

Processamento Digital de Sinais Geofísicos

João Marcos T. Romano, Renato R. Lopes e Martin Tygel

Resumo—Diversas atividades, como a exploração e o monitoramento de reservatórios de petróleo, requerem o conhecimento de propriedades da subsuperfície da região de interesse. A determinação destas propriedades é o objetivo do processamento sísmico. Diversos métodos de processamento sísmico guardam grande semelhança com aqueles usados pela comunidade de processamento digital de sinais, sendo que, mais recentemente, observa-se uma clara tendência em re-estabelecer os laços, historicamente fortes, entre essas duas comunidades. Neste contexto, pretendemos com este trabalho descrever algumas técnicas de processamento sísmico, destacando problemas cuja solução já se beneficia, ou pode se beneficiar, de métodos de processamento de sinais. Nosso principal objetivo é mostrar a sinergia existente entre as duas áreas, enfatizando as diversas perspectivas de pesquisa, bastante promissoras para ambas as comunidades.

Palavras-Chave—Processamento Sísmico, Desconvolução Cega, Separação Cega de Fontes.

Abstract—Several applications, such as exploration and monitoring of oil reserves, rely on some knowledge of properties of the subsurface. Estimating these properties is the main goal of seismic processing. Several seismic processing methods bear great resemblance to those traditionally used by the signal processing community. Recently, there is a clear trend in re-establishing the historically strong ties among these two communities. In this context, this work describes some methods of seismic processing, highlighting problems whose solution benefits, or may benefit, from signal processing techniques. Our main goal is to emphasize the synergy between these research areas, and to identify several research topics that are promising for both.

Keywords—Seismic Processing, Blind Deconvolution, Blind Source Separation.

I. INTRODUÇÃO

Muitas aplicações práticas dependem de boas estimativas das propriedades do subsolo de uma determinada região. Dentre as principais, destaca-se a exploração de petróleo e gás natural, em que uma imagem do subsolo pode indicar regiões mais propensas a conter reservas de hidrocarbonetos. Outras aplicações incluem a monitoração destas reservas, a determinação de regiões adequadas para o sequestro de gás carbônico ou o depósito de dejetos nucleares.

Uma das principais ferramentas para o imageamento do subsolo é a sísmica de reflexão [1], cujo princípio é muito semelhante a um exame de ultrassonografia. Ondas sísmicas são produzidas na superfície, a partir de fontes como dinamites, e se propagam no subsolo, sendo refletidas nas interfaces entre duas camadas de rochas com propriedades distintas. Estas reflexões são medidas na superfície por sensores, como geofones. Essas medidas passam então por um intenso

processamento, que envolve um significativo custo humano e computacional. O objetivo final desse procedimento, cujo conjunto de técnicas é chamado de *processamento sísmico*, é obter uma imagem do subsolo, bem como algumas de suas propriedades, como a velocidade de propagação das ondas. A partir destas informações podem-se inferir as diversas características da subsuperfície necessárias às aplicações.

Os métodos de processamento sísmico guardam grande semelhança com aqueles usados pela comunidade de processamento digital de sinais (PDS). Por exemplo, técnicas de filtragem, desconvolução, e diversas transformadas uni- e bidimensionais são corriqueiramente utilizadas em processamento sísmico [1]. De fato, muitas destas técnicas tiveram sua origem em estudos ligados à geofísica. Um exemplo clássico é o estudo de desconvolução preditiva e filtros digitais de fase mínima, propostos por Robinson em 1954 [2], [3]. Outro exemplo são as transformadas *wavelet*, cuja forma moderna foi originalmente proposta por geofísicos em [4]. De fato, o primeiro uso do termo *wavelet*, no contexto destas transformadas, foi feito em [4].

