
AVALIAÇÃO DA VOLATILIDADE DOS CONTRATOS FUTUROS DO PETRÓLEO E DERIVADOS ANTES E APÓS A CRISE DE 2008

THAÍS C.S. AZEVEDO, FERNANDO A.L. AIUBE,
CARLOS P. SAMANEZ e CLAUDIO R.S. BISSO

RESUMO

Este artigo analisa o comportamento da volatilidade do petróleo e dos derivados gasolina e diesel antes e após a crise de 2008. Estas três commodities são analisadas com base nos preços dos contratos futuros de curto, médio e longo prazo. Foram utilizados dados históricos diários de Janeiro 2000 a Junho 2008 (período pré-crise) e de Maio 2009 a Outubro 2012 (pós-crise). Os modelos da família GARCH foram ajustados às séries e as volatilidades condicionais foram assim estimadas. Comparando as volatilidades dos contratos de curto, médio e longo prazo, identificamos que após a crise, no horizonte de

curto prazo, houve uma queda na volatilidade média dos contratos de todas as commodities analisadas. Calculamos por fim, a persistência dos choques de volatilidade antes e após a crise de 2008 e vimos que após a crise, na maioria dos contratos, houve um aumento da persistência dos choques. A relevância deste tipo de análise está relacionada à importância da volatilidade no desempenho dos agentes que negociam os produtos no mercado físico, nos mercados de bolsa e no gerenciamento de carteiras que incluem commodities do setor de petróleo.



petróleo WTI (West Texas Intermediate), oriundo da principal região petrolífera dos EEUU, é um petróleo leve (light sweet), ou seja, com baixo teor de enxofre, o que pode ser traduzido como de alta qualidade. Este tipo de petróleo possui um alto rendimento quando processado, pois gera produtos de alto valor agregado, como a gasolina e o diesel combustível. A qualidade, o custo de refino e o custo de transporte estão refletidos nos preços do petróleo bruto. A gasolina do tipo RBOB (reformulated blendstock for oxygenate blending) e o diesel são os principais produtos resultantes do processamento do petróleo bruto. A gasolina RBOB é a gaso-

lina produzida com as especificações dos agentes reguladores e pronta para a mistura com o etanol (visando o atendimento de questões ambientais).

Tanto o petróleo como os produtos refinados são negociados através dos contratos futuros na NYMEX. Os mercados futuros permitem, fundamentalmente, que os agentes expostos à volatilidade das commodities possam tomar posições mitigando sua exposição original. Hoje, os mercados futuros de petróleo são de longe os mais relevantes dentre todos os mercados futuros das demais commodities negociadas no mundo (Aiube, 2013).

Os preços do petróleo são influenciados a curto e longo prazo por diversos fatores, podemos resumir em: a oferta dos países produtores, principalmente os participantes da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), a demanda mundial por combustíveis, o nível dos estoques dos países mais dependentes do produto e fatores geopolíticos relacionados aos conflitos no Oriente Médio.

No início do presente século, o aumento da demanda por parte de países emergentes foi um fator relevante para o aumento do preço do petróleo e seus derivados. Soma-se a isto a

PALAVRAS CHAVE / Diesel / Futuros / Gasolina / Modelos GARCH / Petróleo / Volatilidade /

Recebido: 10/01/2013. Modificado: 14/10/2013. Aceito:30/10/2013.

Thaís C.S. Azevedo. Engenheira de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Brasil. e-mail: thais.azevedo@aluno.puc-rio.br

Fernando A. L. Aiube. Doutor em Engenharia de Produção, PUC-Rio, Brasil. Engenheiro, Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras) e Professor, PUC-Rio, Brasil. e-mail: aiube@puc-rio.br

Carlos P. Samanez. Doutor em Economia Financeira. Fundação Getúlio Vargas de São Paulo, Brasil. Professor, PUC-Rio, Brasil. Endereço: Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio. Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. e-mail: cps@puc-rio.br

Claudio R. S. Bisso. Engenheiro de Produção, PUC-Rio, Brasil. Mestre em Engenharia de Produção, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Rio de Janeiro, Brasil. e-mail: cbisso42@yahoo.com.br

baixa oferta resultante de escassos investimentos na atividade exploratória. Mais recentemente, em 2007, o enfraquecimento do dólar e o início da recessão no mercado americano atraíram os investidores para o mercado das commodities. O mercado do petróleo e derivados, por ser o de maior liquidez, recebeu os maiores aportes de recursos. Foi assim que em Julho de 2008 os preços do petróleo WTI no NYMEX registraram cotação recorde, superior a USD140/bbl.

Com a eclosão da crise imobiliária americana no segundo semestre de 2008, os investidores retiraram seus investimentos das bolsas, mas o nível de estocagem em Cushing, no estado de Oklahoma (ponto de entrega para o petróleo negociado no NYMEX) era muito alto. A perspectiva do enfraquecimento da demanda pela recessão, unida aos níveis altos de estocagem provocou uma queda brusca nos preços do petróleo WTI. Os preços caíram 77% desde o mês de julho do mesmo ano (quando houve o pico histórico) e registrou-se uma queda semanal de 27% (a maior desde a Guerra do Golfo), mesmo após a OPEP anunciar um corte na produção de 9% (maior que o esperado) na tentativa de frear o movimento de queda dos preços.

