: a) caminhamento elétrico (CE), utilizada para investigar variações laterais de resistividade elétrica; b) sondagem elétrica vertical (SEV), utilizada para investigar variações verticais de resistividade elétrica. Fonte: Telford, 1976.	19
1.6	Representação gráfica de uma pseudo-seção de resistividade elétrica aparente. Fonte: Telford, 1976.	20
2.1	Ilustração da curva L. O ponto de inflexão da curva ("cotovelo") assinala o valor adequado para o parâmetro de regularização. Adaptada de Vasconcelos (2014).	28

3.1	Primeiro modelo de pluma fina de contaminação. O gráfico acima corresponde à anomalia de potencial espontâneo do dado sintético com e sem ruído (círculos vermelhos e linha azul, respectivamente). Abaixo é mostrado o modelo de resistividade com a pluma em roxo e a distribuição de cargas positiva (em vermelho) e negativa (em azul).	39
3.2	Inversão do modelo 1 com vínculo de Mínima Norma.	40
3.3	Curva L.	40
3.4	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 1. Na primeira imagem foi escolhida uma solução no cotovelo da Curva L, nas imagens central e inferior foram escolhidas uma solução à esquerda e à direita da Curva L, respectivamente.	41
3.5	Inversão Compacta do modelo 1.	42
3.6	Modelo 2 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	42
3.7	Inversão do modelo 2 com vínculo de Mínima Norma.	43
3.8	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 2.	43
3.9	Inversão Compacta do modelo 2.	44
3.10	Modelo 3 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	44
3.11	Inversão do modelo 3 com vínculo de Mínima Norma.	45
3.12	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 3.	45
3.13	Inversão Compacta do modelo 3.	46
3.14	Modelo 4 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	46
3.15	Inversão do modelo 4 com vínculo de Mínima Norma.	47
3.16	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 4.	47
3.17	Inversão Compacta do modelo 4.	48
3.18	Modelo 5 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	48
3.19	Inversão do modelo 5 com vínculo de Mínima Norma.	49
3.20	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 5.	49
3.21	Inversão Compacta do modelo 5.	50

3.22	Modelo 6 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	50
3.23	Inversão do modelo 6 com vínculo de Mínima Norma.	51
3.24	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 6.	51
3.25	Inversão Compacta do modelo 6.	52
3.26	Modelo 7 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	52
3.27	Inversão do modelo 7 com vínculo de Mínima Norma.	53
3.28	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 7.	53
3.29	Inversão Compacta do modelo 7.	54
3.30	Modelo 8 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	54
3.31	Inversão do modelo 8 com vínculo de Mínima Norma.	55
3.32	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 8.	55
3.33	Inversão Compacta do modelo 8.	56
3.34	Modelo 9 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	56
3.35	Inversão do modelo 9 com vínculo de Mínima Norma.	57
3.36	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 9.	57
3.37	Inversão Compacta do modelo 9.	58
3.38	Modelo 10 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	58
3.39	Inversão do modelo 10 com vínculo de Mínima Norma.	59
3.40	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 10.	59
3.41	Inversão Compacta do modelo 10.	60
3.42	Modelo 11 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.	60
3.43	Inversão do modelo 11 com vínculo de Mínima Norma.	61
3.44	Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 11.	61
3.45	Inversão Compacta do modelo 11.	62

Introdução

O método do potencial espontâneo (PE) é um método geoeletrico passivo, baseado em medidas de potenciais elétricos observados na superfície terrestre. Estes potenciais ocorrem naturalmente e sua medição é feita com um par de eletrodos não-polarizáveis, conectados a um voltímetro com alta impedância de entrada. O potencial elétrico medido é interpretado como sendo gerado por fontes de corrente existentes em subsuperfície. A partir de um conjunto de dados, sob a formulação de um problema inverso, pode-se determinar a distribuição de corrente que causa o campo medido. Esta formulação requer um modelo de resistividade para o substrato que pode ser obtido com a inversão de dados elétricos ou eletromagnéticos (Telford et al., 1976).

Potenciais de origem eletrocinética são gerados quando o fluxo primário resulta de um gradiente de pressão que provoca a movimentação da água em subsuperfície. Potenciais eletroquímicos são gerados quando há gradientes de concentração no substrato, podendo dar origem ao potencial de difusão e potenciais associados a reações do tipo redox, de importância na prospecção mineral (Mendonça, 2008). O potencial de difusão é causado por gradientes de concentração iônica nos sais dissolvidos na água em subsuperfície. Potenciais de origem redox são gerados por gradientes na atividade eletrônica do meio, os quais criam locais com diferentes capacidades de trocas catiônicas em reações químicas alterando o estado de oxidação de seus reagentes.

O sinal de PE de origem redox pode ser explicado por modelos de geobateria. Esse modelo foi inicialmente proposto em 1960 (Sato e Mooney, 1960) e, mais recentemente, aprimorado segundo fundamentos eletroquímicos (Bigalke e Grabner, 1997) e testado em experimentos em escala reduzida. Mendonça (2008) propôs uma formulação geral para a interpretação das fontes de corrente associadas a potenciais elétricos relacionados a processos redox, com aplicação direta a problemas de exploração mineral e corrosão de material metálico enterrado.

O modelo de geobateria se baseia na existência de um campo primário de natureza redox associado a variações de atividade eletrônica causada pela concentração de oxigênio molecular ou atmosférico nos poros de solos e rochas. No modelo de geobateria as reações

são interligadas pela presença de um condutor eletrônico que transporta elétrons de uma meia célula para outra. Sendo assim, não se pode conceber um mecanismo de geobateria sem a existência de um material com propriedades de condução eletrônica. Neste fato reside o principal desafio em adaptar modelos abióticos para modelos de biogeobateria.

Embora não previstas por modelos de geobaterias, anomalias expressivas de PE tem sido observadas em áreas contaminadas com resíduos orgânicos ou resíduos de hidrocarbonetos em áreas industriais. Tendo como base modelos de geobateria aplicados na prospecção mineral, modelos de biogeobateria foram propostos. Um melhor entendimento sobre a geração do sinal de PE pode contribuir para a caracterização de áreas contaminadas, como plumas de contaminação ou depósitos de resíduos sólidos, utilizando metodologias não intrusivas, como geofísica. Como proposto pelos modelos de biogeobateria, a presença de uma anomalia de PE estaria associada a processos de oxidação dos resíduos orgânicos no substrato, fornecendo informações relevantes na avaliação de áreas contaminadas por resíduos orgânicos.

A possibilidade de existir estruturas de biogeobateria em áreas contaminadas com anomalias de PE ganhou força com a descoberta de estruturas com propriedades de condução eletrônica produzidas por microorganismos. Tais estruturas, denominada *pillus*, tem diâmetro em escala nanométrica e são utilizadas pelos microorganismos para obter uma rede de conexões que conecta espécimes entre si e espécimes com minerais receptores de elétrons, principalmente óxidos de ferro, em processos de respiração aeróbia. O denominado modelo de biogeobateria incorpora elementos dos modelos clássicos de geobateria, mas supõe que o material com condução eletrônica seja constituído por estruturas orgânicas.

Para investigar algumas destas questões, são apresentados ensaios computacionais de modelagem direta e inversa em plumas de contaminação. Através de simulações numéricas foi possível compreender como a anomalia de potencial espontâneo se comporta de acordo com a polaridade e a posição, atribuindo significado para as fontes de corrente. Além disso, foi possível entender o funcionamento de um algoritmo de inversão de dados de potencial espontâneo, nos problemas vinculados, e quais efeitos os mesmos tem sobre a solução a partir de testes de diferentes vínculos de inversão na geração das anomalias. Os programas de modelagem direta e inversa utilizados foram cedidos por Prof. Dr. Carlos A. Mendonça - IAG/USP e Prof. Dra. Suzan S. Vasconcelos - IGEO/UFBA.

Os procedimentos aplicados são baseados em vínculos de suavidade global que, de modo geral, degradam o imageamento das fontes de corrente com o grau de definição necessária aos estudos de contaminação de água subterrânea. Com a definição adequada, o mapeamento das fontes de corrente ao longo da pluma de contaminação pode indicar as áreas quimicamente ativas, fornecendo assim, informações relevantes no monitoramento ambiental. O método utiliza procedimentos de modelagem numérica nos quais dados sintéticos foram gerados a

partir de distribuições de correntes representativas de diferentes configurações de plumas.

Capítulo 1

Biogeologia e respostas elétricas

A geofísica de investigação rasa, utilizada em estudos ambientais, se caracteriza por investigar pequenas profundidades quando comparadas com a prospecção mineral ou de petróleo. A utilização da geofísica como método de investigação é possível por causa dos contrastes de propriedades físicas entre os materiais geológicos do substrato. Problemas ambientais decorrentes da disposição de resíduos sólidos em aterros e lixões são frequentes e, no intuito de investigar alguns deles, pode-se fazer uso de ferramentas geofísicas tais como os métodos do potencial espontâneo (PE) e da eletrorresistividade (ER), por exemplo.

1.1 Contaminação por aterros de resíduos

As áreas para a disposição de resíduos sólidos urbanos e industriais no Brasil são denominadas por aterro sanitário, aterro controlado e lixão. Um dos maiores problemas relacionados ao descarte de resíduos sólidos se encontram nos lixões, ativos ou em desuso, pois é feito de forma inadequada, diretamente sobre o solo. Nessas áreas, recomenda-se o estudo da área contaminada, envolvendo a identificação da fonte contaminante, caracterização hidrogeológica e análise química de solos e águas (Fachin, 2012). Métodos geofísicos, os geoeletricos principalmente, configuram-se como metodologias de investigação para estes problemas.

Em um aterro de resíduos, a infiltração no solo das águas de chuva gera um lixiviado com alto conteúdo de carbono orgânico e sais em solução que, no Brasil, é denominado *chorume*. O *chorume* é um líquido produzido pela decomposição de substâncias descartadas em aterros ou lixões, com alta concentração de carbono orgânico e, conseqüentemente, elevada demanda de oxigênio (Fachin, 2012). A disposição inadequada de tais resíduos no solo, e sua conseqüente biodegradação, pode gerar plumas de contaminação, as quais irão contrastar com o meio não contaminado, como pode ser visto na Figura 1.1.

Um aquífero com fluxo de água subterrâneo ao longo de uma direção preferencial possui

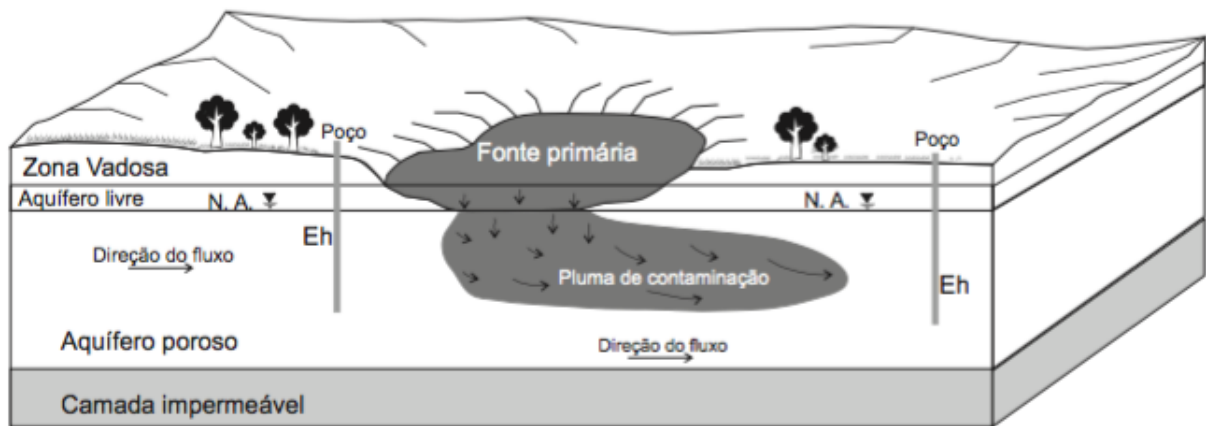


Figura 1.1: Esquema de uma fonte primária de contaminação: a disposição inadequada de resíduos no solo e sua consequente biodegradação gera uma pluma de contaminação, contrastante com o meio não contaminado. Fonte: Fachin, 2012.

diferentes zonas redox. A identificação dessas zonas pode ser feita por meio de análises da composição química da água em subsuperfície, composição mineralógica dos sedimentos e reconhecimento dos microorganismos presentes.

Através de medições de potencial redox, E_h , é possível realizar a identificação de diferentes zonas, como mostrado na Figura 1.2: metanogênica, redução de sulfato, redução de ferro, redução de manganês, redução de nitrato e redução do oxigênio, esta última sendo uma fase aeróbica (Fachin, 2012). Essa diferenciação química ao longo do comprimento da pluma gera zonas com diferentes potenciais redox. A diferença entre tais potenciais, devido às interações catiônicas entre a pluma e a rocha permeável, gera um potencial espontâneo que pode ser medido na superfície.

1.2 Método do potencial espontâneo (PE)

O método do PE consiste na medição de potenciais elétricos naturalmente existentes na superfície terrestre. Em áreas contaminadas, anomalias de PE podem ter origem eletrocinética, associada a um gradiente de pressão, ou eletroquímica, associada a um gradiente de concentração (Fachin, 2012). O modelo de geobateria e seus mecanismos estão intimamente relacionados com a origem do sinal de PE associados a gradientes de potencial redox, como pode ser visto a seguir.

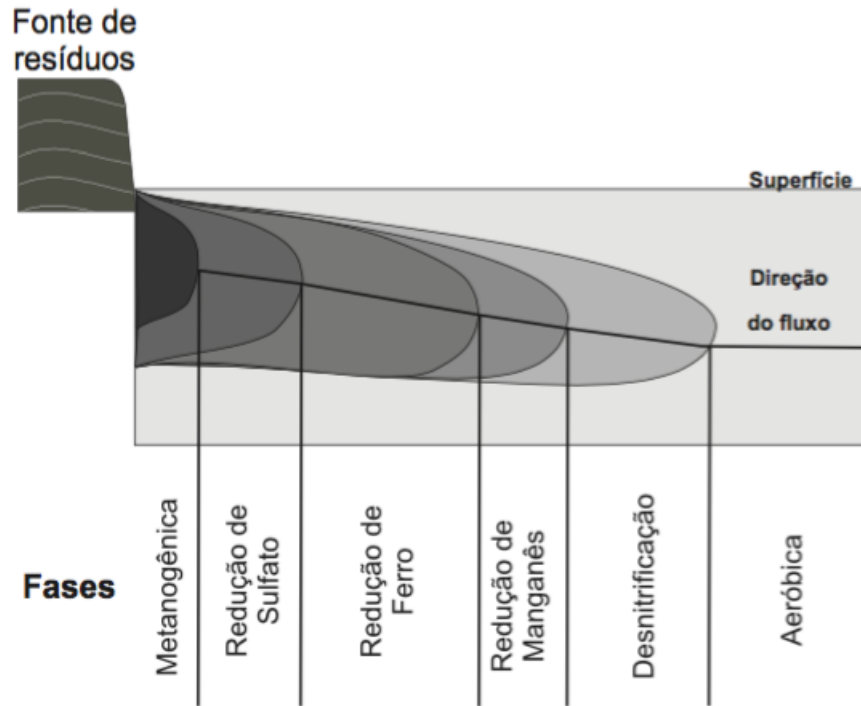


Figura 1.2: Zonas redox ao longo de uma pluma de contaminação: zona de metanogênese, redução do sulfato, redução do ferro, redução do manganês, redução do nitrato e redução do oxigênio. Fonte: Fachin, 2012.

1.2.1 Modelo de geobateria

O modelo de geobateria, definido por (Sato e Mooney, 1960), aplica-se a corpos minerais condutores que conectam locais com diferente potencial redox. Neste modelo, a parte superior de um corpo condutor funciona como o cátodo de uma bateria. A parte inferior, situada abaixo do nível freático, funciona como ânodo.

Reações de oxidação (equação 1.1) na porção anódica geram elétrons que são conduzidos até a parte superior do corpo condutor onde são consumidos por reações de redução (equação 1.2). Para corpos minerais, as reações de oxidação normalmente consomem minerais de ferro em forma reduzida, sulfetos por exemplo, e as reações de redução consomem o oxigênio disponível nos poros de solos e rochas nos níveis superficiais.



A transferência de elétrons do ânodo para o cátodo se dá pelo corpo mineral, acoplado ao fluxo de íons que segue pelo meio eletrolítico. Assim, anomalias negativas de PE podem estar relacionadas a corpos mineralizados.

1.2.2 Modelo de biogeobateria

Modelos de biogeobaterias têm sido propostos para explicar anomalias de PE em plumas de contaminação ou resíduos de hidrocarbonetos. Ao longo de uma pluma de contaminação, a análise conjunta dos dados de PE e de potencial redox mostra uma dependência linear entre ambos, sugerindo que o potencial redox possa ser inferido a partir das anomalias de PE.

A transferência de elétrons no modelo de biogeobateria ocorre ao longo de uma estrutura biológica denominada *biofilme*, desenvolvida na interface de uma zona saturada com uma insaturada (Figura 1.3). A existência de uma biogeobateria em interfaces com gradiente redox é capaz de explicar processos de oxidação e redução, como se espera na interface do nível freático e nos limites de uma pluma de contaminação. A biogeobateria por biofilmes seria, assim, um processo aeróbio no qual a recepção de elétrons é feita pelo oxigênio.

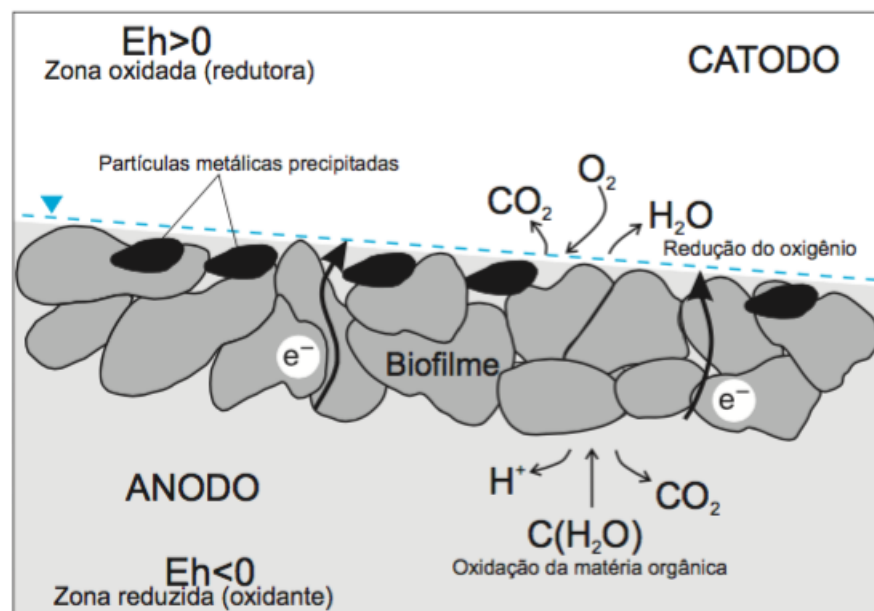


Figura 1.3: Modelo de biogeobateria em biofilme desenvolvido na interface da zona saturada, com material orgânico dissolvido. A variação abrupta do potencial redox na interface favorece a deposição de minerais condutivos e, com isto, a transferência de elétrons. *Eh* é o potencial redox. Fonte: Fachin, 2012.

Trabalhos em microbiologia identificaram estruturas eletricamente condutivas denominadas *pillus*, sintetizadas naturalmente por microorganismos. O modelo proposto assume que a transferência de elétrons ocorreria ao longo de estruturas contituídas exclusivamente por nanofios ou por combinação de nanofios com minerais condutivos (Figura 1.4).

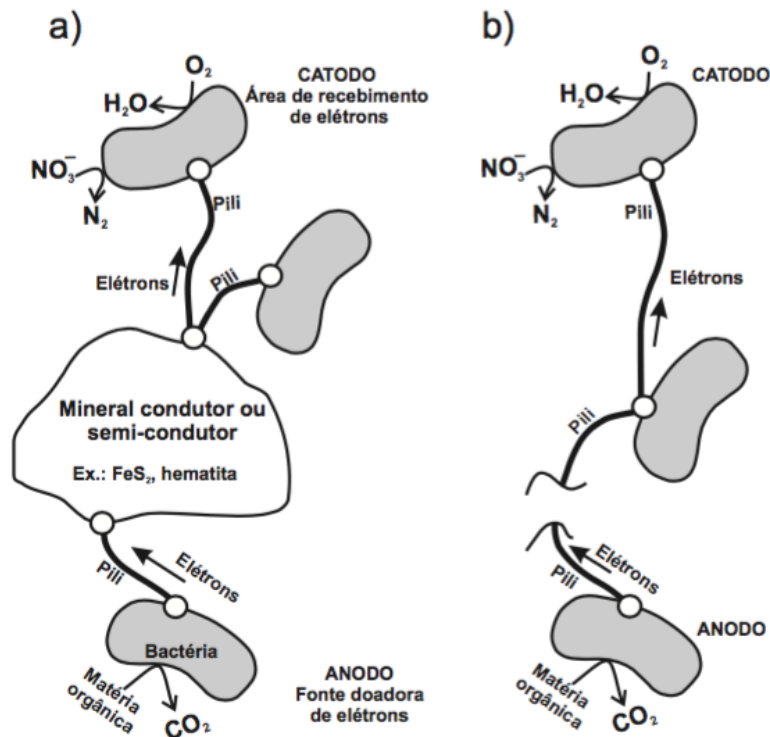


Figura 1.4: Condução de elétrons no esquema de biogeobateria: reações anódicas envolvendo a oxidação de substrato orgânico são acopladas com reações catódicas de redução do oxigênio ou nitrato. O modelo propõe que a transferência de elétrons seria realizada a) por estruturas orgânicas condutivas, pilus, em conexão com minerais metálicos ou b) apenas por estruturas orgânicas formando uma malha condutiva. Fonte: Fachin, 2012.

1.2.3 Aquisição e fontes de ruído

A aquisição de dados de potencial espontâneo pode ser realizada ao longo de linhas ou malhas, a depender do objetivo final da aquisição e da região a ser estudada. O equipamento utilizado consiste em um voltímetro com alta impedância de entrada e um par de eletrodos não polarizáveis enterrados no solo. Deve-se utilizar um voltímetro com tal impedância para não interferir nas medidas de potencial por fuga de corrente.

Os ruídos são sinais não associados ao fenômeno físico em estudo. Neste contexto, um potencial elétrico não associado a uma fonte de corrente no substrato pode ser considerada como ruído na interpretação destes dados. Algumas fontes de ruído podem estar presentes no dado medido em campo, tais como descargas elétricas na atmosfera que induzem correntes no substrato provocando flutuações no sinal de PE, ruídos provenientes da rede elétrica, variações locais de temperatura, fontes de ruído de origem antrópica que podem ser associadas a corpos metálicos enterrados, redes de alta tensão, linhas de aterramento, entre outros. Le-

vantamentos geofísicos preliminares, tais como magnetometria ou eletromagnéticos, podem ser utilizados para identificar tais fontes de interferência e auxiliar a interpretação de dados de PE.

1.3 Método da eletrorresistividade (ER)

1.3.1 Técnica e aquisição

Medidas de resistividade elétrica em campo são realizadas com um equipamento denominado resistímetro, composto por um transmissor, que injeta a corrente elétrica no solo, e um módulo receptor, o qual registra o potencial elétrico em resposta. Eletrodos não polarizáveis podem ser utilizados na leitura de potencial, o que aumenta a qualidade das medidas, e o isolamento elétrico dos equipamentos é imprescindível para uma medida de qualidade.

Na aplicação do método da ER, são utilizadas duas técnicas principais de aquisição de dados: sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE). A técnica do CE (Figura 1.5a) investiga a variação lateral de resistividade a uma profundidade constante, com o objetivo de identificar estruturas sub-verticais ao longo de um perfil. Nesta técnica, os pares de eletrodos de corrente, A e B, e de potencial, M e N, são instalados ao longo de um perfil. Ao se injetar corrente no solo por meio dos eletrodos A e B, leituras de diferença de potencial são realizadas entre eletrodos M e N. Em seguida, todo o arranjo é deslocado ao longo da linha de aquisição e novas medidas são efetuadas.

A técnica da SEV, ilustrada pela Figura 1.5b, é utilizada para determinar a variação vertical de resistividade elétrica, principalmente com o intuito de caracterizar estruturas sub-horizontais ou sucessão de camadas plano-paralelas. Medidas de resistividade aparentes são efetuadas para arranjos com afastamento crescente, de forma a se alcançar maiores profundidades de investigação.

