

O “Sorriso da Volatilidade” Extraído de Opções no Mercado Brasileiro e sua Relação com o Risco Brasil

Gustavo Silva Araujo*

Thiago Tofani Mello Moraes†

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar os padrões do "sorriso da volatilidade" de opções no mercado brasileiro e compreender como eles se alteram com a variação no risco-país. “Sorriso da volatilidade” é a expressão utilizada no mercado financeiro para descrever o fato de volatilidades de um mesmo ativo extraídas de opções de mesmo tempo para vencimento, mas diferentes preços de exercício, serem diferentes. A amostra utilizada compreende eventos de estresse provocados pela pandemia da COVID-19 e pelo advento das eleições presidenciais de 2022. O CDS-Brasil de 5 anos (CDS-5y) é o indicador de risco-país utilizado e estudamos os “sorrisos de volatilidades implícitas” extraídas de opções relevantes do mercado brasileiro: opções de dólar e opções de BOVA11, o qual se constitui no ETF do principal índice da bolsa brasileira. Os resultados indicam que a volatilidade implícita é maior para as opções que servem de proteção contra movimentos adversos e que os “sorrisos de volatilidade” das opções de dólar e BOVA11 tornam-se menos pronunciados quando o CDS-5y apresenta variações positivas, ou seja, quanto maior o risco-Brasil menor a diferença entre as volatilidades implícitas tanto das opções de dólar quanto das opções de BOVA11.

Palavras-chave: Volatilidade Implícita, Sorriso da Volatilidade, Opções, Risco-País

Este Trabalho para Discussão não deve ser citado como representando as opiniões do Banco Central do Brasil. As opiniões expressas neste trabalho são exclusivamente do(s) autor(es) e não refletem, necessariamente, a visão do Banco Central do Brasil.

* Banco Central do Brasil e EPGE/FGV. E-mail: gustavo.araujo@bcb.gov.br

† Mestre em Economia pela EPGE/FGV. E-mail: thiagotofani@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Nos modelos de apreçamento de opções, como por exemplo o de Black e Scholes (1973), utiliza-se como variável de entrada a volatilidade dos retornos do ativo subjacente à opção. Dessa forma, para opções de mesmo tempo para o vencimento, de mesmo ativo subjacente e de preços de exercício diferentes, a volatilidade inserida deveria ser a mesma (uma vez que a volatilidade se refere ao ativo). Entretanto, a volatilidade implícita extraída dessas opções não é a mesma para todos os preços de exercício disponíveis. O gráfico da volatilidade implícita às opções com o mesmo vencimento em relação aos respectivos preços de exercício é conhecido como “sorriso da volatilidade”.

O propósito dessa dissertação é avaliar empiricamente os padrões do "sorriso da volatilidade" de opções no mercado brasileiro e compreender como esses padrões se comportam diante de variações no risco-Brasil. Para tanto, utilizamos as volatilidades implícitas de opções de ativos relevantes ao mercado brasileiro: do ETF (*Exchange-Traded Fund*) que replica o Índice Bovespa, o BOVA11, e de dólar. As opções utilizadas no estudo são aquelas que servem de *hedge* para os ativos-objeto: opções de venda (*puts*) para BOVA11 e opções de compra (*calls*) para o dólar.¹ Como *proxy* do risco-Brasil utilizamos o *Credit Default Swap* do Brasil de 5 anos (CDS-5y). A amostra possui dados em frequência diária no período que abrange desde o segundo ano da pandemia do coronavírus (2021) até o início do 2023 (pós eleição presidencial).

A habilidade de compreender e prever a magnitude das volatilidades é um objetivo amplamente almejado por muitos participantes do mercado financeiro. Essa capacidade permite, por exemplo, uma avaliação mais precisa do risco de um ativo, possibilitando, assim, escolhas mais acertadas na formulação de estratégias, tanto de especulação quanto de *hedge*. Além disso, pode oferecer vantagens para *traders* que se dedicam a estruturação de estratégias que envolvem a compra e a venda de volatilidade por meio de opções, permitindo-lhes tomar decisões mais embasadas. Dessa forma, o “sorriso da volatilidade” se tornou peça chave na valoração das opções e na decisão de montagem de estratégias especulação e *hedge*.

Alguns estudos se dedicaram a analisar os padrões do “sorriso da volatilidade” extraída de opções. Srividya e Susana (2018) indicam que o perfil do “sorriso da volatilidade” varia em diferentes mercados, ativos subjacentes e períodos. Abdullah e Harun (2014) examinam opções vinculadas ao índice australiano S&P/ASX 200 durante o período da crise financeira de 2008. Os resultados indicaram que, mesmo na crise, as opções de compra e as de venda continuaram a obedecer a paridade entre opções de venda e opções de compra (*put call parity*), que é uma condição de não arbitragem entre as opções. Além disso, o estudo corrobora a hipótese de que as volatilidades implícitas aumentaram durante o período de crise e demonstra a presença de uma assimetria no “sorriso da volatilidade” na amostra analisada. A assimetria se refere a volatilidades diferentes entre opções de preço de exercício mais extremos: opções dentro-do-dinheiro (*ITM – in-the-money*) e fora-do-dinheiro (*out-of-the-money*).

Larkina et al. (2012). também estudou o “sorriso da volatilidade implícita” em opções do índice australiano. O estudo mostra um evidente "sorriso da volatilidade" assimétrico para opções de venda do índice tanto em mercados em alta como em mercados em baixa. Srividya e Susana (2018) realizaram um estudo similar, investigando os padrões de volatilidade implícita nas

¹ O maior risco do dólar percebido em mercados emergentes é de a sua cotação subir.

opções do índice Nifty 500. Suas conclusões confirmam a observação de que quando as opções são categorizadas de acordo com o *moneyness*, as opções no-dinheiro (ATM - *At-The-Money*), que são as que geralmente possuem maior liquidez, exibem a menor volatilidade implícita, enquanto as opções DITM (*Deep-In-The-Money*) e ITM (*In-The-Money*) apresentam as maiores volatilidades implícitas.

Outros estudos, como o de Guo et al.(2021), procuraram compreender a dinâmica dos “sorrisos de volatilidade” ao longo de períodos de grande estresse, como a crise financeira global de 2008, e explicar o formato acentuadamente inclinado nesses momentos, além de abordar o potencial preditivo das volatilidades implícitas em relação aos retornos do ativo subjacente. O trabalho concentrou-se nas opções do índice SPY (ETF do S&P500) e revelou que as curvas de volatilidade implícita exibem uma tendência de inclinação para baixo, com alguma curvatura. Além disso, observou-se que a forma amplamente aceita de “sorriso de volatilidade” – a forma de “U” - é evidente apenas durante o período da crise, não ocorrendo em tempos normais.

No presente trabalho, estudamos, inicialmente, os formatos dos “sorrisos da volatilidade” de dólar e do BOVA11. Depois estudamos como as volatilidades implícitas variam de acordo com o CDS-5y do Brasil (risco-Brasil). Além disso, por meio de razões dessas volatilidades, verificamos como os *gaps* do “sorriso da volatilidade” se comportam com variações do risco-país a fim de investigar se eles aumentam ou diminuem com choques nesse indicador. É importante salientar que não encontramos na literatura um estudo que relaciona o formato do “sorriso da volatilidade” com risco-país.