O modelo da volatilidade condicional heterocedástico ARCH foi estabelecido na literatura há mais de 30 anos por Engle (1982). Posteriormente foi generalizado por Bollerslev (1986). A literatura neste tema desenvolveu-se muito desde então, incorporando outros

TABELA I
DADOS DE CADA COMMODITY NO PERÍODO PRÉ-CRISE

| | Contratos | Commodity | | |
|-----------|---|---|--|---|
| | | Petróleo - WTI | Gasolina - RBOB | Diesel americano - Heating Oil |
| Pré-crise | Curto prazo (F1, F3 e F5) | 04/01/2000 a 30/06/2008 (2120 observações) | 03/10/2005 a 30/06/2008 (688 observações) | 04/01/2000 a 30/06/2008 (2120 observações) |
| | Médio prazo (F10, F15, F20, F27, F30 e F35) | 04/01/2000 a 30/06/2008 (2120 observações) | 13/02/2007 a 30/06/2008 (348 observações) | 17/04/2007 a 30/06/2008 (344 observações) |
| | Longo prazo (F40 e F50) | 10/02/2006 a 30/06/2008 (598 observações) | - | - |

fatos estilizados como, por exemplo, a assimetria dos choques. Existem inúmeros artigos que fazem uso de tais modelos analisando o comportamento da volatilidade das séries financeiras. Em particular o trabalho de Hadsell et al. (2004), uma das referências da aplicação de tais modelos à análise da volatilidade para commodity energia elétrica em diversos mercados dos EEUU.

Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento da estrutura a termo da volatilidade dos contratos futuros do petróleo WTI e seus derivados antes e após a crise. Pretende-se avaliar se a crise de 2008 modificou, e em que magnitude, a volatilidade média dos contratos de curto, médio e longo prazo destas commodities.

Natureza e Escolha dos Dados

Foram coletados dados históricos dos preços futuros do petróleo WTI e de seus derivados a partir da plataforma Bloomberg (www.bloomberg.com). Os preços são os de fechamento diários tomados em USD/bbl.

Neste trabalho utilizaremos a notação F_i para representar os contratos futuros com vencimento i meses à frente. Por exemplo: F_1 é o contrato com vencimento um mês à frente e F_{20} é o

contrato com vencimento 20 meses à frente. O primeiro contrato futuro das commodities foi utilizado como sendo referência de curto prazo, o vigésimo contrato futuro como sendo de médio prazo e o quadragésimo contrato futuro como sendo referência de longo prazo.

A escolha dos dados foi realizada com o objetivo de excluir o período de alta volatilidade ocorrida durante a crise de 2008 (principalmente o segundo semestre de 2008). Consideramos como sendo de curto-prazo contratos que vencem em até cinco meses à frente da data de referência, de médio prazo contratos que vencem em até trinta e cinco meses à frente da data de referência e de longo prazo contratos com vencimento a partir de quarenta meses à frente da data de referência. As Tabelas I e II mostram os contratos analisados com os respectivos períodos abrangidos e o número de observações. Ao todo foram analisadas 29 séries antes da crise e 29 séries após a crise.

As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, para os períodos pré e pós-crise, o comportamento dos contratos F_1 , F_{20} e F_{40} para o WTI.

As Tabelas III e IV apresentam, respectivamente, para os períodos pré e pós-crise, algumas estatísticas básicas das séries de preços do petróleo e seus derivados.

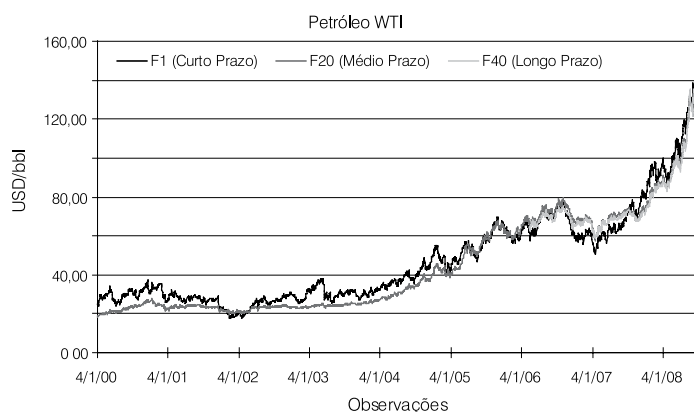


Figura 1. Preços do petróleo WTI no período pré-crise.

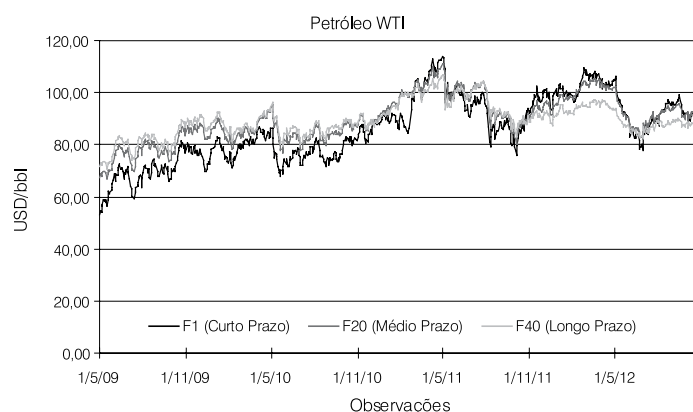


Figura 2. Preços do WTI no período após a crise.

TABELA II
DADOS DE CADA COMMODITY NO PERÍODO PÓS-CRISE

| Contratos | Commodity | | |
|---|---|---|---|
| | Petróleo - <i>WTI</i> | Gasolina - <i>RBOB</i> | Diesel americano - <i>Heating oil</i> |
| Curto prazo (F1, F3 e F5) | 01/05/2009 a 25/10/2012 (881 observações) | 01/05/2009 a 25/10/2012 (881 observações) | 01/05/2009 a 25/10/2012 (881 observações) |
| Médio prazo (F10, F15, F20, F27, F30 e F35) | 01/05/2009 a 25/10/2012 (881 observações) | 01/05/2009 a 25/10/2012 (881 observações) | 01/05/2009 a 25/10/2012 (881 observações) |
| Longo prazo (F40 e F50) | 01/05/2009 a 25/10/2012 (881 observações) | - | - |

Metodologia do Ajuste de Modelos Heterocedásticos às Séries

O uso das séries de retornos apresenta duas vantagens: uma delas está relacionada com o fato de que os retornos contêm informações mais interessantes aos investidores, e a outra vantagem está relacionada com o fato de que a série de retornos apresenta propriedades estatísticas mais atrativas.

