

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS E VALORAÇÃO DOS
DANOS SOCIOECONÔMICOS CAUSADOS PARA
AS COMUNIDADES ATINGIDAS PELO ROMPIMENTO
DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

**Extensão do Impacto do Rompimento
da Barragem de Fundão sobre
a Renda Agregada das Sub-Regiões
de Minas Gerais e Espírito Santo**



DEZEMBRO DE 2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas/FGV

Fundação Getulio Vargas

Extensão do Impacto do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada das Sub-Regiões de Minas Gerais e Espírito Santo / Fundação Getulio Vargas. – Rio de Janeiro; São Paulo: FGV, 2021.

122 p.

Em colaboração com: André Portela Fernandes de Souza, Guillermo Roberto Tomás Málaga Butrón, Heron Marcos Teixeira Rios, Lucas Gerez Foratto, Reynaldo Fernandes.

Acima do título: Projeto Rio Doce – Avaliação dos Impactos e Valoração dos Danos Socioeconômicos Causados para as Comunidades Atingidas pelo Rompimento da Barragem de Fundão.

Inclui bibliografia.

1. Projeto Rio Doce. 2. Fundão, Barragem de (MG). 3. Barragens e açudes – Aspectos ambientais. 4. Renda. 5. Doce, Rio, Bacia (MG e ES) I. Título.

CDD – 627.8

EQUIPE TÉCNICA

André Portela Fernandes de Souza

Guillermo Roberto Tomás Málaga Butrón

Heron Marcos Teixeira Rios

Lucas Gerez Foratto

Reynaldo Fernandes

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Recortes sub-regionais de MG e ES utilizados na estimação do impacto do rompimento.....	20
Figura 2 — Sub-bacias hidrográficas e sua utilização na estimação do impacto.....	35
Figura 3 — Sub-bacias que compõem a sub-bacia do Rio Doce contrafactual selecionadas pelo Controle Sintético	39
Figura 4 — Localização geográfica dos 45 municípios atingidos	46
Figura 5 — Sub-bacias que compõem a sub-região contrafactual selecionadas pelo Controle Sintético	49
Figura 6 — Municípios selecionados pela distância de Mahalanobis como potenciais controles para o Litoral Adjacente.....	56
Figura 7 — Municípios selecionados pela distância de Mahalanobis como potenciais controles para o município de Anchieta (ES)	64
Figura 8 — Perda acumulada das regiões e sub-regiões de MG e ES utilizadas na estimação do impacto do rompimento de 2015 a 2018 (% do PIB contrafactual).....	74
Figura 9 — Delimitação geográfica da sub-região complementar	75
Figura 10 — Estados que compõem a sub-região complementar sintética selecionadas pelo Controle Sintético – contrafactuais selecionados	79
Figura 11 — UFs que compõem a região contrafactual selecionadas pelo Controle Sintético (2013-2014).....	87
Figura 12 — Municípios da fronteira de MG	94

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 — PIB agregado dos municípios da sub-bacia do Rio Doce	22
Gráfico 2 — PIB agregado dos 40 municípios atingidos	23
Gráfico 3 — PIB agregado dos municípios do Litoral Adjacente de ES	23
Gráfico 4 — PIB do município de Anchieta (ES)	24
Gráfico 5 — PIB agregado dos municípios da sub-região complementar.....	26
Gráfico 6 — Composição setorial dos PIBs das sub-regiões	27
Gráfico 7 — Ilustração do método de Diferença-em-Diferenças	30
Gráfico 8 — PIB <i>per capita</i> das sub-bacias selecionadas pelo Controle Sintético e da sub-bacia do Rio Doce (atingida)	40
Gráfico 9 — PIB <i>per capita</i> dos municípios da sub-bacia do Rio Doce e da sub-bacia sintética	42
Gráfico 10 — Diferença entre o PIB <i>per capita</i> observado e o sintético para a sub-bacia do Rio Doce (realizado) e placebos	44
Gráfico 11 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para a sub-bacia do Rio Doce (realizado) e placebos	45
Gráfico 12 — PIB <i>per capita</i> das sub-bacias selecionadas pelo Controle Sintético e dos 40 municípios atingidos (Unidade atingida).....	50
Gráfico 13 — PIB <i>per capita</i> dos 40 municípios atingidos e da região sintética	51
Gráfico 14 — Diferença entre o PIB <i>per capita</i> observado e o sintético para os 40 municípios atingidos (realizado) e placebos.....	52
Gráfico 15 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para os 40 municípios atingidos (realizado) e placebos	53
Gráfico 16 — PIB <i>per capita</i> dos municípios selecionados pelo Controle Sintético e do Litoral Adjacente (Unidade atingida)	59
Gráfico 17 — PIB <i>per capita</i> do Litoral Adjacente e da região sintética.....	60
Gráfico 18 — Diferença entre o PIB <i>per capita</i> observado e o sintético para o Litoral Adjacente (realizado) e placebos	61
Gráfico 19 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para o Litoral Adjacente (realizado) e placebos.....	62
Gráfico 20 — PIB <i>per capita</i> dos municípios selecionados pelo Controle Sintético e do municípios de Anchieta (ES) (atingida)	66
Gráfico 21 — PIB <i>per capita</i> do município de Anchieta-ES e do município sintético ..	68
Gráfico 22 — Diferença entre o PIB <i>per capita</i> observado e o sintético para o município de Anchieta (ES) (realizado) e placebos	69

