

**RESUMOS DE TESES E DISSERTAÇÕES
ABSTRACTS OF THESES AND DISSERTATIONS**

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEARES DE VIBRAÇÕES SÍSMICAS AMBIENTAIS

Cleiton Kefrof Pavan

TOMOGRAFIA SÍSMICA DE DIFRAÇÃO PARA MONITORAMENTO DA INJEÇÃO DE CO₂ EM RESERVATÓRIOS SALINOS

Caio Jean Matto Grosso da Silva

ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE BOTT PARA CONTRASTE DE DENSIDADE VARIANDO COM A PROFUNDIDADE

Karina Palheta Gomes

ANÁLISES DAS CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS, RADIOMÉTRICAS E TÉRMICAS DA CROSTA NAS PROVÍNCIAS ESTRUTURAIAS TOCANTINS E SÃO FRANCISCO

Suze Nei Pereira Guimarães

INTEGRADORES SIMPLÉTICOS E VETOR DE POYNTING NA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO

Edvaldo Suzarthe de Araújo

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE ESTRUTURAS DE ALTO Mergulho EMPREGANDO TÉCNICAS ESPECTRAIS DE MIGRAÇÃO

Adeilton Rigaud Lucas Santos

INVERSÃO DE FORMA DE ONDA APLICADA À ANÁLISE DE VELOCIDADES SÍSMICAS UTILIZANDO UMA ABORDAGEM MULTIESCALA

Adriano Wagner dos Santos

ANÁLISE DAS MARÉS OCEÂNICAS EMPREGANDO O MÉTODO DE LEVENBERG MARQUARDT

Helber da Cunha Macedo

INVERSÃO GRAVIMÉTRICA RÁPIDA DO RELEVO DO EMBASAMENTO APLICANDO O FUNCIONAL DA VARIAÇÃO TOTAL

Raphael Di Carlo Silva dos Santos

MONITORAMENTO AMBIENTAL DA COSTA DO RIO GRANDE DO NORTE COM BASE EM SENSORIAMENTO REMOTO E GEODÉSIA DE PRECISÃO

Anderson Targino da Silva Ferreira

IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEARES DE VIBRAÇÕES SÍSMICAS AMBIENTAIS

Cleiton Kefrof Pavan

Orientador: Dr. Eder Cassola Molina (IAG-USP)

64 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 19.12.2013

RESUMO. Este trabalho consiste em (re)avaliar o melhor método para identificação das anomalias espectrais na banda de 2 a 8 Hz, e identificar o Sistema Físico que rege as anomalias espectrais observadas em Sísmica Passiva, pois até o momento a Sísmica Passiva é somente um potencial método geofísico de exploração de hidrocarbonetos empírico. Para a identificação das anomalias espectrais compararam-se os métodos FFT (*Fast Fourier Transform*), PSD (*Power Spectral Densities*), MEM (*Maximum Entropy Method*), MLM (*Maximum Likelihood Method*) e os espectrogramas calculados por PSD, MEM e MLM. Para determinar o Sistema Físico usaram-se os métodos: expoente de Hurst; expoente de Lyapunov; Biespectro; e Bicoerência. Todos os métodos foram aplicados nas séries temporais obtidas a partir de 18 estações sismográficas localizadas em uma região de petróleo ativa, localizada na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte, Norte do Brasil. O melhor método de identificação espectral do trabalho foi o espectrograma calculado com MEM, e o Sistema Físico da Sísmica Passiva é provavelmente um Sistema Determinístico pertencente a um processo não gaussiano, que apresenta um tipo específico de não-linearidade denominada acoplamento de fase quadrática (AFQ).

ABSTRACT. This work aims to evaluate the best method for identifying anomalies in the spectral band of 2-8 Hz, and identify the physical system governing the spectral anomalies observed in the Passive Seismic, because so far the Passive Seismic is only an empirical geophysical method of exploration of hydrocarbon. For the identification of the spectral anomalies the methods FFT (Fast Fourier Transform), PSD (Power Spectral Densities), MEM (Maximum Entropy Method), MLM (Maximum Likelihood Method) and spectrograms calculated by PSD, MEM and MLM were compared. To find out the physical system were used the methods: Hurst exponent, Lyapunov exponent, bispectrum, and bicoherence. All the methods were applied to the time series obtained from 18 seismograph stations located in a region with active production of oil, located in the city of Mossoró, Rio Grande do Norte, Northern Brazil. The best method of spectral identification obtained was calculated with the MEM spectrogram, and the physical system determined from Passive Seismic was a deterministic system that does not belong to a Gaussian process, which presents a specific type of nonlinearity, known as quadratic phase coupling.

TOMOGRAFIA SÍSMICA DE DIFRAÇÃO PARA MONITORAMENTO DA INJEÇÃO DE CO₂ EM RESERVATÓRIOS SALINOS

Caio Jean Matto Grosso da Silva

Orientador: Dr. Amin Bassrei (UFBA)