A série de retornos (ou melhor, a de log-retornos a partir da frequência diária) foi construída como é usual na literatura por

$$r_t = \ln \left(\frac{p_t}{p_{t-1}} \right) \quad (1)$$

O ajuste do modelo paramétrico heterocedástico à série de retornos de cada contrato foi definido através da minimização do critério BIC (Schwarz, 1978), resultando em modelos mais parcimoniosos. Também foi verificado se, após o ajuste, os resíduos e o quadrado dos resíduos estavam descorrelacionados e não apresentavam nenhum tipo de dependência (estes fatos

foram verificados a partir dos testes de Box-Pierce (1970) e Ljung-Box (1978) para análise da autocorrelação e o teste BDS de Brock et al. (1986) para análise da independência. Além destes, foi realizado o teste ARCH-LM de Engle (1982) nos resíduos de cada série para verificar a eliminação do efeito heterocedástico.

Foi testada a adequação de cada série aos modelos da família GARCH usando-se as distribuições normal, t-Student e GED (generalized error distribution). Todos os modelos selecionados apresentaram melhores resultados ao serem ajustados pela distribuição t-Student.

Modelos lineares de volatilidade condicional como o modelo ARCH de Engle (1982) e o GARCH de Bollerslev (1986) foram testados, assim

Modelos lineares de volatilidade condicional como o modelo ARCH de Engle (1982) e o GARCH de Bollerslev (1986) foram testados, assim

TABELA III
ESTATÍSTICAS BÁSICAS DAS SÉRIES DE PREÇO NO PERÍODO PRÉ-CRISE, EM USD/BBL

| Contratos | Média | Desvio padrão | Máximo | Mínimo |
|--|--------|---------------|--------|--------|
| Petróleo - <i>WTI</i> | | | | |
| Curto prazo (F1) | 47,79 | 24,35 | 140,21 | 17,45 |
| Médio prazo (F20) | 44,93 | 25,78 | 139,10 | 18,55 |
| Longo prazo (F40) | 76,93 | 17,11 | 136,35 | 59,23 |
| Gasolina - <i>RBOB</i> | | | | |
| Curto prazo (F1) | 88,64 | 20,10 | 149,02 | 56,92 |
| Médio prazo (F20) | 94,44 | 17,67 | 142,93 | 70,35 |
| Diesel americano - <i>Heating oil</i> | | | | |
| Curto prazo (F1) | 55,91 | 29,54 | 166,94 | 21,00 |
| Médio prazo (F20) | 104,67 | 23,87 | 168,02 | 81,27 |

TABELA IV
ESTATÍSTICAS BÁSICAS DAS SÉRIES DE PREÇO NO PERÍODO PÓS-CRISE, EM USD/BBL

| Contratos | Média | Desvio-padrão | Máximo | Mínimo |
|--|--------|---------------|--------|--------|
| Petróleo - <i>WTI</i> | | | | |
| Curto prazo (F1) | 86,02 | 12,35 | 113,93 | 53,20 |
| Médio prazo (F20) | 89,92 | 12,00 | 111,17 | 66,94 |
| Longo prazo (F40) | 89,67 | 11,71 | 108,52 | 69,51 |
| Gasolina - <i>RBOB</i> | | | | |
| Curto prazo (F1) | 104,05 | 20,35 | 145,52 | 63,73 |
| Médio prazo (F20) | 100,56 | 11,89 | 122,75 | 68,21 |
| Diesel americano - <i>Heating Oil</i> | | | | |
| Curto prazo (F1) | 105,98 | 22,23 | 139,43 | 58,31 |
| Médio prazo (F20) | 105,73 | 14,78 | 140,02 | 77,32 |

TABELA V
MODELOS AJUSTADOS PARA O PETRÓLEO ANTES E APÓS A CRISE

| | Série | Modelo | Parâmetros | p-valor |
|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|
| Pré-crise | F1 (Curto prazo) | AR-GARCH (1,1) | $\phi_1 = -0,043855$ | 0,0413 |
| | | | $\omega = 1,05 \times 10^{-5}$ | 0,0334 |
| | | | $\alpha_1 = 0,027744$ | 0,0007 |
| | F20 (Médio prazo) | AR-GARCH (2,1) | $\beta_1 = 0,951459$ | 0,0000 |
| | | | $a_0 = 0,001058$ | 0,0001 |
| | | | $\phi_1 = -0,166881$ | 0,0000 |
| $\omega = 1,35 \times 10^{-6}$ | | | 0,0518 | |
| F40 (Longo prazo) | AR-GARCH (1,1) | $\alpha_1 = 0,131356$ | 0,0000 | |
| | | $\alpha_2 = -0,094340$ | 0,0030 | |
| | | $\beta_1 = 0,956998$ | 0,0000 | |
| | | $a_0 = 0,001093$ | 0,0307 | |
| Pós-crise | F1 (Curto prazo) | TARCH (0,2) | $\phi_1 = -0,109885$ | 0,0151 |
| | | | $\omega = 1,3 \times 10^{-5}$ | 0,0681 |
| | | | $\alpha_1 = 0,160515$ | 0,0003 |
| | F20 (Médio prazo) | TARCH (0,2) | $\beta_1 = 0,701217$ | 0,0000 |
| | | | $\omega = 1,26 \times 10^{-6}$ | 0,2497 |
| | | | $\beta_1 = 1,456873$ | 0,0000 |
| $\beta_2 = -0,468562$ | | | 0,0002 | |
| F40 (Longo prazo) | TARCH (0,2) | $\gamma_1 = 0,288871$ | 0,0004 | |
| | | $\gamma_2 = -0,272649$ | 0,0006 | |
| | | $\omega = 9,8 \times 10^{-7}$ | 0,2497 | |
| | | $\beta_1 = 1,443936$ | 0,0000 | |
| F40 (Longo prazo) | TARCH (0,2) | $\beta_2 = -0,459485$ | 0,0004 | |
| | | $\gamma_1 = 0,360421$ | 0,0003 | |
| | | $\gamma_2 = -0,339023$ | 0,0004 | |
| | | $\omega = 1,89 \times 10^{-7}$ | 0,2226 | |
| F40 (Longo prazo) | TARCH (0,2) | $\beta_1 = 1,677063$ | 0,0000 | |
| | | $\beta_2 = -0,680235$ | 0,0000 | |
| | | $\gamma_1 = 0,194152$ | 0,0000 | |
| | | $\gamma_2 = -0,191114$ | 0,0000 | |