Os resultados indicam que:

- As volatilidades implícitas do ETF de Ibovespa (BOVA11) são maiores que as do dólar.
- Os padrões das volatilidades das opções de venda de BOVA11 e de compra de dólar exibem formas assimétricas, com curvaturas similares entre si. As volatilidades implícitas das opções fora do dinheiro (OTM) de ambos ativo-objeto destacam-se como as mais elevadas do “sorriso”. Essas são as opções que mais servem de *hedge* para os participantes do mercado brasileiro. As opções dentro-do-dinheiro possuem as volatilidades implícitas mais baixas.
- A correlação entre o risco-Brasil e as volatilidades implícitas é positiva para ambos os ativos. Entretanto, apenas encontramos uma relação positiva e estatisticamente significativa entre essas medidas para opções dentro do dinheiro (ITM) de BOVA11.
- As inferências realizadas para as razões das volatilidades de dólar em relação ao CDS-5y revelam uma relação significativamente negativa ao nível de confiança de 90%, de onde se conclui que quanto maior o risco país menos acentuado fica o “sorriso da volatilidade” desse ativo.
- Ao nível de significância de 1%, há relevância estatística também negativa na relação entre as razões das volatilidades implícita de BOVA11 e o indicador de risco CDS-5y, o que sugere que, como para as volatilidades do dólar, à medida que o risco aumenta, os *gaps* de volatilidade tendem a diminuir.
- Os resultados se mantêm quando, ao invés de usarmos dados diários, utilizamos dados semanais.

Esse trabalho está organizado em mais quatro seções, além desta introdução. A seção 2 explora as características e peculiaridades das opções e os indicadores de risco-país. Na seção 3,

destacam-se as fontes de dados usadas no trabalho e descreve-se o método adotado na parte empírica da dissertação. A seção 4 apresenta os resultados e suas respectivas análises. Por fim, a seção 5 tece as considerações finais acerca do tema abordado.

2. OPÇÕES E RISCO-PAÍS

2.1 Mercado de Opções

Opção é um instrumento financeiro cujo valor no vencimento que deriva de um ativo subjacente, classificando-se, portanto, como um derivativo. As opções são negociadas no mercado financeiro, podendo ser transacionadas em bolsas de valores ou no mercado de balcão (conhecido como OTC – *Over The Counter*). Esses instrumentos desempenham um papel duplo, servindo tanto como mecanismos de proteção (*hedge*) quanto como ferramentas de especulação. Os investidores especuladores usam opções para apostar na direção futura dos preços dos ativos subjacentes (ou na volatilidade de seus retornos), o que pode resultar em lucro ou prejuízo, enquanto os *hedgers* empregam esses ativos para proteger seu patrimônio de movimentos adversos do mercado.

Um dos modelos de precificação amplamente difundido e aceito é o abordado em Black e Scholes (1973), B-S.² Este modelo denota que o preço de uma opção, seja opção de compra (*call*) ou opção de venda (*put*) (*c* ou *p*, respectivamente), em função de parâmetros como, tempo até o vencimento (*t*), preço de exercício (*K*), taxa de juros livre de risco (*r*), preço do ativo objeto (*S*₀), e a volatilidade (*σ*) dos retornos do ativo subjacente, que é considerada constante até o vencimento da opção.

$$c = S_0 N(x) - Ke^{-rt} N(x - \sigma\sqrt{t}), \text{ onde:}$$

$$x = \frac{\ln\left(\frac{S_0}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)t}{\sigma\sqrt{t}}$$

Nesse modelo, o termo $N(x)$ é a função de probabilidade cumulativa de uma variável x com distribuição normal padronizada.

A volatilidade presente no modelo, quando o preço da opção é o preço de mercado, é conhecida como volatilidade implícita às opções. Ela traduz a volatilidade do ativo subjacente que está implícita ao prêmio de mercado do instrumento derivativo (Alexander, 2005). Assim, podemos afirmar que a volatilidade implícita é função do preço da opção, K , S , t e r , sendo que essa função é dada por um modelo de apreçamento de opções, como o B-S, por exemplo.

² Utilizamos nesse trabalho o modelo de B-S para extrair as volatilidades implícitas às opções, mas poderíamos ter utilizado outro modelo de apreçamento. A razão para o uso desse modelo é que ele é o mais utilizados para opções de ações (ou ETFs de ações, como o BOVA11) e para opções de moeda estrangeiro.

$$\text{volatilidade implícita} = f(c \text{ ou } p, K, S, t, r)$$

Além disso, as volatilidades implícitas de opções europeias, tanto de compra (*call*) quanto de venda (*put*), que compartilham o mesmo ativo subjacente, preço de exercício e data de vencimento, e são calculadas por meio de modelos de precificação bem ajustados, devem apresentar valores equivalentes. Dessa conclusão traduz-se o princípio conhecido como a paridade entre opções de compra e venda (*put call parity*), representada pela seguinte equação (na sua versão para ações):

$$c - p = S - Ke^{-rt}$$

A paridade denota um conceito fundamental de não arbitragem na avaliação de opções. Sua interpretação indica que um aumento (diminuição) do prêmio de uma opção de compra devido a um aumento (diminuição) em sua volatilidade, significa um aumento (diminuição) de mesma magnitude do prêmio da opção de venda. Essa paridade é relevante nesse trabalho, pois com ela temos que *calls* com delta D possuem a mesma volatilidade de *puts* com delta (em módulo) $1-D$. Por exemplo, por essa paridade, uma *call* com delta 0,75 tem mesma volatilidade implícita que uma *put* com delta de módulo 0,25.

Opções do mesmo ativo subjacente, mesmo tempo para o vencimento, mas com preços de exercícios distintos, deveriam utilizar a mesma volatilidade no cálculo dos preços das opções, uma vez que essa volatilidade se refere aos retornos do ativo subjacente, que é o mesmo para as opções (Alexander, 2005). Entretanto, ocorre que essas volatilidades são diferentes, dando origem ao “sorriso da volatilidade”. Na maioria das vezes, o mercado utiliza o modelo de B-S para se extrair as volatilidades implícitas. Dessa forma, surge uma crítica com relação às premissas de B-S de log-normalidade dos retornos e de volatilidade constantes até o vencimento (Derman e Kani, 1994).

Srividya e Susana (2018) indicam diversos estudos empíricos corroboram a violação dessas hipóteses. Os autores destacam, ainda, que durante o período do *crash* do mercado de 1987, o impacto causado nas opções do índice S&P 500 revelou que o formato das volatilidades implícitas em relação aos preços de exercício - com eixos assumindo os valores dos preços de exercício (eixo das abscissas) e volatilidades (eixo das ordenadas) – se alterou da forma de “U” para uma forma apenas descendente (de *volatility smile* passou para *volatility smirk*).

Além dessas constatações, Chance et al. (2017) também destacam esse comportamento, observando que opções com vencimentos mais curtos tendem a exibir um sorriso mais acentuado em comparação com opções com vencimentos mais longos.

O “sorriso da volatilidade” pode ser apresentado com a volatilidade implícita contra o *moneyness* (preços de exercício) ou mesmo contra os deltas (Alexander, 2005). A última forma é utilizada nesse trabalho. Além disso, usualmente os sorrisos não são simétricos. A Figura 1, abaixo, denota um exemplo gráfico do formato do “sorriso da volatilidade” de opções de compra de ações preferenciais de Petrobras (PETR4), em 26/01/2016, construído por Araujo e Ribeiro (2016) em seus estudos sobre a eficiência do mercado de opções no Brasil.