Gráfico 23 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para o município de Anchieta (ES) (realizado) e placebos.....	70
Gráfico 24 — PIB <i>per capita</i> dos estados selecionados pelo Controle Sintético e da sub-região complementar (Unidade atingida)	80
Gráfico 25 — PIB <i>per capita</i> da sub-região complementar e da sub-região sintética .	81
Gráfico 26 — Diferença entre o PIB <i>per capita</i> observado e o sintético para a sub-região complementar (realizado) e placebos	82
Gráfico 27 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para a sub-região complementar (realizado) e placebos	83
Gráfico 28 — PIB <i>per capita</i> dos estados de MG e ES e da região sintética no placebo temporal (2013-2014)	88
Gráfico 29 — PIB per capita dos estados de MG e ES e da Região Sintética (2015-2018)	89
Gráfico 30 — Diferença entre o PIB <i>per capita</i> observado e o sintético dos estados de MG e ES (realizado) e placebos – contrafactuais selecionados.....	89
Gráfico 31 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para a MGES (realizado) e placebos: 2013-2014.....	90
Gráfico 32 — Comparação do PIB <i>per capita</i> entre os municípios da fronteira MG ...	95
Gráfico 33 — Resultados ano a ano: PIB sem ajuste.....	97
Gráfico 34 — Resultados ano a ano: PIB com ajuste.....	98

LISTA DE TABELA

Tabela 1 — Municípios atingidos.....	21
Tabela 2 — População das sub-regiões (milhões de habitantes)	26
Tabela 3 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB dos municípios da sub-bacia do Rio Doce (R\$ de 2020).....	37
Tabela 4 — Pesos estimados pelo Controle Sintético das sub-bacias que compõem a sub-bacia do Rio Doce sintético – contrafactuais selecionados	38
Tabela 5 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB dos 40 municípios atingidos (R\$ de 2020)	47
Tabela 6 — Pesos estimados pelo Controle Sintético das sub-bacias que compõem a região sintética dos 40 municípios – contrafactuais selecionados.....	48
Tabela 7 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB do Litoral Adjacente (R\$ de 2020).....	57
Tabela 8 — Pesos estimados pelo Controle Sintético dos municípios que compõem a região sintética do Litoral Adjacente – contrafactuais selecionados	58
Tabela 9 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB do município de Anchieta (ES) (R\$ de 2020)	65
Tabela 10 — Pesos estimados pelo Controle Sintético dos municípios que compõem o município de Anchieta (ES) sintético – contrafactuais selecionados	66
Tabela 11 — Síntese das estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB sem ajuste para diversos recortes sub-regionais (R\$ bilhões de 2020) ...	72
Tabela 12 — Síntese das estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB com ajuste para diversos recortes sub-regionais (R\$ bilhões de 2020) ...	73
Tabela 13 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB agregado dos municípios da sub-região complementar (R\$ de 2020)	77
Tabela 14 — Pesos estimados pelo Controle Sintético dos estados que compõem a sub-região complementar sintética – contrafactuais selecionados	78
Tabela 15 — Robustez: placebo temporal do Controle Sintético de MG e ES com os anos 2013 e 2014 (R\$ de 2020)	86
Tabela 16 — Estatísticas dos municípios da fronteira (dados de 2014).....	93
Tabela 17 — Resultados do modelo de Diferença-em-Diferenças.....	96