TABELA VI
MODELOS AJUSTADOS PARA A GASOLINA
ANTES E APÓS A CRISE

| | | Série | Modelo | Parâmetros | p-valor |
|------------------------|-----------|----------------------|----------------|---|--------------------------------------|
| Gasolina - <i>rbob</i> | Pré-crise | F1 (Curto prazo) | ARCH (1) | $\omega = 0,000479$ $\alpha_1 = 0,109560$ | 0,0000 0,0713 |
| | | F20 (Médio prazo) | AR-ARCH (1) | $a_0 = 0,002414$ $\phi_1 = -0,142602$ $\omega = 0,000207$ $\alpha_1 = 0,222040$ | 0,0030 0,0125 0,0000 0,0281 |
| | Pós-crise | F1 (Curto prazo) | GARCH (1,1) | $b_3 = 0,003366$ $\omega = 4,86 \times 10^{-5}$ $\alpha_1 = 0,065762$ $\beta_1 = 0,816418$ | 0,0111 0,0749 0,0218 0,0000 |
| | | F20 (Médio prazo) | TARCH (0,1) | $\omega = 3,02 \times 10^{-5}$ $\beta_1 = 0,799841$ $\gamma_1 = 0,178410$ | 0,0142 0,0017 0,0000 |

TABELA VIII
VOLATILIDADE INCONDICIONAL E MEIA-VIDA
SEGUNDO CADA MODELO HETEROCEDÁSTICO

| Modelo | V (volatilidade incondicional) | Meia-vida (τ) |
|-------------|--|--|
| GARCH (p,q) | $\left[\left(\frac{\omega}{1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i - \sum_{j=1}^q \beta_j} \right) \times 252 \right]^{1/2}$ | $\frac{\ln \left(\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i + \sum_{j=1}^q \beta_j \right) \right)}{\ln \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i + \sum_{j=1}^q \beta_j \right)}$ |
| TARCH (p,q) | $\left[\left(\frac{\omega}{1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \gamma_k - \sum_{j=1}^q \beta_j} \right) \times 252 \right]^{1/2}$ | $\frac{\ln \left(\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \gamma_k + \sum_{j=1}^q \beta_j \right) \right)}{\ln \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \gamma_k + \sum_{j=1}^q \beta_j \right)}$ |

como os modelos não-lineares EGARCH (Exponential GARCH; Nelson, 1991) e TARCH (Threshold ARCH; Zakoian, 1994).

No período pré-crise, a maior parte das séries foram ajustadas recaindo-se aos casos dos modelos AR-GARCH (p,q) descrito por

$$r_t = a_0 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + b_3 D_3 + \sum_{i=1}^k n_i r_{t-n_i} + v_t \quad (2)$$

$$v_t = h_t^{1/2} \varepsilon_t \quad (3)$$

$$h_t = \omega + \sum_{i=1}^p \alpha_i v_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q \beta_j h_{t-j} \quad (4)$$

onde D_i considera o efeito da sazonalidade. É um fato bem conhecido que para a commodity petróleo não há evidência do efeito sazonal.

Já no período pós-crise, na maioria dos horizontes, as séries foram melhor ajustadas por modelos AR-TARCH (p,q). Este modelo está dentro da classe dos modelos heterocedásticos não lineares que captam o efeito da assimetria dos choques. A equação da variância similar à Eq. 4 para o modelo TARCH (p,q) é escrita por

$$h_t = \omega + \sum_{i=1}^p \alpha_i v_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q \beta_j h_{t-j} + \sum_{k=1}^r \gamma_k v_{t-k}^2 (1 - I(v_{t-k} > 0)) \quad (5)$$

Sempre que o choque em t-k for positivo ($v_{t-k} > 0$), $I(v_{t-k}) = 1$ e o impacto na variância é dado por α . Se ($v_{t-k} < 0$), ou seja, se o choque for negativo então, $I(v_{t-k}) = 0$ e o impacto na variância é