162 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 29.05.2013

RESUMO. Independentemente da causa do efeito estufa ser ou não provocado pelo homem, o dióxido de carbono (CO₂) é um grande vilão quando o assunto é o aquecimento global, pois este gás contribui diretamente para o aumento da temperatura do planeta. Os governos mundiais e as empresas, principalmente de energia, têm buscado uma forma de desenvolvimento sustentável, de forma a diminuir a emissão desse gás na atmosfera. Num contexto geológico o CO₂ pode ocorrer conjuntamente com o petróleo em reservatórios porosos. Surge, então, a seguinte questão: O que fazer com o CO₂? Duas técnicas tem se mostrado de grande potencial neste cenário, a primeira é a CCS (*Carbon Capture and Storage*) que corresponde à injeção do gás em aquíferos salinos, reservatórios depletados e camadas de carvão. A segunda é a EOR (*Enhanced Oil Recovery*) que compreende a injeção de CO₂ em reservatórios com óleos pesados afim de se diminuir sua viscosidade e se aumentar o fator de recuperação. Uma vez iniciada a injeção do dióxido de carbono necessita-se de monitoramento periódico, uma vez que o comportamento do CO₂ dentro do reservatório pode ser dos mais diversos, desde uma interação do mesmo com as rochas do reservatório (caso seja reservatório carbonático, podendo aumentar ou diminuir a porosidade do mesmo), até mesmo a mudança de direção do fluxo devido a regiões de mais baixa permeabilidade. Neste trabalho, é proposto o uso da tomografia de difração, com abordagens monofrequência e multifrequência, para se mapear as mudanças de velocidade dentro de um reservatório devido à injeção de CO₂. Todavia, a tomografia de difração é um problema inverso considerado mal-posto, e para condicionar o problema optou-se pela utilização de duas técnicas aplicadas separadamente. A primeira consiste no uso de uma quantidade ótima de valores singulares, descartando os menores valores singulares para se aumentar a estabilidade do problema inverso. Para seleção dos valores singulares utilizou-se os critérios: energia dos parâmetros de modelo, entropia dos parâmetros de modelo, erro RMS (*Root Mean Square*) dos parâmetros de modelo. O segundo método foi baseado na regularização por matrizes de derivadas, onde a ordem da matriz de derivada foi zero e, utilizou-se a Validação Cruzada Generalizada (ou GCV do inglês *Generalized Cross Validation*) para seleção do parâmetro ótimo. Ainda, para simular qual seria a magnitude da mudança de velocidade dentro do reservatório devido a uma substituição de fluidos, utilizou-se a equação de Gassmann. Utilizou-se dois modelos sintéticos baseados no Campo de Miranga na Bacia do Recôncavo, que corresponde a camadas de arenitos plano paralelas saturadas com água salina. Os resultados obtidos para as abordagens mono e multifrequência se mostraram confiáveis com base nos modelos sintéticos utilizados. Além disso, a seleção de valores singulares e regularização por matrizes de derivadas se mostraram válidas para ambas as abordagens da tomografia sísmica de difração, mas não foi possível determinar superioridade de um método em relação ao outro.

ABSTRACT. Regardless if the cause of the greenhouse effect is caused by man or not, the carbon dioxide (CO₂) is a great villain when it comes to global warming, because this gas contributes directly to the increased temperature of the planet. World governments and companies, especially energy companies, have sought a way to a sustainable development in order to reduce the emission of this gas in the atmosphere. In a geological context the CO₂ can occur in conjunction with oil porous reservoirs. Then, comes the question: What to do with CO₂? Two techniques have shown great potential in this scenario, the first is the CCS (*Carbon Capture and Storage*) which corresponds to gas injection in saline aquifers, depleted reservoirs and coal seams. The second is the EOR (*Enhanced Oil Recovery*) comprising injecting CO₂ with heavy oil reservoirs in order to reduce its viscosity and to increase the recovery factor. Once started the injection of carbon dioxide is needed periodic monitoring, since the behavior of CO₂ within the reservoir can be from many different from an interaction thereof with the reservoir rocks (if the reservoir is formed by carbonate rocks, can increase or decrease the porosity thereof), even the change of own direction due to lower permeability regions. In this paper, we propose the use of diffraction tomography, with monofrequency and multifrequency approaches, to map the velocity changes within a reservoir due to injection of CO₂. However, diffraction tomography is an inverse problem considered ill-posed, and to change this situation, it was decided to use two techniques applied separately. The first is the use of an optimum amount of singular values, discarding the smallest singular values to increase the stability of the inverse problem. For the selection of singular values, we used the criteria: energy parameter model, the entropy model parameters, RMS error (Root Mean Square) of the model parameters. The second method was based on the regularization by derivative matrices, where the order of zero matrix was derived and used the Generalized Cross Validation for selecting the optimal parameter. Further, to simulate what would be the magnitude of the speed change within the reservoir due to a substitution fluid, we used the Gassmann's equation. We used two synthetic models based on Miranga Field in the Recôncavo Basin, which corresponds to plane parallel layers of sandstones saturated with saline water. The results obtained for the mono and multifrequency approaches have proven reliable based on synthetic models used. Moreover, the selection of singular values and regularization by matrices derived proved valid for both approaches of seismic diffraction tomography, but it was not possible to determine the superiority of one method over the other.

ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE BOTT PARA CONTRASTE DE DENSIDADE VARIANDO COM A PROFUNDIDADE

Karina Palheta Gomes

Orientadora: Dra. Darciléa Ferreira Santos (UFPA)
42 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 23.08.2013

RESUMO. Apresentamos um novo método para estimar o relevo do embasamento de bacias sedimentares através da extensão analítica da expressão da placa Bouguer para contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento decrescendo monotonicamente com a profundidade de acordo com uma lei hiperbólica. O método requer ruído contido nos dados gravimétricos tenha desvio-padrão inferior a 0,01 mGal. As estimativas do relevo do embasamento são obtidas nas posições espaciais localizadas diretamente abaixo de cada observação. A metodologia foi aplicada a dados sintéticos de bacias sedimentares simuladas apresentando relevo do embasamento suave. O método produziu relevo do embasamento estimado próximo ao relevo simulado. O método foi também aplicado a três conjuntos de dados reais: Bacia do Recôncavo (Brasil), Graben do Büyük Menderes (Turquia) e Graben de San Jacinto (Estados Unidos). As soluções produzidas pelo método proposto apresentaram estimativas de profundidades máximas em acordo com as informações geológicas disponíveis: 6 km para Bacia do Recôncavo, 1,6 km para Vale do Büyük Menderes e 2,2 km para Graben de San Jacinto.

ABSTRACT. We present a new method to estimate the basement relief of a sedimentary basin through the analytic extension of the expression of the slab Bouguer for the case of a density contrast between the basement and the sediments decreasing monotonically with depth according to a hyperbolic law. The method requires that the noise in data have a standard deviation smaller than 0.01 mGal. The basement relief estimates are obtained at positions located directly below each observation. The methodology was applied on synthetic data from a simulated sedimentary basin presenting smooth basement relief. The method produced estimated basement topographies close to simulated basement topographies. The method was also applied to three sets of real Bouguer anomalies: Recôncavo Basin (Brazil), Büyük Menderes Graben (Turkey) and San Jacinto Graben (United States). The solutions produced by the proposed method attained maximum basement depth estimates in accordance with the available geological information: 6 km to Recôncavo Basin, 1.6 km to Büyük Menderes Valley, and 2.2 km to San Jacinto Graben.