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO	9
1 INTRODUÇÃO	16
2 PERFIL DAS SUB-REGIÕES ANALISADAS	19
3 METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DO IMPACTO DO ROMPIMENTO	28
3.1 Controle Sintético e a construção dos contrafactuais	28
3.2 Diferença-em-Diferenças sobre os municípios da fronteira de MG	29
4 RESULTADOS NAS SUB-REGIÕES DE MG E ES	34
4.1 Sub-bacia do Rio Doce	35
4.2 40 municípios atingidos	45
4.3 Litoral Adjacente	54
4.4 Anchieta (ES)	63
5 SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS REGIÕES DE INTERESSE	71
6 RESULTADOS NA REGIÃO COMPLEMENTAR	75
7 ROBUSTEZ E SENSIBILIDADE: IMPACTO CONJUNTO EM MINAS GERAIS E ESPÍRITO SANTO	84
7.1 Análise placebo temporal	84
8 ROBUSTEZ E SENSIBILIDADE: IMPACTO SOBRE OS MUNICÍPIOS DA FRONTEIRA DE MG	92
8.1 Estatísticas descritivas	93
8.2 Resultados de Diferença-em-Diferenças	95
9 CONCLUSÃO	100
REFERÊNCIAS	102
APÊNDICE A	104
APÊNDICE B	106
APÊNDICE C	111
APÊNDICE D	114
APÊNDICE E	117
APÊNDICE F	119
APÊNDICE G	121

SUMÁRIO EXECUTIVO

Este estudo faz parte de uma sequência que investiga os impactos econômicos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG) em novembro de 2015. Os estudos anteriores trouxeram evidências do impacto sobre o Produto Interno Bruto (PIB) dos estados e sub-regiões de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES). O presente estudo avança na análise da perda da renda agregada ao, primeiro, atualizar as estimativas com dados do ano de 2018; segundo, apresentar evidências de impactos em regiões para além do Rio Doce e litoral capixaba; e, terceiro, apresentar evidências de que os impactos encontrados são atribuíveis ao desastre e não a demais fatores idiossincráticos aos estados de MG e ES.

No estudo “Impactos do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada nos Estados e Sub-Regiões de Minas Gerais e Espírito Santo” (FGV, 2020i), estimaram-se os efeitos do rompimento sobre as sub-regiões definidas pelos 215 municípios que compõem a sub-bacia hidrográfica do Rio Doce, os 5 municípios do Litoral Adjacente do ES (Aracruz, Conceição da Barra, Fundão, São Mateus e Serra) e o município de Anchieta (ES), onde se localiza a etapa de pelotização no processo de exportação do minério de ferro, pela empresa Samarco S.A., e o porto de Ubu. A análise do impacto econômico total nos estados de MG e ES, conjuntamente, e nos recortes sub-regionais foi estimada até o ano de 2017.

Este estudo apresenta as seguintes contribuições em relação às análises anteriores: i) atualiza os resultados com as informações mais recentes do IBGE para o PIB estadual e municipal, incluindo o ano de 2018; ii) apresenta os valores do impacto a preços reais de 2020; iii) traz estimativas do impacto para os 40 municípios de MG e ES (pertencentes à sub-bacia do Rio Doce) que, em conjunto com os municípios do Litoral Adjacente, compõem os municípios atingidos de acordo com o TTAC; iv) apresenta a estimativa dos impactos econômicos do rompimento sobre a “região complementar” composta por todos os municípios de MG e ES excluídos os municípios que compõem a sub-bacia hidrográfica do Rio Doce, os municípios do Litoral Adjacente do ES e o município de Anchieta (ES); e v) analisa a robustez das estimativas do impacto conjunto em MG e ES.