1.3.2 Apresentação e interpretação dos dados

Os valores de resistividade aparente obtidos em uma SEV são apresentados em função das distâncias $AB/2$, sendo AB a distância entre os eletrodos de corrente A e B da Figura 1.5b). Os valores de resistividade aparente no CE são normalmente apresentados na forma de pseudo-seção, onde são representados graficamente os valores de resistividade aparente atribuindo-lhes uma profundidade. A profundidade para uma medida é, esquematicamente, atribuída ao ponto de intersecção entre duas retas projetadas a um ângulo de 45° , a partir do ponto médio entre os eletrodos de corrente e de potencial (Figura 1.6). O nível de investigação em profundidade é crescente com o afastamento do arranjo.

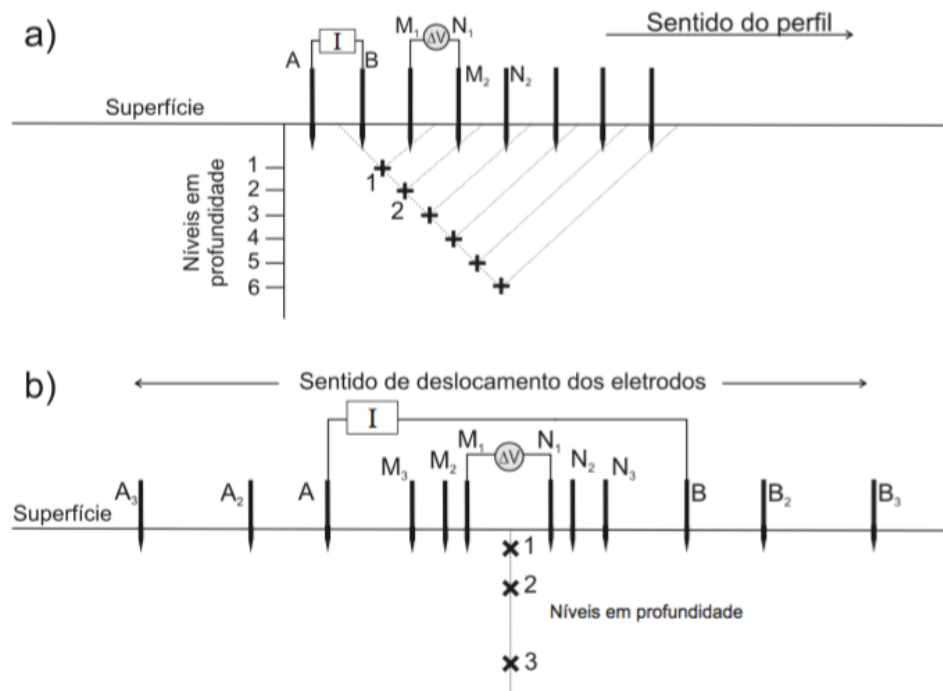


Figura 1.5: Aquisição de eletrorresistividade: a) caminhamento elétrico (CE), utilizada para investigar variações laterais de resistividade elétrica; b) sondagem elétrica vertical (SEV), utilizada para investigar variações verticais de resistividade elétrica. Fonte: Telford, 1976.

A utilização da interpretação qualitativa por meio de pseudo-seções é imprecisa, pois esta distribuição não representa um modelo de resistividade coerente com a realidade de subsuperfície. Abordagens quantitativas por técnicas de inversão de dados buscam contornar este problema, pois geram uma distribuição de resistividade que é coerente com a base de dados medida. O modelo de resistividade obtido por inversão representa satisfatoriamente a geometria e os valores de resistividade no substrato.

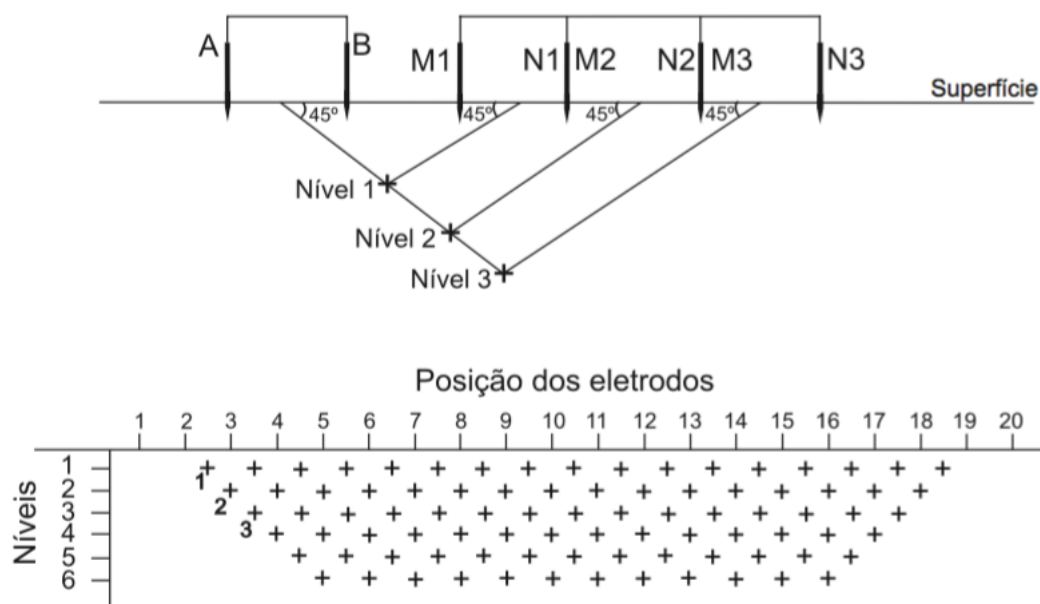


Figura 1.6: Representação gráfica de uma pseudo-seção de resistividade elétrica aparente. Fonte: Telford, 1976.

Capítulo 2

Modelagem direta e inversa aplicada a métodos elétricos

2.1 Formulação do problema direto

Para dados de potencial espontâneo, o problema direto consiste no cálculo do potencial elétrico através do conhecimento da distribuição de resistividade do meio e a distribuição das fontes de corrente. No método de diferenças finitas, o substrato é representado por uma malha de retângulos justapostos, referenciado em um sistema de coordenadas cartesianas, com o eixo x ao longo do perfil de medição e o eixo z representando a profundidade, crescente em direção ao interior da Terra. O potencial elétrico é calculado sobre os nós da malha que define o modelo. Cada retângulo da malha tem resistividade constante, mas pode variar de um retângulo para o outro.

Na formulação por diferenças finitas o potencial elétrico é determinado pela solução de um sistema de equações lineares

$$\mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{q}, \quad (2.1)$$

no qual $\mathbf{q}$ é um vetor n -dimensional com os termos de corrente e $\mathbf{A}$ a matriz das condutâncias de ordem $n \times n$. Esta equação pode ser aplicada para métodos ativos ou passivos.

A equação 2.1 pode ser redimensionada a partir da seleção dos pontos da malha, nos quais o conjunto de medidas foi tomado. Considerando m estações de medida, nas posições $l(i), i = 1, \dots, m$, os potenciais no vetor $\mathbf{u}_0$, são descritos (Mendonça, 2008) por

$$\mathbf{u}_0 = \mathbf{Q}\mathbf{u}, \quad (2.2)$$

sendo $\mathbf{Q}$ uma matriz $m \times n$ cujas linhas são compostas por deltas de Kronecker $\delta_{j,i}^T$, onde o termo T denota a transposição de uma matriz. Por definição, todos os elementos em $\delta_{j,i}$ são iguais a zero exceto o j -ésimo termo que é igual a 1. A matriz $\mathbf{Q}$ é denominada matriz de

amostragem pois seleciona valores específicos no vetor de potenciais $\mathbf{u}$. Para um conjunto de dados, a matriz de amostragem é dada por

$$\mathbf{Q} \equiv \begin{pmatrix} \delta_{l(1)}^T \\ \delta_{l(2)}^T \\ \vdots \\ \delta_{l(n)}^T \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Definindo uma matriz $\mathbf{R}_\infty$, tal que

$$\mathbf{R}_\infty = \mathbf{Q}\mathbf{A}^{-1}, \quad (2.4)$$

a equação 2.3 torna-se

$$\mathbf{u}_0 = \mathbf{R}_\infty \mathbf{q}. \quad (2.5)$$

Os valores em $\mathbf{u}$ e $\mathbf{q}$ são expressos em volt e ampère, respectivamente, assim, os elementos da matriz $\mathbf{R}_\infty$ são expressos em ohm, razão pela qual a matriz $\mathbf{R}_\infty$ é denominada matriz de resistência. O sistema linear na equação 2.5 representa uma forma generalizada da Lei de Ohm, onde cada linha da matriz de resistência contém a resposta do modelo para uma fonte de corrente unitária na posição de medida. Esta resposta expressa a função de Green na forma numérica para o modelo de resistividade considerado.

Para calcular o potencial espontâneo, u_l , na l -ésima estação, fazemos

$$u_l = \mathbf{r}_l^T \mathbf{q}, \quad (2.6)$$

sendo a r_l a l -ésima linha da matriz de resistência.

Para representar a estação de referência, subtrai-se o potencial u_{ref} , onde $u_{\text{ref}} = \mathbf{r}_{\text{ref}}^T \mathbf{q}$, do potencial u_l . O vetor $\mathbf{u}_m$ com o conjunto de leituras de diferença de potencial, é representado por

$$\mathbf{u}_m = \begin{pmatrix} u_1 - u_{\text{ref}} \\ u_2 - u_{\text{ref}} \\ \vdots \\ u_l - u_{\text{ref}} \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

Pode-se, assim, definir uma matriz $\mathbf{R}_{\text{ref}}$ cujas linhas são os vetores das diferenças $\mathbf{r}_l^T - \mathbf{r}_{\text{ref}}^T$, $l = 1, 2, \dots, m$,

$$\mathbf{R}_{\text{ref}} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^T - \mathbf{r}_{\text{ref}}^T \\ \mathbf{r}_2^T - \mathbf{r}_{\text{ref}}^T \\ \vdots \\ \mathbf{r}_l^T - \mathbf{r}_{\text{ref}}^T \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

representando a base de dados por uma forma generalizada da equação 2.5 dada por

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{R}_{\text{ref}}^T \mathbf{q}, \quad (2.9)$$

onde considera-se que as medidas foram tomadas com relação a uma estação de referência em particular.

2.2 Formulação do problema inverso para dados de potencial espontâneo

O problema inverso consiste em estimar o vetor n -dimensional $\mathbf{q} \equiv (q_1, \dots, q_n)^T$ dos valores de corrente q_i nos nós da malha de resistividade, utilizando os dados $\mathbf{u}_0 = (u_{0_1}, \dots, u_{0_m})^T$ e a relação matricial da equação 2.9. Este problema é linear e a condição de aceitabilidade para uma solução representando a distribuição de corrente, $\mathbf{q}$, é que o funcional de resíduos Q

$$Q = (\mathbf{u}_0 - \mathbf{R}\mathbf{q})^T \mu_e \mathbf{W}_e (\mathbf{u}_0 - \mathbf{R}\mathbf{q}) + \mathbf{q}^T (\mu_q \mathbf{W}_q) \mathbf{q} \quad (2.10)$$

seja minimizado. Para simplificar a notação, convencionou-se que $\mathbf{R}_{\text{ref}} \equiv \mathbf{R}$.

O termo $\mathbf{R}\mathbf{q}$ representa o problema direto na forma matricial para dados de potencial espontâneo, pois calcula o potencial elétrico correspondente à distribuição de corrente $\mathbf{q}$, $\mu_e \mathbf{W}_e$ é a matriz de covariância dos dados, μ_q é um escalar de ponderação do peso dos parâmetros de escolha, equivalente ao multiplicador de Lagrange, e $\mathbf{W}_q$ é a matriz de peso que introduz informação física, matemática ou geológica *a priori* de acordo com o vínculo escolhido. O primeiro termo da expressão impõe ajuste aos dados e o segundo impõe características da distribuição de corrente $\mathbf{q}$.

Como o número de estações é menor que o número de nós da malha, $m < n$, o problema é do tipo sub-determinado, fazendo com que minimização do funcional Q não possa ser obtida com unicidade a menos que informação *a priori* seja introduzida. Pela teoria da regularização, a introdução de informação *a priori* é feita por meio de funcionais regularizadores, incorporados por meio de formas quadráticas envolvendo os parâmetros desconhecidos.

Pode-se resumir as ponderações no espaço dos parâmetros definindo

$$\mu_q \mathbf{W}_q = \sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{W}_i, \quad (2.11)$$

sendo $\mu_i \mathbf{W}_i$ as matrizes ponderadas que caracterizam os diferentes vínculos. A solução que minimiza o funcional na equação 2.10 é dada por

$$\mathbf{q}' = \mathbf{W}_q^{-1} \mathbf{R}^T (\mathbf{R} \mathbf{W}_q^{-1} \mathbf{R}^T + \mu \mathbf{W}_e^{-1})^{-1} \mathbf{u}_0. \quad (2.12)$$

Diversos funcionais regularizadores têm sido utilizados na inversão de dados de potencial espontâneo, entre eles os que impõem Vínculo de Suavidade (VS), Inverso da Sensibilidade (VSA) e Inversão Compacta (IC), discutidos mais adiante.

2.2.1 Determinação da matriz de sensibilidade

Um modelo $\mathbf{q}$ pode ser considerado uma solução de um problema inverso se ele ajustar o conjunto de dados experimentais obtidos. Os valores teóricos são calculados através de uma função h , tal que $h(\mathbf{q}) = \mathbf{R}\mathbf{q}$, que expressa as relações físicas envolvidas no problema.

O funcional de ajuste Q' é expresso no primeiro termo da equação 2.10. Reescrevendo-o desconsiderando o termo constante $\mu_e \mathbf{W}_e$, temos

$$Q'(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^m [\mathbf{u}_{0_i} - h(\mathbf{q})_i]^2. \quad (2.13)$$

Assumindo que um ponto de mínimo, $\mathbf{q}'$, exista, a minimização de Q' pode ser obtida calculando o ponto em que seu gradiente é nulo. Como o modelo tem n parâmetros, o cálculo do gradiente envolve n derivadas. A derivada em relação ao parâmetro q_j é dada por

$$\frac{\partial Q'}{\partial q_j} = -2 \sum_{i=1}^m [\mathbf{u}_{0_i} - h(\mathbf{q})_i] \frac{\partial h(\mathbf{q})_i}{\partial q_j}. \quad (2.14)$$

O termo $\partial h(\mathbf{q})_i / \partial q_j$ quantifica a variação que o j -ésimo parâmetro produz na i -ésima medida e, por este motivo, é denominado *coeficiente de sensibilidade*.

A minimização de Q' tal como definido em 2.13 faz sentido se $m > n$, no qual o número de equações é maior que o número de incógnitas. Isto implica em dados inconsistentes pois para uma situação hipotética de precisão infinita a introdução de equações adicionais seria redundante. Para dados inconsistentes, um ajuste aproximado também deve ser buscado para o caso $m = n$. Na formulação subdeterminada, em que o número de incógnitas é maior que o número de equações, o problema tem infinitas soluções e o ajuste é perfeito (resíduo nulo), mesmo para dados inconsistentes. A unicidade é obtida restringindo o campo de variação para os parâmetros desconhecidos, por exemplo, impondo que sua norma seja mínima.

Para problemas lineares o problema direto assume forma

$$h(\mathbf{p})_i = \sum_{j=1}^n g_{ij} p_j, \quad (2.15)$$

o que deixa o funcional Q' em 2.13 na forma de

$$Q'(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^m \left[d_i - \sum_{j=1}^n g_{ij} p_j \right]^2 \quad (2.16)$$

e seus coeficientes de sensibilidade tais que

$$\frac{\partial h(\mathbf{p})_i}{\partial p_j} = g_{ij}, \quad (2.17)$$

para $j = 1, \dots, n$.

Como indica 2.17, para problemas lineares o coeficiente de sensibilidade independe dos parâmetro em $\mathbf{p}$, o que simplifica a determinação do mínimo de Q' . Incluindo 2.17 em 2.14 e igualando a zero obtemos

$$\sum_{i=1}^m \left[d_i - \sum_{j=1}^n g_{ij} p_j \right] g_{ij} = 0. \quad (2.18)$$

Escrevendo o sistema de equações na forma matricial, obtemos

$$\begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & \dots & r_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & \dots & g_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & \dots & g_{mn} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Definindo um vetor n -dimensional com elementos nulos, $\mathbf{0}_n$, temos que

$$\mathbf{0}_n^T = \mathbf{r}^T \mathbf{G} \quad (2.20)$$

que, por transposição, fornece

$$\mathbf{0}_n = \mathbf{G}^T \mathbf{r}. \quad (2.21)$$

A matriz $\mathbf{G}$ é denominada *matriz de sensibilidade*.

Substituindo $\mathbf{r} = \mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{p}'$ na equação 2.21 obtemos

$$\mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{p}' = \mathbf{G}^T \mathbf{d}. \quad (2.22)$$

Assumindo que a inversa do produto $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ existe, obtemos o estimador de mínimos quadrados

$$\mathbf{p}' = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d}. \quad (2.23)$$

Para problemas não lineares, o coeficiente de sensibilidade é uma função do parâmetro a ser determinado. Uma maneira de contornar este problema é considerar uma vizinhança ao redor de um ponto $\mathbf{p}_0$ na qual uma aproximação linear para $h(\mathbf{p})$ pode ser assumida. Daí, desenvolve-se $h(\mathbf{p})$ por série de Taylor.

2.2.2 Vínculo de Suavidade (VS) ou Mínima Norma

O vínculo de suavidade impõe a condição que a norma euclidiana dos parâmetros desconhecidos seja mínima. Isto implica em minimizar $\|\mathbf{q}\|_2$, garantindo que $\|\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_c\|_2 = \varepsilon$, sendo ε um parâmetro que mede o ajuste entre dados medidos $\mathbf{u}_0$ e calculados $\mathbf{u}_c = \mathbf{R}\mathbf{q}$, e que

normalmente dependente do nível de ruído nos dados. A condição de mínima norma faz com que os valores q_i no somatório $\sum q_i^2$ tendam a valores próximos a zero e, dessa forma, valores próximos entre si. Esta imposição de proximidade gera distribuições com aparência suave, já que a variação entre parâmetros adjacentes é pequena. A inversão com vínculo de suavidade define uma matriz de peso $\mathbf{W}_q = \mathbf{I}_n$, sendo $\mathbf{I}_n$ a matriz identidade de ordem n . Ao impor condições de suavidade, o VS produz imagens com gradação, sem definição de contrastes abruptos. A matriz $\mathbf{W}_e$ é igual à matriz identidade.

2.2.3 Vínculo do Inverso da Sensibilidade ou Sensibilidade Acumulada (VSA)

O vínculo de sensibilidade acumulada VSA tem como objetivo evitar soluções contendo elementos não nulos na superfície do meio em que as medições foram tomadas. O vínculo consiste em penalizar distribuições com fontes de corrente na vizinhança dos pontos de medida, definindo uma matriz diagonal de pesos, $\mathbf{W}_{sa}$, onde

$$\{\mathbf{W}_{sa}\}_{kk} = \left(\sum_{j=1}^m R_{jk}^2 \right)^{-1}, \quad (2.24)$$

sendo R_{kj} o elemento k, j da matriz $\mathbf{R}_{Ref}$, na equação 2.9.

A matriz de peso $\mathbf{W}_{sa}$ contém elementos que são iguais ao inverso da sensibilidade do parâmetro, isso porque

$$R_{jk} = \frac{\partial \mathbf{u}_c}{q_k} \quad (2.25)$$

é por definição o coeficiente de sensibilidade em um problema linear.

A incorporação do VSA leva a uma diminuição da sensibilidade se o parâmetro da malha de discretização estiver distante da superfície. Na formulação do funcional do VSA, $\mathbf{W}_e$ é a identidade, assim como no VS e $\mathbf{W}_q = \mathbf{W}_{sa}$.

2.2.4 Inversão Compacta (IC)

O funcional que implementa a Inversão Compacta utiliza matrizes de pesos que dependem dos parâmetros a serem determinados, o que implica numa relação de não linearidade ao funcional a ser minimizado. A solução é obtida em um processo iterativo, no qual a estimativa $\mathbf{q}'^{(k)}$ dependerá da solução $\mathbf{q}'^{(k-1)}$, obtida na iteração anterior, sendo k o número da iteração. Por ser não linear, o algoritmo requer uma solução inicial $\mathbf{q}^0$, normalmente obtida com vínculo de suavidade (VS). Outro parâmetro exigido pela inversão compacta denomina-se parâmetro de congelamento, o qual é fornecido pelo intérprete e define o valor máximo para os parâmetros desconhecidos.

Basicamente, a inversão compacta determina soluções do tipo $\mathbf{q}'^{(k)}$ tal que

$$\mathbf{q}'^{(k)} = [\mathbf{W}_q^{(k-1)}]^{-1} \mathbf{R}^T \left\{ \mathbf{R} [\mathbf{W}_q^{(k-1)}]^{-1} \mathbf{R}^T + [\mathbf{W}_e^{(k-1)}]^{-1} \right\}^{-1} \mathbf{u}_0 \quad (2.26)$$

empregando matrizes de peso $\mathbf{W}_q^{(k-1)}$, atualizadas em cada iteração, dadas por

$$\{\mathbf{W}_q^{(k-1)}\}_{jj}^{-1} = \begin{cases} \epsilon, & \text{se } q_j \geq b, \\ \epsilon + [q_j^{(k-1)}]^2, & \text{se } q_j < b, \end{cases} \quad (2.27)$$

sendo b o parâmetro de congelamento e $\mathbf{W}_e^{(k-1)}$ atualizada com valores muito pequenos de ϵ da ordem de 10^{-16} . Como definido na equação 2.27, o peso na matriz diagonal $\mathbf{W}_q$, em todas as iterações k , faz com que a solução apresente muitos valores próximos de zero. Os elementos da matriz de peso são $\{\mathbf{W}_q\}_{jj} = 1/(q_j^2 + \epsilon)$, minimizando o termo

$$\mathbf{q}^T \mathbf{W}_q \mathbf{q} = \sum_{j=1}^m \frac{q_j^2}{q_j^2 + \epsilon}. \quad (2.28)$$

No congelamento, o valor de q_j pode ser diferente de zero sempre que o valor estimado for menor que b . Desta forma, a minimização do funcional exige que um número mínimo de $q_j \neq 0$ seja alcançado, gerando assim uma distribuição com muitos valores nulos, a qual se denomina solução compacta.

2.3 Curva L e a escolha do parâmetro de regularização

A curva L é um critério para a escolha do parâmetro de regularização μ e seu nome vem da plontagem da mesma em escala logarítmica, pois assemelha-se com o formato da letra L. Esta é caracterizada por uma inflexão, que separa as regiões aproximadamente vertical e horizontal da curva, na qual o eixo das abscissas corresponde ao módulo da diferença entre a anomalia observada e calculada, ou seja, o resíduo $\|\mathbf{r}\|_2$, e o eixo das ordenadas ao módulo $\|\mathbf{q}\|_2$ dos parâmetros estimados. A parte aproximadamente vertical da curva L é muito sensível às mudanças do parâmetro de regularização μ , pois as soluções são dominadas pelo erro de perturbação, enquanto que a parte aproximadamente horizontal corresponde às soluções dominadas pelo erro de regularização, onde a norma residual é mais sensível aos parâmetros de regularização μ .

A equação 2.12 é resolvida para vários valores de μ e cada solução gera um par $\|\mathbf{q}\|_2$ e $\|\mathbf{r}\|_2$. A escolha de um ponto determina na curva a solução escolhida, obedecendo ao critério de ajuste e norma dos parâmetros. Conforme a concepção do critério, a melhor solução estará localizada no "cotovelo" da curva L. A análise da curva L torna também possível observar como a minimização excessiva da norma dos parâmetros pode desajustar os dados. Ou seja,

o "cotovelo" da curva L, o qual pode ser visto na Figura 2.1, determina o valor de μ que minimiza $\|q\|_2$ ao mesmo tempo garantindo um ajuste satisfatório. Valores maiores de μ a partir do "cotovelo", minimizam excessivamente a norma dos parâmetros comprometendo o ajuste dos dados.