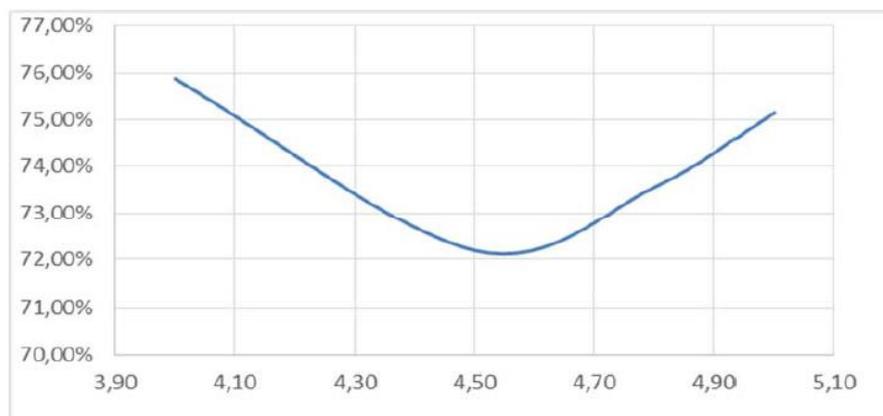


Figura 1 – “Sorriso da volatilidade” para Opções de Compra de Ações Preferenciais da Petrobras. No eixo das ordenadas tem-se as volatilidades enquanto o das abscissas o preço de exercício. Fonte: Araujo e Ribeiro (2016)

2.2 Risco-País

De acordo com Banco central do Brasil (2016), em sua “Série Perguntas Mais Frequentes”, o Risco-país é uma expressão que remete ao risco de crédito com o qual um país está submetido. É um importante conceito utilizado por investidores estrangeiros ao avaliar o aporte ou não de capital em um determinado país ou em títulos soberanos desse país.

No contexto brasileiro, esse conceito é conhecido por risco-Brasil e pode ser traduzido pelo *Credit Default Swap* (CDS) do Brasil. Nesse trabalho utilizamos o CDS-Brasil de 5 anos (CDS-5y).³ O CDS funciona como um contrato no qual o investidor compra proteção contra eventuais eventos de crédito do emissor, que nesse caso é o Tesouro brasileiro, sendo cotado em pontos-base.

3. BASE DE DADOS E METODOLOGIA

A base de dados desse trabalho possui frequência diária compreendida entre o primeiro dia útil do segundo ano da pandemia do novo coronavírus, 4 de janeiro de 2021, a 28 de março de 2023, perfazendo 557 observações. Esse período engloba um período de restrições econômicas motivadas pelos decretos da pandemia, e um segundo período sem limitações, mas que conta com uma temporada de eleição presidencial.

³ O CDS Brasil de 5 anos é o mais utilizado em trabalhos acadêmicos por sua maior liquidez. Ver, por exemplo, Banco Central do Brasil (2021).

A série histórica do CDS Brasil com vencimento de cinco anos (CDS-5y), assim como os dados relativos às volatilidades implícitas das opções foram extraídas da plataforma Bloomberg (2023).⁴

Utilizamos opções de compra (*call*) de dólar e opções de venda (*put*) do BOVA11, que é um fundo de índice projetado (ETF) para reproduzir o desempenho do Ibovespa, o principal índice de ações do mercado brasileiro. Originalmente, os dados das volatilidades implícitas obtidos de BOVA11 se referem às *calls*, mas utilizando a paridade *put-call* obteve-se as volatilidades das *puts*. A razão para se utilizar *puts* de BOVA11 é que são esses instrumentos que servem de *hedge* para carteiras de ações compradas (e não *calls*). Vale ressaltar que as opções de BOVA11 são uma das opções mais líquidas disponíveis no mercado, conferindo-lhe uma ampla facilidade de negociação.

Os dados das volatilidades implícitas foram coletados para opções com prazo de vencimento mais curto, especificamente de um mês, uma vez que Chance et al. (2017) afirmam que as opções que apresentam “sorrisos da volatilidade” mais pronunciados são aquelas com prazo de um mês até o vencimento.

As volatilidades implícitas foram organizadas não com base no preço de exercício (*strike*), mas sim com relação aos deltas das opções. Os deltas selecionados para o estudo foram 0,10 (denominado D10 neste trabalho), 0,25 (D25), 0,50 (D50), 0,75 (D75) e 0,90 (D90).

Acerca da metodologia empregada na pesquisa, primeiro calculamos medidas de estatísticas descritivas da amostra juntamente com uma análise gráfica na busca de visualizar os padrões de volatilidade implícita existentes para os dois ativos estudados.

Numa segunda etapa, empregamos regressões lineares das volatilidades implícitas (variável dependente) contra o CDS-5y.⁵ O intuito de avaliar e quantificar a relação entre as variações das volatilidades implícitas das opções de mesmo vencimento e o indicador de risco-Brasil. Além disso, para controlar a regressão por autocorrelação e heterocedasticidade das séries temporais, optou-se por empregar o método Newey-West, conforme indicado por Zeileis (2004), a fim de garantir resultados mais robustos e confiáveis nas regressões. A equação (1) mostra a regressão:

$$Dnn_t = \beta_0 + \beta_1 CDS_t + u_t \quad (1)$$

em que:

Dnn_t se refere à volatilidade implícita extraída da opção com delta Dnn na data t , em que nn é o delta da opção. Por exemplo, $D10$ se refere à opção com delta 0,10; e

CDS_t se refere ao CDS Brasil de 5 anos na data t .

Para verificar como variam as diferenças (*gaps*) das volatilidades das opções à medida que o risco-país se altera, e com isso o que ocorre com o formato do “sorriso da volatilidade”, formou-

⁴ *Tickers* utilizados na obtenção das volatilidades implícitas de BOVA11 nos diversos deltas:

1M_CALL_IMP_VOL_10DELTA_DFLT; 1M_CALL_IMP_VOL_25DELTA_DFLT;
1M_CALL_IMP_VOL_50DELTA_DFLT; 1M_CALL_IMP_VOL_75DELTA_DFLT;
1M_CALL_IMP_VOL_90DELTA_DFLT.

⁵ O objetivo aqui é estudar a relação entre as variáveis e não fazer um modelo para a volatilidade.

se razões entre as volatilidades dos deltas disponíveis, as quais assumiram o papel de variáveis dependentes contra o CDS-5y. A equação (2) apresenta as novas regressões:

$$\frac{Dnn_{o_t}}{Dnn_{i_t}} = \beta_0 + \beta_1 CDS_t + u_t \quad (2)$$

em que:

$\frac{Dnn_{o_t}}{Dnn_{i_t}}$ se refere à razão entre volatilidades implícitas de opções com delta Dnn_o e as com delta Dnn_i na data t , em que Dnn_o é o delta da opção relativamente mais fora-do-dinheiro (*out-of-the-money*) e Dnn_i é o delta da opção relativamente mais dentro-do-dinheiro (*in-the-money*). Por exemplo, $\frac{D_{10}}{D_{90}}$ se refere à razão entre as volatilidades implícitas das opções com delta 0,10 e delta 0,90.