TABELA VII
MODELOS AJUSTADOS PARA O DIESEL ANTES
E APÓS A CRISE

| | | Série | Modelo | Parâmetros | p-valor |
|---------------------------------------|-----------|----------------------|-------------------|---|--|
| Diesel americano - <i>Heating oil</i> | Pré-crise | F1 (Curto prazo) | AR-TARCH (1,1) | $a_0 = 0,001293$ $\phi_1 = -0,044155$ $\omega = 1,15 \times 10^{-5}$ $\alpha_1 = 0,057122$ $\beta_1 = 0,942398$ $\gamma_1 = -0,036110$ | 0,0075 0,0465 0,0157 0,0000 0,0000 0,0137 |
| | | F20 (Médio prazo) | AR-GARCH (0,1) | $a_0 = 0,002797$ $b_1 = -0,002962$ $\phi_1 = -0,199434$ $\omega = 1,98 \times 10^{-6}$ $\beta_1 = 0,968255$ | 0,0009 0,1009 0,0002 0,0000 0,0000 |
| | Pós-crise | F1 (Curto prazo) | TARCH (0,3) | $b_3 = 0,001951$ $\omega = 2,86 \times 10^{-7}$ $\beta_1 = 1,401966$ $\beta_2 = -0,367607$ $\beta_3 = -0,038872$ $\gamma_1 = 0,270554$ $\gamma_2 = -0,264855$ | 0,0846 0,1584 0,0000 0,0000 0,0000 0,0000 |
| | | F20 (Médio prazo) | TARCH (1,1) | $a_0 = 0,001598$ $\omega = 7,26 \times 10^{-5}$ $\alpha_1 = -0,106173$ $\beta_1 = 0,590173$ $\gamma_1 = 0,319118$ | 0,0146 0,0015 0,0039 0,0000 0,0006 |

TABELA IX
MEIA-VIDA DOS CHOQUES NOS PERÍODOS
PRÉ E PÓS-CRISE

| Commodity | Contratos | Meia-vida (τ) em dias | |
|---------------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------|
| | | Pré-crise | Pós-crise |
| Petróleo - <i>WTI</i> | F1 (Curto prazo) | 33,9814 | 194,378 |
| | F20 (Médio prazo) | 116,4478 | 143,5701 |
| | F40 (Longo prazo) | 9,568649 | 419,9801 |
| Gasolina - <i>RBOB</i> | F1 (Curto prazo) | 1,313459 | 6,52929 |
| | F20 (Médio prazo) | 1,460594 | 6,893793 |
| Diesel americano - <i>Heating oil</i> | F1 (Curto prazo) | 38,04901 | 417,3333 |
| | F20 (Médio prazo) | 78,35999 | 2,572684 |

dado por $\alpha + \gamma$. O efeito assimétrico ocorre quando $\gamma \neq 0$ e o efeito alavanca é observado quando $\gamma = 0$. Maiores detalhes sobre a aplicação de modelos GARCH encontram-se em Moretin e Tolo (2004), Moretin (2006) e Aiube (2013).

Nas tabelas V, VI e VII são apresentados os parâmetros obtidos nos respectivos modelos.

Maiores detalhes sobre o procedimento de seleção dos modelos mais adequados às séries podem ser encontradas no Anexo.

Análise dos Resultados

O risco inerente a um ativo financeiro está intimamente relacio-

TABELA XIII
VOLATILIDADES MÉDIAS UTILIZADAS NA DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA
A TERMO DA VOLATILIDADE DE CADA COMMODITY

| Contratos | Pré- Crise | | | Pós- Crise | | | |
|-------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|--------------------|-------|
| | Petróleo % | Gasolina % | Diesel americano % | Petróleo % | Gasolina % | Diesel americano % | |
| Curto prazo | F1 | 35,83 | 36,70 | 38,74 | 30,63 | 32,14 | 26,53 |
| | F3 | 31,05 | 31,94 | 33,13 | 28,92 | 29,52 | 25,65 |
| | F5 | 28,35 | 29,64 | 30,20 | 27,99 | 27,90 | 24,75 |
| Médio prazo | F10 | 24,71 | 28,78 | 25,91 | 25,84 | 25,33 | 23,76 |
| | F15 | 22,87 | 25,21 | 24,88 | 24,38 | 26,12 | 23,40 |
| | F20 | 21,81 | 25,55 | 21,70 | 23,15 | 25,19 | 22,67 |
| | F27 | 21,18 | 25,27 | 24,30 | 21,79 | 25,83 | 22,05 |
| | F30 | 20,59 | 25,53 | 24,61 | 21,53 | 24,88 | 23,53 |
| | F35 | - | 25,89 | 23,71 | - | 24,43 | 23,08 |
| Longo prazo | F40 | 20,19 | - | - | 19,91 | - | - |
| | F50 | 20,12 | - | - | 19,34 | - | - |

nado à variância do retorno deste ativo ou, ao seu desvio padrão. A volatilidade histórica da série de retornos, uma das medidas utilizadas na mensuração do risco de um ativo, é definida a partir do desvio padrão da série.

Em Engle e Patton (2001) os autores enfatizaram que um bom modelo de volatilidade condicional deve ser capaz de capturar as seguintes características da volatilidade: a reversão à média, os aglomerados de volatilidade

e sua meia-vida. Estas características são importantes, pois elas estão relacionadas com a longevidade do efeito de um choque nas séries de preços/retornos.

Os choques tendem a desaparecer gradualmente com o tempo, fazendo com que a volatilidade retorne a um nível médio. Este nível de volatilidade é denominado de volatilidade de longo prazo ou volatilidade incondicional (V). É dito que a volatilidade é persistente se um choque ocorrido hoje tem uma influência significativa nas volatilidades futuras (Carrol e Collins, 2007). Esta persistência pode ser medida de várias formas, aqui utilizaremos o conceito de meia-vida (τ) da volatilidade.

Neste trabalho, a partir dos parâmetros estimados, foram estimadas as volatilidades incondicionais (V) e a meia-vida (τ) dessas volatilidades, conforme as equações mostradas na segunda e terceira colunas da Tabela VIII, respectivamente.