ANÁLISES DAS CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS, RADIOMÉTRICAS E TÉRMICAS DA CROSTA NAS PROVÍNCIAS ESTRUTURAIS TOCANTINS E SÃO FRANCISCO

Suze Nei Pereira Guimarães

Orientador: Dr. Valiyya Mannathal Hamza (ON)
146 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 08.11.2013

RESUMO. Os trabalhos desenvolvidos nesta tese tiveram como enfoque principal a caracterização magnética, radiométrica e térmica da crosta superior das Províncias Estruturais Tocantins e São Francisco. Foram reunidos para esta finalidade dados adquiridos em 12 projetos de levantamentos aeromagnéticos e 10 projetos de levantamentos radiométricos. Os dados geotérmicos reunidos incluem os disponíveis no banco de dados geotérmicos do Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional (principalmente para os Estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia), bem como novas medições realizadas em 36 localidades nos Estados do Tocantins e Pará, totalizando assim 190 localidades utilizadas nesse estudo. A fase inicial do projeto dessa tese teve como enfoque a análise de dados aeromagnéticos. Foram incorporadas as correções básicas (*lag, heading, nivelamento, micronivelamento, entre outras*) nos conjuntos das bases de dados. Em seguida, foram empregadas técnicas convencionais de interpretação geofísica na análise preliminar, tais como a derivada vertical, sinal analítico e deconvolução de Euler. Isso permitiu localizações das fontes magnéticas anômalas e determinações preliminares de suas respectivas profundidades. Foram identificadas nove principais anomalias na região sul das províncias estruturais de estudo, sendo sete destas na borda ocidental da província Tocantins e duas em área cratônica. As anomalias na província Tocantins foram interpretadas como resultados de variações nas susceptibilidades magnéticas das unidades geológicas locais e magnetizações remanescentes presentes em intrusões magmáticas alcalinas do período Terciário. Regionalmente as dimensões espaciais dessas fontes anômalas são relativamente pequenas (menores que 10 km) e estão localizadas em profundidades inferiores a 5 km. Por outro lado, as anomalias nas áreas cratônicas foram interpretadas como oriundas de contrastes magnéticos dos corpos situados a profundidades superiores a 5 km e possuem dimensões espaciais superiores a 50 km. Estas se encontram localizadas na área conhecida como Quadrilátero Ferrífero, onde as formações rochosas são antigas, variando suas idades do Proterozóico ao Arqueano. Na fase seguinte da análise de dados aeromagnéticos foram identificados lineamentos magnéticos evidenciados pela derivada vertical do campo magnético anômalo. Os lineamentos magnéticos evidenciados na borda oeste da província Tocantins foram considerados como indicativos de feições tectônicas regionais, com arraste na direção leste para oeste. Verificou-se ainda uma correlação espacial entre os lineamentos magnéticos regionais e as ocorrências de corpos magnéticos rasos, interpretados como indicativo de uma característica tectônica atípica da porção oeste da província Tocantins. A última fase da análise de dados aeromagnéticos se encontra focado no emprego do método de análise espectral em dados aeromagnéticos, obtidos em 21 localidades diferentes. A técnica utilizada é o método de tendências sistemáticas no espectro do campo (*spectral slope method*), proposta inicialmente por Bhattacharyya & Leu (1975, 1977). Isso permitiu a determinação das profundidades das fontes magnéticas anômalas em camadas (topo e base). De acordo com os resultados obtidos, as profundidades da camada magnética mais profunda estão no intervalo de 30-35 km na província Tocantins e maiores que 40 km na província São Francisco. As diferenças nos valores dessas profundidades são consideradas indícios de uma mudança sistemática nas estruturas térmicas profundas destas duas províncias. Ainda na fase inicial, de forma paralela à análise magnética, foram efetuadas análises de dados aerogamaespectrométricos, visando determinação de abundância relativa dos elementos radioativos naturais (urânio, tório e potássio) dos principais tipos de solo e rochas aflorantes na região centro-norte do Estado de Goiás. Verificou-se que a maioria dos tipos de solo são relativamente enriquecidos em urânio, possuindo teores superiores a 1 ppm. Apenas em argisolos e latosolos ocorrem teores menores que 1 ppm. A variação na abundância de tório também têm tendências semelhantes às do urânio. A distribuição de potássio, no entanto, não segue um padrão semelhante, mas a razão K/U cai no intervalo 1,0-1,7 dos valores esperados para solos comuns. Por outro lado, a razão U/Th possui uma variação maior que a normal com valores entre 4-16. Isto foi considerado como indicativo de possível efeito de lixiviação de urânio em camadas do solo na área de estudo. Diferenças sistemáticas na profundidade de amostragem dos dados de aerolevantamentos e possíveis ocorrência de condições de desequilíbrio das séries radioativas em camadas sedimentares são consideradas como motivos para essa diferença. Os resultados foram utilizados na determinação do calor radiogênico dos principais tipos de solo e das camadas do subsolo. Assim, em cambisolos a taxa de produção de calor radiogênico médio calculada é de $3,3 \pm 0,9 \mu\text{Wm}^{-3}$ enquanto que em argisolos esse valor é de apenas $0,4 \pm 0,3 \mu\text{Wm}^{-3}$. A média da produção de calor radiogênico dos solos tropicais calculada é de $0,7 \pm 0,4 \mu\text{Wm}^{-3}$. Levando em consideração os efeitos de contrastes na densidade de solos e das condições de desequilíbrio na série de urânio, a produção de calor radiogênico das rochas do embasamento seriam superiores a $1,3 \mu\text{Wm}^{-3}$. Na fase intermediária do projeto foram efetuados estudos geotérmicos, que incluíram análise de dados geotérmicos compilados pelo Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional (LabGeot/ON) e aquisição de dados complementares. Verificou-se que a região ocidental da área de estudo é caracterizada por valores de gradiente geotérmicos no intervalo de $22-36^\circ\text{Ckm}^{-1}$. Enquanto que a região oriental que envolve a província São Francisco é caracterizada por gradientes geotérmicos menores no intervalo de $16 \text{ a } 22^\circ\text{Ckm}^{-1}$. Um modelo unidimensional da distribuição de temperatura, supondo regime térmico estacionário, foi utilizado para calcular as temperaturas crustais. Resultados desse modelo, em concomitância com valores do limite da crosta magnetizada, revelam que as temperaturas em áreas cratônicas são sistematicamente menores que os da província Tocantins, portanto a espessura da crosta magnetizada é maior nessa região. Na fase final do projeto, realizou-se um estudo integrado de dados aeromagnéticos e geotérmicos a fim de examinar as características termomagnéticas da crosta na área de estudo. Foi utilizado o método espectral de determinação das profundidades magnéticas para delimitar a profundidade da isoterma de Curie na região central do Brasil. O método de filtragem espectral ajustado (*Matched filtering*) é usado na comparação e otimização das técnicas de análises e verificação de procedimentos (*cross-check*). Os resultados obtidos permitiram a identificação em profundidade de três principais camadas magnéticas. Os valores para a profundidade da base das fontes magnéticas anômalas na região que envolve as duas províncias de estudo (superfície de Curie) se encontram na faixa de $18-50 \pm 5$ km. Comparações entre dados de fluxo de calor e resultados de modelagem térmica sugerem que as variações nas profundidades das fontes magnéticas anômala estão relacionadas com as características da estrutura termal destas províncias. Comparações da profundidade Curie com as da Moho, obtida pelos métodos sísmicos, sugerem que o manto superior pode ser ferromagnético na região central do Cráton pré-cambriano brasileiro, onde as temperaturas são atualmente menores do que a temperatura de Curie. Assim, é provável que alguns dos recursos magnéticos crustais de grande escala têm contribuições de magnetização do manto.