O motivo para utilizarmos a razão e não a subtração entre as volatilidades é que o nível dessa variável pode variar muito. Como veremos nas estatísticas descritivas, as volatilidades implícitas de BOVA11 de delta 50 e prazo 1 mês, por exemplo, têm, nos percentis 5% e 95%, respectivamente, valores de 30,14% a.a. e 17,24% a.a.

4. RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentadas estatísticas descritivas da base de dados e análises das regressões lineares sobre a relação do risco-brasil com as volatilidades implícitas.

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas de volatilidades implícitas diárias das opções de dólar e BOVA11, além do indicador de risco-Brasil, no período compreendido entre 04/01/2021 e 28/03/2023.⁶

Tabela 1 - Estatísticas Descritivas do CDS de 5 anos do Brasil e de Puts de BOVA11 e Calls de dólar, segregadas pelos Deltas das Opções.

Instrumentos: Deltas:	Opções de BOVA11 - PUT					Opções de Dólar - CALL					CDS 5y -
	D10	D25	D50	D75	D90	D10	D25	D50	D75	D90	
Máximo	47,13	47,69	40,66	38,55	37,24	30,05	27,86	26,12	25,50	25,45	0,0329
Percentil 95%	37,69	35,16	30,14	29,22	29,65	26,18	24,45	23,08	22,54	22,45	0,0296
Percentil 75%	32,58	29,13	25,61	24,00	24,12	23,06	21,25	20,01	19,56	19,54	0,0249
Mediana	29,04	25,70	22,48	21,22	21,13	21,40	19,78	18,48	17,90	17,79	0,0225
Percentil 25%	26,22	22,92	19,89	18,93	19,08	19,73	18,08	16,73	16,06	15,82	0,0193
Percentil 5%	22,76	20,19	17,24	16,38	16,28	18,11	16,67	15,53	14,77	14,55	0,0162
Mínimo	16,35	14,45	5,20	7,71	11,37	16,50	15,27	14,33	13,77	13,27	0,0144
Média	29,70	26,38	22,88	21,70	21,71	21,63	19,93	18,64	18,05	17,89	0,0224
Desvio Padrão (%)	4,98	4,78	4,41	4,05	3,99	2,53	2,42	2,36	2,37	2,42	0,05%
Data de Máximo	26/11/2021	30/11/2021	26/10/2022	26/10/2022	26/10/2022	11/11/2022	11/11/2022	11/11/2022	26/10/2022	26/10/2022	14/07/2022

Ao se analisar as estatísticas descritivas das volatilidades implícitas, pode-se notar que as volatilidades de BOVA11 são maiores que as de dólar. Além disso, percebe-se a presença de um “sorriso da volatilidade” das opções de ambos os ativos subjacentes do estudo: as volatilidades implícitas das opções mais usadas para *hedge* (*puts* fora do dinheiro de BOVA11

⁶ Para o cálculo do desvio-padrão do CDS, as variações do indicador de risco-país foram calculadas pela primeira diferença entre o dia corrente e o dia útil anterior.

e *calls* fora do dinheiro de dólar) possuem os maiores valores do “sorriso”, ou seja, as opções que geram proteção são as mais valorizadas.

O Gráfico 1, que mostra as medianas das volatilidades implícitas, apresenta um formato descendente para o “sorriso da volatilidade” tanto para as opções de venda de BOVA11, como para as de compra de dólar. Esse formato é corroborado por todas as medidas descritivas das volatilidades de dólar e por quase todas de BOVA11 (apenas na estatística mínimo a volatilidade das opções no-dinheiro - D50 - é a menor). Portanto, em ambos os ativos, os “sorrisos” não são pronunciados, ou seja, as volatilidades D50 não são as menores e sim as de delta maiores (opções mais dentro-do-dinheiro). Esse é o mesmo formato que Bates (2000) e Hull (2017) encontram para opções de ações⁷. Entretanto, Hull (2017) afirma que para opções sobre moeda estrangeira no mercado americano, o “sorriso” realmente é verificado (volatilidades menores para as opções de delta 0,50), diferentemente de nosso exercício empírico.

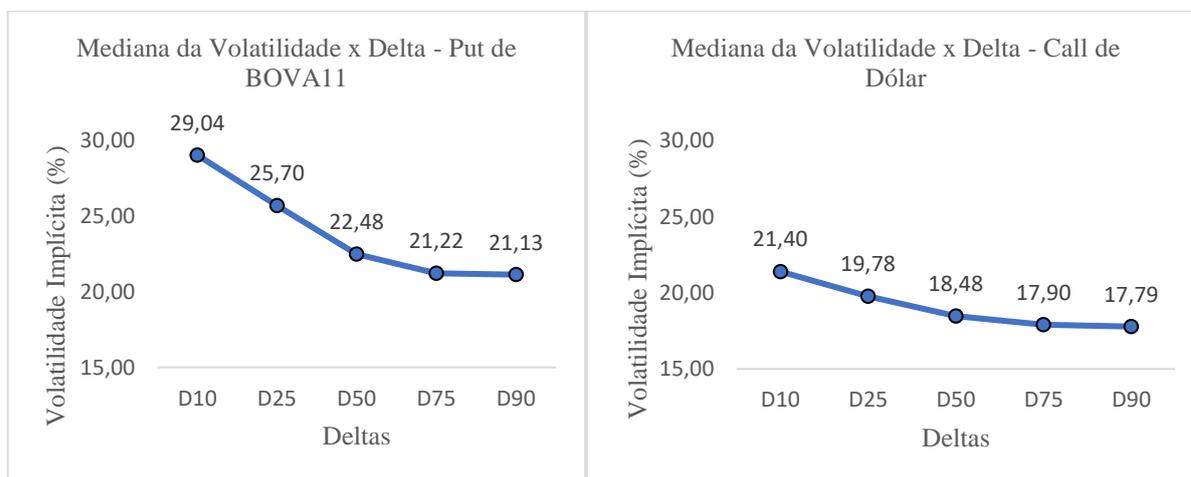


Gráfico 1 - Gráficos do “Sorriso da volatilidade” de Put de BOVA11 e Call de Dólar com base na estatística mediana

Nos gráficos do Apêndice 1 investigamos com mais detalhes o formato do “sorriso da volatilidade” ao longo do tempo. Para BOVA11 (Apêndice - gráfico acima), o sorriso é na maioria das vezes decrescente no delta (maior delta, menor a volatilidade implícita), mas nem sempre isso ocorre: há muitas vezes que D50 possui a menor volatilidade. Já para o dólar (Apêndice - gráfico abaixo), a série é mais bem comportada: durante praticamente todo o período o sorriso é decrescente no delta.

Essa curvatura observada nas volatilidades extraídas das opções de dólar destaca uma característica peculiar desses ativos em sua função na gestão de *hedge* no cenário nacional: agentes vendidos em ativos dolarizados, como importadores, buscam proteger-se contra a alta do câmbio por meio de estratégias simples, como a compra de opções de compra (*call*) com preços de exercício acima do câmbio *spot* (ou seja, optam por opções fora do dinheiro, como

⁷ Bates (2000) e Hull (2017) afirma que após o *crash* da bolsa de Nova Iorque em 1987, o formato do gráfico entre as volatilidades implícitas e preços de exercício tem essa forma encontrada no Gráfico 1 (volatilidade implícita maior para as opções fora-do-dinheiro e menor para as dentro-do-dinheiro).