A análise de robustez busca evidências adicionais de que os impactos encontrados não são devidos a demais fatores idiossincráticos aos estados de MG e ES, antes, porém, estão associados ao rompimento da Barragem de Fundão. Para tanto, realizam-se dois exercícios distintos. No primeiro, chamado placebo temporal, supõe-se que o impacto

ocorreu em data anterior ao de fato observado. Este exercício busca trazer evidências de que o método utilizado estima corretamente o efeito do rompimento ao não encontrar evidência de impacto em períodos nos quais se sabe não ter ocorrido o rompimento ou choque de magnitude semelhante nos estados. No segundo, examina-se o impacto do rompimento sobre os municípios da fronteira do estado de MG (excluindo os municípios na fronteira do ES, dado que o estado também foi atingido). Ao comparar a variação temporal no PIB dos municípios de MG que estão na fronteira do estado com os municípios da fronteira pertencentes a estados vizinhos buscam-se evidências de que o impacto estimado de fato reflete o impacto do rompimento e não outros choques específicos ao estado de MG. A razão é que choques simultâneos podem confundir a estimativa no sentido de atribuir (erroneamente) ao rompimento os impactos dos mesmos. Para essa análise utiliza-se uma metodologia alternativa ao Controle Sintético denominada de Diferença-em-Diferenças. Por essa razão, os resultados para os municípios da fronteira de MG podem, também, ser vistos como uma robustez para o método anterior (na medida em que não indicam contraposição de resultados).

A metodologia utilizada nas estimativas do impacto nas sub-regiões bem como na análise de robustez do impacto sobre o PIB conjunto de MG e ES baseia-se na técnica econométrica de Controle Sintético proposta por Abadie e Gardeazabal (2003) e Abadie et. al (2010, 2015). Nesta metodologia, constrói-se uma região sintética que replique a trajetória pré-rompimento da unidade atingida (antes de 2015), como base num grupo de controle (por exemplo, demais estados). De forma simplificada, mensura-se o impacto através da diferença entre as trajetórias do PIB da unidade atingida e da região sintética estimada, nos anos após o rompimento. Um ponto-chave do método na identificação do efeito em questão é o fato de que os impactos são mensurados sob duas premissas: (i) o desastre não impacta as regiões definidas como controle; e (ii) todos os demais fatores que afetam a trajetória do PIB, impactam similarmente as regiões atingidas e as de controle.

Sabe-se que durante o período em consideração houve variação do preço internacional do minério de ferro. Sob a hipótese de que esta variação afetou as trajetórias de PIB dos estados similarmente, podemos utilizar as séries de PIB observadas. Contudo, se for o caso que MG e ES são afetados diferentemente dos demais, devemos filtrar essa diferença nas trajetórias de PIB. Nesse sentido, constroem-se séries de PIB nas quais são filtradas as oscilações do PIB devido às variações do preço do minério. Isto é feito pelo fato de que houve uma queda significativa do preço do minério de ferro simultaneamente ao desastre e que, potencialmente, esta pode confundir os impactos estimados atribuídos ao rompimento. Por essa razão, as estimativas de perda no PIB

Total de MG e ES são apresentadas para a série diretamente observada (sem ajuste) e a série ajustada pela variação do preço do minério de ferro (com ajuste)¹.

A primeira parte do estudo fornece uma análise do impacto do rompimento sobre o PIB de diversos recortes sub-regionais de interesse, bem como uma primeira evidência da propagação do seu efeito para a região complementar. O *spillover* é, então, calculado como resíduo das estimativas sub-regionais em relação ao impacto total nos estados de MG e ES reportado em Nota Técnica anterior (FGV, 2021a).

Para efeito de análise de sensibilidade da estimação do impacto nas sub-regiões feita através do método de Controle Sintético, foram consideradas 4 especificações alternativas de contrafactuais, numeradas de Contrafactual 2 a 5² seguindo a sequência de estudo anterior³. Isto é feito de modo a permitir a comparação dos resultados (o Contrafactual 1 supõe, de forma simples, o crescimento do PIB do Brasil sem MG e ES como a trajetória contrafactual do PIB de MG e ES e se encontra reportado no APÊNDICE A).