ABSTRACT. The focus of the works developed in this thesis has been on the magnetic, radiometric and thermal characterization of the upper crust in the structural provinces of Tocantins and São Francisco. Aeromagnetic data acquired in 12 projects and radiometric data acquired in 10 projects were assembled together for this purpose. The geothermal data acquired include those available at the database of the Geothermal Laboratory of the National Observatory (mainly for the states of Minas Gerais, Goiás and Bahia) as well as new measurements carried out at 36 localities in the states of Tocantins and Pará, totaling 190 locations used in this study. Analysis of aeromagnetic data has been the main focus activities carried out during the initial phase of the project. It included corrections for basic technical operations (lag, heading, leveling, micro leveling, etc.). Following this stage conventional techniques of geophysical interpretation such as the vertical derivative, analytic signal and Euler deconvolution were carried out. The results obtained have allowed location of the magnetic sources anomalous and preliminary determination of their respective depths. A total of nine main anomalies were identified in southern region of the study structural provinces, seven of these in western border of Tocantins province and two in the cratonic area. The anomalies in the Tocantins province were interpreted as arising from the variation in magnetic susceptibility of the local geological unit. In addition, remanent magnetization of the alkaline magmatic intrusion of Tertiary period is believed to contribute to the anomalies. Regionally the spatial sizes of these anomalous sources are relatively small (less than 10 km) and are localized at depths of less than 5 km. On the other hand, the anomalies in the cratonic areas are interpreted as arising from magnetic contrasts of bodies localized at depths of more than 5 km and have spatial dimensions of more than 50 km. These anomalies are localized in a region known as Iron Quadrangle, where basement rock formations are of Proterozoic to Archean. In the next phase of aeromagnetic data analysis the technique of vertical derivative the anomalous magnetic field was employed in identifying the magnetic lineaments. The magnetic lineaments shown in the western border of the Tocantins province were considered as indicative of the regional tectonics features with east-west direction. In addition, the spatial correlation between the regional magnetic lineaments and the occurrence of magnetic bodies at shallow depths has been interpreted as indicative of an atypical tectonic characteristic of the west part the Tocantins province. The focus of activities during the last phase of aeromagnetic data analysis has been the application of the method of spectral analysis of aeromagnetic data obtained from 21 different localities. The technique used is based on methods of systematic tendencies in field spectra (spectral slope method) proposed by Bhattacharyya & Leu (1975, 1977). This allowed the determination the depth of the anomalous magnetic bodies in layers (top and bottom). According results obtained the depth interval of magnetic sources is in range of 30-35 km in the Tocantins province, whereas they reach depths greater than 40 km in the São Francisco province. Such difference in the depth values has been considered evidence of systematic changes in deep thermal structure of these provinces. Another parallel activity in the initial phase has been analysis of data obtained in the aerogammaspectrometry surveys. The objective has been the determination of relative abundances of natural radioactive elements (uranium, thorium and potassium) in the main soils types and outcropping rocks in the north-central part in state of Goiás. According to the results obtained most soil types have uranium content of more of 1 ppm. Only argisols and oxisols have uranium content less than 1 ppm. The abundance variations of thorium have tendencies similar to that of uranium. The potassium distribution doesn't follow a similar trend but the ratio of K/U falls in the range 1-1.7, which is expected for the common soils. On the other hand, the U/Th ratios were found to have values between 4-16. This is considered as indicative of the effect possible of uranium lixiviation in soil layers in the study area. Systematic differences in sampling depths in airborne survey data and possible occurrence of disequilibrium conditions of radioactive series in sedimentary layers are considered as reasons for this difference. The results were used in determination of radiogenic heat of the main soils types and subsoil layers. Thus, in cambisol the mean radiogenic heat production rate is calculated as $3.3 \pm 0.9 \mu\text{Wm}^{-3}$ while in argisols the values is only $0.3 \pm 0.3 \mu\text{Wm}^{-3}$. The mean of radiogenic heat production of tropical soils calculated is $0.7 \pm 0.4 \mu\text{Wm}^{-3}$. Allowing for the contrasting effects of soil density and disequilibrium conditions in the uranium series the radiogenic heat production to basement rocks is estimated to be more of $1.3 \mu\text{Wm}^{-3}$. Other activities carried out during the intermediary phase of thesis project had been analysis of geothermal data compiled by the Geothermal Laboratory of the National Observatory (LabGeot/ON) and acquisition of complementary data. It was found that the western region of study area is characterized by values of the geothermal gradients in the range $22-36^\circ\text{Ckm}^{-1}$. The São Francisco province to the east is found to be characterized by smaller geothermal gradients in the range $16-22^\circ\text{Ckm}^{-1}$. Following this a one-dimensional model of the temperature distribution, assuming conditions of stationary thermal regime, was used to calculate the crustal temperatures. Results of this model were found to be in reasonable agreement with values of magnetized crust. The conclusion has been that the crustal temperatures in cratonic areas are systematically lower when compared with those of the Tocantins structural province. Hence the thickness of magnetic crust is larger in the cratonic region. In the final phase of the thesis project, an integrated analysis of aeromagnetic and geothermic data was carried out to examine the thermomagnetic characteristics of crust in the study area. Spectral methods were employed in determining the magnetic depth and depths of Curie temperatures in the region of central Brazil. Matched filtering methods were used for spectral filtering in cross-checking the results. The results obtained allowed identification of three magnetic layers in region. The values obtained for the bottom depth of magnetic sources in the region that includes the two provinces, (in other words, the depth to the so-called Curie surface) are in the range of $18-50 \pm 5$ km. Comparisons of the heat flow data and results of thermal modeling suggest that the variations in the depths of Curie isotherm are related to the characteristics of the thermal structure in these provinces. Comparisons of the Curie depths and with Moho depths obtained by seismic methods suggest that part of the upper mantle can be ferromagnetic in the central parts of the Precambrian Brazilian Craton, where the temperatures are currently smaller than Curie temperature. Hence it is possible that magnetization of the upper mantle contribute to the occurrence of large-scale magnetic anomalies in the study area.