D10 e D25). Dessa forma, caso o câmbio ultrapasse o preço de exercício, o *hedger* terá o direito de compra, que possibilitará a realização de um lucro nas operações de opções que compensaria o prejuízo causado pela variação cambial na importação.

Pela paridade *put-call*, as *calls* de dólar de delta mais alto (D75 e D90) são equivalentes às *puts* de delta mais baixo (D25 e D10). Portanto, se participantes do mercado comprados em dólar, como exportadores, se protegessem com essas opções, elas deveriam ser valorizadas, o que não ocorre, uma vez que as volatilidades implícitas extraídas das opções são as mais baixas. Entretanto, os grandes exportadores têm outros meios de se proteger contra a queda do dólar: podem receber pagamentos em contas exterior, podem se utilizar de ACCs (Adiantamento sobre Contrato de Câmbio) e ACEs (Adiantamento sobre Cambiais Entregues) e ainda podem utilizar futuros ou NDFs (*Non-Delivered Forward*). Esses últimos são atrativos porque, além de não requererem pagamento para a proteção, têm cotação acima da cotação à vista do dólar pela paridade coberta de taxa de juros.⁸ Assim, as *puts* de delta mais baixo não são tão procuradas para *hedge* como as *calls* de delta mais baixo.

Um aspecto importante a ser destacado é que as volatilidades implícitas máximas dos deltas referentes às opções de BOVA11 e dólar ocorreram simultaneamente alguns dias antes do segundo turno das eleições presidenciais, em 26/10/2022 (ver Tabela 1). Tal fato coincide com uma alta relevante do índice de risco-brasil (CDS-5y) que, apesar de não ter atingido seu máximo no período amostral, tem um valor alto, 0,0286, o qual é próximo do percentil 95% (0,0296). A Tabela 2 e o Gráfico 2 mostram as estatísticas descritivas e o formato do “sorriso da volatilidade” para essa data.

Tabela 2 - Estatísticas Descritivas do CDS de 5 anos do Brasil e de Puts de BOVA11 e Calls de dólar, segregadas pelos Deltas das Opções, para o dia 26/10/2022

Instrumentos:	Opções de BOVA11 - PUT					Opções de Dólar - CALL					CDS 5y
	D10	D25	D50	D75	D90	D10	D25	D50	D75	D90	
Valor	46,55	42,13	40,66	38,55	37,24	28,59	27,11	25,94	25,50	25,45	0,0286

⁸ Seja um contrato a termo de dólar (NDF) com cotação F em R\$/US\$. Essa cotação é dada pela condição de não arbitragem $F = \frac{S \times (1+R)}{(1+R^*)}$, sendo S a cotação do dólar à vista, e R e R^* as cotações das taxas de juros prefixadas em reais e dólares, respectivamente, com vencimento igual ao do NDF. Essa condição é denominada paridade coberta de taxa de juros. Como tradicionalmente $R > R^*$, a cotação do dólar a termo (F) é maior que a do dólar à vista (S).

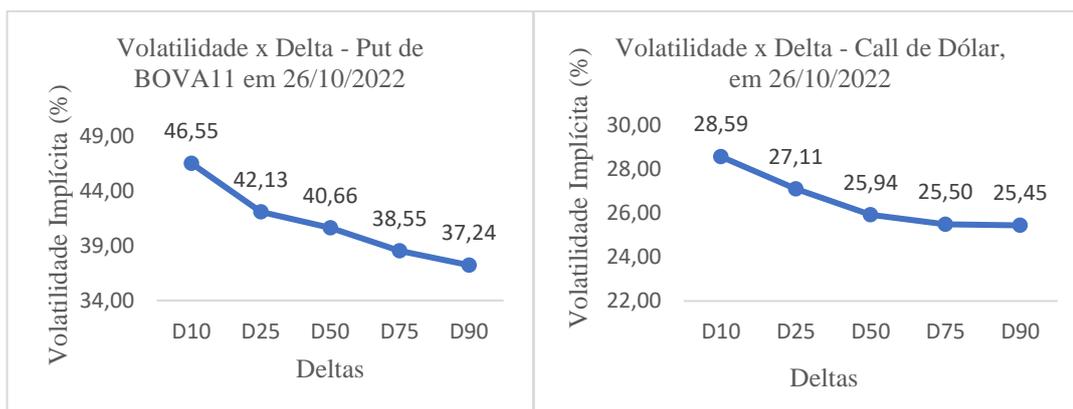


Gráfico 2 - Gráficos do "Sorriso da volatilidade" de Put de BOVA11 e Call de Dólar em 26/10/2022

A Tabela de Correlações, que consta do Apêndice 2 desse trabalho, apresenta relações positivas entre o CDS-5y e as volatilidades implícitas: as correlações são maiores para o dólar, variando entre 0,40 e 0,53; para BOVA11 a relação apenas não é positiva para D10. Interessante notar que quanto mais dentro-do-dinheiro, maior a correlação entre o CDS-5y e as volatilidades para ambos os ativos.

Com o intuito de se verificar a significância estatística da relação entre as volatilidades e o risco-Brasil, realizou-se regressões lineares de cada uma das volatilidades (em cada delta) das opções contra o CDS-5y e das razões de volatilidades contra esse mesmo indicador ao longo da amostra de 557 observações.

Tabela 3 - Resultados da Regressão Linear das Volatilidades Implícitas das Opções Compra de Dólar Contra CDS-5y, controlado por Newey-West

	Volatilidade Implícita				
	Dólar D10	Dólar D25	Dólar D50	Dólar D75	Dólar D90
CDS-5y	253,869	264,275	277,155	300,764	326,636
Erro Padrão	(2.980,917)	(2.411,491)	(1.698,354)	(1.214,248)	(795,323)
Constante	15,939	14,011	12,426	11,311	10,573
Erro Padrão	(75,399)	(60,922)	(43,015)	(30,907)	(20,257)
Observações	557	557	557	557	557
R ²	0,158	0,187	0,217	0,251	0,285
R ² Ajustado	0,157	0,185	0,215	0,250	0,284

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Os resultados das primeiras regressões (volatilidades implícitas contra o indicador de risco-Brasil) encontram-se nas Tabela 33 e 4. Ao analisar a relação entre as volatilidades implícitas

das opções de dólar e o CDS-5y (ver Tabela 3), nota-se que os coeficientes estimados não possuem significância estatística, mesmo considerando um nível de confiança de 90%, o que contrasta com a expectativa de uma relação positiva significativa entre o risco-país e a volatilidade implícita do dólar.

Tabela 4 - Resultados da Regressão Linear das Volatilidades Implícitas das Opções Venda de BOVA11 Contra CDS-5y, controlado por Newey-West

Volatilidade Implícita					
	BOVA11 D10	BOVA11 D25	BOVA11 D50	BOVA11 D75	BOVA11 D90
CDS-5y	-96,146	102,078	238,366	320,304**	345,386**
Erro Padrão	(155,769)	(147,852)	(150,342)	(146,362)	(136,763)
Constante	31,857***	24,090***	17,543***	14,527***	13,969***
Erro Padrão	(3,340)	(3,175)	(3,276)	(3,138)	(2,919)
Observações	557	557	557	557	557
R ²	0,006	0,007	0,046	0,098	0,117
R ² Ajustado	0,004	0,005	0,044	0,096	0,116

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Por outro lado, uma relação robusta e significativa ao nível de 5% é observada nas regressões que envolvem as volatilidades das opções de venda dentro do dinheiro (deltas 75 e 90) de BOVA11 em relação ao CDS-5y, conforme pode ser notado na Tabela 44. Essa constatação sugere que um aumento do risco-Brasil estaria diretamente associado a um aumento da volatilidade do mercado acionário brasileiro.