A meia-vida (τ) da volatilidade, que é uma das medidas da persistência dos choques de volatilidade, é o tempo em que o efeito de um choque na volatilidade leva para diminuir até a metade do valor de sua volatilidade de longo prazo ou volatilidade incondicional (V).

De acordo a Carrol e Collins (2007), a meia-vida (τ) é o menor valor de k tal que

$$\left| h_{t+k|t} - V \right| = \frac{1}{2} \left| h_{t+1|t} - V \right| \quad (6)$$

A Tabela IX apresenta os valores encontrados da meia-vida (τ) dos choques nos contratos estudados.

Em geral, apesar da queda observada na volatilidade média para os contratos de curto prazo, a meia-vida dos choques se mostrou maior após a crise, independentemente do horizonte observado. Ou seja, no curto prazo a volatilidade média das commodities apresentou decaimento, porém a persistência dos choques passou a ser maior após a crise. Além disso, ainda que o nível médio da volatilidade dos contratos de médio e/ou longo prazo não tenha apresentado grandes deslocamentos, a persistência dos choques nestes horizontes também se mostrou maior na maioria dos contratos no período pós-crise.

As Tabelas X, XI e XII apresentam as volatilidades médias condicionais e incondicionais. Observa-se que estas volatilidades estão bem próximas.

A Tabela XIII constitui a base para a construção da estrutura a termo da volatilidade dos contratos futuros das commodities estudadas.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam as estruturas a termo das volatilidades médias anualizadas das commodities estudadas nos períodos pré e pós-crise.

TABELA X
VOLATILIDADES MÉDIA CONDICIONAL E INCONDICIONAL ANUALIZADAS
DOS CONTRATOS DE PETRÓLEO

| | Contratos | Volatilidade média | V (volatilidade | |
|----------------|-----------|--------------------|------------------|-------|
| | | condicional % | incondicional) % | |
| Petróleo - WTI | Pré-crise | F1 (Curto prazo) | 35,83 | 35,67 |
| | | F20 (Médio prazo) | 21,81 | 23,84 |
| | | F40 (Longo prazo) | 20,19 | 20,53 |
| | Pós-crise | F1 (Curto prazo) | 30,63 | 29,79 |
| | | F20 (Médio prazo) | 23,15 | 22,56 |
| | | F40 (Longo prazo) | 19,91 | 16,97 |

TABELA XI
VOLATILIDADES MÉDIA CONDICIONAL E INCONDICIONAL ANUALIZADAS
DOS CONTRATOS DE GASOLINA

| | Contratos | Volatilidade média | V (volatilidade | |
|-----------------|-----------|--------------------|------------------|-------|
| | | condicional % | incondicional) % | |
| Gasolina - RBOB | Pré-crise | F1 (Curto prazo) | 36,70 | 36,82 |
| | | F20 (Médio prazo) | 25,55 | 25,89 |
| | Pós-crise | F1 (Curto prazo) | 32,14 | 32,24 |
| | | F20 (Médio prazo) | 25,19 | 26,19 |

TABELA XII
VOLATILIDADES MÉDIA CONDICIONAL E INCONDICIONAL ANUALIZADAS
DOS CONTRATOS DE DIESEL

| | Contratos | Volatilidade média | V (volatilidade | |
|--------------------------------|-----------|--------------------|------------------|-------|
| | | condicional % | incondicional) % | |
| Diesel americano - Heating oil | Pré- | F1 (Curto prazo) | 38,74 | 39,54 |
| | | F20 (Médio prazo) | 21,70 | 23,65 |
| | Pós-crise | F1 (Curto prazo) | 26,53 | 20,81 |
| | | F20 (Médio prazo) | 22,67 | 22,65 |

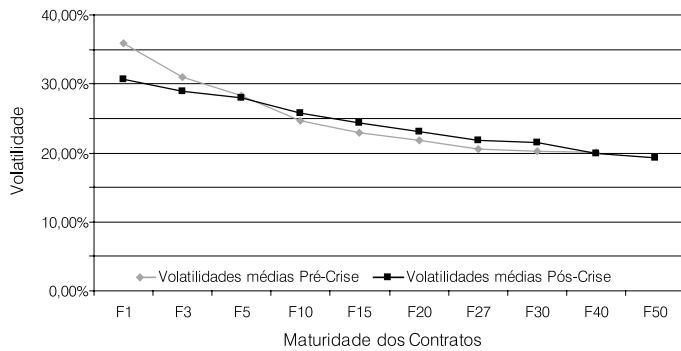


Figura 3. Estrutura a termo da volatilidade média anualizada do petróleo antes e após a crise.

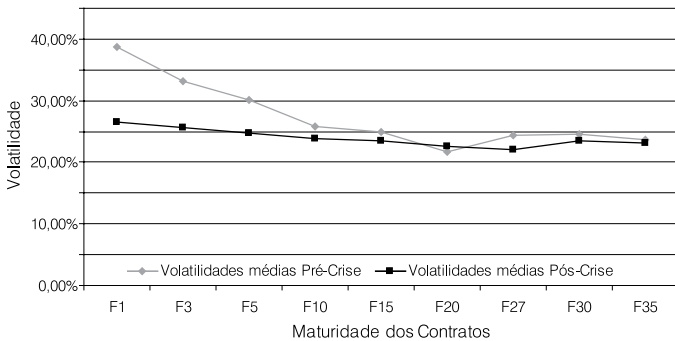


Figura 5. Estrutura a termo da volatilidade média anualizada do diesel antes e após a crise.