INTEGRADORES SIMPLÉTICOS E VETOR DE POYNTING NA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO

Edvaldo Suzarthe de Araújo

Orientador: Dr. Reynam da Cruz Pestana (UFBA)

132 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 06.09.2013

RESUMO. Neste trabalho apresenta-se uma nova solução numérica para a equação da onda baseada na combinação de integradores simpléticos e na expansão da função cosseno em série dos polinômios de Chebyshev. O método proposto aqui pode extrapolar o campo de ondas em tempo, garantindo uma propagação estável das ondas sísmicas, livres de dispersão numérica. Além disso, o novo esquema numérico fornece naturalmente, a primeira derivada temporal da solução da equação da onda sem aumentar consideravelmente a demanda computacional. Assim, o vetor de Poynting – grandeza física que fornece a base matemática para o cálculo da direção de propagação do campo de ondas – pode ser calculado com precisão, uma vez que a primeira derivada no tempo do campo de ondas é obtida diretamente do método proposto. As informações provenientes do vetor Poynting têm sido usadas para o desenvolvimento de várias estratégias para melhorar a qualidade da imagem migrada da migração reversa no tempo (*reverse time migration* – RTM). Baseado no vetor de Poynting, o campo de ondas pode ser separado em componente ascendente e descendente e usa-se somente a parte descendente dos campos de ondas da fonte e do receptor na condição de imagem da correlação cruzada, resultando em uma boa atenuação do ruído de baixa frequência, que aparece na imagem da RTM. Nesta mesma direção, esta tese apresenta uma nova metodologia para separar o campo de ondas e baseia-se no ângulo da direção de propagação do campo de ondas, calculado através do vetor Poynting. Também mostra uma nova estratégia que usa famílias de imagem comum (*common image gathers* – CIGs) no domínio do ângulo de reflexão. Nesse domínio é aproveitado a parte dos CIGs que normalmente é descartado, para melhorar os resultados da RTM. Usando esquemas simpléticos para solução da equação da onda, a derivada temporal do campo de ondas é calculado durante cada extrapolação no tempo. Isso permite criar um mecanismo para mudar a direção de propagação do campo de ondas e aplicá-lo como um procedimento na condição de contorno para atenuar a energia refletida na borda do modelo. Esse mecanismo foi apresentado na literatura e é denominado de *Qreverse*. Neste trabalho, esse mecanismo foi também investigado e utilizado em um modelo de velocidade constante. Os bons resultados obtidos com este procedimento na condição de contorno é apresentado. O método proposto aqui foi testado em vários conjuntos de dados sintéticos complexos e com resultados satisfatórios. Através de exemplos numéricos, este trabalho demonstra a aplicabilidade do novo método, para extrapolar o campo de ondas com intervalos de tempo maiores do que os normalmente utilizados pelos métodos pseudospectral, de forma estável e sem o ruído da dispersão numérica. Além disso, o método simplético pode calcular com sucesso o vetor de Poynting e apresenta os resultados da RTM usando a nova metodologia de separação do campo de ondas e a nova estratégia que usa CIGs afim de atenuar o ruído de baixa frequência, produzindo assim melhoria nos resultados da RTM.