A partir de agora, iremos examinar os resultados das regressões das razões de volatilidade implícita contra risco-Brasil (Tabelas 5 e 6). Essa análise permite verificar se o “sorriso da volatilidade” fica mais ou menos pronunciado com uma variação do risco-Brasil.

A um nível de significância de 10%, pode-se afirmar que há uma relação negativa entre o CDS-5y e as razões das volatilidades das opções de compra de dólar (Tabela 5), com R² ajustado médio próximo a 30% em todos os casos. Esses resultados indicam que à medida que o risco-país aumenta, os *gaps* de volatilidade implícita dessas opções (em termos percentuais) decrescem.

Tabela 5 - Resultados da Regressão Linear das Razões das Volatilidades Implícitas das Opções de Compra de Dólar Contra CDS-5y, controlado por Newey-West

Razões das Volatilidades Implícitas						
	Dólar D10/D90	Dólar D25/D75	Dólar D10/D50	Dólar D25/D50	Dólar D50/D75	Dólar D50/D90
CDS-5y	-8,081*	-3,802*	-3,636*	-1,721*	-1,879**	-3,637*
Erro Padrão	(4,507)	(2,066)	(2,205)	(0,977)	(0,954)	(1,897)
Constante	1,394***	1,191***	1,244***	1,109***	1,075***	1,125***
Erro Padrão	(0,071)	(0,054)	(0,056)	(0,026)	(0,025)	(0,049)
Observações	557	557	557	557	557	557
R ²	0,311	0,307	0,205	0,238	0,358	0,369
R ² Ajustado	0,310	0,305	0,203	0,237	0,357	0,368

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Já para as inferências que investigam vínculos entre as razões das volatilidades implícitas das opções de venda de BOVA11 e o indicador CDS-5y (Tabela 6), os resultados mostraram-se mais robustos: são estatisticamente significativos a 1%, salvo a relação considerando a razão D25-D50, a qual, apesar de ter o mesmo sinal das outras regressões, não foi significativa nem a 10%. Em consonância com os resultados das regressões envolvendo as razões das volatilidades das opções de dólar, a relação entre as razões das volatilidades de BOVA11 e o CDS-5y também é negativa, sugerindo que quando o risco tende a aumentar, os *gaps* de volatilidade implícita diminuem (e vice-versa), o que torna o “sorriso” menos acentuado.

Tabela 6 - Resultados da Regressão Linear das Razões das Volatilidades Implícitas das Opções de Venda de BOVA11 Contra CDS-5y, controlado por Newey-West

Razões das Volatilidades Implícitas						
	BOVA11 D10/D90	BOVA11 D25/D75	BOVA11 D10/D50	BOVA11 D25/D50	BOVA11 D50/D75	BOVA11 D50/D90
CDS-5y	-26,527***	-13,006***	-18,024***	-7,565	-4,609***	-5,980***
Erro Padrão	(3,570)	(3,832)	(5,992)	(5,907)	(0,913)	(1,620)
Constante	1,984***	1,529***	1,746***	1,363***	1,157***	1,189***
Erro Padrão	(0,085)	(0,099)	(0,166)	(0,160)	(0,022)	(0,038)
Observações	557	557	557	557	557	557
R ²	0,190	0,031	0,023	0,004	0,087	0,067
R ² Ajustado	0,188	0,030	0,022	0,002	0,085	0,065

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Ao consolidar as informações das regressões, chega-se à conclusão de que há significância estatística para afirmar que quando há um choque positivo no CDS-5y, existe um aumento nas volatilidades implícitas das opções de venda de BOVA11 mais dentro do dinheiro (D75 e D90) – ver Tabela 4. No entanto, a mera disponibilidade dessa informação é insuficiente para determinar se tal aumento altera o formato do “sorriso da volatilidade”. Assim, as inferências relacionando as razões das volatilidades implícitas com os indicadores de risco-país tornam-se fundamentais para a compreensão das mudanças no “sorriso”.

Os resultados das regressões entre as razões das opções de venda de BOVA11 e CDS-5y apontaram para uma relação forte e negativa (ver Tabela 6). Isso sugere que um aumento positivo no indicador de risco-brasil está associado a uma diminuição na razão de volatilidades, o que, por sua vez, implica em uma diminuição dos *gaps* das volatilidades implícitas das opções de BOVA11. Tal interpretação é fortalecida quando analisa-se os resultados das regressões das suas volatilidades contra o CDS-5y (ver novamente Tabela 4), que indicam um aumento das volatilidades dentro do dinheiro, aliada a análise gráfica do perfil decrescente do “sorriso da volatilidade” (Gráfico 2). De tal forma, nota-se que com aumento do risco-Brasil as volatilidades implícitas a essas opções crescem, mas como esse crescimento não é uniforme, a curvatura do “sorriso da volatilidade” permanece, embora de forma menos acentuada.

Entretanto, o mesmo não pode ser assumido para as opções de compra de dólar, uma vez que, apesar de o “sorriso da volatilidade” ficar menos acentuado quanto maior o risco Brasil, as regressões das volatilidades individuais contra o CDS não geraram coeficientes significativos.

Por fim, para reduzir os ruídos da amostra e contornar o possível assincronismo entre os dados das volatilidades implícitas e do CDS-5y, realizamos, como robustez, regressões adicionais utilizando médias semanais dos dados. Especificamente, aplicou-se uma média aritmética simples nos dados de volatilidade implícita e no indicador de risco-país para cada semana da amostra. A amostra com frequência semanal tem 117 observações.

Os resultados estão documentados nas Tabela 7 . Os resultados com dados semanais são semelhantes aos com frequência diária. Os coeficientes das regressões das volatilidades implícitas de dólar contra o CDS continuam com a mesma magnitude e sem significância estatística (Tabelas 3 e 7). Comparando-se as Tabelas 4 e 8, a única diferença ocorre no coeficiente do delta 50 (D50) que se tornou significativo a 10%, corroborando a relação positiva entre o risco-Brasil e a volatilidade implícita de BOVA11. Os resultados da Tabela 9 são praticamente iguais aos da Tabela 5: a única diferença ocorre no coeficiente de D10/D50 que deixou de ser significativo ao nível de significância de 10%. A Tabela 10 e 6 não possuem diferenças relevantes. É importante frisar que, exceto os poucos casos escritos acima, os estimadores das regressões se mantiveram com os mesmos sinais e níveis de significância daqueles obtidos com as regressões com dados diários. Portanto, apesar das pequenas diferenças encontradas, os resultados corroboram as conclusões anteriormente estabelecidas.