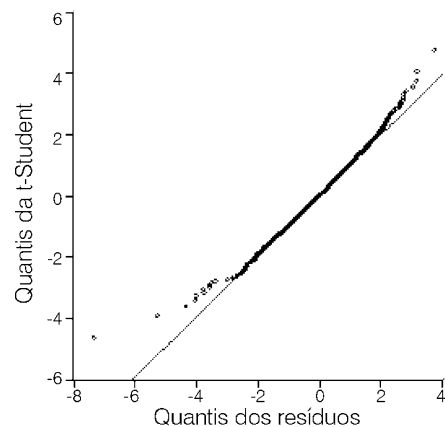


Figura 6. QQ-plot dos resíduos.

Observa-se um padrão para o comportamento da estrutura a termo das três commodities. O padrão notado é que no curto prazo, para o petróleo e seus derivados, a volatilidade média apresentou decréscimo significativo após a crise, mas nos outros horizontes (médio e longo prazo) a volatilidade média mostrou pouca variação, ora com pequeno acréscimo ora com pequeno decaimento. A maior queda no curto prazo, dentre as três commodities analisadas, ocorreu para o diesel.

Uma das razões para a maior volatilidade no período antes da crise está na grande presença de fundos de investimento (principalmente hedge funds). O com-

portamento dos preços das commodities após o ano 2000 atraiu tais fundos que, incluíram em suas carteiras posições em contratos futuros de curto prazo, pois estes possuem maior liquidez. Este efeito foi mais nítido de 2007 em diante, quando já havia o prenúncio de uma recessão na economia americana e, por conseguinte as ações eram pouco atrativas.

Conclusões

Este trabalho teve por objetivo analisar o comportamento da estrutura a termo das volatilidades dos contratos futuros do petróleo WTI, da gasolina RBOB e

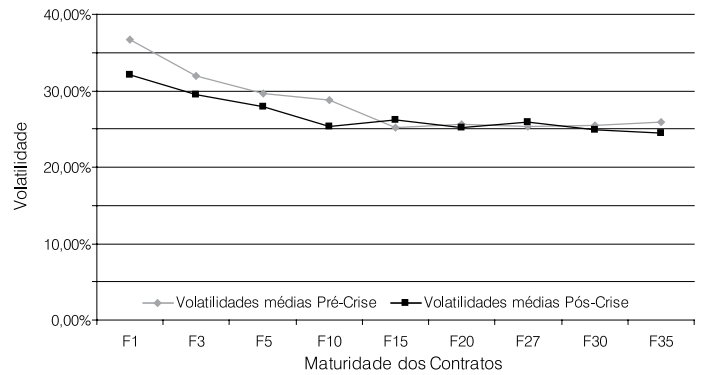


Figura 4. Estrutura a termo da volatilidade média anualizada da gasolina antes e após a crise.

do diesel americano, e identificar os efeitos da crise de 2008.

Modelos da família GARCH foram ajustados às séries de retorno das

commodities visando extrair a dependência não linear e a autocorrelação das séries de resíduo.

As características fundamentais do comportamento da volatilidade, tais como a tendência de reversão à média, a presença dos aglomerados (clusters) que são períodos de certa intensidade se-

ANEXO

Neste anexo é apresentado o ajuste de uma série de retornos do contrato F1 do petróleo WTI ao modelo AR-GARCH. As demais séries de retornos foram ajustadas similarmente.

i) Modelo ajustado visando à minimização do critério BIC de Schwarz.

$$r_t = -0,043855 r_{t-1} + v_t$$

$$v_t = h_t^{1/2} \varepsilon_t$$

onde $\varepsilon_t \sim t\text{-Student}$

$$h_t = 1,05 \times 10^{-5} + 0,027744 v_{t-1}^2 + 0,951459 h_{t-1}$$

ii) Estatísticas do teste de Box-Pierce e Ljung-Box para os resíduos padronizados. Entre parênteses são apresentados o p-valor.

$$Q(1) = 0,8407; \quad Q(5) = 2,7921; \quad Q(10) = 8,4848; \quad Q(20) = 16,846$$

$$(0,359) \quad (0,732) \quad (0,582) \quad (0,663)$$

iii) Estatísticas do teste de Box-Pierce e Ljung-Box para o quadrado dos resíduos padronizados.

$$Q(1) = 0,7835; \quad Q(5) = 5,5874; \quad Q(10) = 6,5653; \quad Q(20) = 12,846$$

$$(0,376) \quad (0,348) \quad (0,766) \quad (0,884)$$

iv) Teste BDS de independência na série de resíduos com dimensão $m = 2, \dots, 6$ e distância ξ de 0,5 a 1,5 vezes o desvio-padrão da série. A Tabela XIV apresenta os resultados do teste BDS.

TABELA XIV
RESULTADOS DO TESTE BDS

| Dimensão | $0,5 \times \sigma$ | $1,0 \times \sigma$ | $1,5 \times \sigma$ |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 2 | 0,4923 | 0,6643 | 0,9500 |
| 3 | 0,3022 | 0,3373 | 0,4726 |
| 4 | 0,6298 | 0,4918 | 0,5400 |
| 5 | 0,7820 | 0,5164 | 0,4885 |
| 6 | 0,7979 | 0,7712 | 0,6074 |

v) O teste ARCH-LM foi realizado na série de resíduos para 1, 5 e 10 lags. Em todos os testes não conseguimos rejeitar a hipótese nula de que a série não apresentava efeito ARCH, ou seja, não foi detectada heterocedasticidade condicional na série de resíduos.

vi) O QQ-plot para verificação da aderência da série de resíduos à distribuição t-Student. A Figura 6 apresenta o QQ-plot dos resíduos.

guiados por períodos de mesma intensidade na volatilidade, e a persistência, que é a influência da volatilidade de hoje na volatilidade futura, puderam ser observadas.