Adicionalmente, levou-se em consideração a possibilidade de efeitos atenuadores ou amplificadores da variação do preço do minério de ferro em todas as estimativas. De modo que, as estimativas de impacto foram obtidas utilizando as séries de PIB estadual e municipal observadas (e divulgadas pelo IBGE) no período 2002 a 2018 e as séries de PIB ajustadas pela variação do preço internacional do minério de ferro. Uma vez que é possível que o impacto tenha afetado também o preço do minério de ferro e suas flutuações podem confundir as estimativas do impacto do rompimento. Assim, no que segue, o Contrafactual 2 com ajuste (pelo preço do minério de ferro) é o resultado de referência analisado e que apresenta os melhores ajustes do modelo de Controle Sintético. Os principais resultados da primeira parte serão apresentados mais adiante.

¹ Série de preço internacional do minério de ferro obtida em FMI (2021).

² Composição dos contrafactuais:

- Contrafactual 1: taxa de crescimento do Brasil, excluindo MG e ES, entre 2014 e 2017;
- Contrafactual 2: passado do PIB *per capita* de 2002 a 2014;
- Contrafactual 3: média das demais covariadas de 2002 a 2014 e PIB *per capita* de 2002 a 2004 e de 2011 a 2014;
- Contrafactual 4: média das demais covariadas e a média do PIB *per capita* de 2002 a 2014;
- Contrafactual 5: média das demais covariadas de 2002 a 2014 e PIB *per capita* de 2011 a 2014.

As demais covariadas são relacionadas à estrutura produtiva e a fatores de produção importantes para a determinação do nível de produção dos estados, são elas: densidade populacional e composição do PIB (participação dos setores agropecuário, indústria e serviços). Vale ressaltar que no caso das estimativas para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo acrescentaram-se as covariadas de capital humano, área produtiva e percentual do setor extrativo no PIB, uma vez que essas informações são obtidas apenas em nível estadual.

³ FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Impacto do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada de Minas Gerais e Espírito Santo**. Rio de Janeiro; São Paulo. 2019a.

A segunda parte deste estudo, por sua vez, foca na análise de evidências de propagação do choque (ou *spillover*) para a região complementar. Para tanto, implementa-se a mesma técnica de Controle Sintético para o conjunto de municípios que compõem a região complementar, na mesma linha da estimação para os recortes sub-regionais. Os resultados mostram que as estimativas de propagação do choque para a região complementar são similares àquelas obtidas na primeira parte onde o cálculo do impacto nessa região é realizado de forma residual. Uma vez que não há razões *a priori* para esperar que esses resultados sejam iguais, estas estimativas corroboram a análise inicial dos efeitos de propagação e conferem uma maior confiabilidade às magnitudes encontradas.

A terceira e última parte do estudo apresenta uma análise de sensibilidade e robustez dos resultados do impacto sobre o PIB total de MG e ES, uma vez que estes resultados fundamentam as estimativas de propagação do choque para a região complementar descritas na primeira parte. Inicia-se pela análise de placebo temporal, onde estima-se o impacto sobre o PIB conjunto de MG e ES supondo que o desastre ocorreu em 2013 (ao invés de 2015). Desse modo, constrói-se a região sintética com base na trajetória do PIB de MG e ES anterior ao ano hipotético e calcula-se o impacto em 2013 e 2014. A ausência de impacto nestes anos corroboraria os resultados estimados para os anos pós-rompimento, na medida em que o placebo temporal testa a capacidade do método de identificar a ocorrência do choque. De fato, os exercícios de placebo temporal não encontram evidências de impacto em anos anteriores (nos quais se sabe que não houve rompimento ou outro fator com efeito equivalente).

Em seguida, lança-se mão da técnica econométrica de Diferença-em-Diferenças para estimar o impacto diferencial entre os municípios da fronteira – interna e externa – de MG, excluindo aqueles pertencentes ao estado do ES. Essa metodologia mensura a diferença da variação do PIB antes e depois do rompimento entre o grupo atingido (municípios da fronteira pertencentes a MG) e o grupo de controle (municípios da fronteira de MG pertencentes a estados contíguos). De modo que desvios da tendência paralela entre as regiões atingidas e de controle fornecem indícios de impacto diferencial. A ausência de impacto diferencial traz evidências de que não houve choques alternativos e idiossincráticos a MG que pudessem explicar os resultados da primeira parte em detrimento do rompimento da barragem.