Tabela 7 - Resultados da Regressão Linear das Médias Semanais das Volatilidades Implícitas das Opções de Compra de Dólar Contra Média Semanal do CDS-5y, controlado por Newey-West

Médias Semanais das Volatilidades Implícitas					
	Dólar D10	Dólar D25	Dólar D50	Dólar D75	Dólar D90
CDS-5y	255,118	265,424	278,105	301,671	327,725
Erro Padrão	(943,487)	(588,550)	(504,474)	(499,579)	(576,425)
Constante	15,915	13,987	12,404	11,288	10,544
Erro Padrão	(23,588)	(14,709)	(12,666)	(12,643)	(14,724)
Observações	117	117	117	117	117
R ²	0,164	0,194	0,224	0,259	0,294
R ² Ajustado	0,157	0,187	0,217	0,253	0,288

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Tabela 8 - Resultados da Regressão Linear das Médias Semanais das Volatilidades Implícitas das Opções de Venda de BOVA11 Contra Média Semanal do CDS-5y, controlado por Newey-West

Médias Semanais das Volatilidades Implícitas					
	BOVA11 D10	BOVA11 D25	BOVA11 D50	BOVA11 D75	BOVA11 D90
CDS-5y	-104,369	95,313	240,374*	324,841**	350,439***
Erro Padrão	(158,465)	(149,466)	(138,575)	(130,302)	(128,082)
Constante	32,053***	24,247***	17,484***	14,421***	13,859***
Erro Padrão	(3,468)	(3,323)	(3,163)	(2,951)	(2,918)
Observações	117	117	117	117	117
R ²	0,009	0,008	0,059	0,122	0,144
R ² Ajustado	0,00002	-0,001	0,051	0,114	0,137

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Tabela 9 - Resultados da Regressão Linear das Razões das Médias Semanais das Volatilidades Implícitas das Opções de Compra de Dólar Contra Média Semanal do CDS-5y, controlado por Newey-West

Razões das Médias Semanais das Volatilidades Implícitas						
	DOLAR D10/D90	DOLAR D25/D75	DOLAR D10/D50	DOLAR D25/D50	DOLAR D50/D75	DOLAR D50/D90
CDS-5y	-8,082*	-3,791*	-3,625	-1,712*	-1,878**	-3,648**
Erro Padrão	(4,300)	(1,921)	(2,810)	(1,031)	(0,816)	(1,505)
Constante	1,394***	1,191***	1,244***	1,109***	1,075***	1,125***
Erro Padrão	(0,111)	(0,049)	(0,073)	(0,027)	(0,021)	(0,038)
Observações	117	117	117	117	117	117
R ²	0,313	0,304	0,203	0,234	0,359	0,377
R ² Ajustado	0,307	0,298	0,196	0,227	0,354	0,371
Nota:	*p<0.1;	**p<0.05;	***p<0.01			

Tabela 10 - Resultados da Regressão Linear das Razões das Médias Semanais das Volatilidades Implícitas das Opções de Venda de BOVA11 Contra Média Semanal do CDS-5y, controlado por Newey-West

Razões das Médias Semanais das Volatilidades Implícitas						
	BOVA11 D10/D90	BOVA11 D25/D75	BOVA11 D10/D50	BOVA11 D25/D50	BOVA11 D50/D75	BOVA11 D50/D90
CDS-5y	-27,058***	-13,419***	-18,238***	-7,791	-4,660***	-6,023***
Erro Padrão	(4,398)	(3,727)	(4,834)	(4,948)	(1,166)	(2,050)
Constante	1,991***	1,529***	1,729***	1,346***	1,159***	1,190***
Erro Padrão	(0,103)	(0,086)	(0,114)	(0,117)	(0,027)	(0,047)
Observações	117	117	117	117	117	117
R ²	0,298	0,08	0,086	0,016	0,16	0,112
R ² Ajustado	0,292	0,072	0,078	0,007	0,152	0,104
Nota:	*p<0.1;	**p<0.05;	***p<0.01			

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho é examinar empiricamente os padrões das volatilidades implícitas no mercado brasileiro e entender o comportamento do “sorriso da volatilidade” diante de variações do risco-país (CDS de 5 anos do Brasil). São utilizadas opções de Dólar e de BOVA11, que se constitui no ETF de Ibovespa, o principal índice da bolsa brasileira. A amostra compreende um período com eventos de estresse (pandemia e eleição presidencial).

Inicialmente confirmou-se a presença de assimetria nos perfis dos “sorrisos de volatilidade” das opções analisadas, conforme descrito por Abdullah e Harun (2014). A assimetria do “sorriso da volatilidade” é observada de modo mais acentuada onde se localizam as *calls* de dólar e *puts* de BOVA11 fora do dinheiro, ou seja, nos deltas 10 e 25. Nesses pontos a volatilidade é mais alta. Essas são as opções mais utilizadas para *hedge*.

Apesar de haver evidências, nas estatísticas descritivas, de uma relação positiva entre o risco-Brasil e a volatilidade, não foi possível inferir estatisticamente que quanto maior o CDS maiores as volatilidades implícitas de dólar. Para BOVA11, em alguns deltas, houve significância estatística dessa relação.

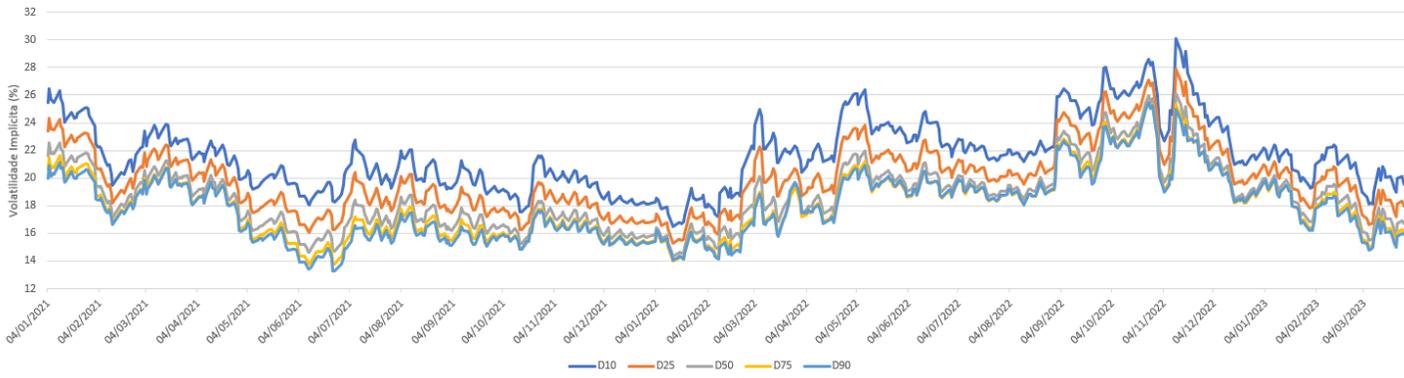
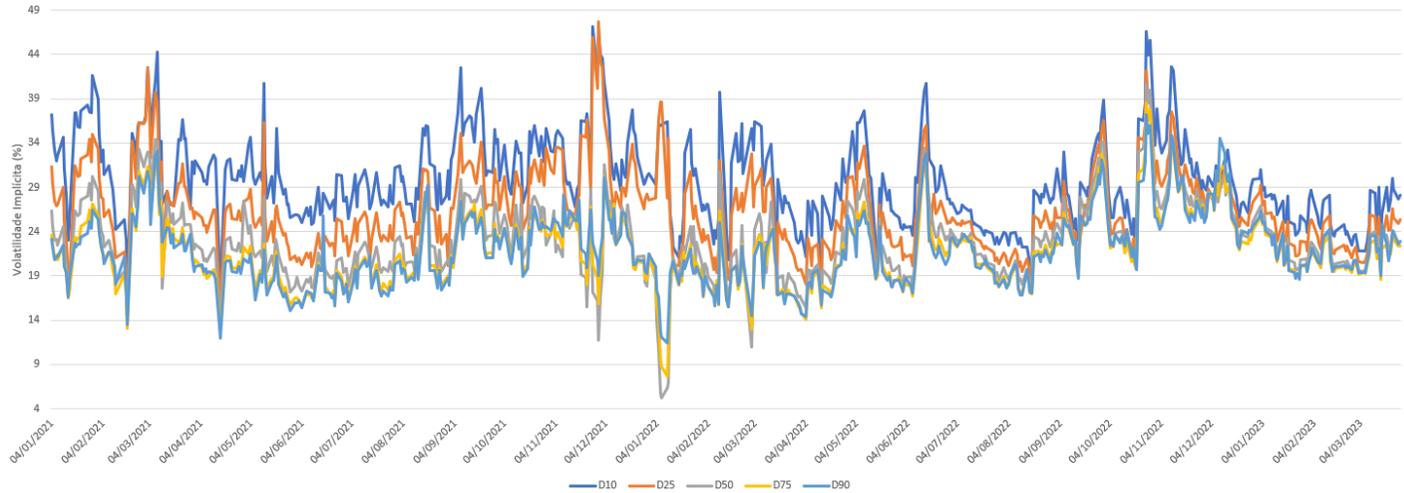
As inferências estatísticas indicam que as relações entre as razões de volatilidade implícita das opções de dólar e de BOVA11 com o indicador de risco-país, CDS-5y, são suficientemente negativas e significantes, ou seja, pode-se afirmar que os “sorrisos de volatilidade” destas opções são menos acentuados à medida que o CDS-5y varia positivamente. Isso significa que quanto maior o risco, menores os gaps de volatilidade implícita.