Nas últimas décadas, o contato entre as comunidades de PDS e de processamento sísmico perdeu parte de sua vitalidade. Felizmente, os últimos anos viram ressurgir o interesse em estreitar os laços entre essas duas comunidades, buscando a aplicação de novos métodos de PDS em processamento sísmico. Nesse sentido, destaca-se o anúncio de um número especial da *IEEE Signal Processing Magazine* em processamento de sinais geofísicos, cuja publicação está prevista para 2012.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar os fundamentos e as principais técnicas de processamento sísmico, enfatizando a sinergia com problemas tipicamente encontrados em PDS e comunicações, assim como as perspectivas de pesquisa decorrentes dessa sinergia. Para simplicidade de apresentação, focaremos apenas no processamento de dados 2D. Com este fim, na seção II apresentamos os aspectos básicos do processamento sísmico. Na seção III discutimos as perspectivas de pesquisa que, no nosso ponto de vista, apresentam-se hoje como as mais promissoras para a comunidade de processamento de sinais. Concluímos o trabalho na seção IV com alguns comentários finais.

II. PROCESSAMENTO SÍSMICO

A figura 1, reproduzida de [5], ilustra uma etapa de um levantamento sísmico. À esquerda desta figura, vemos uma fonte sísmica emitindo uma onda que se propaga pela subsuperfície. Em geofísica, a detonação da fonte sísmica é chamada de *tiro*. Diversas reflexões desta onda são captadas pelos receptores mostrados à direita da figura. O sinal captado por cada geofone, correspondendo a um tiro, é chamado

J. M. T. Romano e R. R. Lopes, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP. M. Tygel, Departamento de Matemática Aplicada - UNICAMP. E-mails: romano@dmo.unicamp.br, rlopes@decom.fee.unicamp.br, tygl@ime.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

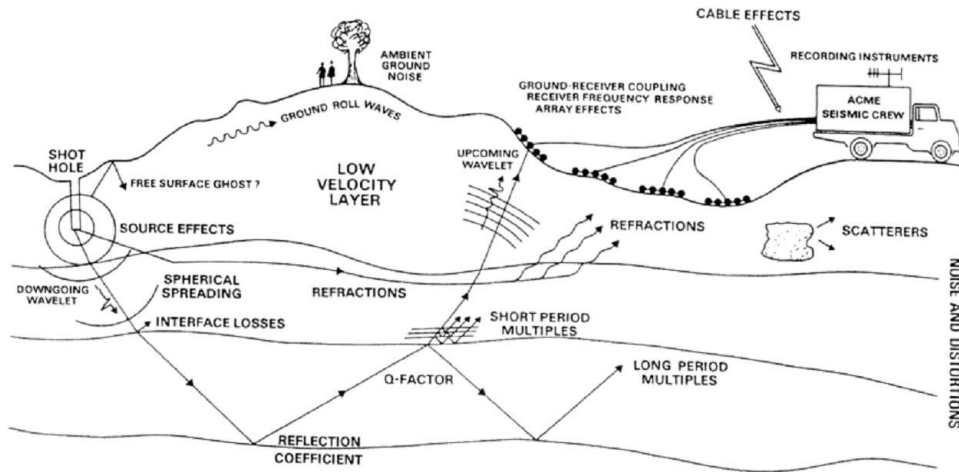


Fig. 1. Ilustração de um levantamento sísmico e das diversas distorções sofridas pela onda sísmica. Reproduzida de [5].

de um *traço*. Este procedimento é repetido diversas vezes, com a fonte e os receptores sendo deslocados a intervalos aproximadamente constantes ao longo de uma *linha sísmica*. Geralmente, apenas a fonte e o receptor mais próximo dela são deslocados, sendo o receptor levado ao outro extremo da linha de geofones, na posição mais distante da fonte. Desta forma, note que um mesmo receptor, em uma posição fixa, registra as reflexões oriundas de diferentes tiros disparados em diferentes instantes de tempo. Cada um destes registros corresponde a um traço distinto. Esta observação será essencial para as etapas de análise de velocidade e empilhamento descritas adiante.

A figura 1 também mostra diversos sinais sendo recebidos no geofone: as reflexões primárias, ou seja, ondas que foram refletidas apenas uma vez, as reflexões múltiplas, as refrações, as ondas que se propagam próximas à superfície, assim como as diversas fontes de ruído. As reflexões primárias, chamadas simplesmente de primárias, são, via de regra, os mais importantes sinais (ou *eventos*) de interesse para etapas futuras do processamento sísmico. Na sequência, descreveremos algumas etapas do processamento sísmico que buscam atenuar as diversas distorções sofridas pelas ondas sísmicas, compor uma imagem da subsuperfície, e extrair algumas características do meio.