Os resultados encontrados demonstram que as variações do PIB municipal são estatisticamente iguais entre a região atingida e a região de controle. Ou seja, não há evidências de impacto sobre os municípios da fronteira, o que indica a ausência de outros choques concomitantes ao rompimento e específicos aos estados atingidos.

Portanto, a análise dos municípios da fronteira de MG corrobora a identificação do impacto total estimado anteriormente, como sendo decorrente do rompimento. Além disso, este último exercício pode ser entendido como uma análise adicional dos efeitos de propagação do choque, sugerindo que o impacto estimado na região complementar é heterogêneo.

A Tabela 1 a seguir mostra a síntese do primeiro conjunto de resultados que estima o impacto nas diversas sub-regiões e na região complementar (aqui como resíduo do impacto total menos o impacto nas sub-regiões mencionadas), em bilhões de reais de 2020. Os resultados apresentados referem-se ao Contrafactual 2 com ajuste. A coluna “MG e ES” reporta os valores obtidos em Fundação Getulio Vargas (2021a). Como é possível observar o impacto total no período 2015 a 2018, reportado anteriormente, é de uma perda de R\$ 225,3 bilhões (6,6% do PIB contrafactual, isto é, o PIB da região sintética). Já a perda estimada para as sub-regiões no mesmo período é de R\$ 48,6 bilhões (10,9%) na sub-bacia do Rio Doce, de R\$ 35,6 bilhões (16,2%) nos 40 municípios, de R\$ 15,2 bilhões (10,5%) no Litoral Adjacente e de R\$ 12,9 bilhões (66,1%) em Anchieta (ES). Por sua vez, a estimativa preliminar do efeito sobre a região complementar é de R\$ 148,5 bilhões (5,3%). Note que os resultados mostram que as perdas estimadas nas sub-regiões, embora menores (em termos absolutos) que a perda da região complementar, tendem a ser mais intensas no sentido do seu valor como proporção do PIB contrafactual. Uma discussão mais detalhada desses resultados se encontra na Seção 4.

Dada a importância da magnitude do impacto sobre a sub-região complementar em relação ao impacto total, o segundo conjunto de resultados foca na evidência de efeitos de propagação do choque do rompimento (ou *spillover*). A Tabela 2 mostra as estimativas do Controle Sintético para a região complementar sob os diversos contrafactuais e ajustes das séries de PIB no período pós-rompimento. Como é possível observar, as estimativas de impacto acumulado no período 2015-2018 encontram-se próximas do valor preliminar da perda apresentado na Tabela 1 anterior. De fato, o resultado de referência sugere uma perda de R\$ 144,6 bilhões (5,1%), muito próximo ao valor obtido anteriormente.

Tabela 1 — Síntese das estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB com ajuste para diversos recortes sub-regionais (R\$ bilhões de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2 com ajuste					
		MG e ES	Sub-bacia	40 mun.	Litoral	Anchieta	Restante
2015	R\$ bilhões	-44,5	-12,7	-8,2	-4,2	-2,4	-25,2
	% do PIB ^{CF}	-5,1	-11,3	-14,9	-11,2	-39,9	-3,5
	p-valor	0,19	0,08	0,01	0,25	0,13	-
2016	R\$ bilhões	-54,7	-18,3	-11,8	-4,8	-2,8	-28,8
	% do PIB ^{CF}	-6,6	-16,5	-21,4	-13,6	-74,5	-4,2
	p-valor	0,23	0,07	0,01	0,33	0,09	-
2017	R\$ bilhões	-76,3	-12,3	-8,8	-5,3	-3,4	-55,3
	% do PIB ^{CF}	-8,8	-10,9	-16,1	-14,8	-77,7	-7,8
	p-valor	0,19	0,21	0,06	0,35	0,07	-
2018	R\$ bilhões	-49,8	-5,3	-6,8	-0,9	-4,4	-39,3
	% do PIB ^{CF}	-5,7	-4,7	-12,5	-2,5	-79,9	-5,5
	p-valor	0,46	0,50	0,11	0,75	0,07	-
Acumulado	R\$ bilhões	-225,3	-48,6	-35,6	-15,2	-12,9	-148,5
	% do PIB ^{CF}	-6,6	-10,9	-16,2	-10,5	-66,1	-5,3
	p-valor	0,31	0,47	0,14	0,84	0,43	-

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético.