Para um investidor que aposte no aumento ou na diminuição do risco-Brasil, essa conclusão lhe traz insumos para operar *gap* de volatilidade, ou seja, elaborar estratégias com opções de mesmo ativo subjacente e vencimento, mas com diferentes deltas (ou preços de exercício), para obter lucros com a variação do risco-Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M. H.; HARUN, H. F. **Investigation of Implied Volatility during Financial Crisis: Evidence from Australian Index Options.** *AIP Conference Proceedings*, v. 1621, p. 478-483, outubro de 2014. DOI: [10.1063/1.4898509](https://doi.org/10.1063/1.4898509).
- ALEXANDER, C. **Modelos de Mercados – Um Guia para a Análise de Informações Financeiras.** 2005
- ARAUJO, G.S.; RIBEIRO, R.A.C. **O Mercado de Opções no Brasil é Eficiente? Um Estudo a partir da Estratégia Delta-Gama-Neutra com Opções da Petrobras.** *Trabalhos para Discussão Brasília*, nº 441, p. 1-23, junho de 2016. ISSN 1519-1028. CGC 00.038.166/0001-05.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Série Perguntas Mais Frequentes: Risco-País.** Brasília, 2016.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Relatório de Inflação.** Brasília, março de 2021.
- BATES, D. **Post-'87 Crash Fears in the S&P 500 Futures Option Market.** *Journal of Econometrics* 94 (2000), 181 – 238.
- BLACK, F.; SCHOLES, M. **The Pricing of Options and Corporate Liabilities.** *The Journal of Political Economy*, v. 81, n. 3, p. 637-654, maio-jun, 1973. Publicado por The University of Chicago Press. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1831029>.
- BLOOMBERG. Bloomberg Financial Data. 2023. Bloomberg Terminal.
- CHANCE, D. M.; HANSON, T. A.; LI, W.; MUTHUSWAMY, J. **A bias in the volatility smile.** *Rev Deriv Res*, v. 20, p. 47-90, 2017. DOI: [10.1007/s11147-016-9124-0](https://doi.org/10.1007/s11147-016-9124-0). Publicado online em 16 de junho de 2016. Springer Science+Business Media New York, 2016.
- DERMAN, R.; KANI, I. **Riding on a smile.** *Risk*, v. 7, p. 32-39, 1994.
- GUO, W.; GEHRICKE, S. A.; RUAN, X.; ZHANG, J. E. **The Implied Volatility Smirk in SPY Options.** *Applied Economics*, v. 53, n. 23, p. 2671-2692, 2021. DOI: [10.1080/00036846.2020.1866159](https://doi.org/10.1080/00036846.2020.1866159).
- HULL, J. C. **Opções, Futuros e Outros Derivativos.** 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2017.
- LARKINA, J.; BROOKSBY, A.; LIN, C. T.; ZURBRUEGG, R. **Implied Volatility Smiles, Option Mispricing and Net Buying Pressure: Evidence Around the Global Financial Crisis.** *Accounting and Finance*, v. 52, p. 47-69, 2012.
- SRIVIDYA, V.; SUSANA, D. **Implied Volatility Smile Patterns: Evidence from Nifty 50 Index Options.** *International Journal of Social Science and Economic Research*, v. 03, n. 12, dezembro de 2018. ISSN: 2455-8834.
- ZEILEIS, A. **Econometric Computing with HC and HAC Covariance Matrix Estimators.** *Journal of Statistical Software*, v. 11, n. 10, p. 1–17, 2004. DOI: [10.18637/jss.v011.i10](https://doi.org/10.18637/jss.v011.i10).

Apêndice 1 – Série Temporal das Volatilidades Implícitas de BOVA11 (acima) e Dólar (abaixo)



Apêndice 2 – Matriz de Correlações entre as Volatilidades Implícitas e o CDS-5y

	<i>BOVA11_D10</i>	<i>BOVA11_D25</i>	<i>BOVA11_D50</i>	<i>BOVA11_D75</i>	<i>BOVA11_D90</i>	<i>DOLAR_D10</i>	<i>DOLAR_D25</i>	<i>DOLAR_D50</i>	<i>DOLAR_D75</i>	<i>DOLAR_D90</i>	<i>CDS-5y</i>
<i>BOVA11_D10</i>	1										
<i>BOVA11_D25</i>	0,94	1									
<i>BOVA11_D50</i>	0,59	0,59	1								
<i>BOVA11_D75</i>	0,60	0,65	0,97	1							
<i>BOVA11_D90</i>	0,60	0,67	0,91	0,98	1						
<i>DOLAR_D10</i>	0,18	0,20	0,48	0,48	0,46	1					
<i>DOLAR_D25</i>	0,18	0,22	0,50	0,50	0,48	0,99	1				
<i>DOLAR_D50</i>	0,17	0,22	0,50	0,51	0,50	0,98	1,00	1			
<i>DOLAR_D75</i>	0,15	0,22	0,49	0,51	0,50	0,96	0,99	1,00	1		
<i>DOLAR_D90</i>	0,13	0,21	0,48	0,50	0,49	0,95	0,97	0,99	1,00	1	
<i>CDS-5y</i>	-0,08	0,08	0,21	0,31	0,34	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	1