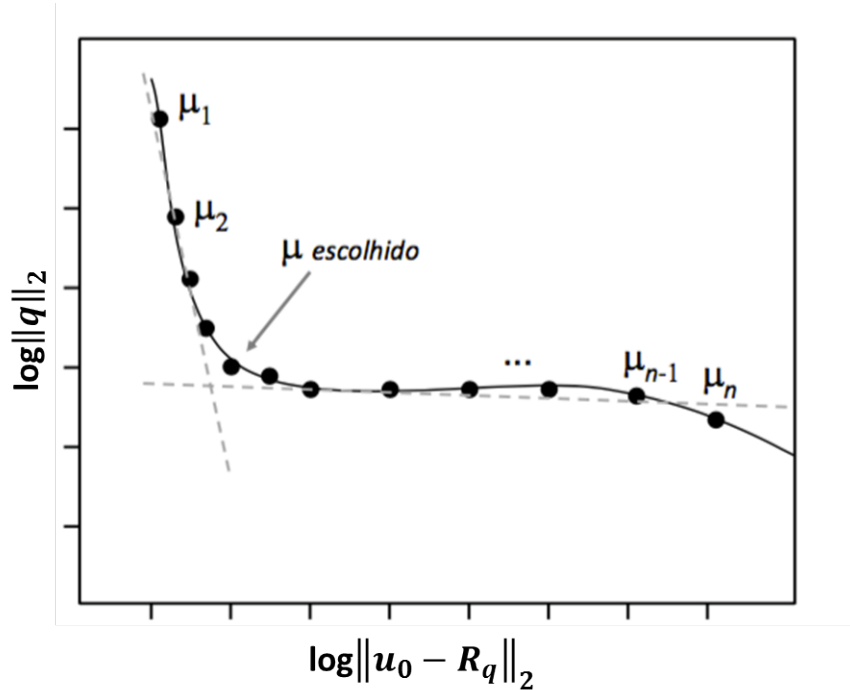


Figura 2.1: Ilustração da curva L. O ponto de inflexão da curva ("cotovelo") assinala o valor adequado para o parâmetro de regularização. Adaptada de Vasconcelos (2014).

O traçado da curva L consiste em resolver um sistema linear para cada μ , resultando em modelos estimados. A utilização da curva L adiciona um custo computacional na inversão, porém, esse custo computacional adicionado é compensado pela eficiência do método na busca do fator que melhor regulariza a solução. Ou seja, o cotovelo da curva L é uma maneira eficiente de encontrar uma boa aproximação do parâmetro de regularização e, em retorno, obtêm-se uma solução regularizada com um equilíbrio entre os dois tipos de erros citados anteriormente.

Capítulo 3

Modelagem direta e inversa em dados sintéticos

Os modelos utilizados simulam plumas de contaminação resultantes do despejo inadequado de lixo sobre a superfície do terreno, e por conseguinte a infiltração até alcançar um aquífero, ou oriundos de uma cava produzida com a finalidade de receber resíduos, geralmente é feito um procedimento de impermeabilização do fundo e seu monitoramento diz respeito a acompanhar a biodegradação e possível geração de gás, além de assegurar-se da eficiência da proteção do fundo da mesma. A presença de bactérias no chorume e na matéria orgânica cria um ambiente oxi-redutor, gerando, assim, regiões com diferenças de potencial elétrico. O fato da pluma de contaminação formada nestes casos ser fina ou espessa depende basicamente da permeabilidade da camada porosa próxima à superfície e da velocidade do fluxo de água subterrânea.

Nos modelos de pluma fina, consideramos um fluxo de água subterrânea da esquerda para a direita, tomando como referência o leitor, o que faz com que a pluma de contaminação seja deslocada para a direita, como pode ser visto a seguir, nos modelos 1 a 7 ¹. Já nos modelos em forma de cava, consideramos que o fluxo de água subterrânea não deslocou o fluído contaminante, pois a mesma tem seu fundo devidamente protegido. A extensão superficial deste depósito é representada pela barra preta horizontal na superfície das figuras seguintes, o triângulo indica a posição do eletrodo de referência e os círculos representam as estações de medida, onde são posicionados os eletrodos não polarizáveis.

Foram testadas diferentes configurações de distribuição de carga com o objetivo de observar o formato da anomalia frente a aproximação ou separação dos dipolos de corrente, a mudança da polaridade e a correlação com a profundidade. O ruído adicionado ao dado tem a finalidade de testar a estabilidade da solução vinculada, portanto, em todos os modelos

¹As figuras estão na última seção deste capítulo.

inversos o dado utilizado tem ruído.

3.1 Modelo 1

Nos programas utilizados para gerar o modelo, a soma dos valores absolutos de corrente foi considerado igual a 1A. Foi feito com que a soma das fontes positivas fossem iguais a $+0.5A$ e a soma de fontes negativas iguais a $-0.5A$. Em seguida, a distribuição é dimensionada para 100 mA. A resistividade da pluma e da cava é de $10\Omega m$ e a do fundo $578\Omega m$. O ruído adicionado foi constante e igual a 5mV.

O primeiro modelo escolhido, representado pela Figura 3.1, tem sua distribuição de carga considerando a concentração de cargas negativas em azul, próxima à superfície e no início da pluma, e a concentração de cargas positivas em vermelho, próxima à outra extremidade da pluma. Sabe-se que, caso dependesse somente do fluxo de água, as cargas positivas tenderiam a ficar localizadas exatamente no extremo final da pluma, já que o fluxo de água transporta mais facilmente íons positivos devido às ligações químicas estabelecidas destes com as moléculas de água. A anomalia observada em resposta a este modelo se dá como esperado, com valores menores onde está a concentração de cargas negativas e valores maiores onde estão concentradas as cargas positivas.

O contorno branco pontilhado em torno das cargas na Figura 3.1 foi usado para facilitar a observação dos resultados das inversões a seguir. Os contornos nas imagens invertida representam onde estão as cargas no modelo original.

Com o modelo gerado, foram testadas uma série de inversões com diferentes vínculos associados. A Figura 3.2 é o resultado da inversão do modelo apresentado utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto claramente que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, na parte central da pluma, a inversão gerou um efeito de borramento e, na extremidade esquerda da pluma, uma carga positiva (vermelho), ambos não relacionados com a distribuição de cargas do modelo. O erro relativo associado a essa inversão foi satisfatoriamente baixo e igual a 2,0104%, como pode ser visto na Figura 3.2.

Para fazer a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007), deve-se escolher o parâmetro μ , um escalar que multiplica a matriz de peso, para obter a melhor solução. Para determinar tal número, que representa um compromisso entre o ajuste do dado e a minimização da norma dos parâmetros, devemos escolher um ponto do "cotovelo" da curva L. No caso da figura 3.3, esse ponto que representa a melhor solução seria aproximadamente $\mu = 62,1017$, que pode ser observado no primeiro resultado da Figura 3.4.

No primeiro resultado da Figura 3.4, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da

Sensibilidade (Minsley et al. 2007) escolhendo a solução no cotovelo da curva. Pode ser visto claramente que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, na parte central da pluma, a inversão gerou um efeito de borramento não relacionado com a distribuição de cargas do modelo, assim como na inversão da Figura 3.2.

No segundo resultado da Figura 3.4 foi escolhida uma solução à esquerda do cotovelo da curva. Como pode ser observado, tal solução apresentou um resultado muito ruim em relação ao posicionamento das fontes de corrente, gerando uma distribuição de carga não compatível com o modelo inicial. Isto acontece porque $\|\mathbf{q}\|_2$ é muito sensível às variações do parâmetro de regularização (ver Figura 2.1) na região em questão da Curva L, isto faz com que a solução não seja suavizada, apesar do seu erro de regularização ser muito baixo. Vale ressaltar que, nesse caso, apesar do mal resultado em relação ao posicionamento da fontes de corrente, o erro relativo associado é baixo e igual a 1,6116 %, isto porque a curva do dado calculado ajustou muito bem os valores dos pontos de observação.

No último resultado da Figura 3.4 foi escolhida uma solução à direita do cotovelo da curva L. Como pode ser observado, tal solução apresentou um resultado ruim em relação ao posicionamento das fontes de corrente, gerando uma distribuição de carga muito suavizada e não compatível com o modelo inicial. Isto ocorre porque as soluções nessa região em questão da Curva L são dominadas pelo erro de regularização. Nesse caso o erro relativo foi um pouco maior e igual a 7,7038 %.

Na Figura 3.5, estão apresentados os resultados da inversão compacta com variadas iterações. No resultado obtido com a Iteração 1 (figura superior à esquerda) pode ser claramente observado que foram preservadas as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, de forma muito suavizada em relação ao modelo original e, além disso, na parte central da pluma, a inversão gerou um efeito de borramento não relacionado com a distribuição de cargas do modelo, assim como nas inversões anteriores. Na Iteração 2, vemos que a solução está mais compacta em relação à iteração anterior e corresponde melhor ao modelo original. Na Iteração 3, a solução obtida está muito compactada, começando a desviar do modelo original. Na iteração 4, observa-se que a solução foi absurdamente compacta, não coincidindo com o modelo inicial. Nos testes realizados com mais de cinco iterações as soluções obtidas convergiam para um ponto, similarmente ao resultado da Iteração 4. Destes testes, concluímos que a solução que mais se aproxima do modelo inicial foi obtida na Iteração 2 de forma satisfatória. Observamos que, neste caso, o efeito de borramento observado nas inversões anteriores foi bem reduzido, não sendo perceptível. O erro relativo associado a esta iteração foi de 2,1828 %.

3.2 Modelo 2

Neste modelo, representado na Figura 3.6, foi considerada uma distribuição de cargas muito similar a do primeiro modelo, porém com a polaridade invertida. Novamente, como esperado, os maiores valores de anomalia de potencial espontâneo estão localizados onde a concentração de carga é positiva e os menores valores da anomalia, onde a concentração de carga é negativa.

Na Figura 3.7 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto claramente que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, na parte central da pluma, a inversão gerou um efeito de borramento muito expressivo não relacionado com a distribuição de cargas do modelo.

Na Figura 3.8, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). É facilmente observável que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, na parte central da pluma, a inversão gerou um efeito de borramento não relacionado com a distribuição de cargas do modelo. É possível observar que, nesse caso, a parte central da pluma está mais borrada do que com a inversão com vínculo de Mínima Norma.

Na Figura 3.9, temos a solução da inversão Compacta do modelo 2. Observa-se que a solução preservou a posição das fontes de corrente positiva e negativa e, além disso, está satisfatoriamente compactada. Pode ser visto, à direita da fonte de corrente positiva (vermelha) que a inversão gerou uma fonte de corrente positiva não relacionada com o modelo inicial. Isto pode ocorrer devido a tentativa de ajuste da curva do dado calculado ao dado observado.

3.3 Modelo 3

Neste terceiro modelo, representado pela Figura 3.10, foi considerada a distribuição de cargas negativa e positivas próximas entre si e no centro da pluma. Percebe-se nesse modelo que o acréscimo do ruído destoou mais do dado sem ruído do que nos modelos anteriores. Isto acontece porque a amplitude do sinal cai devido ao efeito de sobreposição das cargas, decorrente dos pólos estarem próximos, que tendem a se cancelar e, como o ruído tem amplitude constante para todos os modelos, este será mais elucidado nas menores amplitudes se comparada às maiores. Desta forma, este modelo serve também para comparar o efeito que o ruído provoca no modelo invertido e, por conseguinte, no ajuste.

Na Figura 3.11 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto claramente que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, na parte da pluma onde o modelo

apresentava uma distribuição nula de carga, a inversão gerou um efeito de borramento muito evidenciado não relacionado com a distribuição de cargas do modelo. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com menores valores onde está a concentração negativa de cargas e maiores valores onde está a concentração positiva de cargas.

Na Figura 3.12, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto claramente que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, nas extremidades da pluma, a inversão gerou um efeito de borramento mais evidente do que na inversão da Figura 3.11.

Na Figura 3.13, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 2 iterações. Pode ser claramente visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas e não gerou o efeito de borramento observado nas inversões anteriores referentes a este modelo. Essa solução ofereceu visualmente a posição de fontes de corrente mais próxima do modelo inicial e seu erro relativo foi de 6,9483 %, bem próximo dos erros relativos das outras inversões deste mesmo modelo.

3.4 Modelo 4

No quarto modelo, representado pela Figura 3.14, foi considerada a distribuição de cargas negativa e positivas próximas entre si e no início da pluma. É perceptível que o acréscimo do ruído destoou mais do dado sem ruído, assim como no modelo3.

Na Figura 3.15 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. É visível que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, com um leve efeito de borramento e uma fonte de corrente negativa (azul) não relacionada ao modelo inicial à direita da fonte de corrente positiva coerente com o modelo. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com menores valores onde está a concentração negativa de cargas e maiores valores onde está a concentração positiva de cargas.

Na Figura 3.16, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). É notório que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas e gerou um efeito de borramento menos evidente do que na inversão da Figura 3.15.

Na Figura 3.17, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 2 iterações. Pode ser claramente visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas e não gerou o efeito de borramento observado nas inversões anteriores referentes a este modelo. Essa solução ofereceu visualmente a posição de fontes de corrente mais próxima do modelo inicial apesar do seu erro relativo de 12,8235 % ser elevado.

3.5 Modelo 5

No quinto modelo, representado pela Figura 3.18, foi considerada a distribuição de cargas negativas e positivas alternadas entre si ao longo da pluma. Percebe-se que os pontos de carga nos extremos da pluma proporcionam maior amplitude no dado de potencial espontâneo, sendo muito baixo na extremidade esquerda referente à primeira fonte de carga negativa e muito mais alto na extremidade direita referente à segunda fonte de carga positiva. Isto ocorre porque os pontos de corrente mais centrais da pluma sofrem maior interferência das fontes de corrente próximas de sinal contrário, diminuindo sua amplitude.

Na Figura 3.19 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, de forma muito suavizada. Isto por causa da interferência das fontes de corrente próximas de sinal contrário. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com menores valores onde está a concentração de cargas negativas e maiores valores onde está a concentração de cargas positivas.

Na Figura 3.20, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto claramente que tal inversão também preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém, não tão suavizada como na inversão da Figura 3.15. No caso deste modelo, essa inversão ofereceu a solução mais próxima do modelo inicial e seu erro relativo foi de 6,8778 %.

Na Figura 3.21, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 2 iterações. Pode ser visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém de forma extremamente suavizada, configurando, visualmente, a pior solução gerada pelas inversões deste modelo. A distribuição alternada, provavelmente, foi avaliada pelo regularizador compacto como uma distribuição suave, dada a proximidade das fontes, e o princípio de suavidade é o oposto da informação a priori que este vínculo introduz. O erro relativo associado foi excesssivamente alto e igual a 24,0943 %.

3.6 Modelo 6

O sexto modelo, representado pela Figura 3.22, contém cargas positivas nas extremidades da pluma e uma concentração de cargas negativas no centro da pluma. Comparado a outros modelos, a amplitude do dado de potencial espontâneo é maior, isto porque as cargas de sinal contrário anulam-se em menor proporção e por causa da concentração de cargas negativas maior em relação aos modelos anteriores.

Na Figura 3.23 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto que a inversão preservou as posições das concentrações

de cargas positivas, porém, na parte central da pluma, as cargas negativas não ficam muito evidentes e há um aparecimento de cargas positivas nessa região que não condizem com o modelo inicial, introduzindo um efeito de borramento. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com menores valores onde está a concentração de cargas negativas e maiores valores onde está a concentração de cargas positivas.

Na Figura 3.24, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas de forma muito suavizada. No caso deste modelo, essa inversão ofereceu a solução mais próxima do modelo inicial e seu erro relativo foi de 4,0167%.

Na Figura 3.25, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 2 iterações. Pode ser visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas positivas, porém no que se refere às fontes de cargas negativas a solução converge para uma fonte no centro da pluma, não sendo compatível com o modelo inicial que contém cinco pontos de fonte de corrente negativa na região central da pluma.

3.7 Modelo 7

O sétimo modelo, representado pela Figura 3.26, assemelha-se ao modelo 6, porém com polaridade invertida: contém cargas negativas nas extremidades da pluma e uma concentração de cargas positivas no centro da pluma. Comparado ao modelo anterior, a amplitude do dado de potencial espontâneo é menor, isto porque as cargas de sinal contrário anulam-se em maior intensidade devido a menor disparidade na quantidade destas (contém cinco pontos de fonte de corrente negativa e quatro de fonte de corrente positiva).

Na Figura 3.27 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto de forma clara que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas positivas e negativas. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com menores valores onde está a concentração de cargas negativas e maiores valores onde está a concentração de cargas positivas. Para este modelo, esta foi visualmente a melhor solução e seu erro relativo foi de 4,5137%.

Na Figura 3.28, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto que tal inversão também preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas, porém de forma muito suavizada em relação à da Figura 3.27.

Na Figura 3.29, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 2 iterações. Pode ser visto que tal inversão preservou em partes as posições das concentrações de cargas positivas, porém as fontes de corrente negativa na extremidade esquerda da pluma desapareceram e na extremidade direita foram muito reduzidas, não sendo compatível com

o modelo inicial.

3.8 Modelo 8

O oitavo modelo, representado pela Figura 3.30, representa um volume contaminado subsuperficial na forma de cava, com duas fontes de corrente de sinais opostos localizadas horizontalmente no mesmo plano e próximas do limite da cava, sinalizando área de biodegradação ativa. Observa-se que a curva dos dados segue como esperado, com valores menores referentes à fonte negativa e valores maiores referentes à fonte positiva. Pode ser claramente visto que a curva do dado marca a borda da cava, isto ocorre porque, em comparação à pluma, a cava tem espessura maior, proporcionando maior contraste de resistividade.

Na Figura 3.31 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto de forma clara que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas positivas e negativas. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com menores valores onde está a concentração de cargas negativas e maiores valores onde está a concentração de cargas positivas. O erro relativo foi de 3,1013 %, satisfatoriamente baixo.

Na Figura 3.32, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto que tal inversão também preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas de forma muito semelhante ao da Figura 3.31.

Na Figura 3.33, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 2 iterações. Pode ser visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas positivas e negativas de forma mais compacta em relação às inversões anteriores deste modelo, sendo mais compatível com o modelo inicial. O erro relativo associado foi satisfatoriamente baixo e igual a 3,4051 %.

3.9 Modelo 9

O nono modelo, representado pela Figura 3.34, representa uma contaminação na forma de cava, com duas fontes de corrente de sinais opostos localizadas verticalmente no mesmo plano. Observa-se que a curva dos dados segue como esperado, com valores menores sobre a cava, isto porque a fonte de corrente negativa está mais próxima da superfície, logo a maior contribuição à amplitude vai ser referente à esta. Deve-se observar que a amplitude dos dados é menor em relação ao modelo anterior, isto porque a proximidade entre as fontes de corrente de sinal contrário faz com que se anulem em maior intensidade.

Na Figura 3.35 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo

de Mínima Norma. Pode ser visto que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas positivas e negativas. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com menores valores sobre a pluma. O erro relativo foi elevado e igual a 15,3057 %.

Na Figura 3.36, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto que tal inversão também preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas de forma muito semelhante ao da Figura 3.35, porém menos suavizada, oferecendo um melhor resultado em relação à anterior.

Na Figura 3.37, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 1 iteração. O fato de só utilizar a primeira iteração, neste caso, foi devido à rápida convergência do programa de inversão. Pode ser visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas positivas e negativas de forma mais compacta em relação às inversões anteriores deste modelo, sendo mais compatível com o modelo inicial. O erro relativo associado foi alto e igual a 14,9376 %.

3.10 Modelo 10

O décimo modelo, representado pela Figura 3.38, representa uma contaminação na forma de cava muito similar ao modelo 9, porém com polaridade invertida. Observa-se que a curva dos dados segue como esperado, com valores maiores sobre a cava, isto porque a fonte de corrente positiva está mais próxima da superfície, logo a maior contribuição à amplitude vai ser referente à esta.

Na Figura 3.39 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto que a inversão preservou relativamente as posições das concentrações de cargas positivas e negativas, porém houve a criação de fontes de corrente nas extremidades superiores da cava não relacionadas ao modelo inicial. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu como esperado, com maiores valores sobre a pluma. O erro relativo foi elevado e igual a 15,2087 %.

Na Figura 3.40, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto que tal inversão também preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas de forma muito semelhante ao da Figura 3.39.

Na Figura 3.41, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 1 iteração. Pode ser visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas positivas e negativas de forma mais compacta em relação às inversões anteriores deste modelo, sendo mais compatível com o modelo inicial, porém houve a criação de pontos de fonte de corrente nas extremidades superiores da cava não relacionados com o modelo inicial. O erro relativo associado foi alto e igual a 14,1056 %.

3.11 Modelo 11

No décimo primeiro modelo, representado pela Figura 3.42, foi considerada a distribuição de cargas negativas e positivas alternadas entre si ao longo da cava. Percebe-se que os pontos de carga nos extremos da cava proporcionam maior amplitude no dado de potencial espontâneo, sendo muito baixo na extremidade esquerda referente à primeira fonte de carga negativa e muito mais alto na extremidade direita referente à segunda fonte de carga positiva. Isto ocorre porque os pontos de corrente mais centrais da cava sofrem maior interferência das fontes de corrente próximas de sinal contrário, diminuindo sua amplitude.

Na Figura 3.43 está apresentado o resultado da inversão do modelo utilizando o vínculo de Mínima Norma. Pode ser visto que a inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas das extremidades da cava, porém, não diferenciou a alternância entre as polaridades no centro, isto devido à interferência das fontes de corrente de sinal contrário muito próximas. A anomalia de potencial espontâneo ocorreu com menores valores onde está a concentração de cargas negativas e maiores valores onde está a concentração de cargas positivas.

Na Figura 3.44, foi utilizada a inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007). Pode ser visto que tal inversão também preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas das extremidades da cava, porém, não diferenciou a alternância entre as polaridades no centro. Observa-se que esta inversão está mais suavizada em relação à anterior. O erro relativo associado foi satisfatoriamente baixo e igual a 5,7553 %

Na Figura 3.45, está apresentado o resultado da inversão Compacta utilizando 2 iterações. Pode ser visto que tal inversão preservou as posições das concentrações de cargas negativas e positivas das extremidades da cava, porém inexistem as cargas do centro da cava, não sendo compatível com o modelo inicial.

3.12 Resultados dos Ensaio

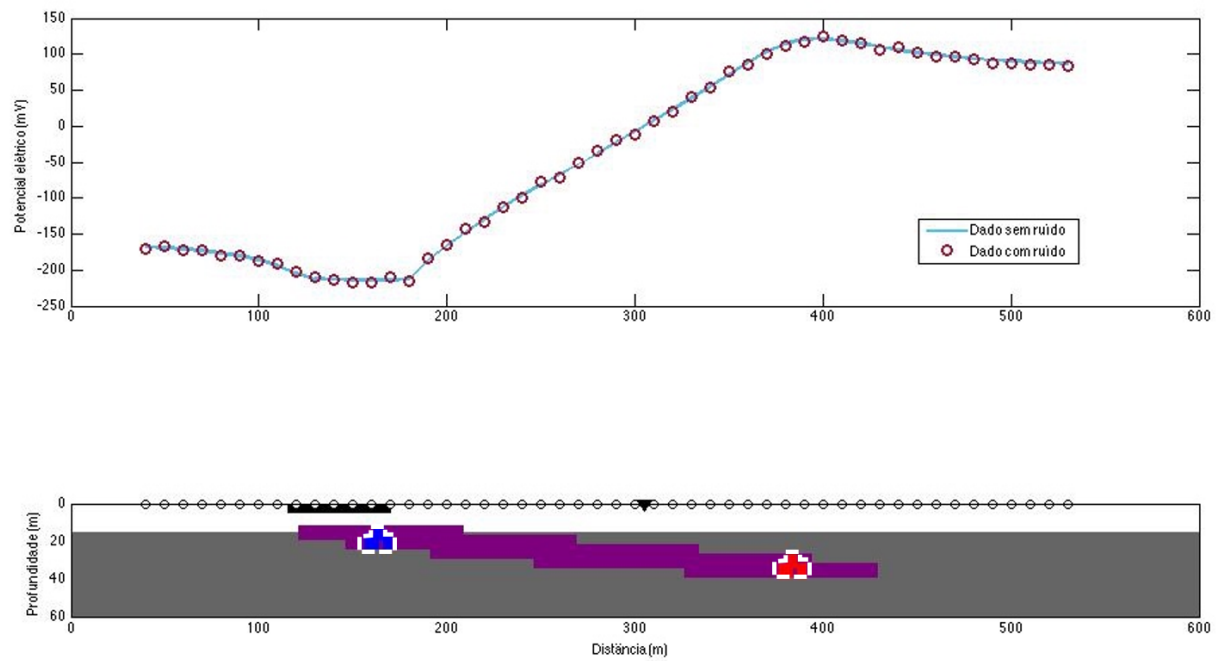


Figura 3.1: Primeiro modelo de pluma fina de contaminação. O gráfico acima corresponde à anomalia de potencial espontâneo do dado sintético com e sem ruído (círculos vermelhos e linha azul, respectivamente). Abaixo é mostrado o modelo de resistividade com a pluma em roxo e a distribuição de cargas positiva (em vermelho) e negativa (em azul).