ABSTRACT. In this work a new numerical solution for the acoustic wave equation based on the combination of the symplectic integrators and the expansion of the cosine function using the Chebyshev polynomials is presented. The method proposed here can march the wavefield in time, generating a stable propagation of seismic waves, free of numerical dispersion. Furthermore, the new numerical scheme provides the first time derivative directly from the wave equation solution without any increase in computational cost. Thus, the Poynting vector – a physical quantity that provides the mathematical basis for calculating the direction of propagation of the wave field – can be calculated accurately, since the first time derivative of the wavefield is obtained directly of the using the proposed method. The Poynting vector information has been used more recently in the development of various strategies to improve the quality of the migrated images from the reverse time migration (RTM) method. Based on the Poynting vector, the wavefield can be separated in its upgoing and downgoing components and the use of only the downgoing part of the source and receiver wavefields in the cross-correlation imaging condition results in a good attenuation of low frequency noise artifacts, that appear in the RTM images. In this same direction, this thesis presents a new methodology to separate the wavefield and it is based on the angle of the direction of propagation of the wavefield calculated by the Poynting vector. It also shows, a new strategy that uses common image gathers (CIGs) in the reflection angle domain. This domain is exploited the part of the CIGs, which is usually discarded, to improve the results from the RTM. Using symplectic schemes for wave equation solution the time derivative of the wavefield is calculated during each extrapolation in time. This allows one to create a mechanism to change the direction of propagation of the wavefield and apply it as a boundary condition procedure to attenuate the reflected energy in the boundaries of the model. This mechanism was previously present in literature and it is called *Qreverse*. Here, it was also investigated and using a homogeneous velocity model, good results with this boundary condition procedure is presented. The methods proposed here were tested on various complex syntethic datasets and with quite satisfactory results. Through these numerical examples, this work shows the applicability of the new method to extrapolate wavefields with time steps larger than the ones commonly used by pseudospectral methods, in a stable way and without numerical dispersion noise. Furthermore, the symplectic method can successfully handle Poynting vector calculations and it presents the results of RTM using the new methodology of separating the wavefield and the new strategy that uses CIGs in order to attenuate the low frequency noise, thus producing improvement in the RTM results.

IMAGEAMENTO SÍSMICO DE ESTRUTURAS DE ALTO MERGULHO EMPREGANDO TÉCNICAS ESPECTRAIS DE MIGRAÇÃO

Adeilton Rigaud Lucas Santos

Orientador: Dr. Reynam da Cruz Pestana (UFBA)
99 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 21.11.2013

RESUMO. As técnicas espectrais de migração englobam os algoritmos que realizam a extrapolação do campo de ondas no domínio de Fourier. Apesar de computacionalmente eficientes, as técnicas espectrais empregam a equação unidirecional da onda, desprezando o campo de ondas descendentes na etapa de extrapolação. Essa aproximação prejudica o imageamento de estruturas de alto mergulho (sub-verticais), que são relativamente comuns em áreas de geologia complexa, tal como em regiões com domos de sal. Neste trabalho, foi realizada uma comparação entre a qualidade do imageamento com quatro diferentes algoritmos de migração: *Split Step*, *Phase Shift Plus Interpolation* (PSPI), *Up-Down* e migração reversa no tempo (RTM). As duas primeiras são técnicas espectrais convencionais, enquanto o método *Up-Down* emprega o artifício de realizar uma segunda etapa de extrapolação para gerar o campo descendente e assim permitir o imageamento das estruturas de alto mergulho. A migração reversa no tempo, por empregar a equação completa da onda, foi utilizada para servir de comparação com os demais métodos. Os métodos de migração foram aplicados em dois conjuntos de dados sísmicos sintéticos, o primeiro simulando a presença de uma falha vertical e o segundo um modelo representativo da bacia de Santos, com variações laterais de velocidades e corpos salinos. As técnicas espectrais convencionais conseguiram reconstruir as principais estruturas de baixo mergulho dos modelos, mas falharam no imageamento daquelas de alto ângulo. Já os algoritmos *Up-Down* e RTM conseguiram reconstruir as estruturas de alto mergulho e também resolver as camadas delgadas existentes no modelo da bacia de Santos. O resultado do imageamento com o algoritmo *Up-Down*, apesar da qualidade inferior, mostrou-se comparável aquele da migração reversa no tempo. Assim sendo, em alguns casos específicos, o algoritmo *Up-Down* pode ser considerado como uma alternativa computacionalmente eficiente ao uso da migração reversa no tempo.

ABSTRACT. Spectral migration methods comprise algorithms of wave field extrapolation in Fourier domain. Although computationally fast, spectral methods apply the one-way wave equation, neglecting the descending wave field in the extrapolation procedure. Such approximation compromises imaging of strong dipping structures (sub-vertical structures), which are relatively common in complex geology areas (such as salt dome areas). In this work, four different imaging algorithms were applied and results compared: Split Step, Phase Shift Plus Interpolation (PSPI), Up-Down, and reverse time migration (RTM). The first two are conventional spectral techniques. The Up-Down method employs a second interpolation procedure to generate the descending wave field allowing the imaging of strong dipping structures. The reverse time migration employs the two-way wave equation and was used as benchmark for the comparison. The migration methods were applied on two sets of synthetic seismic data. The first data model simulate the presence of a vertical fault and the second one represents a typical Santos Basin seismic response, with lateral velocity variations and salt bodies. The conventional spectral techniques were able to reconstruct the main low dipping structures of both models, but they failed to imaging structures with high dipping angle. On the other hand, the Up-Down and RTM algorithms were able to image such structures and some thin layers present in the Santos Basin model. The Up-Down imaging result, besides inferior when compared to RTM, provides excellent results. Therefore, the Up-Down algorithm may be considered, in some cases, as a computationally faster alternative to the RTM method.

INVERSÃO DE FORMA DE ONDA APLICADA À ANÁLISE DE VELOCIDADES SÍSMICAS UTILIZANDO UMA ABORDAGEM MULTIESCALA

Adriano Wagner dos Santos

Orientador: Dr. Reynam da Cruz Pestana (UFBA)

147 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 20.11.2013

RESUMO. A inversão de forma de onda (FWI – *Full Waveform Inversion*), aplicada à análise de velocidades sísmicas, é um método capaz de obter resultados de mais alta resolução que os métodos convencionais até então empregados. Entretanto, a formulação clássica da FWI está fortemente sujeita à convergência para mínimos locais devido à não-linearidade do problema. Além disso, este método é conhecido por seu alto custo computacional, fazendo necessário o uso de estratégias com baixo nível de retrabalho, além de técnicas mais avançadas de programação, como a computação paralela. O objetivo deste trabalho é apresentar, implementar e testar a inversão de forma de onda e os diversos aspectos que podem influenciar no processo de convergência. Dentre as técnicas estudadas, estão o método de diferenças finitas e o de expansão rápida, empregados na extrapolação do campo de ondas; o método adjunto para o cálculo do gradiente; os métodos *steepest-descent* e L-BFGS para o cálculo da direção de busca; e sete alternativas de determinação do comprimento do passo inicial, utilizados na busca em linha. Além disso, é mostrado como o problema de *cycle-skipping* pode levar à convergência para mínimos locais e como a abordagem multiescala é capaz de evitar este problema ao proporcionar um incremento gradual do conteúdo de frequência usado na inversão. Os testes foram realizados com modelos sintéticos, porém simulando geologias complexas, a fim de validar a teoria e implementação da abordagem multiescala na FWI, além de permitir avaliar o efeito dos parâmetros da inversão no resultado final e no custo computacional. Os principais critérios usados na avaliação dos resultados foram a minimização da função objetivo, o erro RMS normalizado entre o modelo estimado e o verdadeiro, a imagem migrada obtida com o modelo invertido e a horizontalização dos eventos nas famílias de imagem comum no domínio do ângulo de reflexão.