Tabela 2 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB agregado dos municípios da sub-região complementar (R\$ de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ bilhões	-24,4	-26,0	-24,1	-26,0	-12,0	-32,4	-34,1	-38,8
	% do PIB ^{CF}	-3,4	-3,7	-3,4	-3,7	-1,7	-4,5	-4,8	-5,4
	p-valor	0,27	0,27	0,31	0,31	0,50	0,19	0,23	0,19
2016	R\$ bilhões	-26,4	-30,3	-26,0	-30,3	-25,4	-46,0	-47,8	-51,1
	% do PIB ^{CF}	-3,9	-4,4	-3,8	-4,4	-3,7	-6,6	-6,8	-7,2
	p-valor	0,38	0,46	0,31	0,38	0,38	0,23	0,23	0,19
2017	R\$ bilhões	-53,5	-54,1	-53,1	-54,1	-41,0	-50,7	-58,5	-54,5
	% do PIB ^{CF}	-7,5	-7,6	-7,5	-7,6	-5,9	-7,2	-8,2	-7,6
	p-valor	0,15	0,19	0,15	0,19	0,35	0,19	0,19	0,19
2018	R\$ bilhões	-33,7	-34,2	-33,2	-34,2	-4,3	-10,8	-18,5	-15,8
	% do PIB ^{CF}	-4,7	-4,8	-4,7	-4,8	-0,6	-1,6	-2,6	-2,3
	p-valor	0,38	0,46	0,50	0,50	0,92	0,77	0,81	0,65
Acumulado	R\$ bilhões	-137,9	-144,6	-136,4	-144,7	-82,6	-139,8	-158,9	-160,2
	% do PIB ^{CF}	-4,9	-5,1	-4,9	-5,1	-3,0	-5,0	-5,6	-5,6
	p-valor	0,19	0,31	0,31	0,19	0,62	0,42	0,42	0,50
RSME	Pré	0,62	0,59	0,62	0,59	1,13	1,25	1,21	1,39
	Pós	1,77	1,84	1,75	1,84	1,21	1,87	2,07	2,09

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético. Para esse exercício retirou-se os 221 municípios de MG e ES já incluídos nas demais análises (215 da sub-bacia, 5 do litoral adjacente e Anchieta – ES).

Em suma, os resultados sugerem a presença de impacto do rompimento sobre o PIB conjunto dos estados de MG e ES e sobre o PIB de diversos recortes sub-regionais desses estados. Uma característica importante da perda estimada é de que o impacto tende a ser menor nas sub-regiões analisadas, como proporção do impacto total, quando comparado à perda estimada na sub-região complementar (efeito de propagação). Essa proporção do impacto total está em linha com a proporção relativa de PIB entre essas sub-regiões. Entretanto, em linha com o esperado, o impacto nas sub-regiões mencionadas (mais próximas ou diretamente atingidas pelos rejeitos ou ainda pertencentes à cadeia produtiva) tende a ser mais intenso como proporção do PIB contrafactual. De modo que as sub-regiões analisadas, embora tenham sofrido um impacto menor em relação ao impacto total, tiveram uma perda maior em relação ao seu PIB contrafactual. Esses resultados apontam para uma consistência interna entre as diversas aferições de impacto para diferentes sub-regiões que, a princípio, poderiam trazer resultados dissonantes. Assim, os resultados tomados em conjunto trazem maior robustez e plausibilidade para as evidências de impactos estimadas.

Por fim, os resultados sugerem a existência de efeitos da propagação do choque do rompimento para a região complementar, ou seja, o PIB agregado dos municípios dessa região sofreu parte dos efeitos do rompimento sobre a sua atividade econômica. Todavia, a análise de sensibilidade e robustez dos municípios da fronteira sugere que estes efeitos sejam heterogêneos. Uma possível interpretação para a ausência de impacto diferencial entre os conjuntos de municípios da fronteira é de que o efeito tende a se dissipar ao longo da região complementar, tornando-se nulo nos municípios limítrofes. Vale ressaltar, porém, que esse resultado não descarta a possibilidade de os efeitos do rompimento ultrapassarem os limites geográficos do estado afetando os municípios da fronteira de MG pertencentes aos demais estados (exceto o estado do ES).