A. Correções Estáticas

O dado fundamental do processamento sísmico, ao menos nas etapas iniciais, é o *tempo de trânsito*, ou seja, o tempo que uma reflexão leva para ser captada em um receptor. Entretanto, conforme mostrado na figura 1, os receptores podem se encontrar em elevações diferentes, o que introduz diferenças nos tempos de trânsito que são devidas a características da superfície, e não à estrutura da subsuperfície. Pode também ocorrer que diferentes tiros sejam dados a diferentes elevações, também ocasionando diferenças em tempos de propagação que não refletem a estrutura de interesse. Outros fatores também podem gerar tempos de propagação com desvios em relação aos modelos teóricos, degradando as etapas posteriores do processamento sísmico.

O processamento que corrige desvios no tempo de trânsito,

melhorando o alinhamento de reflexões, é chamado de correção estática [1]. Técnicas de PDS, como estimação de parâmetros, são comumente usadas nesse caso. Recentemente [6], as transformadas *wavelet* também foram usadas com sucesso para esse fim.

B. Deconvolução

Feitas as correções estáticas, uma etapa seguinte do processamento sísmico é a deconvolução [1]. Para entender sua necessidade, observe que estamos interessados em determinar a estrutura das camadas geológicas do subsolo. Estas estão ilustradas na figura 2, onde também estão mostrados os coeficientes de reflexão de uma seção geológica, causados pelas diferentes propriedades de propagação da onda sísmica em camadas distintas. Conforme visto nesta figura, é possível modelar o sinal recebido como uma convolução entre a forma de onda emitida pela fonte (chamada de *wavelet sísmica* ou pulso da fonte) e a função de refletividade do subsolo. Na ausência de ruído, se a *wavelet* fosse um impulso, o traço corresponderia exatamente à função de refletividade, que é a medida de interesse. Infelizmente, na prática a *wavelet* é um sinal de faixa limitada, e portanto tem uma duração temporal não desprezível, causando assim uma perda de definição dos traços. A deconvolução consiste em filtrar o sinal recebido por um filtro que, idealmente, é o inverso da *wavelet*, de forma que a cascata entre o sinal emitido, o canal, dado pela função de refletividade, e o filtro de deconvolução resulte apenas na resposta ao impulso do canal. Na prática, busca-se um filtro que “encurte” a *wavelet*, ou seja, cuja convolução com a *wavelet* seja um sinal de duração mais curta.

Note que existe um paralelo evidente entre a deconvolução sísmica e a equalização de canais de telecomunicações. No primeiro caso, buscamos um filtro que inverta os efeitos da entrada, recuperando a resposta do canal. No último caso, buscamos um filtro que inverta os efeitos do canal, recuperando sua entrada. Note também que a *wavelet* sísmica, em geral, não é conhecida exatamente, pois a explosão não é perfeitamente controlada e nem pode ser perfeitamente medida. Cria-se assim um problema de deconvolução não-supervisionada, pois nem

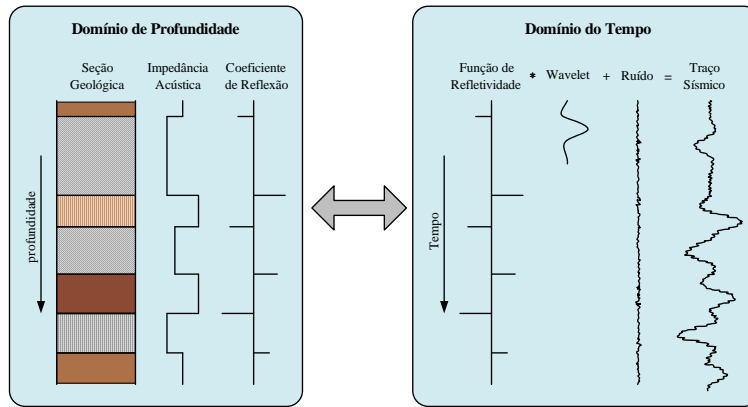


Fig. 2. Modelo convolutivo para os traços.

a entrada nem o canal são conhecidos [7].