ABSTRACT. The full waveform inversion (FWI), applied to seismic velocity analysis, is a method capable of obtaining results with higher resolution than the conventional methods used so far. However, in its classical formulation, FWI is strongly subject to convergence to local minima, due to non-linearity of the problem. In addition, this method is known by its high computational cost, making necessary the use of efficient strategies, and more advanced programming techniques, like parallel computing. The objective of this work is to present, implement and test the full waveform inversion and several aspects that may influence on the convergence process. Among the studied techniques, are the finite difference and rapid expansion methods, used for wavefield extrapolation; the adjoint state method used to compute the gradient; the steepest-descent and L-BFGS methods to compute the search direction; and seven different alternatives to compute the initial step-size, used in a line-search. Besides, it is shown how the cycle-skipping problem can lead the convergence to local minima and how the multiscale approach is capable of avoiding this problem, by providing a gradual increment of the frequency content used during inversion. Tests were carried using synthetic models, but simulating complex geologies, in order to validate theory and implementation of the multiscale approach in FWI, and also to evaluate the effects of parameterization on the final result and the computational cost. The main criteria used to evaluate the results were: minimization of the objective function, normalized RMS error between estimated and true models, migrated image obtained with the estimated model and flatness of angle-domain common image gathers.

ANÁLISE DAS MARÉS OCEÂNICAS EMPREGANDO O MÉTODO DE LEVENBERG MARQUARDT

Helber da Cunha Macedo

Orientador: Dr. Cosme Ponte Neto (ON)

51 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 11.12.2013

RESUMO. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia que possibilite a previsão e a análise harmônica das marés oceânicas. Foram desenvolvidos três códigos computacionais em Fortran. Dois fazem a análise harmônica para gerar as quinze constantes harmônicas (sete amplitudes, sete atrasos de fase e o nível médio do mar) de cada local analisado. O primeiro programa usa o método da Série de Fourier para realizar a análise harmônica. O resultado é usado como uma boa estimativa inicial para o segundo programa. Este, por sua vez, através do método Levenberg-Marquardt, gera os quinze parâmetros pesquisados. O terceiro realiza a previsão de marés com os parâmetros calculados, comparando os resultados com os obtidos por marégrafos. Eles foram aplicados à Ilha Fiscal (RJ) e às cidades norte-americanas de Atlantic City e Port Morris. Os resultados obtidos permitem propor o uso dessa metodologia para o meio científico e acadêmico, auxiliando na pesquisa das marés oceânicas.

ABSTRACT. The present work aims to develop a methodology that enables the prediction and harmonic analysis of ocean tides. Three computer codes were developed in Fortran. Two of them make the harmonic analysis to generate the fifteen harmonic constants (seven amplitudes, seven phase delays and the mean sea level) of each location analyzed. The first program uses the Fourier-series method to perform the harmonic analysis. The result is used as a good initial guess to the second program. This, in turn, through the Levenberg-Marquardt method, generates the fifteen parameters investigated. The third program makes the tide prediction with the parameters calculated, comparing the results with those obtained from tide gauges. They were applied to Ilha Fiscal (RJ) and the American cities of Atlantic City and Port Morris. The obtained results allow us to propose the use of this methodology to the scientific and academic communities, aiding in the research on ocean tide.

INVERSÃO GRAVIMÉTRICA RÁPIDA DO RELEVO DO EMBASAMENTO APLICANDO O FUNCIONAL DA VARIAÇÃO TOTAL

Raphael Di Carlo Silva dos Santos

Orientadora: Dra. Darciléa Ferreira Santos (UFPA)
51 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 23.08.2013

RESUMO. Apresentamos um novo método de inversão linear bidimensional de dados gravimétricos produzidos por bacias sedimentares com relevo do embasamento descontínuo. O método desenvolvido utiliza um modelo interpretativo formado por um conjunto de fitas horizontais bidimensionais justapostas cujas espessuras são os parâmetros a serem estimados. O contraste de densidade entre o embasamento e os sedimentos é presumido constante e conhecido. As estimativas das espessuras foram estabilizadas com o funcional da Variação Total (VT) que permite soluções apresentando descontinuidades locais no relevo do embasamento. As estimativas do relevo são obtidas através da resolução de um sistema de equações lineares, resolvido na norma L_1 . Como métodos lineares subestimam as estimativas de profundidade do embasamento de bacias maiores que cerca de 500 m, amplificamos as estimativas de profundidade através da modificação da matriz associada ao modelo interpretativo de fitas. As estimativas obtidas através deste procedimento são em geral ligeiramente superestimadas. Desse modo, elas são corrigidas através de uma correção definida pela expressão da placa Bouguer. Testes em dados sintéticos e reais produziram resultados comparáveis aos produzidos pelo método não linear, mas exigiram menor tempo computacional. A razão R entre os tempos exigidos pelo método não linear e o método proposto cresce com o número de observações e parâmetros. Por exemplo, para 60 observações e 60 parâmetros, R é igual a 4, enquanto para 2500 observações e 2500 parâmetros R cresce para 16,8. O método proposto e o método de inversão não linear foram aplicados também em dados reais do Steptoe Valley, Nevada, Estados Unidos, e da ponte do POEMA, no Campus do Guamá em Belém, produzindo soluções similares às obtidas com o método não linear exigindo menor tempo computacional.