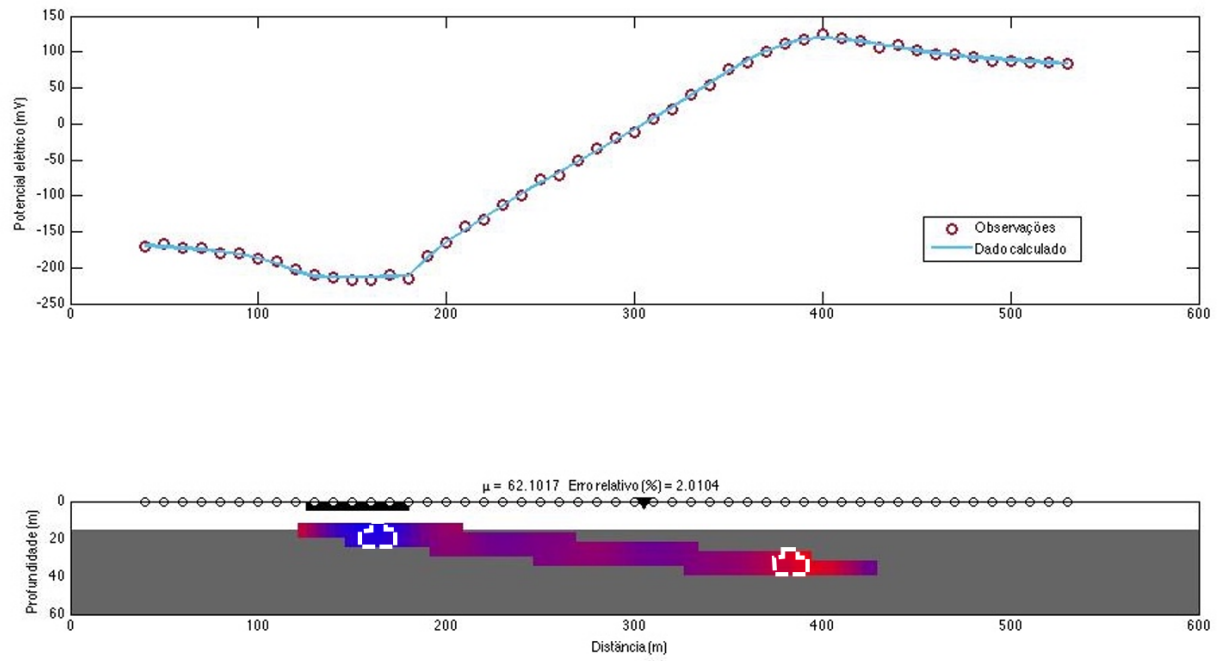


Figura 3.2: Inversão do modelo 1 com vínculo de Mínima Norma.

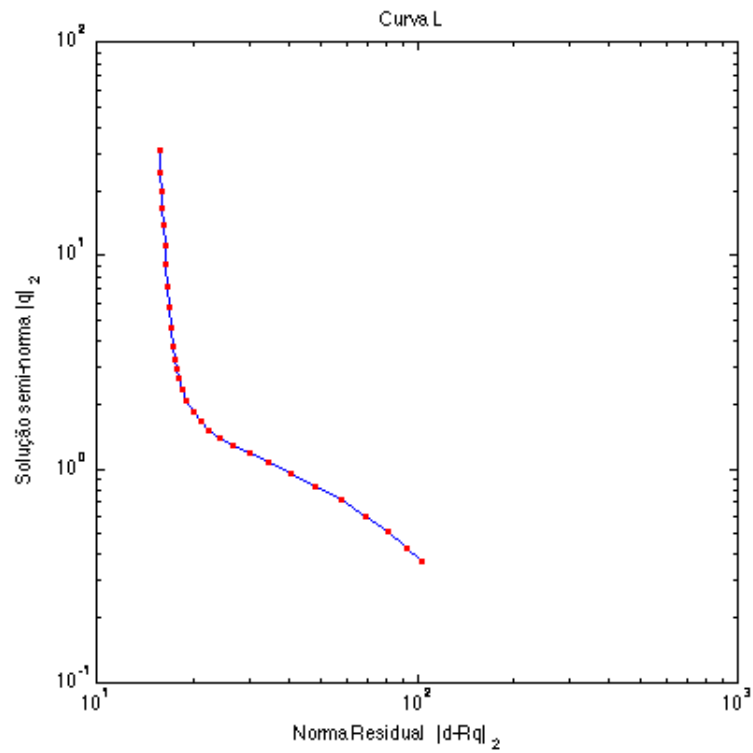


Figura 3.3: Curva L.

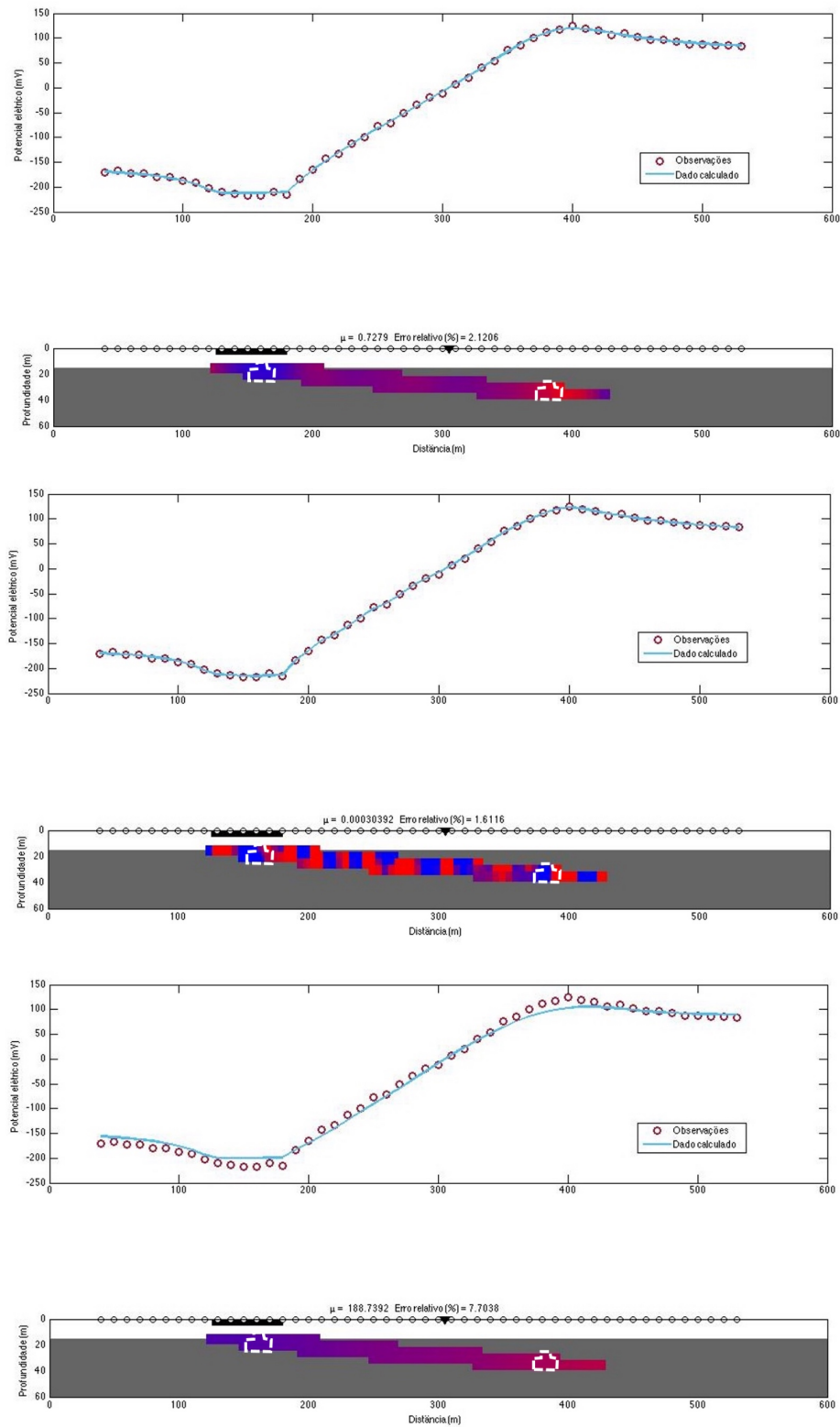


Figura 3.4: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 1. Na primeira imagem foi escolhida uma solução no cotovelo da Curva L, nas imagens central e inferior foram escolhidas uma solução à esquerda e à direita da Curva L, respectivamente.

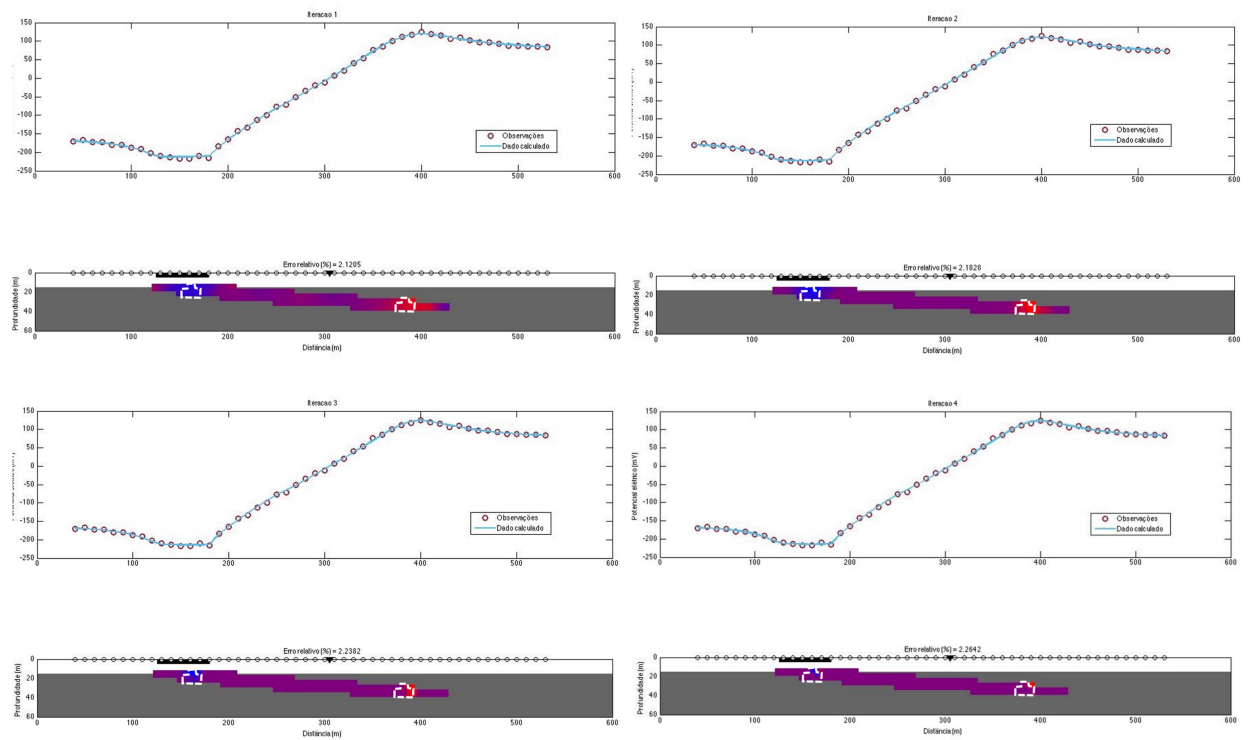


Figura 3.5: Inversão Compacta do modelo 1.

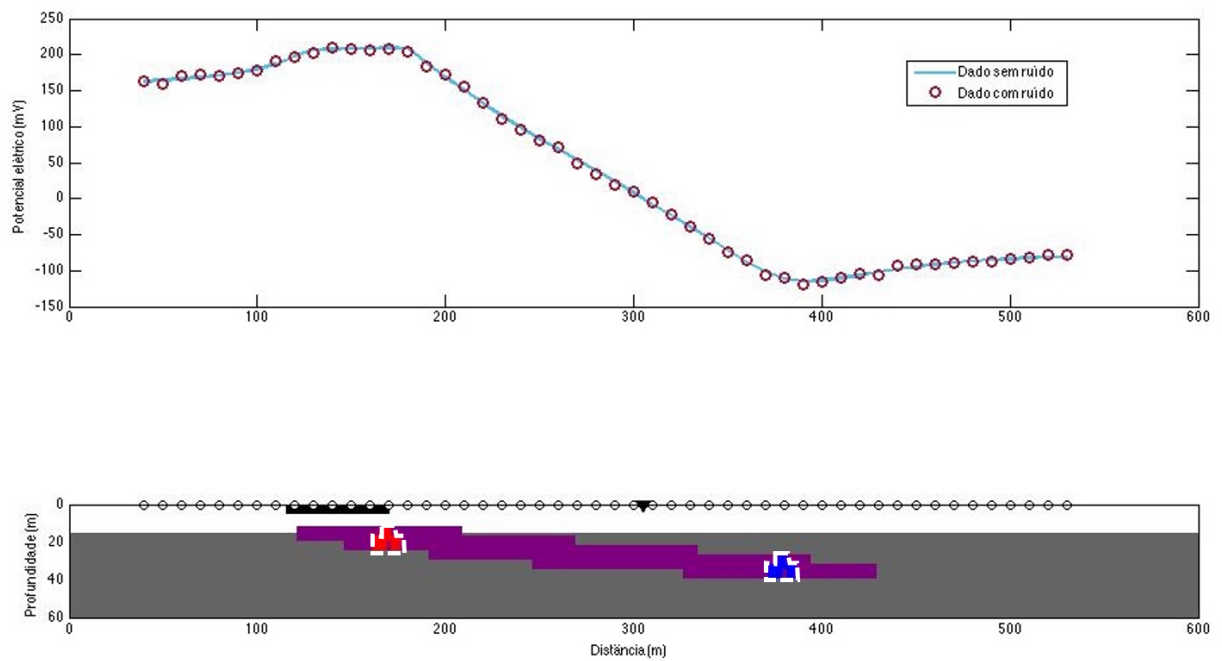


Figura 3.6: Modelo 2 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

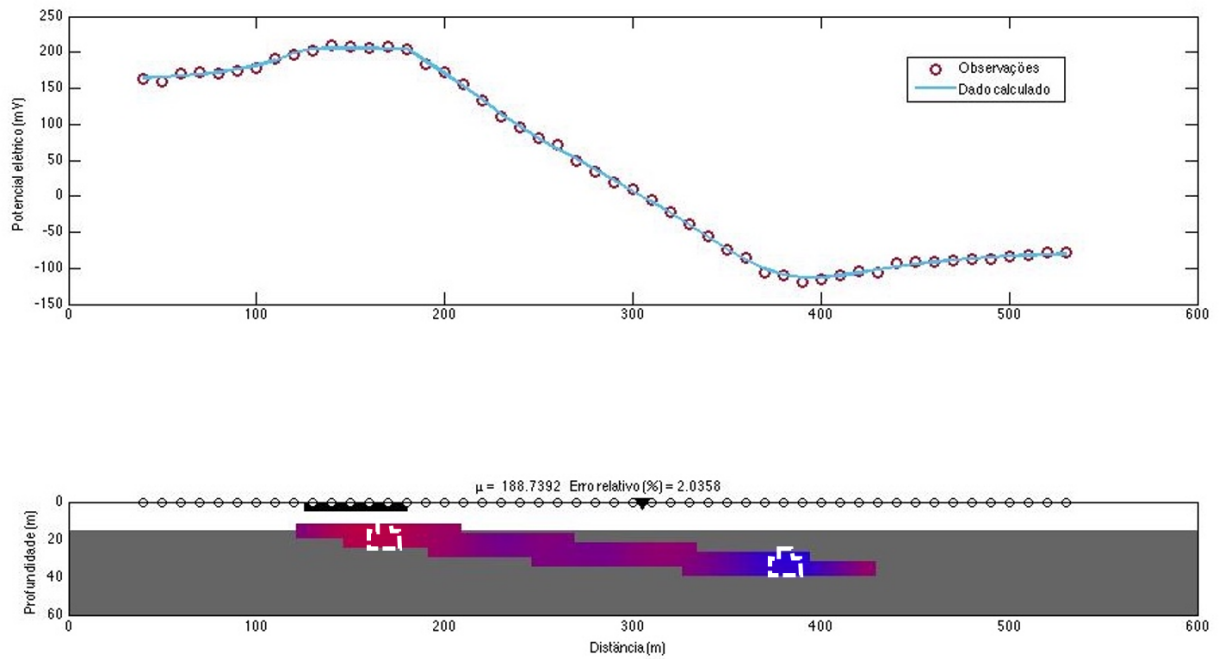


Figura 3.7: Inversão do modelo 2 com vínculo de Mínima Norma.

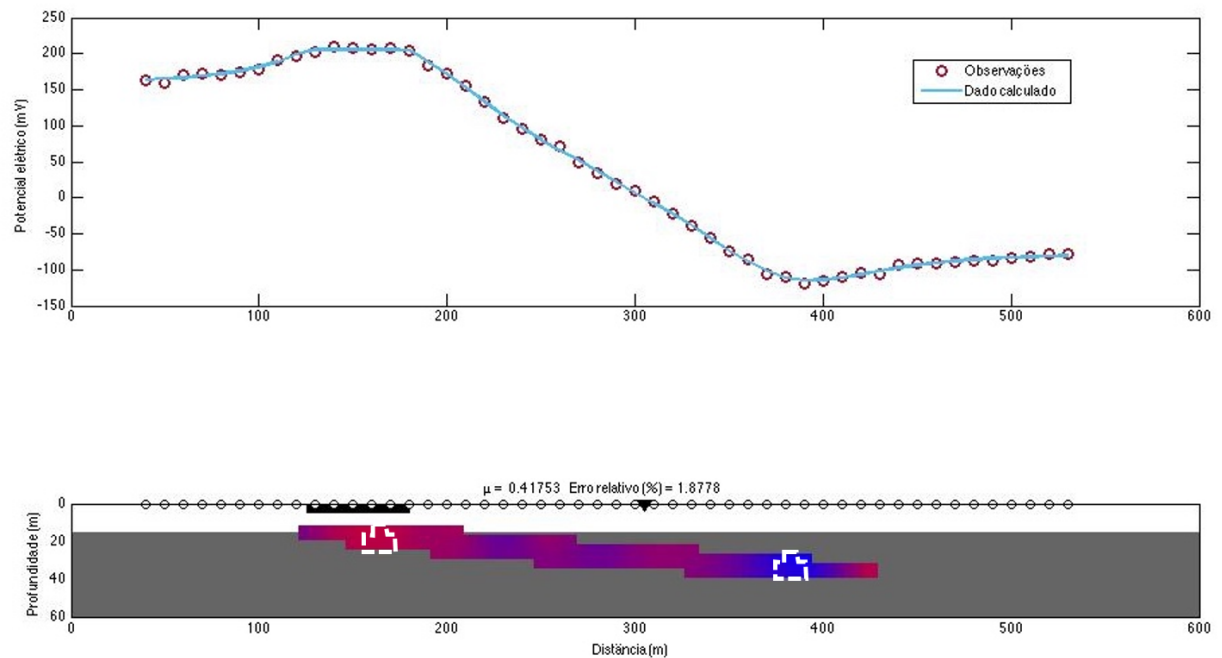


Figura 3.8: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 2.

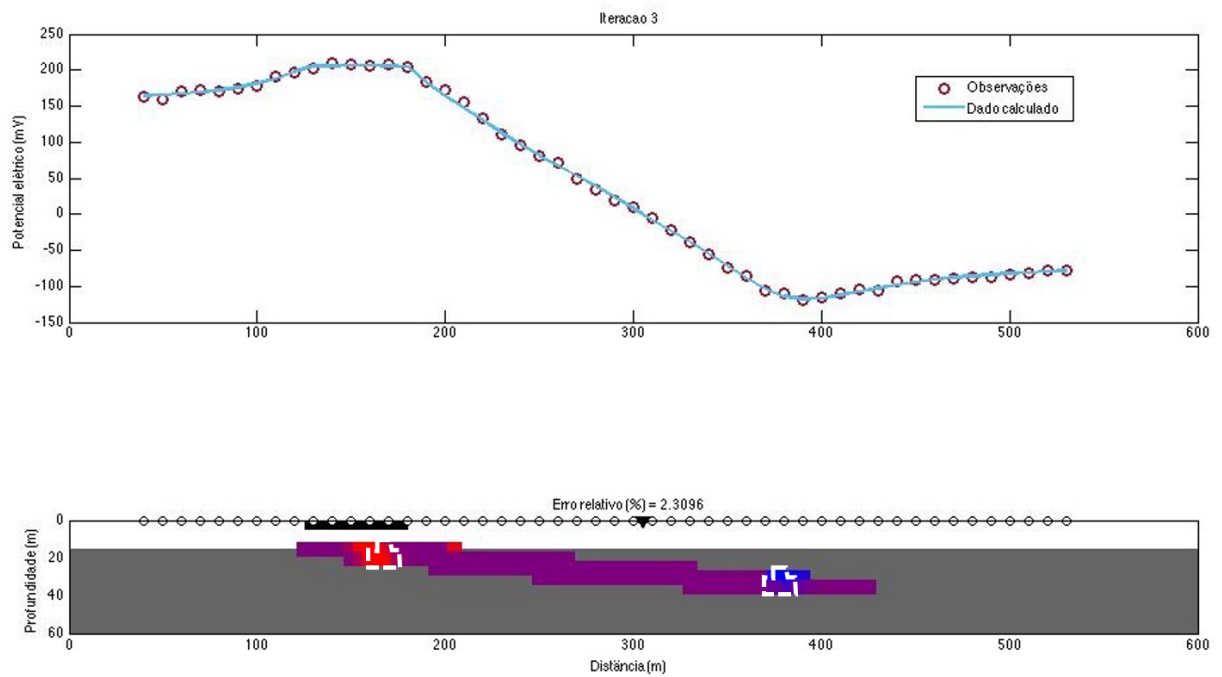


Figura 3.9: Inversão Compacta do modelo 2.