C. Empilhamento e análise de velocidade

Após a deconvolução, os sinais sísmicos passam por processos que, simultaneamente, buscam melhorar a relação sinal-ruído dos traços e determinar as velocidades de propagação. Para entender como isso é feito, recorde que, no levantamento sísmico, as ondas emitidas por uma fonte sísmica são simultaneamente recebidas por diversos receptores. Da mesma forma, um mesmo receptor recebe sinais emitidos por diferentes fontes, disparadas em instantes distintos, gerando diferentes traços. Estes traços podem ser agrupados em diversas famílias ou configurações, cada qual com sua utilidade. Para as etapas descritas aqui, a configuração de interesse é a de ponto-médio comum (CMP, do inglês *common midpoint*), que reúne traços correspondentes a pares fonte-receptor que possuem o mesmo ponto médio.

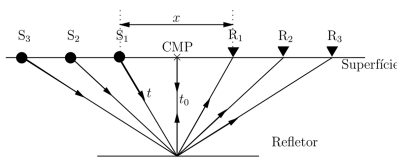


Fig. 3. Pares fonte-receptor com o mesmo ponto médio, resultando em traços na configuração CMP.

A figura 3 ilustra pares na configuração CMP, com as fontes colocadas à esquerda da figura, os receptores à direita, e o ponto médio comum no centro da figura. Note que a cada par corresponde um traço, e que os traços na configuração CMP foram medidos em instantes distintos, pois cada um corresponde a um disparo de uma fonte diferente. Considere, agora, a reflexão que cada uma das ondas emitidas pelas fontes sofre na interface horizontal mostrada na parte inferior da figura. Devido à hipótese de um refletor horizontal, todas as reflexões ocorrerem no mesmo ponto. Assim, todas as reflexões captadas pelos receptores nesse caso correspondem à existência de uma interface situada em um mesmo ponto. A ideia é combinar estas reflexões, de forma similar ao conceito de diversidade em sistemas de comunicações sem fio, para melhorar a relação sinal-ruído. Mais ainda, veremos

que esta combinação resulta em uma estimativa do traço em *afastamento nulo*. Este é o traço que seria obtido se a fonte e o receptor sísmicos estivessem colocados em um mesmo ponto, no caso o ponto médio da configuração CMP, também mostrado na figura 3. A configuração CMP é bastante robusta: se o refletor não for plano e horizontal e/ou a velocidade de propagação sísmica não for homogênea, ainda assim as reflexões da configuração CMP se concentram em uma região pequena, promovendo boa iluminação sísmica da mesma.

Para combinar as reflexões em um traço de afastamento nulo, assumamos por enquanto que a velocidade de propagação da onda seja conhecida. Neste caso, usando geometria básica de triângulos retângulos, pode-se mostrar que o tempo de propagação de cada reflexão é dado por

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}, \tag{1}$$

onde v é a velocidade de propagação, suposta constante, x é a distância entre a fonte e o refletor, conhecida como *afastamento* e também ilustrada na figura, e t_0 é o tempo de trânsito em afastamento nulo. O tempo de trânsito dado por (1) é chamado de *sobretempo normal* (NMO, do inglês *normal moveout*). Assim, dado v , para cada valor de t_0 , o valor do traço do afastamento nulo é obtido como a soma de todos os traços da configuração CMP, com suas amostras tomadas nos instantes de tempo dado pela equação (1). Este procedimento de somar os traços é chamado de *empilhamento*.

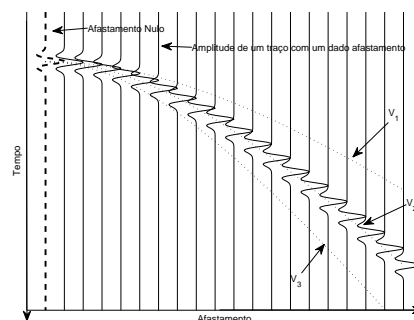


Fig. 4. Análise de velocidade.