Foi constatada a queda da volatilidade após a crise de 2008 comparada aos valores pré-crise dos contratos de curto prazo em todas as commodities estudadas. A maior ocorreu para o diesel. Isto significa que, no curto prazo, os agentes estarão mais propensos a tomarem mais proteção na mitigação de suas exposições. Também se observou que após a crise, os choques na volatilidade se mostraram mais persistentes, levando mais tempo para a volatilidade retornar ao seu nível médio. Isto significa que os agentes deverão observar um maior tempo de espera para que os choques nos preços se dissipem. Ainda mais, observa-se nos modelos ajustados para o período pós-crise, a significância do efeito assimétrico através do parâmetro $\tilde{\alpha}$. Esta assimetria dos choques não ocorreu no período anterior à crise.

Uma extensão natural deste trabalho é a análise do comportamento da volatilidade implícita, oriunda

das opções negociadas sobre os contratos futuros, antes e após a crise de 2008.

O monitoramento do comportamento da volatilidade é fundamental para o gerenciamento da exposição dos agentes que negociam os produtos no mercado físico, dos negociadores no mercado futuro de bolsa e dos gerentes de carteiras de investimentos que contêm contratos futuros das commodities do setor de petróleo.

REFERÊNCIAS

- Aiube FAL (2013) Modelos Quantitativos em Finanças com Enfoque em Commodities. Bookman. Porto Alegre, Brasil. 472 pp.
- Bollerslev T (1986) Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *J. Econometr.* 31: 307-327.
- Box GEP, Pierce DA (1970) Distribution of residual autocorrelations in autoregressive integrated moving average time series models. *J. Am. Stat. Assoc.* 65: 1509-1526.
- Brock WA, Dechert W, Scheinkman JA, Lebaron B (1986) A test of independence based on correlation dimension. *Econometr. Rev.* 15: 197-235.

- Carrol T, Collins J (2007) Volatility models and the ISEQ index. *J. Financial Report* 23: 12-24.
- Engle RF (1982) Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation. *Econometrica* 50: 987-1007.
- Engle RF, Patton A (2001) What good is a volatility model? *Quantit. Finance* 1: 237-245.
- Hadsell L, Marathe A, Shawky HA (2004) Estimating the volatility of wholesale electricity spot prices in the US. *Energy J.* 25: 23-40.
- Ljung GM, Box GEP (1978) On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika* 65: 297-303.
- Moretin PA (2006) *Econometria Financeira. Um Curso em Séries Temporais Financeiras*. Blucher. São Paulo, Brasil. 389 pp.
- Moretin PA, Toloí CMC (2004). *Análise de Séries Temporais*. Blucher. São Paulo, Brasil. 544 pp.
- Nelson DB (1991) Conditional heteroskedasticity in asset returns: a new approach. *Econometrica* 59: 347-370.
- Schwarz GE (1978) Estimating the dimension of a model. *Ann. Stat.* 6: 461-464
- Zakoian JM (1994) Threshold heteroskedastic models. *J. Econ. Dynam. Contr.* 18: 931-955.

VOLATILITY OF CRUDE OIL AND REFINED PRODUCTS FUTURES CONTRACTS BEFORE AND AFTER THE 2008 CRISIS

Thais C.S. Azevedo, Fernando A.L. Aiube, Carlos P. Samanez and Claudio R.S. Bisso

SUMMARY

This paper analyses the behavior of the volatility of the WTI crude oil and refined products future contracts (short, medium and long-term) before and after the crisis of 2008. Daily historical data were used from January 2000 to June 2008 (pre-crisis period) and May 2009 to October 2012 (post crisis). GARCH family models were adjusted to these time series and the long-term volatility was estimated. After the crisis the short-term volatility dropped for all three commodities. Finally, we calculated

the persistence of volatility before and after the 2008 crisis for these contracts and observed that after the crisis in most contracts there was an increased persistence of shocks. The relevance of this type of analysis is related to the importance of volatility not only to the agents who negotiate physical products, but also to the traders and their daily positions on exchanges. Furthermore, volatility is a crucial parameter on the management of investment portfolios that include oil products.

EVALUACIÓN DE LA VOLATILIDAD DE LOS CONTRATOS FUTUROS DEL PETRÓLEO Y DERIVADOS ANTES Y DESPUÉS DE LA CRISIS DE 2008

Thais C.S. Azevedo, Fernando A.L. Aiube, Carlos P. Samanez e Claudio R.S. Bisso

RESUMEN

Este artículo analiza el comportamiento de la volatilidad del petróleo y de sus derivados gasolina e diésel antes e después de la crisis de 2008. Estas tres commodities son analizadas con base en los precios de los contratos futuros de corto, medio y largo plazo. Fueron utilizados datos históricos diarios de Enero 2000 a Junio 2008 (período pre-crisis) y de Mayo 2009 a Octubre 2012 (post-crisis). Los modelos de la familia GARCH fueron ajustados a las series y las volatilidades condicionales fueron así estimadas. Comparando las volatilidades de los contratos de corto, medio y largo plazo, identificamos que después de la crisis,

en el horizonte de corto plazo, hubo una caída en la volatilidad media de los contratos de todas las commodities analizadas. Calculamos por fin, la persistencia de los choques de volatilidad antes y después de la crisis de 2008 y vimos que después de la crisis, en la mayoría de los contratos, hubo un aumento de la persistencia de los choques. La relevancia de este tipo de análisis está relacionada a la importancia de la volatilidad en el desempeño de los agentes que negocian los productos en el mercado físico, en los mercados de la bolsa y en el gerenciamento de carteras que incluyen commodities del sector de petróleo.