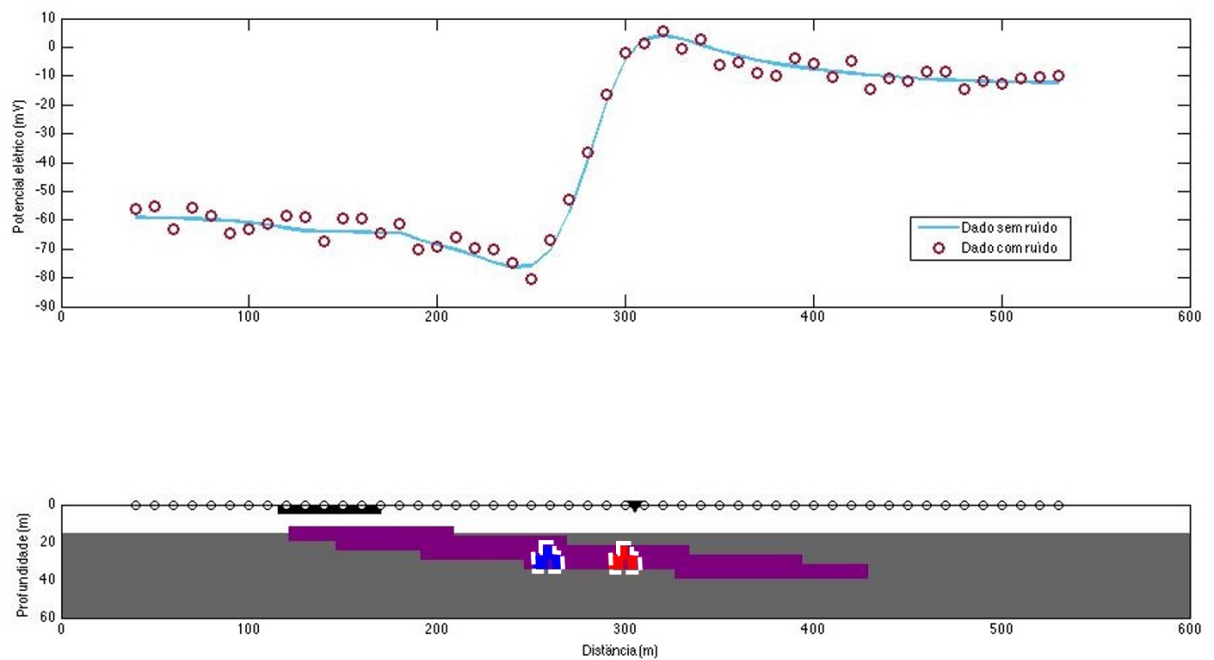


Figura 3.10: Modelo 3 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

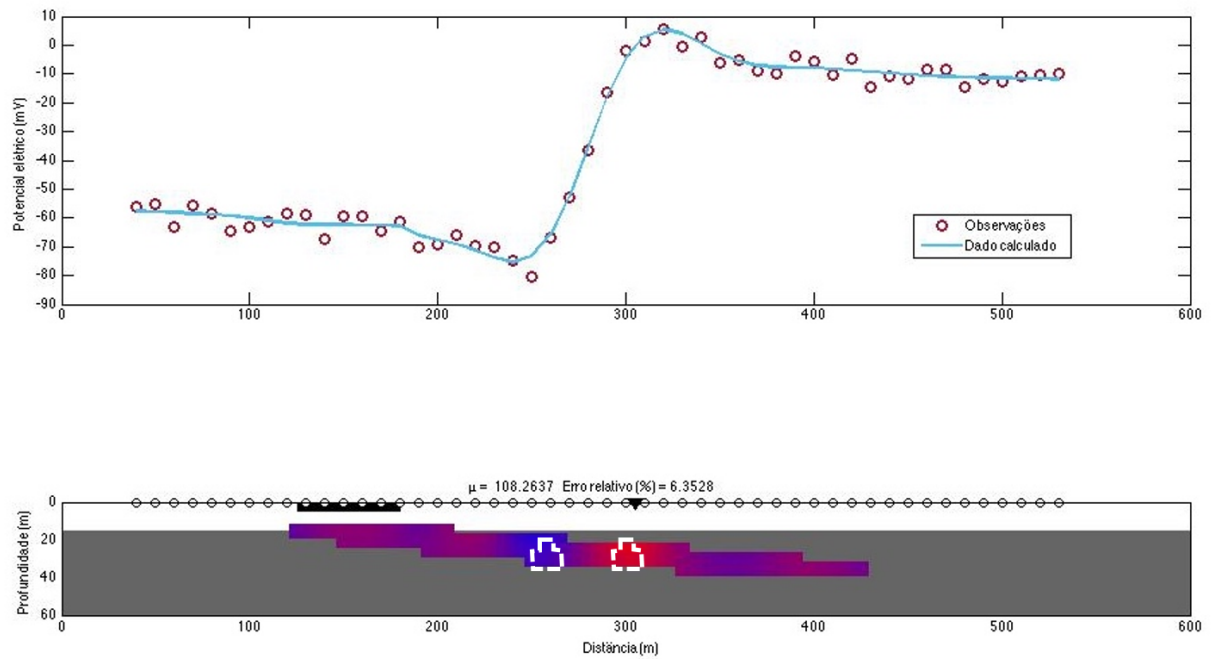


Figura 3.11: Inversão do modelo 3 com vínculo de Mínima Norma.

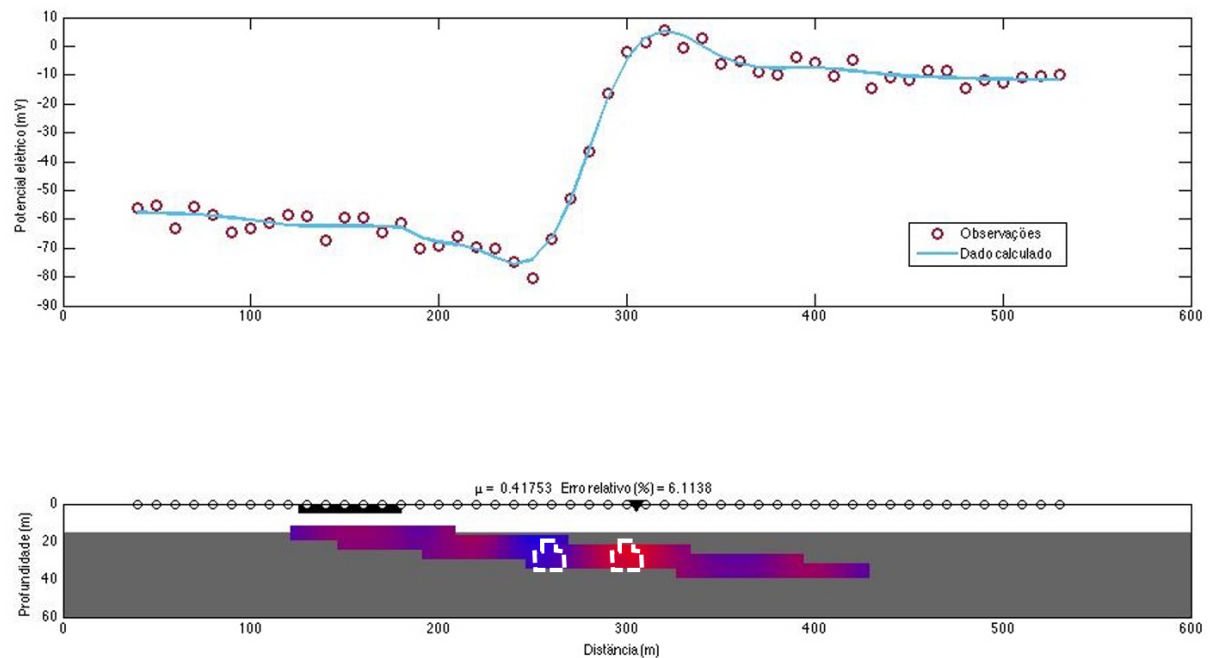


Figura 3.12: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 3.

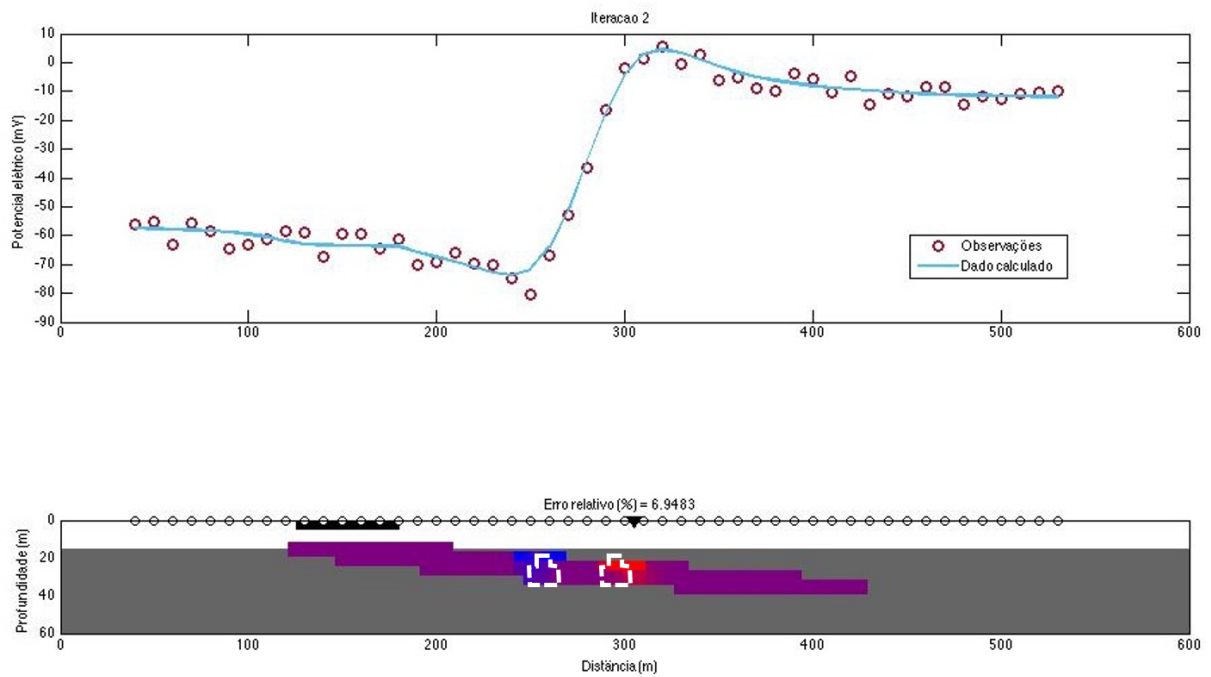


Figura 3.13: Inversão Compacta do modelo 3.

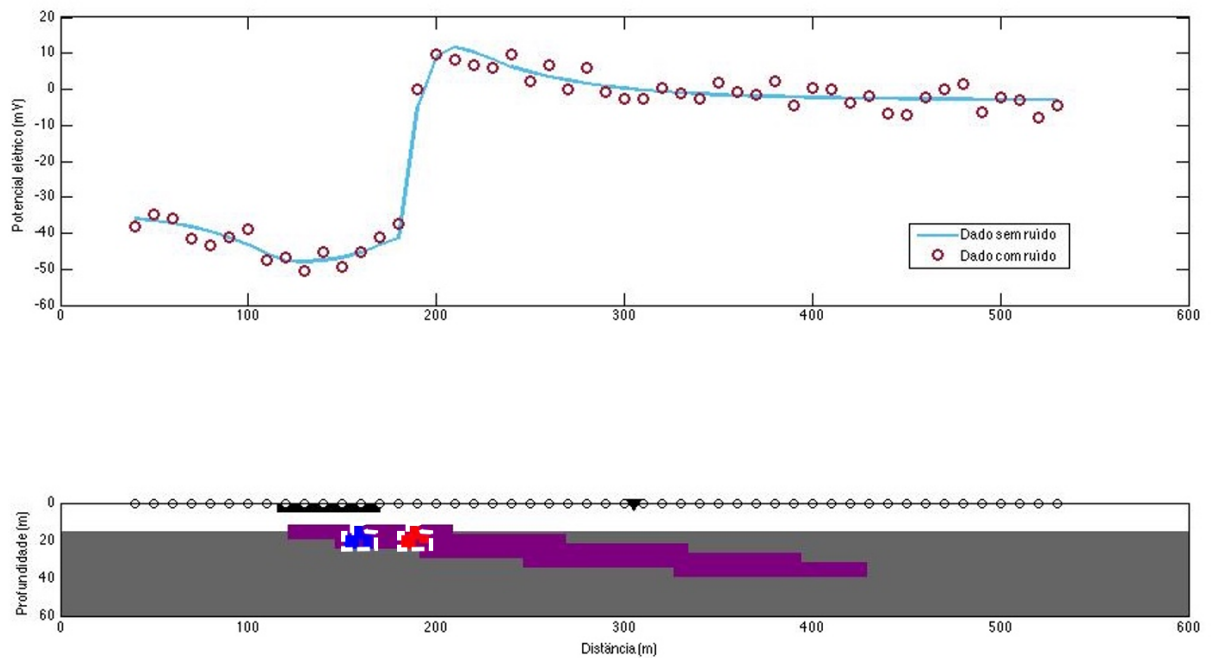


Figura 3.14: Modelo 4 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

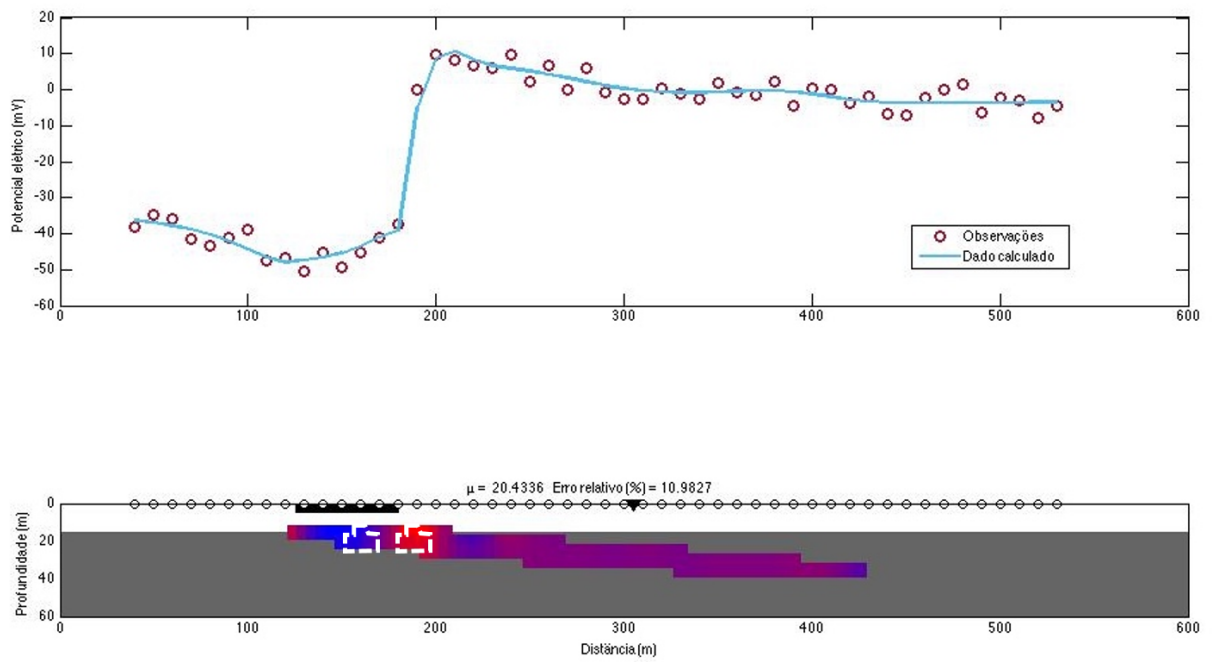


Figura 3.15: Inversão do modelo 4 com vínculo de Mínima Norma.

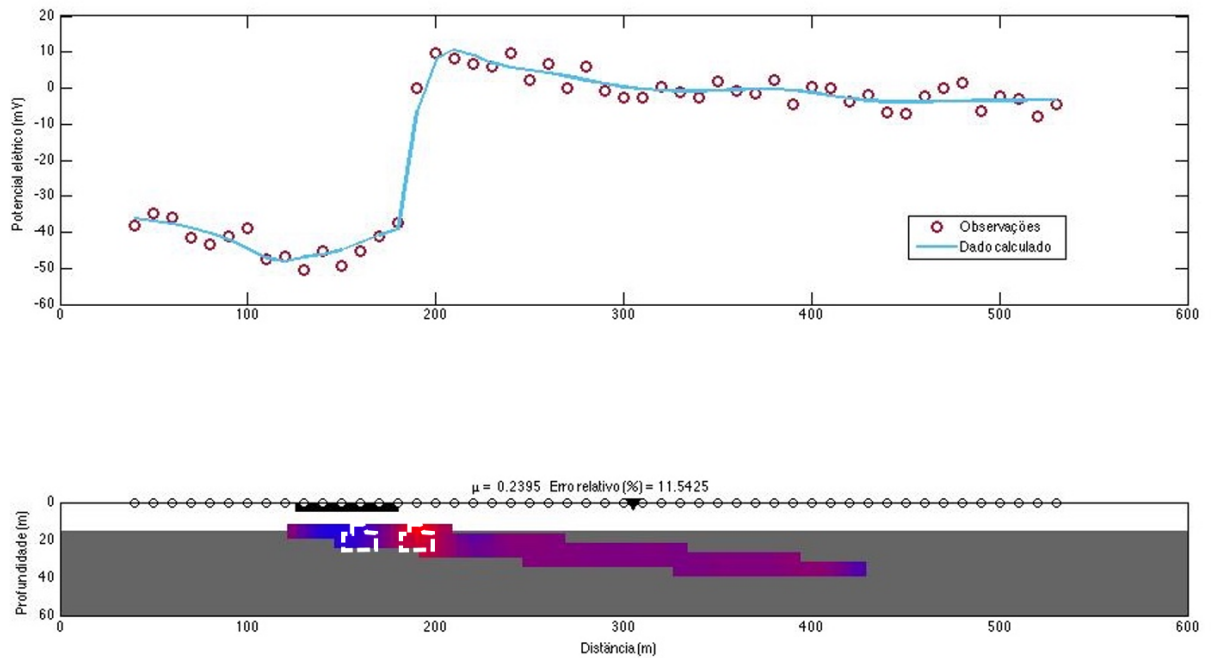


Figura 3.16: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 4.

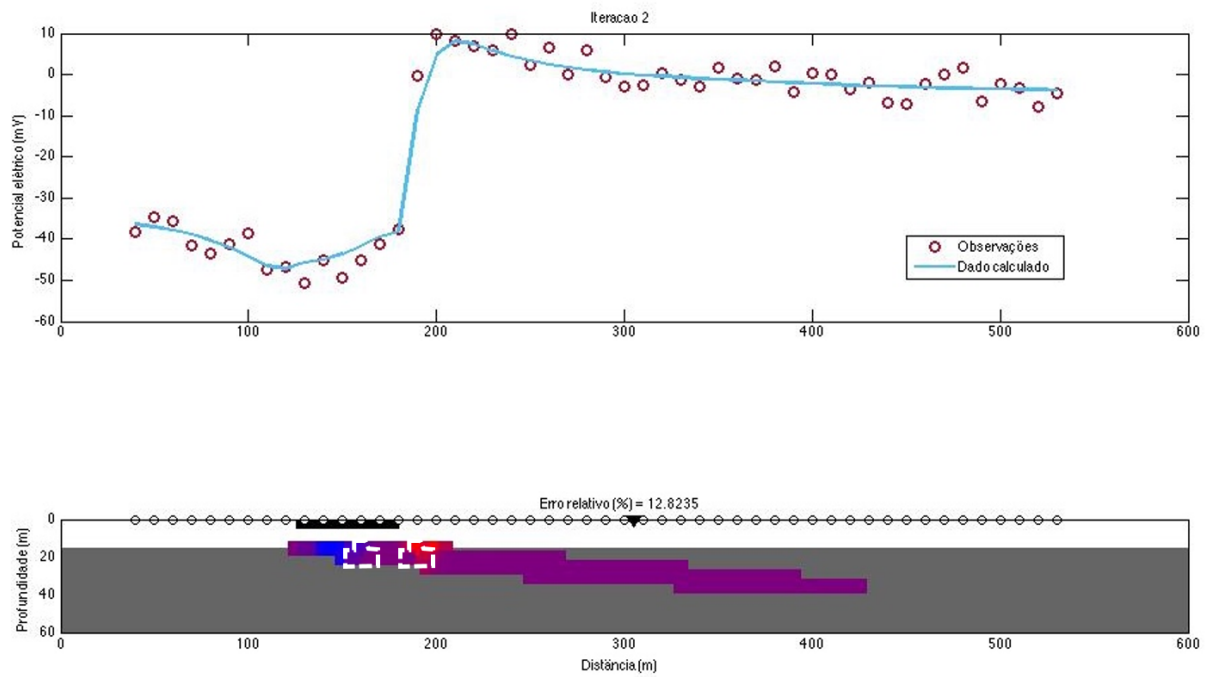


Figura 3.17: Inversão Compacta do modelo 4.

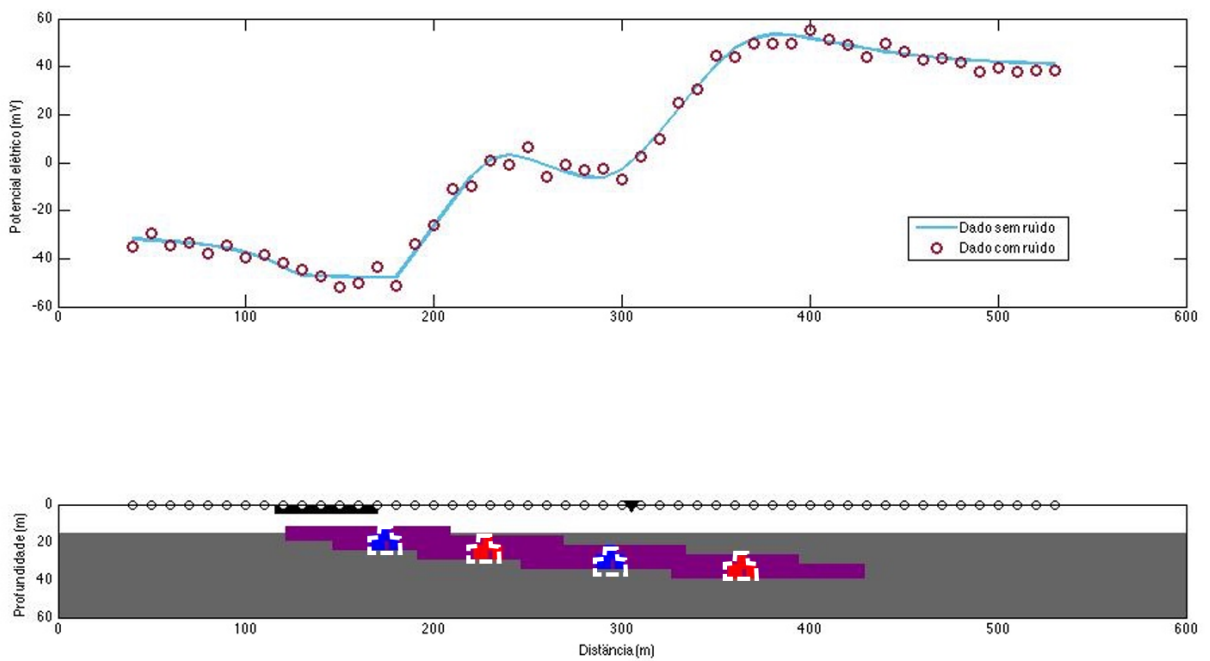


Figura 3.18: Modelo 5 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

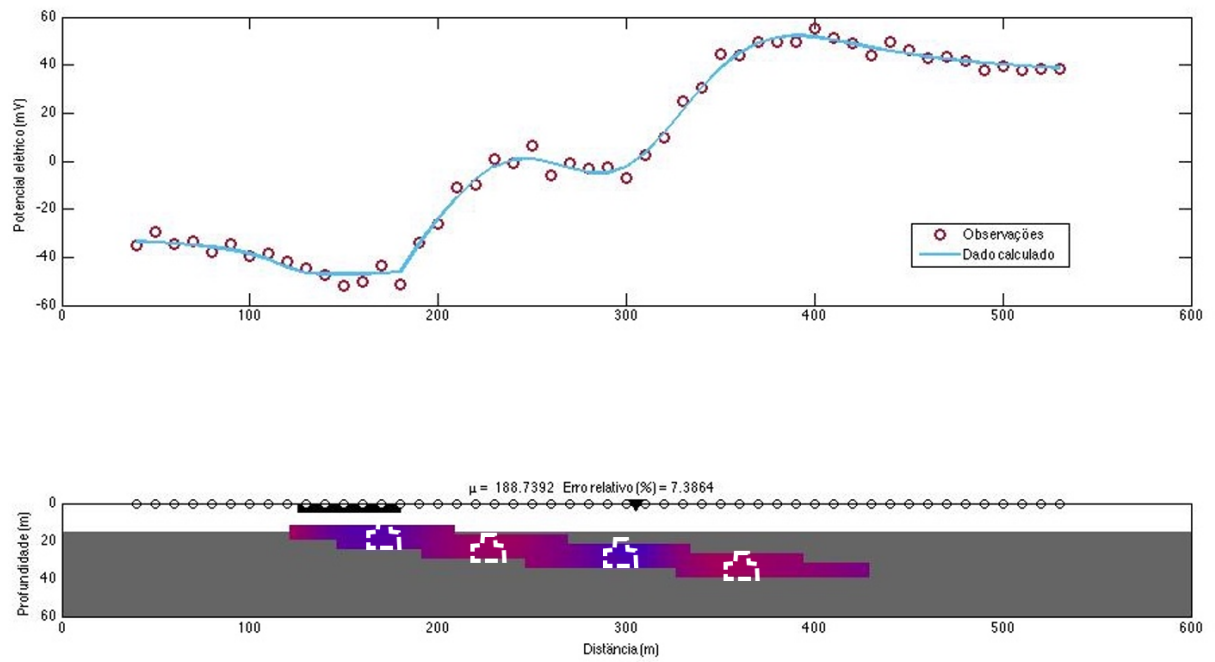


Figura 3.19: Inversão do modelo 5 com vínculo de Mínima Norma.