Obviamente, precisamos determinar a velocidade de propagação para podermos aplicar a equação (1). O proce-

dimento aqui envolve força bruta, e sua ideia é ilustrada na figura 4, onde mostramos diversos traços de uma configuração CMP, sobrepostos a curvas de tempo de trânsito em (1) para diferentes valores de v . A estimação da velocidades é feita da seguinte forma: para cada valor de t_0 , vários valores de v são testados. Para o valor correto de v , no caso V_2 , observe que a curva de tempo de trânsito acompanha precisamente as reflexões medidas em cada traço da configuração CMP. Neste caso, a soma dos traços ao longo desta curva consistirá de um sinal, repetido de forma coerente ao longo da curva, mais um ruído. Para outros valores de v , a soma corresponde a sinais, agora incoerentes, mais ruído. Assim, espera-se que a soma ao longo da curva correspondente a V_2 resulte em valores maiores. Na prática, diversas medidas de coerência podem ser usadas para distinguir quais valores de v contêm sinal. Aqui, métodos de alta resolução como o MUSIC (*multiple signal classification*) [8] e o SPICE (*SParse Iterative Covariance-based Estimation*) [9] têm se mostrado muito promissores [10].

Em resumo, a obtenção do traço em afastamento nulo é feita da seguinte forma. Para cada t_0 , testamos vários valores de v . O valor de v que leva à maior coerência é então usado para fazer o empilhamento usando (1).

D. Migração

Mesmo se o refletor não for plano, o empilhamento descrito na seção II-C resulta em uma boa aproximação dos traços que seriam obtidos em um hipotético levantamento de afastamento nulo. Entretanto, note que os traços resultantes ainda medem o tempo que a onda sísmica levou para atingir o refletor e retornar à superfície. Por outro lado, na prática estamos geralmente interessados na profundidade em que o refletor se encontra. Assim, é necessário converter os traços de tempo para profundidade. Esta é uma finalidade da *migração*.

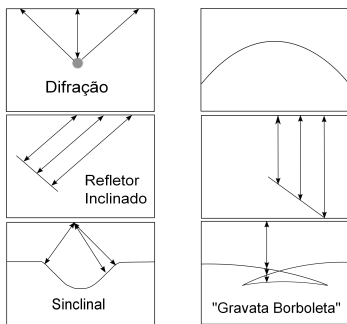


Fig. 5. Esta figura ilustra, à esquerda, diversas configurações geológicas e, à direita, a seção de afastamento nulo que cada uma produz. Baseado em [11].

A migração tem ainda a finalidade de corrigir a localização dos refletores. Para entender o problema, note que dispomos apenas da informação da velocidade de propagação e do tempo de trânsito. Com isso, podemos determinar apenas que um refletor se encontra a uma determinada distância do receptor, mas não temos como saber a direção. Em resumo, não é possível saber, a partir dos traços, se uma determinada reflexão ocorreu devido a uma interface diretamente abaixo do receptor ou se essa interface está localizada em outra direção, mas à mesma distância. Esta indeterminação, causada por um refletor

inclinado está ilustrada na figura 5. Nesta figura, ilustramos também uma difração, outro desvio que deve ser corrigido pela migração. Nesse caso, a presença de um único ponto com características distintas do meio que o cerca causam uma difração da onda incidente. Esta difração é capturada pelos receptores no padrão mostrado na figura. Difrações também podem ser causadas por discontinuidades dos refletores, como as ocasionadas por falhas geológicas. Finalmente, vemos na figura 5 que uma sinclinal, a última configuração geológica mostrada na figura, produz uma seção de afastamento nulo com a aparência de uma gravata borboleta.

III. PERSPECTIVAS EM PROCESSAMENTO SÍSMICO

Nesta seção, descrevemos algumas perspectivas de pesquisa em processamento sísmico que, em nossa visão, se inserem na retomada da interação entre as comunidades de PDS e processamento sísmico.

A. Desconvolução Sísmica

Conforme já mencionado, o objetivo da desconvolução é remover o efeito da *wavelet* sísmica, a forma de onda emitida pela fonte sísmica, a fim de estimar com precisão a refletividade. Como nem a fonte nem a refletividade são conhecidas, temos um problema não-supervisionado.

Ainda conforme mencionado, é interessante notar que a aplicação em geofísica está na origem dos métodos de desconvolução não supervisionada, uma vez que a ideia de desconvolução preditiva foi proposta pela primeira vez por Enders A. Robinson, nos anos cinquenta, no contexto de desconvolução sísmica. Robinson considerou duas hipóteses simplificadoras [2]:

- A *wavelet* sísmica é a resposta ao impulso de um sistema de fase mínima;
- A resposta ao impulso do modelo em camadas da terra se comporta como um ruído branco, ou seja, possui um espectro plano.