ABSTRACT. We present a new 2D linear inversion gravity method to estimate the discontinuous basement relief of a sedimentary basin. The method uses an interpretation model consisting of a set of 2D juxtaposed horizontal ribbons whose thicknesses are the parameters to be estimated. The density contrast between the basement and the sediments is assumed constant and known. The estimates of the thicknesses were stabilized with the Total Variation functional (TV) which permits solutions presenting local discontinuities in the basement relief. The estimates of the basement relief are produced by solving a single linear system of equations in the L_1 norm. Because linear inversion methods underestimate the depth of the basement relief for sedimentary basins thicker than 500 m, we amplify the depth estimates through by modifying the matrix associated with the interpretation model. This procedure in general leads to overestimated depths which are corrected through the expression of the anomaly of a Bouguer slab. Tests on synthetic and real data produced similar results as compared with the nonlinear method, but required less computational time. The ratio R between the computational times required by the nonlinear and the proposed methods to produce similar solutions increases with the number of observations and parameters. For example, for 60 observations and 60 parameters R is equal to 4 whereas for 2500 observations and 2500 R increases to 16.8. The proposed method and the nonlinear inversion method were also applied to real gravity data from Steptoe Valley, Nevada, U.S.A. and from Ponte do POEMA at the Campus of Guamá, in Belém, producing solutions which are similar to the ones produced by the nonlinear method but required a smaller computer time.

MONITORAMENTO AMBIENTAL DA COSTA DO RIO GRANDE DO NORTE COM BASE EM SENSORIAMENTO REMOTO E GEODÉSIA DE PRECISÃO

Anderson Targino da Silva Ferreira

Orientador: Venerando Eustáquio Amaro (PPGG/UFRN)

160 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 16.09.2013

RESUMO. Este trabalho apresenta modelos de parâmetros da Camada Superficial do Mar (CSM), tais como: Clorofila- α , Temperatura da Superfície do Mar (TSM), Produtividade Primária (PP) e Material Particulado em Suspensão (MPS), para a região adjacente a plataforma continental do Rio Grande do Norte (RN), Brasil. Concentrações desses parâmetros medidos *in situ* foram comparadas em tempo quase-síncronos com imagens AQUA-MODIS entre os anos de 2003 até 2011. Coeficientes de determinação foram representativos entre as amostras *in situ* e as bandas de reflectância do sensor AQUA-MODIS. A partir disso, concentrações de parâmetros da CSM foram adquiridos para a plataforma continental do RN (Plataforma Oriental e Setentrional) analisando a distribuição geográfica da variação desses parâmetros entre os anos de 2009-2012. Variações geográficas e sazonais influenciadas principalmente por fenômenos climáticos globais como o fenômeno *El Niño* e *La Niña*, foram constatadas através das análises das imagens AQUA-MODIS por análise de Principais Componentes (PC). As imagens apontam de maneira qualitativa a variância e disponibilidade do MPS nas regiões, assim como sua relação com *hotspots* de erosão costeira, monitorados ao longo do litoral do RN. Em uma das regiões identificadas como sendo de pouca disponibilidade de MPS, foi desenvolvida uma metodologia para levantamento e avaliação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de superfícies praias (setores emersos e submersos) a partir da integração de dados topográficos e batimétricos mensurados *in situ* e georeferenciados com precisão compatível aos estudos de geomorfologia e dinâmica costeira de curta duração. A metodologia desenvolvida consistiu de levantamentos com posicionamentos GNSS operados no modo relativo cinemático envolvidos nos levantamentos topográficos e batimétricos executados em relação às estações da rede geodésica da área de estudo, que forneceram referencial geodésico vinculado ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), o qual é unívoco, fixo e relativamente estável no tempo. No estudo foi apresentado a Praia de Ponta Negra, Natal/RN, identificada como uma região com baixa variância e disponibilidade de MPS ao largo, assim como, caracterizada por intensa ocupação antrópica e intensa erosão costeira nas últimas décadas, no qual são apresentadas as potencialidades da metodologia proposta, quanto à acurácia e produtividade, além dos avanços alcançados em relação aos métodos clássicos de levantamento de perfis de praia.

ABSTRACT. This paper presents models of parameters of Sea Surface Layer (SSL), such as chlorophyll- α , sea surface temperature (SST), Primary Productivity (PP) and Total Suspended Matter (TSM) for the region adjacent to the continental shelf of Rio Grande do Norte (RN), Brazil. Concentrations of these parameters measured *in situ* were compared in time quasi-synchronous with images AQUA-MODIS between the years 2003 to 2011. Determination coefficients between samples *in situ* and bands reflectance sensor AQUA-MODIS were representative. From that, concentrations of SSL parameters were acquired for the continental shelf of the RN (eastern and northern) analyzing the geographic distribution of variation of these parameters between the years 2009-2012. Geographical and seasonal variations mainly influenced by global climate phenomena such as *El Niño* and *La Niña*, were found through the analysis of AQUA-MODIS images by Principal Components Analysis (PCA). Images show qualitatively the variance and availability of TSM in the regions, as well as their relationship with coastal erosion hotspots, monitored along the coast of the RN. In one of the areas identified as being of limited availability of TSM, we developed a methodology for assessment and evaluation of Digital Elevation Models (DEM) of beach surfaces (emerged and submerged sections) from the integration of topographic and bathymetric data measured *in situ* and accurately georeferenced compatible to studies of geomorphology and coastal dynamics of short duration. The methodology consisted of surveys with GNSS positioning operated in cinematic relative mode involved in topographic and bathymetric executed in relation to the stations of the geodetic network of the study area, which provided geodetic link to the Brazilian Geodetic System (GBS), univocal, fixed, and relatively stable over time. In this study Ponta Negra Beach, Natal/RN, was identified as a region with low variance and availability of MPS in the region off, as characterized by intense human occupation and intense coastal erosion in recent decades, which presents potential of the proposed methodology for accuracy and productivity, and the progress achieved in relation to the classical methods of surveying beach profiles.