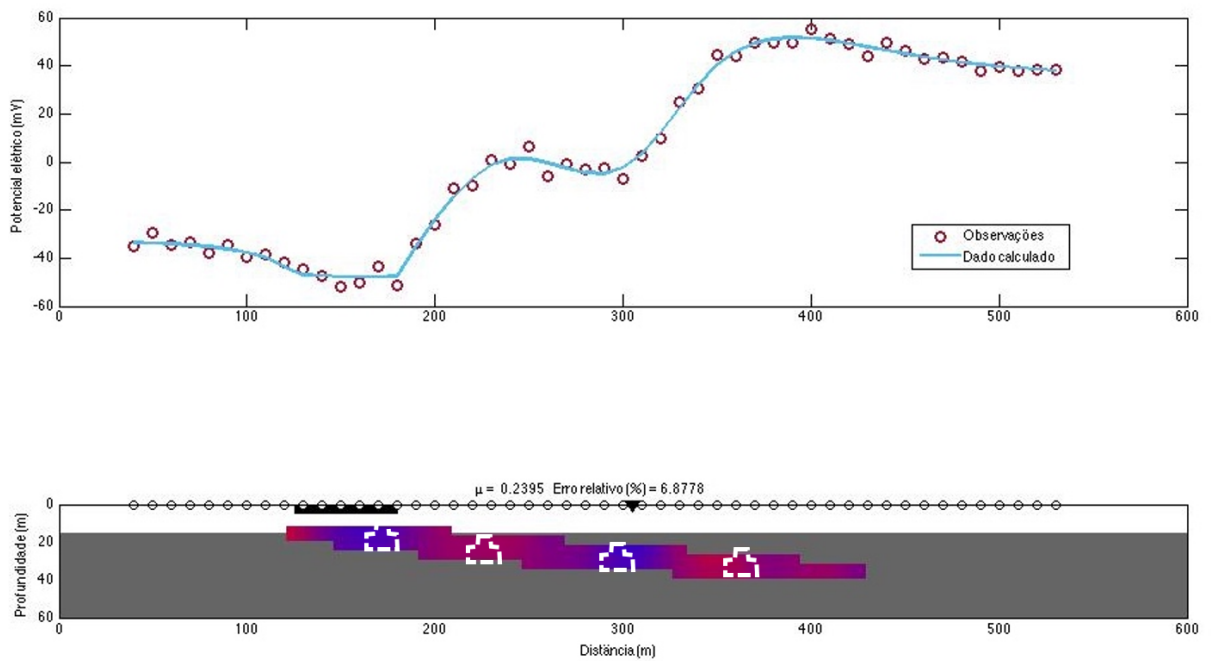


Figura 3.20: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 5.

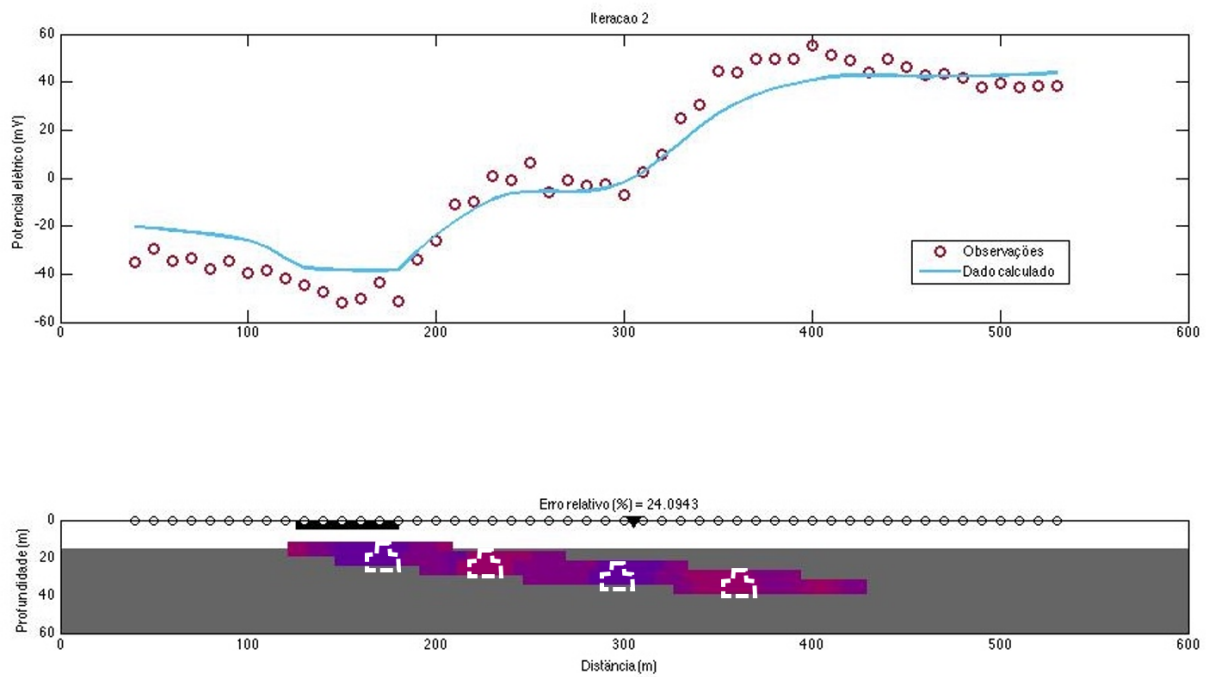


Figura 3.21: Inversão Compacta do modelo 5.

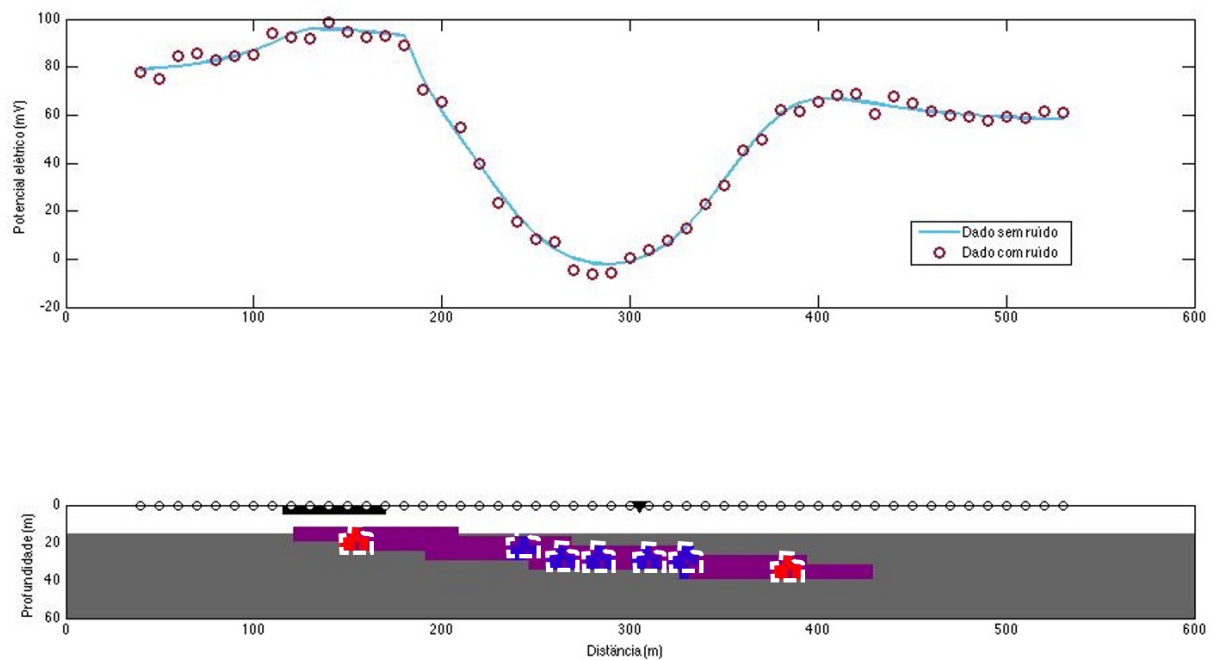


Figura 3.22: Modelo 6 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

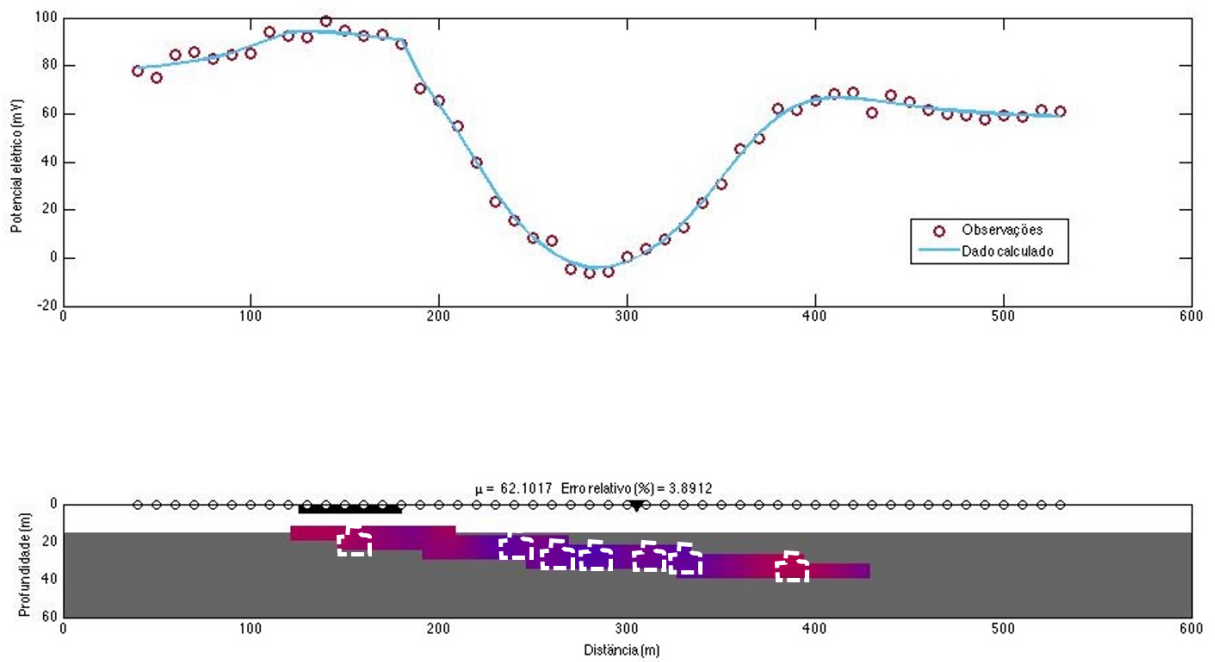


Figura 3.23: Inversão do modelo 6 com vínculo de Mínima Norma.

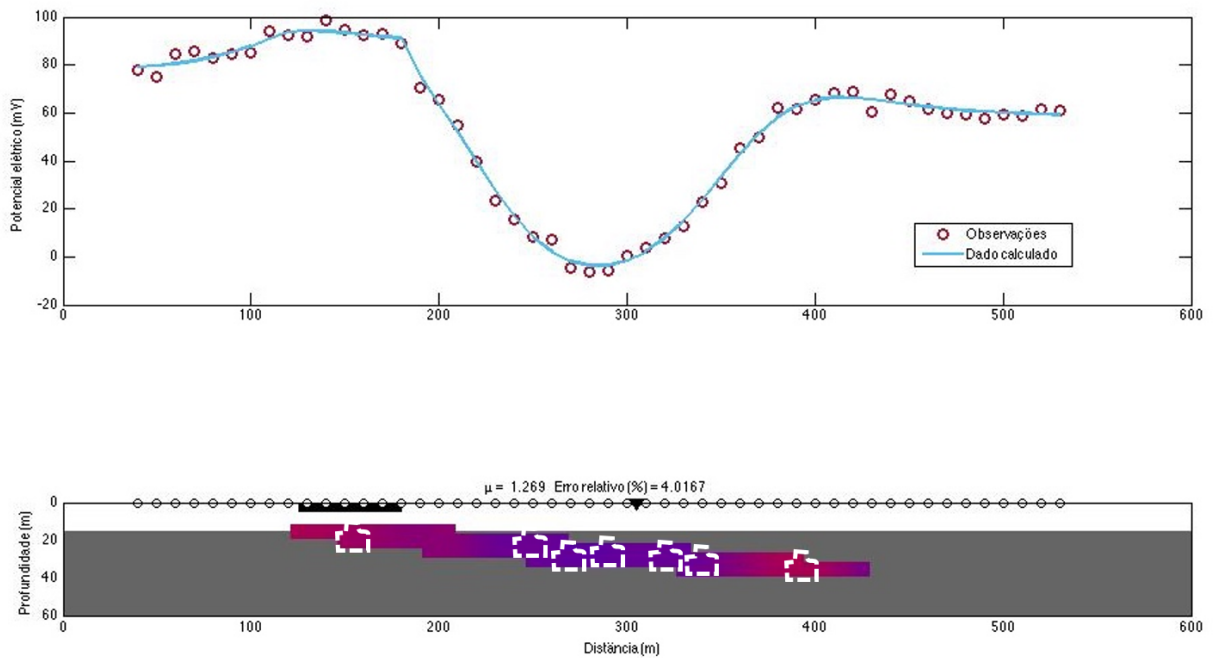


Figura 3.24: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 6.

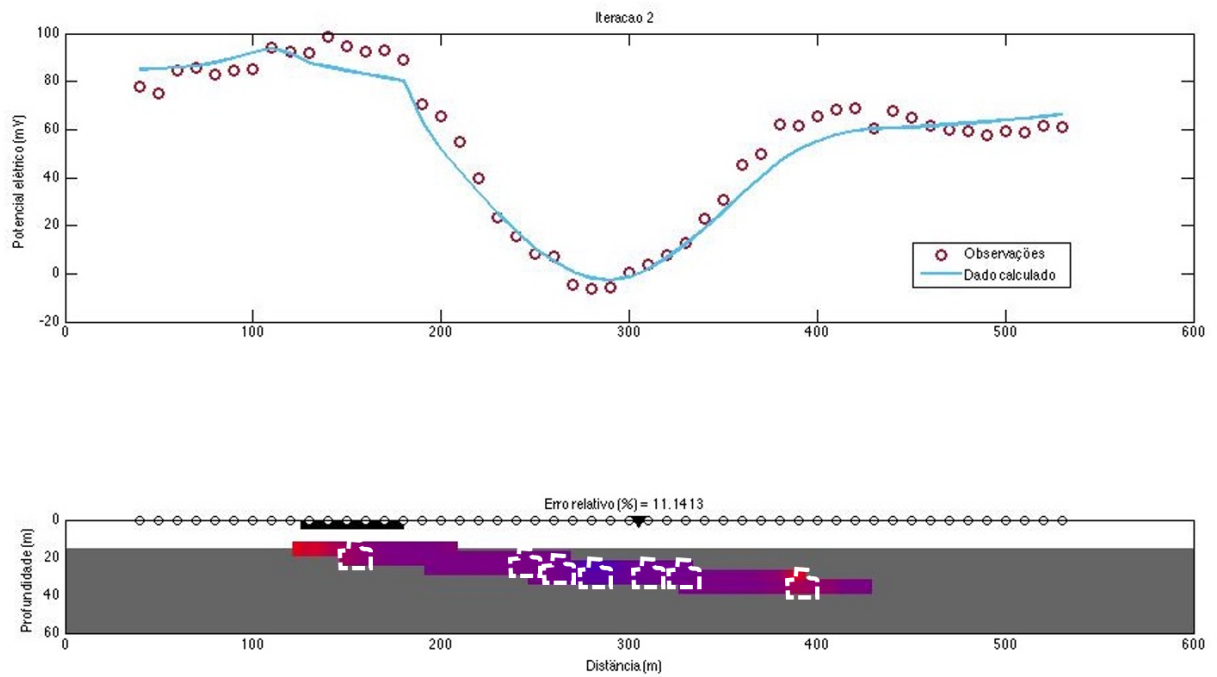


Figura 3.25: Inversão Compacta do modelo 6.

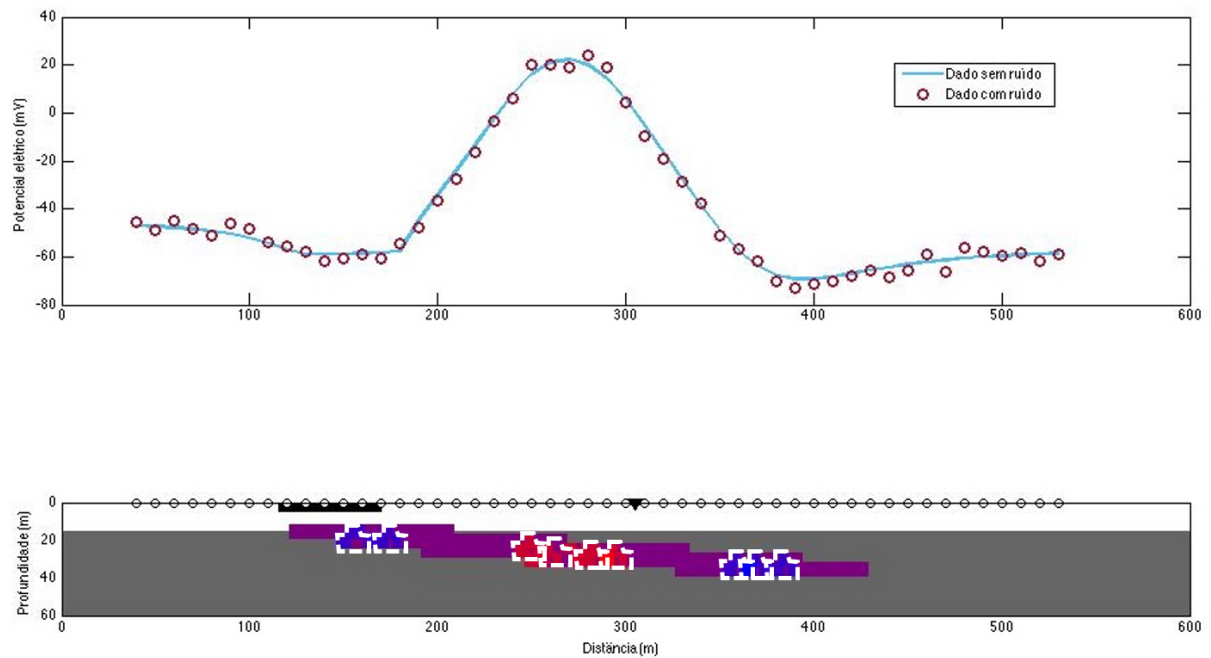


Figura 3.26: Modelo 7 de pluma fina de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

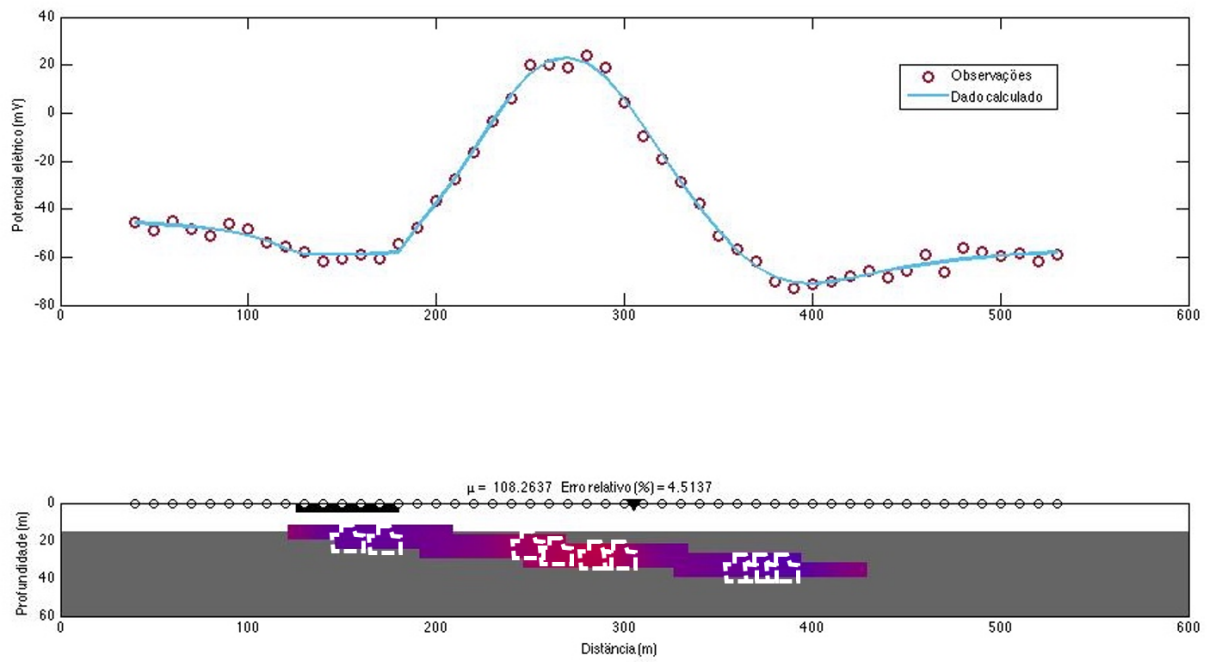


Figura 3.27: Inversão do modelo 7 com vínculo de Mínima Norma.

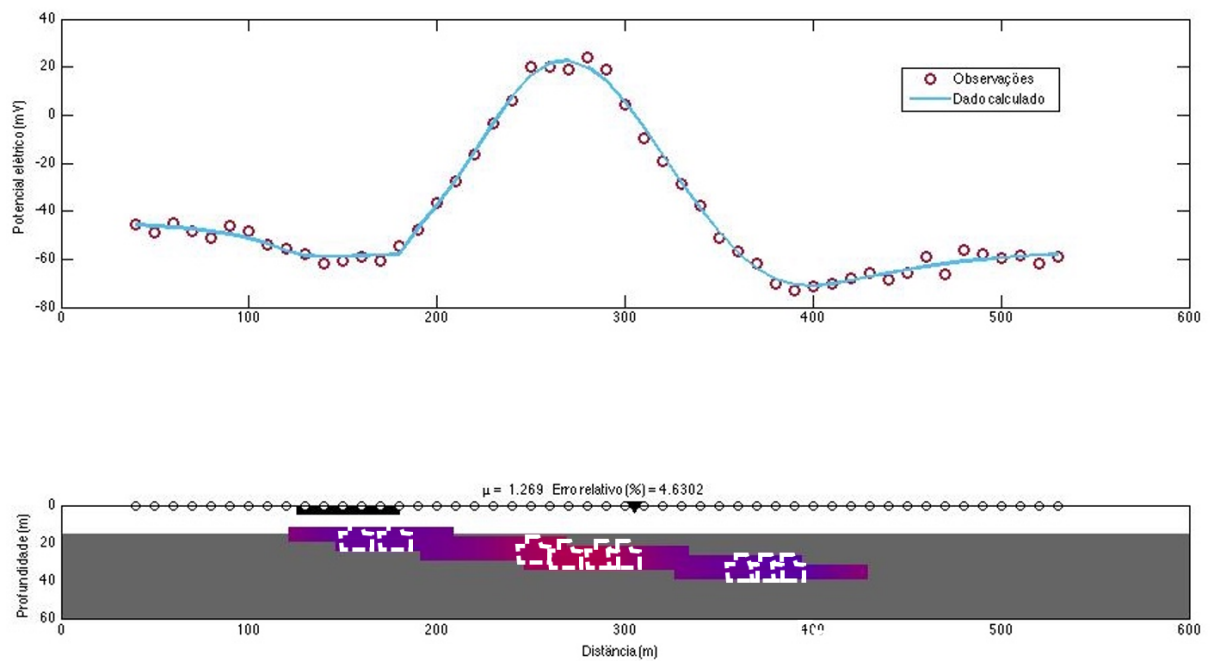


Figura 3.28: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 7.