A partir dessas premissas, pode-se mostrar que a desconvolução pode ser atingida com um filtro de erro de predição, que pode ser calculado apenas com estatísticas de segunda ordem dos sinais envolvidos, simplificando consideravelmente o problema [1], [2].

Entretanto, as hipóteses acima não são válidas de modo geral, o que degrada os resultados obtidos através da predição linear. Mais recentemente, porém, foi possível mostrar que a restrição em relação ao comportamento em fase da *wavelet* não se deve à técnica de predição em si, e sim à estrutura linear do preditor [12]. Assim, uma linha de pesquisa que se mostra promissora é a utilização de preditores não-lineares, solução que se mostrou muito eficaz na equalização não-supervisionada de canais de comunicação. O emprego de filtros não-lineares para predição, além de eliminar a restrição a fontes de fase mínima, também apresenta desempenho melhor em termos de relação sinal-ruído, o que pode facilitar a definição dos eventos sísmicos.

Outra abordagem promissora é a de desconvolução multicanal [13], na qual diversos traços podem ser desconvoluídos conjuntamente. A vantagem neste caso é que redundâncias

entre os traços podem ser exploradas, o que pode levar a bons resultados de desconvolução, ainda fazendo uso unicamente de estatísticas de segunda ordem.

B. Separação de Fontes por Componentes Esparsas (SCA)

O problema separação cega de fontes (BSS, do inglês *Blind Source Separation*) consiste em recuperar um conjunto de sinais (fontes) a partir unicamente da observação de misturas dessas fontes. Via de regra, considera-se o conhecimento de pouca informação sobre as fontes e o processo de mistura, daí o uso do termo cego (equivalente a não-supervisionado). Devido à generalidade da formulação desse problema, as técnicas de BSS vêm sendo aplicadas a uma ampla gama de problemas práticos [14], como em sinais biomédicos, astrofísica, sinais de áudio, e sensores químicos.

Os principais métodos de BSS originam-se da chamada análise de componentes independentes (ICA, do inglês *Independent Component Analysis*) [15]. Nesta abordagem, trabalha-se com a hipótese de que as fontes são estatisticamente independentes. Dado que o processo de mistura torna as observações dependentes, a ideia central de ICA é buscar um processo de separação cujas saídas sejam novamente independentes. No caso de misturas lineares e instantâneas, e para um número igual de fontes e sensores, é possível mostrar que este processo de recuperação de independência implica de fato na separação das fontes originais [14].

Mais recentemente, no entanto, uma tendência clara na área de BSS é a busca por métodos alternativos aos baseados em ICA. Isto é motivado, por exemplo, pela possibilidade de explorar informações adicionais sobre as fontes, ou mesmo sobre o processo de mistura, que não são consideradas nos métodos de ICA. Um exemplo é a esparsidade, presente em sinais que podem ser descritos com poucos coeficientes. Esta característica vem sendo intensamente estudada nos últimos anos também em outros exemplos de aplicação e está na origem da chamada teoria de *compressive sensing* [16], tópico de grande atualidade na comunidade de processamento de sinais. O grupo do professor Felix Herrmann, da University of British Columbia, tem liderado as pesquisas no uso de *compressive sensing* em geofísica.

De forma análoga à ICA, as técnicas de BSS baseadas em Análise de Componentes Esparsos (SCA, do inglês *Sparse Component Analysis*) partem do princípio de que o processo de mistura destrói a propriedade de esparsidade das fontes, de modo que os métodos de separação baseiam-se em algum processo de recuperação de sinais de saída que sejam os mais esparsos possíveis. As técnicas de BSS vêm sendo aplicadas com sucesso ao processamento sísmico para atenuação de múltiplas e outras distorções, como difrações, ruído, ondas de superfície, etc.. Nesse caso, vê-se um sismograma como uma mistura das reflexões primárias, que são o sinal de interesse, com os outros sinais indesejáveis. Dado o desconhecimento das fontes e das características da subsuperfície onde os sinais são misturados, tem-se um contexto adequado à aplicação de técnicas de BSS. Em [17] mostrou-se o excelente desempenho das técnicas de ICA no problema de separação entre os chamados eventos alinhados e não-alinhados. Outros traba-

lhos consideram ainda a aplicação de BSS para a subtração adaptativa de múltiplas [18], [19].