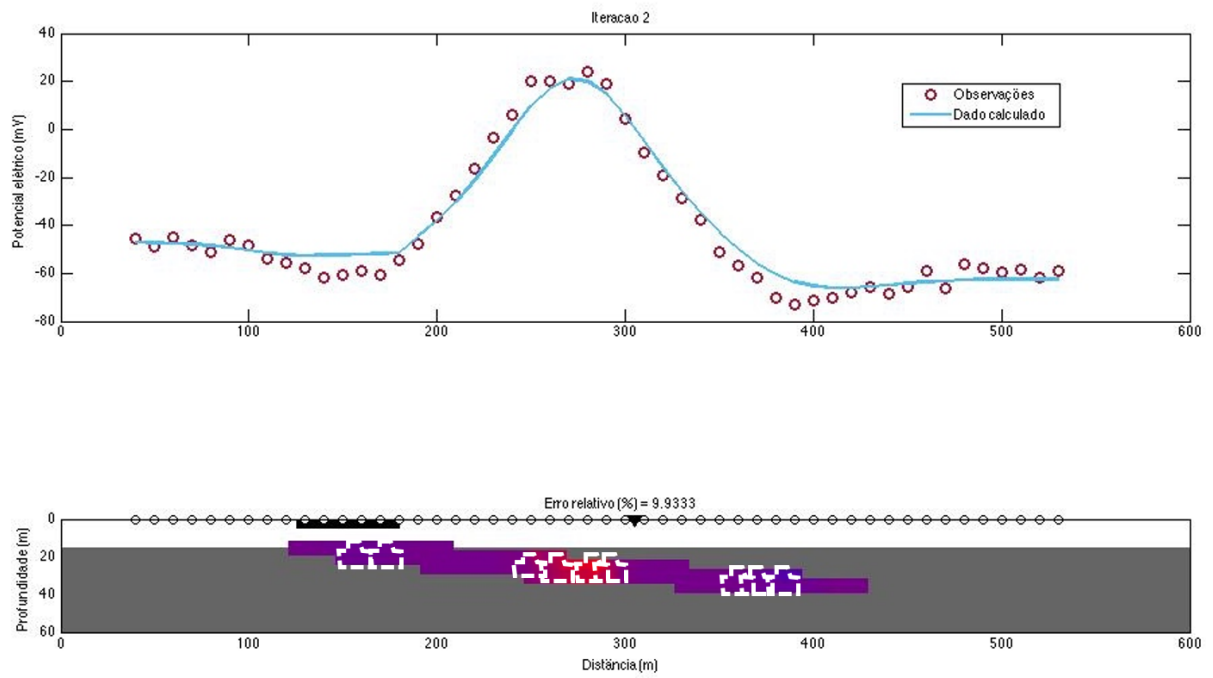


Figura 3.29: Inversão Compacta do modelo 7.

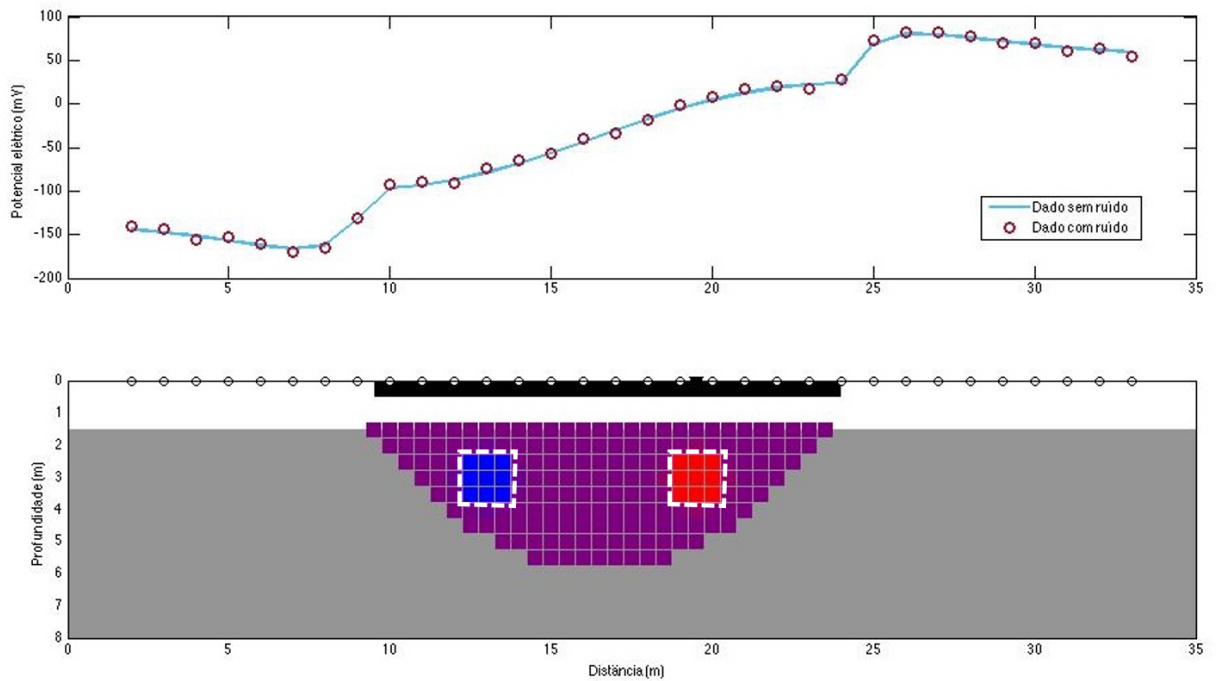


Figura 3.30: Modelo 8 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

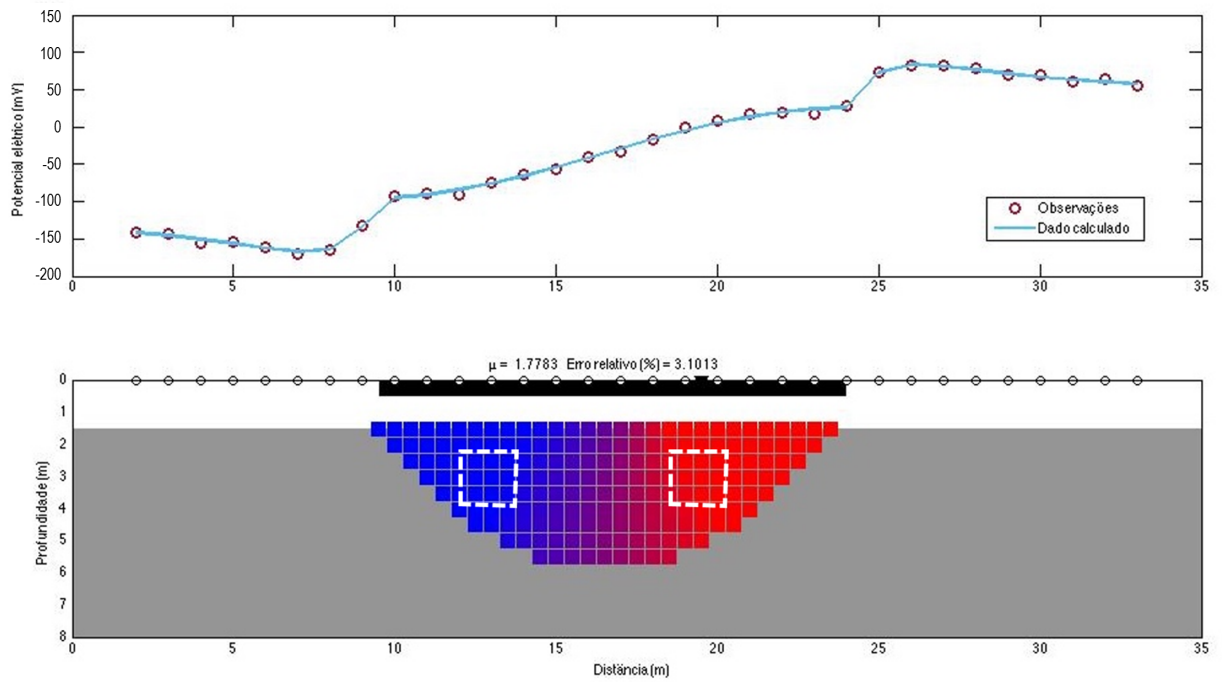


Figura 3.31: Inversão do modelo 8 com vínculo de Mínima Norma.

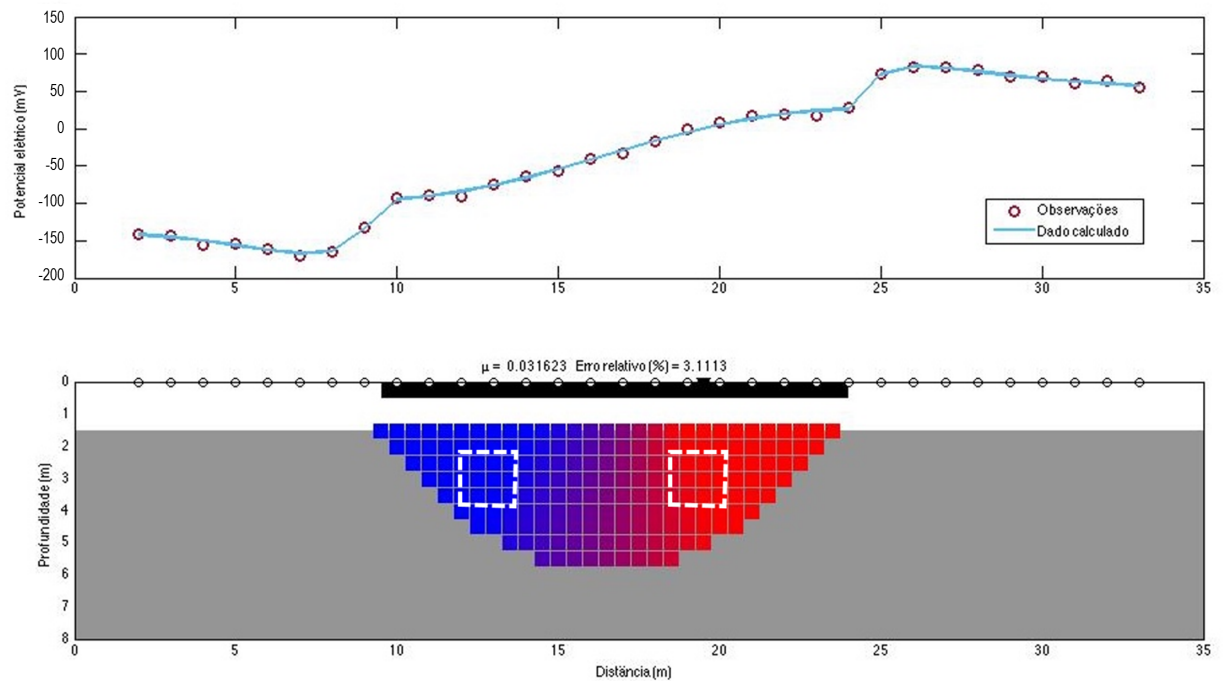


Figura 3.32: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 8.

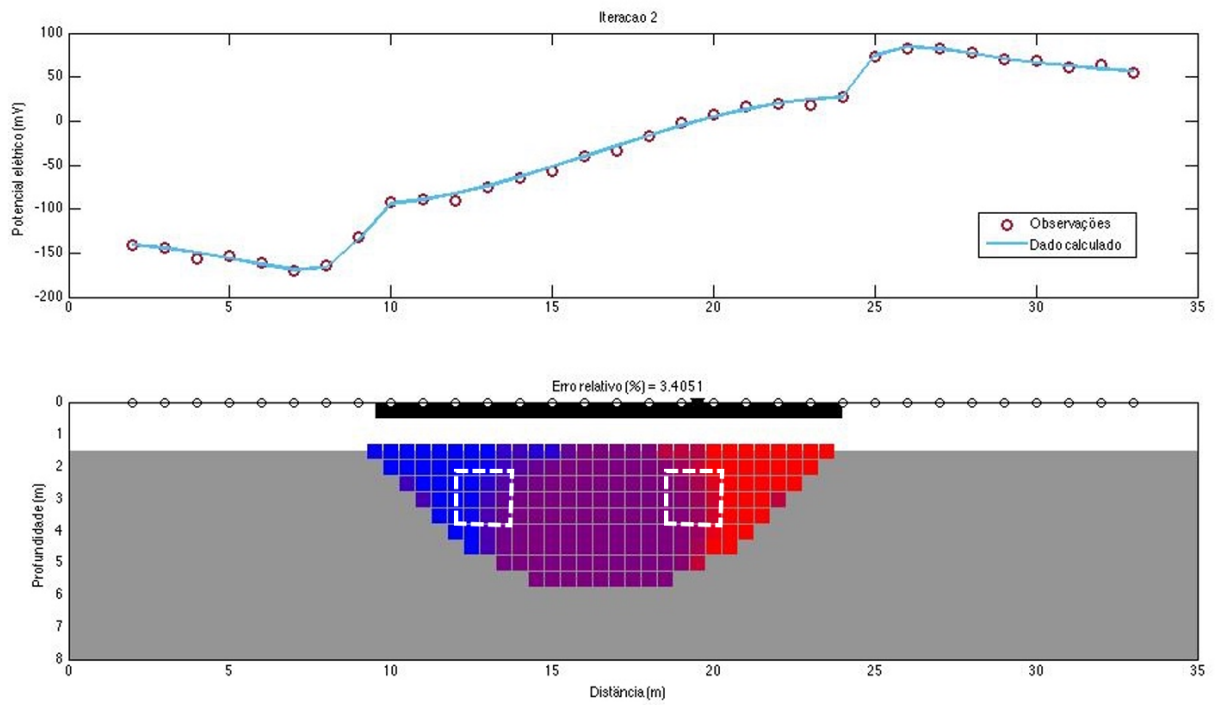


Figura 3.33: Inversão Compacta do modelo 8.

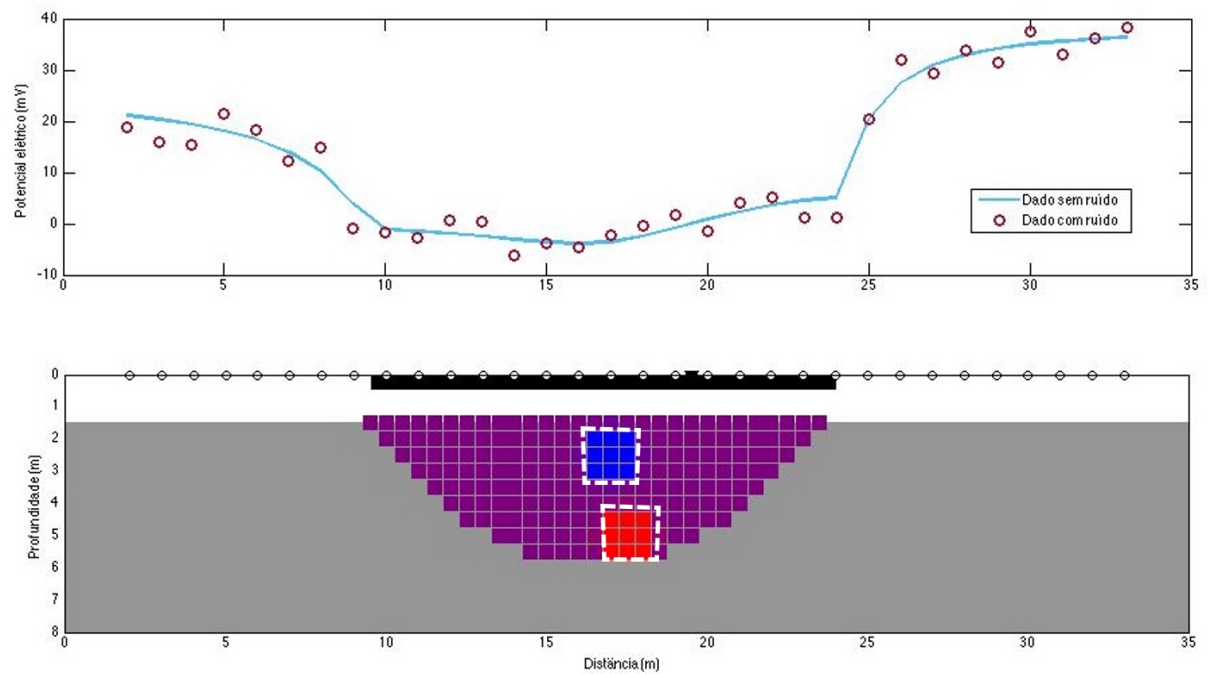


Figura 3.34: Modelo 9 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

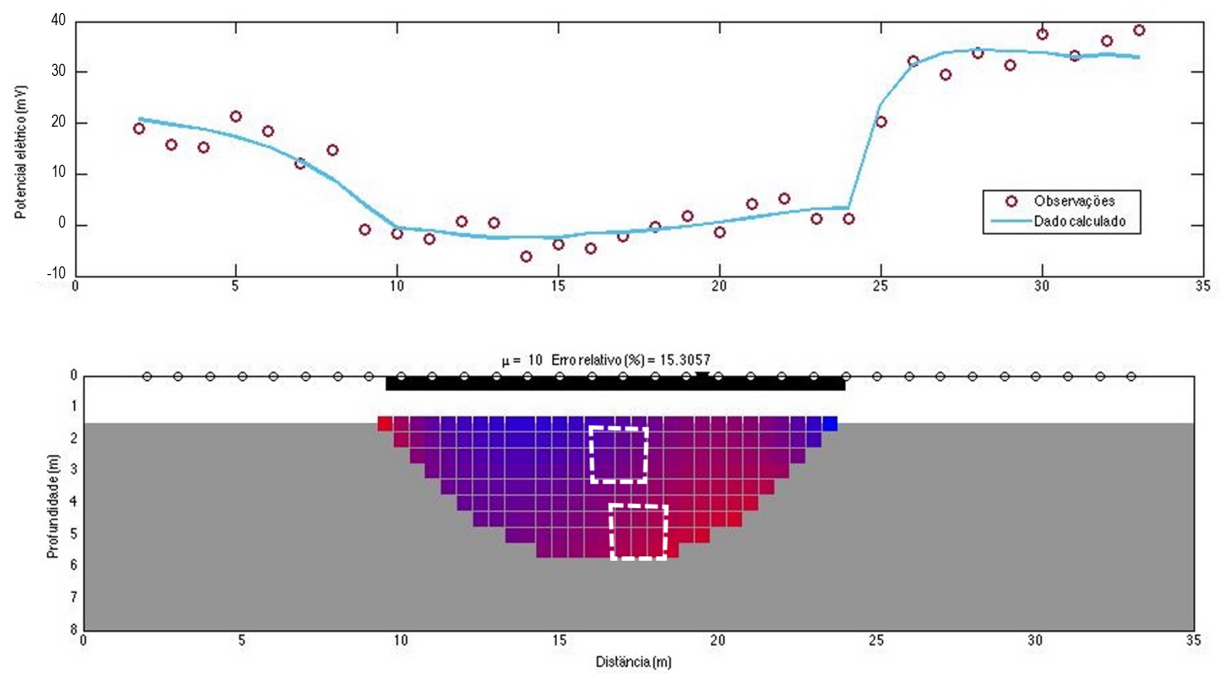


Figura 3.35: Inversão do modelo 9 com vínculo de Mínima Norma.

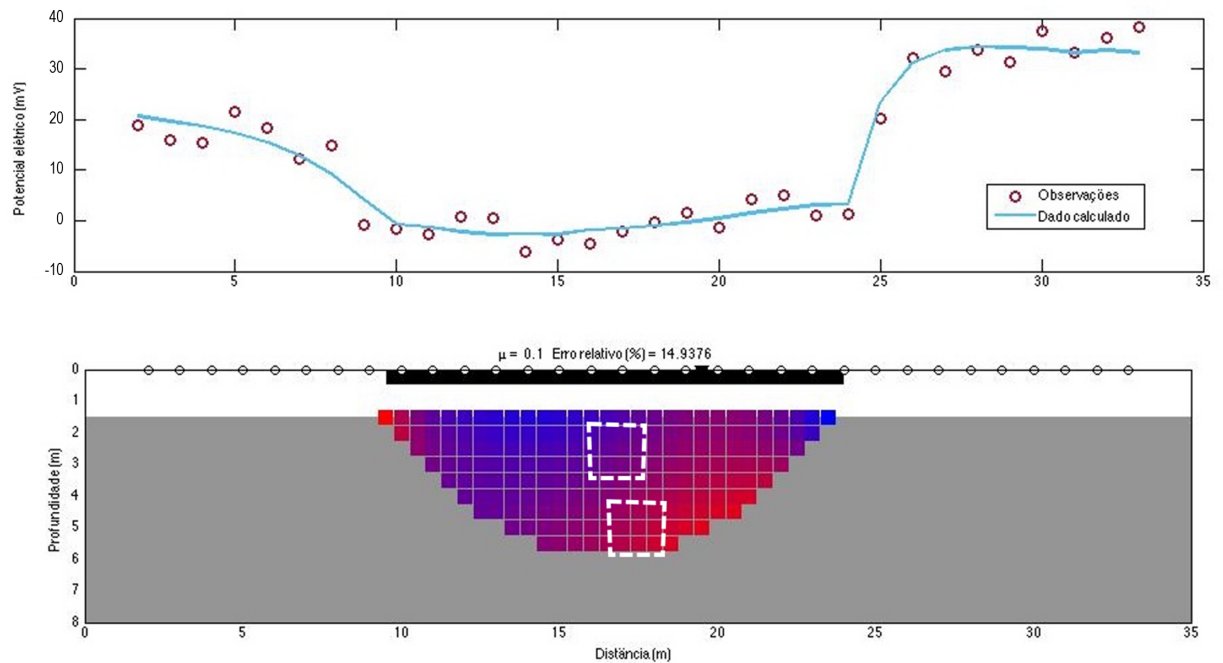


Figura 3.36: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 9.

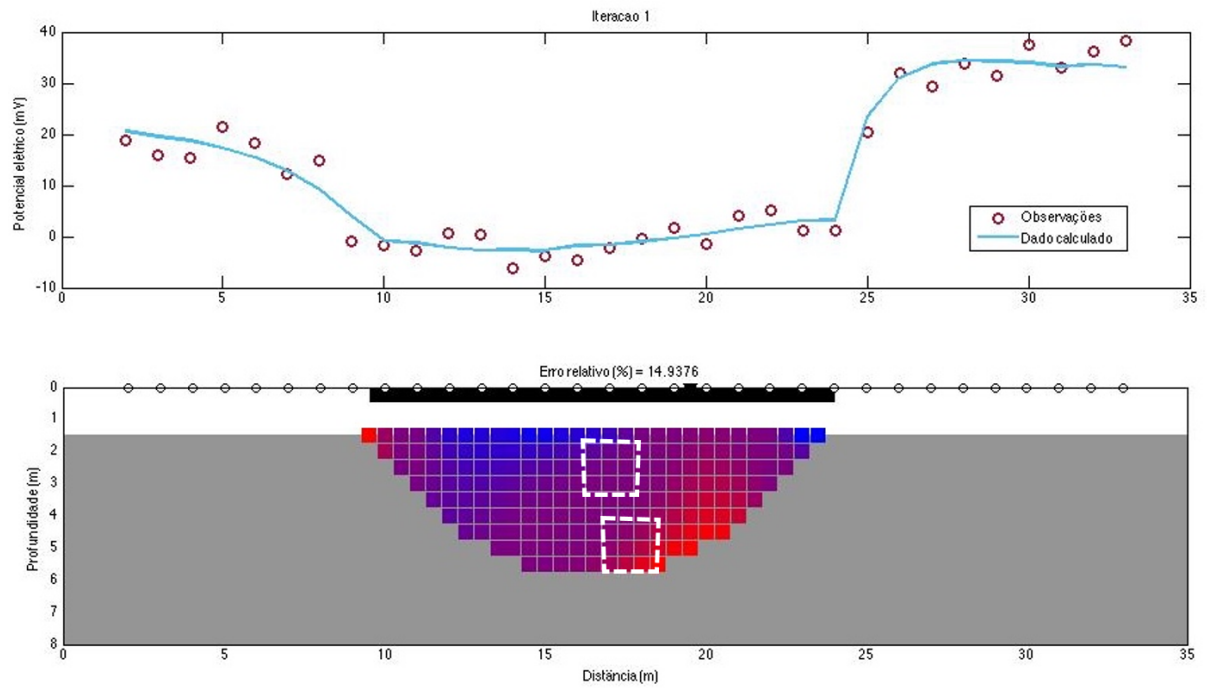


Figura 3.37: Inversão Compacta do modelo 9.