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos alguns aspectos teóricos e práticos da área de processamento sísmico, tendo em vista aqueles problemas cuja solução se beneficia, ou pode vir a se beneficiar, do emprego adequado de técnicas de processamento digital de sinais. Em particular, discutimos a aplicação de técnicas de processamento não-supervisionado, focando-nos em desconvolução sísmica e em separação por componentes esparsas. É importante ressaltar ainda a existência de um grande número de possibilidades, tanto em termos de aplicações como de metodologia, que não foram abordadas aqui, incluindo, a título de exemplo, o processamento MIMO e as técnicas de machine learning. Através de nossa breve apresentação, pretendemos sobretudo ressaltar o grande potencial das ferramentas de PDS para se obter avanços concretos, teóricos e práticos, em processamento sísmico, e o forte benefício que se pode obter pela aproximação das duas comunidades, visando um processo de fertilização mútua de ideias.

REFERÊNCIAS

- [1] O. Yilmaz, *Seismic Data Analysis*. Society Of Exploration Geophysicists, 2001.
- [2] E. A. Robinson and S. Treitel, *Geophysical Signal Analysis*. Prentice Hall, 1980.
- [3] E. A. Robinson, "The MIT geophysical analysis group (GAG) from inception to 1954," *Geophysics*, vol. 70, no. 4, pp. 71A-30, 2005.
- [4] P. Goupillaud, A. Grossman, and J. Morlet, "Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis," *Geoexploration*, vol. 23, pp. 85-102, 1984.
- [5] J. M. Reynolds, *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley and Sons, 1998.
- [6] I. L. S. Braga, F. S. Moraes, and M. A. Almeida, "Combining seismic data preconditioning, AVO inversion and geometrical attributes for high resolution reservoir delineation," in *12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 2011.
- [7] J. M. T. Romano, R. R. de F. Attux, C. C. Cavalcante, and R. Suyama, *Unsupervised Signal Processing: Channel Equalization and Source Separation*. CRC Press, 2010.
- [8] P. Stoica and R. Moses, *Spectral Analysis of Signals*. Prentice-Hall, 2005.
- [9] P. Stoica, P. Babu, and J. Li, "SPICE: A sparse covariance-based estimation method for array processing," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 2, pp. 629-638, feb. 2011.
- [10] E. Asgedom and L.-J. Gelius, "Multi-frequency phase coherent super-resolution imaging," in *72nd EAGE Conference*, Barcelona, Spain, 2010.
- [11] Section 2.1, *Seismic Imaging*. UniGEO: www.unigeo.no.
- [12] R. Ferrari, R. Suyama, R. Lopes, R. Attux, and J. M. Romano, "An optimal MMSE fuzzy predictor for SISO and MIMO blind equalization," in *IAPR Workshop on Cognitive Information Processing (CIP)*, 2008.
- [13] L. S. Ma, "Multichannel blind deconvolution," Ph.D. dissertation, University of Wollongong, 2004.
- [14] P. Comon and C. Jutten, *Handbook of Blind Source Separation: Independent Component Analysis and Applications*. Academic Press, 2010.
- [15] P. Comon, "Independent component analysis: A new concept?" *Signal Processing*, vol. 36, no. 3, pp. 287-314, apr. 1994.
- [16] D. L. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, april 2006.
- [17] V. D. Vrabie, J. I. Mars, and J. Lacoume, "Modified singular value decomposition by means of independent component analysis," *Signal Processing*, pp. 645-652, 2004.
- [18] W. Lu, "Adaptive multiple subtraction using independent component analysis," *Geophysics*, vol. 71, no. 5, pp. S179-S184, 2006.
- [19] S. T. Kaplan and K. A. Innanen, "Adaptive separation of free surface multiples through independent component analysis," *Geophysics*, vol. 73, no. 3, pp. V29-V36, 2008.