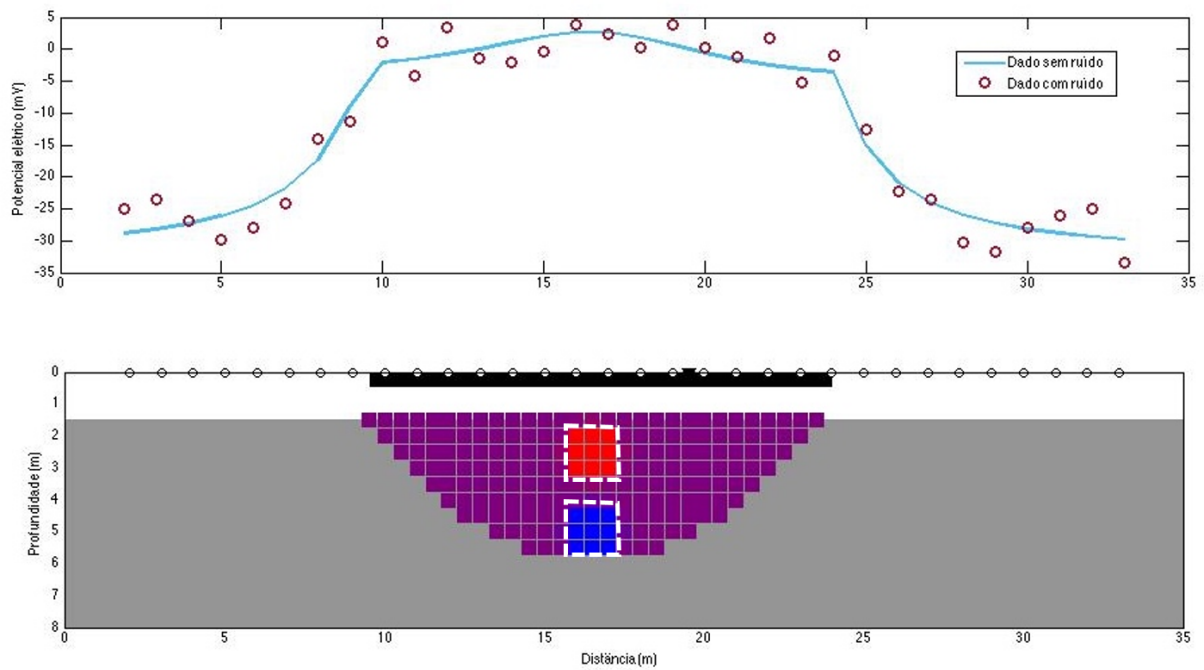


Figura 3.38: Modelo 10 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

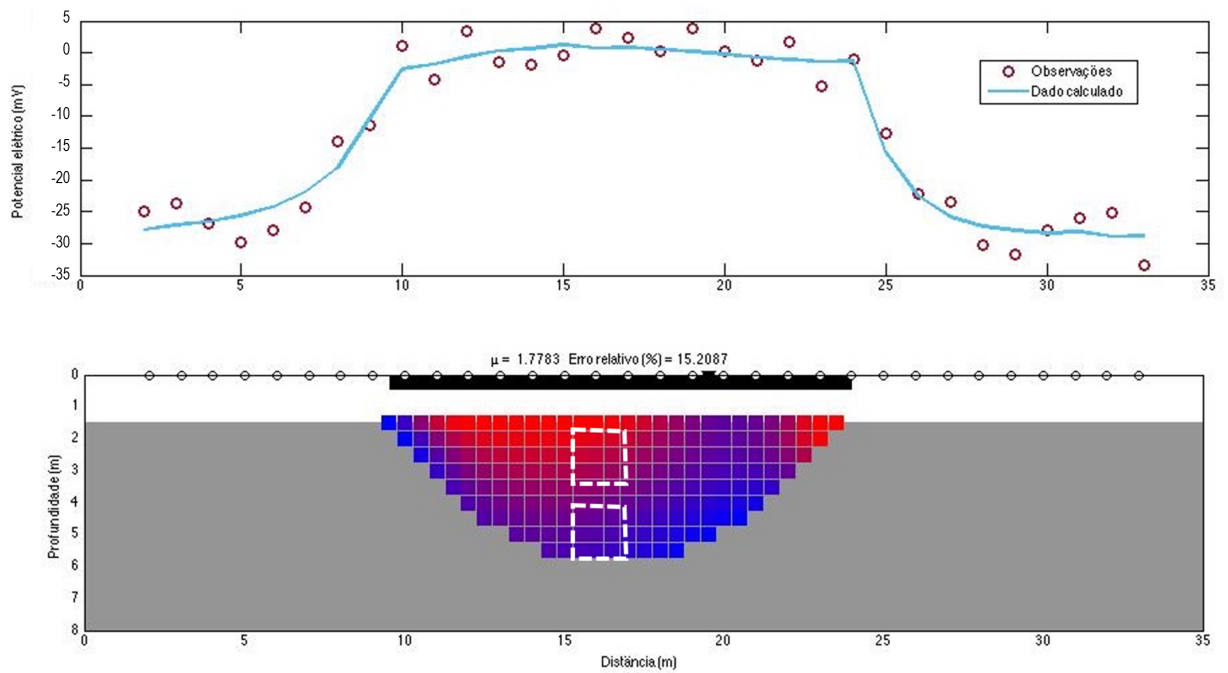


Figura 3.39: Inversão do modelo 10 com vínculo de Mínima Norma.

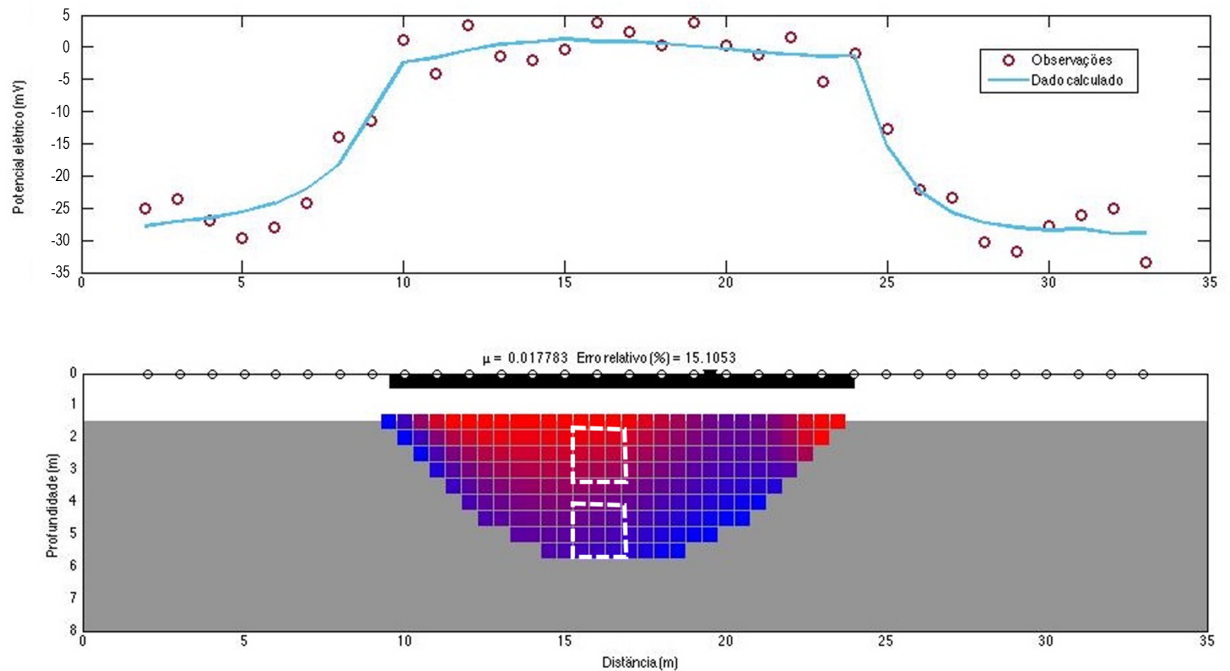


Figura 3.40: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 10.

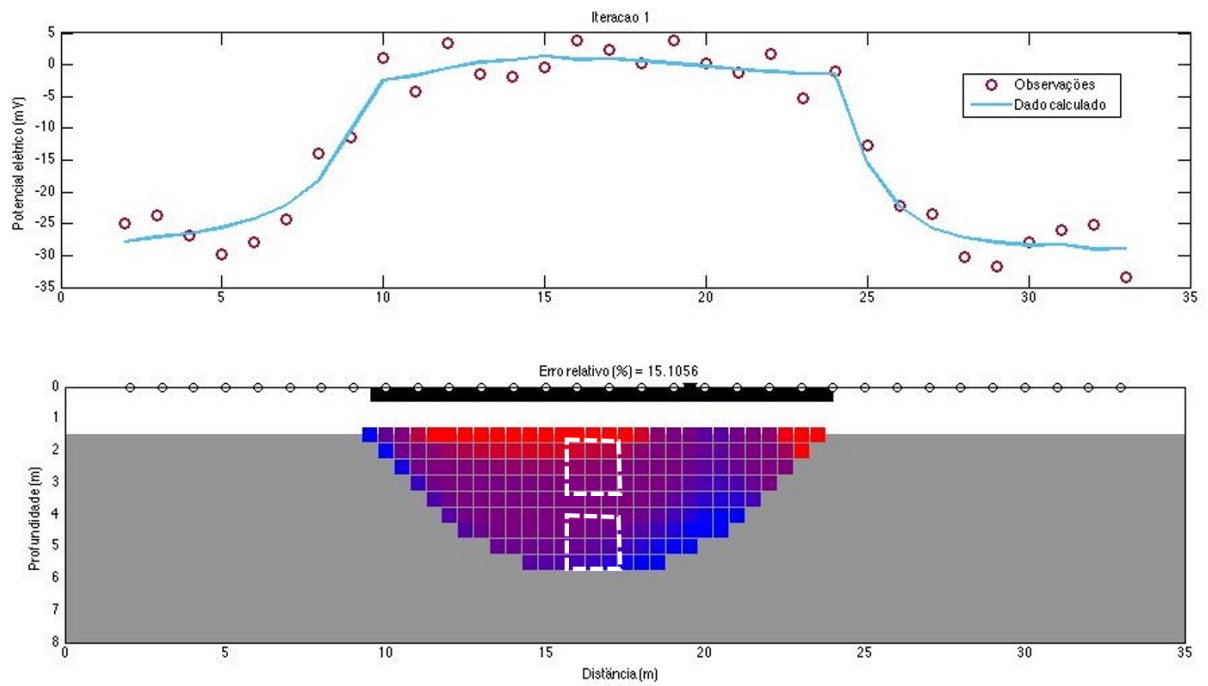


Figura 3.41: Inversão Compacta do modelo 10.

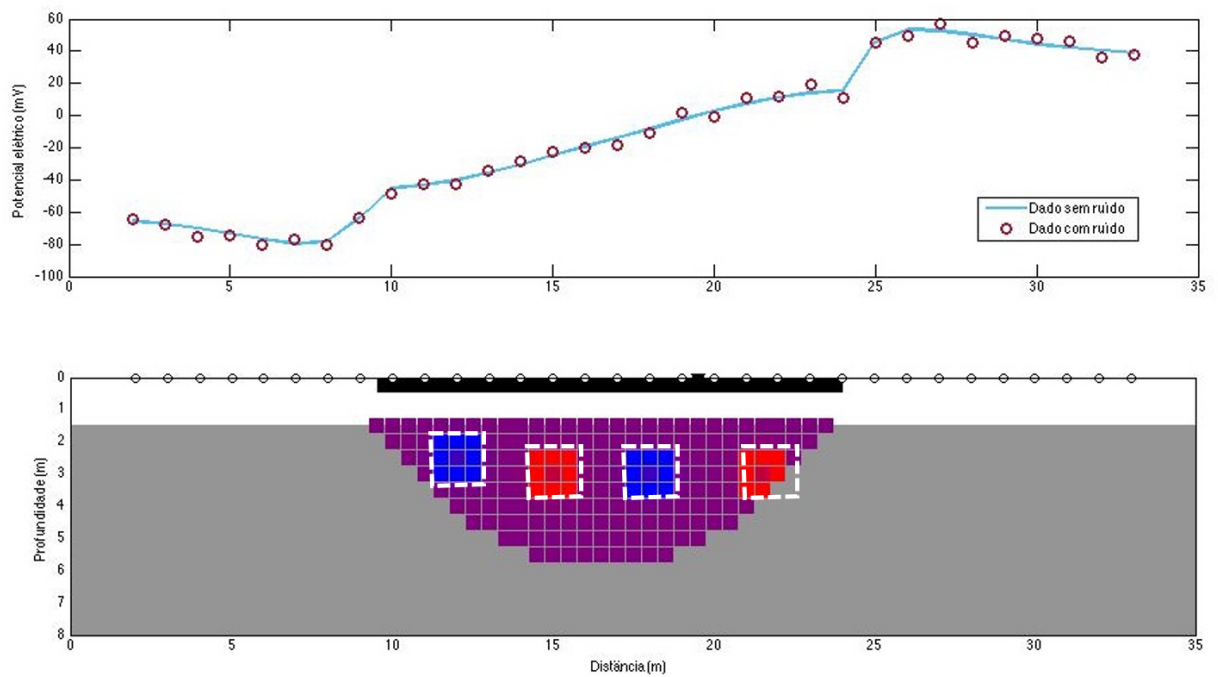


Figura 3.42: Modelo 11 de cava de contaminação e sua respectiva anomalia de potencial espontâneo.

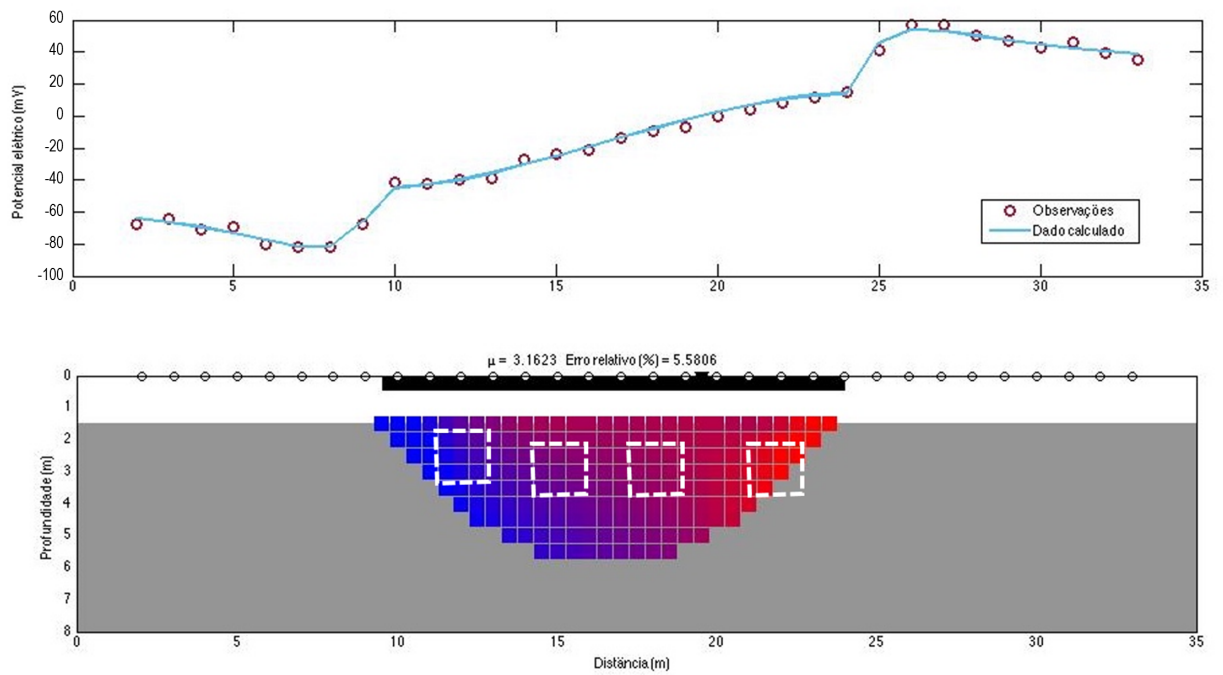


Figura 3.43: Inversão do modelo 11 com vínculo de Mínima Norma.

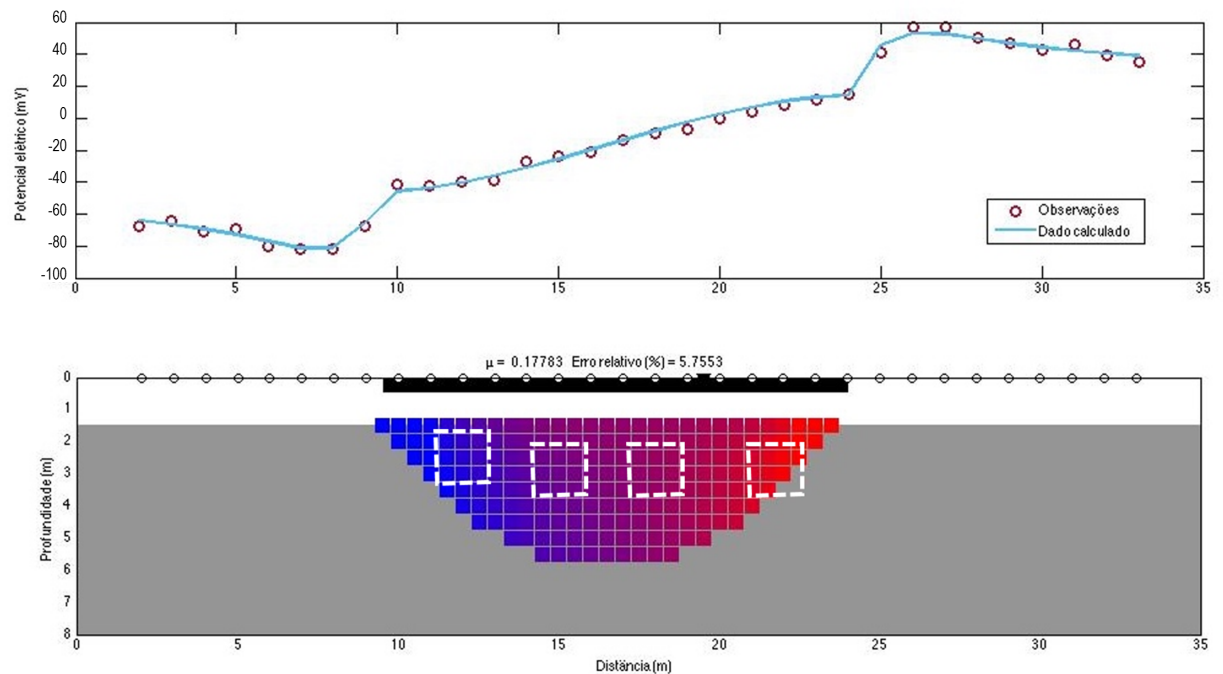


Figura 3.44: Inversão ponderada pelo Inverso da Sensibilidade (Minsley et al. 2007) do modelo 11.

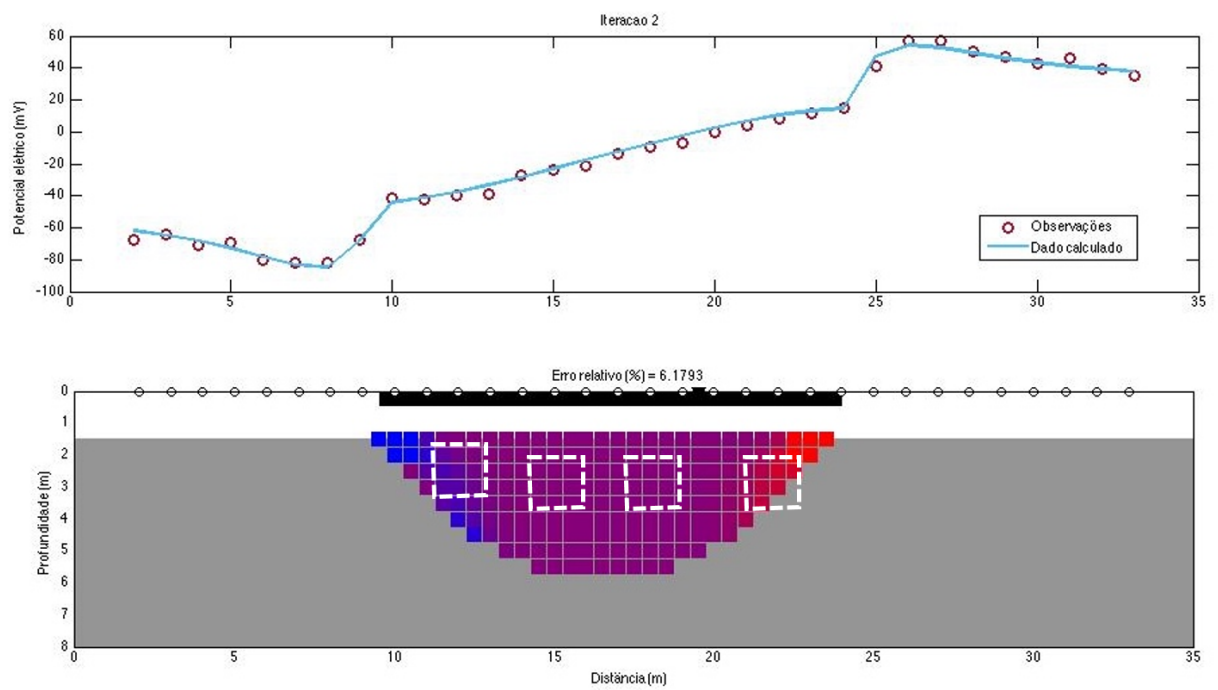


Figura 3.45: Inversão Compacta do modelo 11.

Capítulo 4

Conclusões

Os ensaios computacionais de modelagem direta e inversa em plumas e cavas de contaminação permitiram, através de simulações numéricas, compreender como a anomalia de potencial espontâneo se comporta frente às diferentes configurações de polaridade e posição, atribuindo significado para as fontes de corrente. Um dos desafios residiu em correlacionar distribuições de corrente com uma interpretação geológica-geofísica, atribuindo valores quantitativos os quais, no estudo de aquíferos, indiquem zonas de descarga e recarga e, em áreas contaminadas, determinem zonas ativas de biodegradação.

Durante a modelagem foi possível avaliar diferentes vínculos de inversão e entender o funcionamento de um problema vinculado no sentido de obter uma solução única e estável, assim como identificar quais vínculos oferecem melhor resposta para cada modelo proposto. Ao longo dos testes realizados, desenvolveu-se uma sensibilidade relacionada ao desempenho do papel de sintonizador da informação *a priori* que o multiplicador de Lagrange realiza.

Uma boa alternativa para escolher a melhor solução pode ser o uso da curva L, que impõe um compromisso entre ajuste e norma dos parâmetros. No entanto, um ótimo ajuste pode ser reproduzido por um modelo diferente. Tal fato não indica o não funcionamento do mesmo, mas uma aplicação não coerente com o tipo de resposta geológica. Para escolher um vínculo, deve-se ter em mente o tipo de feição esperada, e isso requer conhecimentos prévios sobre a geologia da área, informações de outros levantamentos geofísicos em superfície ou poços, por exemplo.

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Ana Nery de Carvalho, que sempre prezou pela minha educação e me apoiou durante toda minha trajetória universitária, e ao meu pai, José Raimundo Mançur, pelo apoio e cuidado até o seu último dia de vida. À minha orientadora, Profa. Dra. Suzan Vasconcelos, por toda paciência e dedicação durante a realização deste trabalho. À Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf) pelo apoio na forma de bolsa. Ao professor Hédison Sato pelo fornecimento do modelo *.tex, acompanhamento do desenvolvimento do TFG e por ter aceito o convite para compor minha banca. Ao professor Joelson Batista pelas sugestões durante o desenvolvimento dos modelos e por aceitar contribuir mais uma vez, fazendo parte da banca avaliadora. Ao Instituto de Geociências, pelo espaço físico que me acolheu durante estes quase quatro anos de graduação e pelos funcionários e professores, principalmente do Departamento de Geofísica, que proporcionaram um ambiente de aprendizado.

Referências

- Bigalke, J. e Grabner, E. W. (1997) The geobattery model: a contribution to large scale electrochemistry, *Electrochimica Acta*, **42**.
- Fachin, S. J.; Abreu, E. L.; Mendonça, C. A.; Revil, A.; Novaes, G. C. e Vasconcelos, S. S. (2012) Self-potential signals from an analog biogeobattery model, *Geophysics*, **77**.
- Fachin, S. J. S. (2012) O sinal de potencial espontâneo em investigações ambientais: fatores que condicionam a amplitude de uma anomalia, Ph. D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Forté, S. (2011) Mapping organic contaminant plumes in groundwater using spontaneous potentials, Ph. D. Thesis, University of Calgary, Calgary.
- Mendonça, C. A. (2008) Forward and inverse self-potential modeling in mineral exploration, *Geophysics*, **73**.
- Minsley, B. J.; Sogade, J. e Morgan, F. D. (2007) Three-dimensional self-potential inversion for subsurface dnapi contaminant detection at the Savannah River Site, South Carolina, *Water Resources Research*, **43**.
- Sato, M. e Mooney, H. M. (1960) The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials, *Geophysics*, **25**.
- Silva, N. (2011) Estudo do Sinal Elétrico de Potencial Espontâneo Associado ao Fluxo de Água em Meios Porosos, Ph. D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1976) *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Terra, F. A. (2007) Aplicação da curva L em problemas inversos: Metodologias de extração do parâmetro ótimo de regularização, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Vasconcelos, S. S. (2014) Modelagem e inversão de dados de potencial eletrocinético, Ph. D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Vasconcelos, S. S.; Mendonça, C. A. e Silva, N. (2014) Self-potential signals from pumping tests in laboratory experiments, *Geophysics*, **79**.