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo estima as perdas econômicas devido ao rompimento da Barragem de Fundão em Minas Gerais, ocorrido em 2015. A investigação apresentada tem um duplo objetivo. Primeiramente, documentar o efeito do rompimento sobre o Produto Interno Bruto (PIB) – ou renda agregada – dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, conjuntamente, e sobre diversos recortes sub-regionais desses estados a partir dos dados divulgados pelo IBGE. Em segundo lugar, fornecer evidências de propagação do choque do rompimento (*spillover*) para a sub-região complementar, definida como o conjunto dos municípios dos estados de MG e ES, excluindo as sub-regiões analisadas. A sub-região complementar corresponde a um conjunto de municípios sob os quais ainda não se tinha estimado a perda de renda agregada. Adicionalmente, são fornecidas análises de sensibilidade e robustez da estimativa de impacto agregado sobre o PIB conjunto de MG e ES que trazem evidências de que os impactos encontrados são atribuíveis ao desastre e não a outros fatores idiossincráticos que possam ter afetado os estados de MG e ES.

Esta análise complementa uma sequência de estudos anteriores onde analisa-se os efeitos sobre o PIB conjunto e das sub-regiões dos estados diretamente atingidos pelo rompimento (FGV, 2019a; FGV, 2020i; FGV, 2021a). No primeiro conjunto de resultados, atualizam-se as estimativas de perdas de PIB de diversos recortes sub-regionais nestes estados para o ano de 2018. Dentre os recortes estão a sub-bacia do Rio Doce, o Litoral adjacente e o município de Anchieta (ES), este último já presente em estudos anteriores em face da sua importância no processo de pelotização e escoamento do minério via porto de Ubu. Através dessa estimação, obtém-se como resíduo uma estimativa preliminar da propagação sobre a sub-região complementar. Adicionalmente, incluiu-se a estimação do impacto sobre 40 municípios, que em conjunto com os municípios do Litoral adjacente totalizam os 45 municípios definidos como atingidos pelo TTAC⁴.

No segundo conjunto de resultados, apresentam-se evidências de propagação do choque do rompimento para a sub-região complementar. Nesse sentido, estimam-se os impactos, diretamente, seguindo a linha metodológica utilizada para as demais sub-regiões, através da estimação por Controle Sintético (Abadie & Gardeazabal, The economy costs of conflict: A case study of the Basque Country, 2003; Abadie, Diamond,

⁴ BRASIL. Tribunal Regional Federal da 1ª Região. Ação Civil Pública nº 006975861.2015.4.01.3400. **Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC)**. Brasília, 2 mar. 2016.

& Hainmueller, Synthetic control methods for comparative studies: Estimating the effect of California's tobacco control program, 2010). Os resultados sugerem uma perda nessa região maior que aquela estimada para as demais sub-regiões, como proporção do impacto total nos estados de MG e ES, embora sua intensidade seja menor (medida pela proporção em relação ao PIB contrafactual).

O terceiro conjunto de resultados foca nos exercícios de robustez e sensibilidade para as estimativas do impacto conjunto de MG e ES, incluindo o placebo temporal e a análise do impacto sobre os municípios da fronteira. Na análise de placebo temporal, estima-se o impacto sobre o PIB conjunto de MG e ES supondo que o desastre ocorreu em 2013 (ao invés de 2015). Desse modo, constrói-se a região sintética com base na trajetória do PIB de MG e ES anterior ao ano hipotético e calcula-se o impacto em 2013 e 2014. Com isso, verifica-se a capacidade do método de identificar o impacto do rompimento num período no qual se sabe não ocorreu o rompimento ou outro choque equivalente. Os exercícios de placebo temporal não indicam evidências de impacto em anos anteriores, apresentando inversões de sinais e grande variabilidade nas estimativas.

No segundo exercício de robustez estima-se o efeito do rompimento sobre os municípios da fronteira de MG, excluindo aqueles pertencentes à fronteira do ES. Esta estimativa baseia-se no método de Diferenças em Diferenças que mede impactos diferenciais sobre as variações do PIB antes e depois do rompimento entre a unidade atingida e o grupo de controle. Os resultados dessa análise indicam ausência de impacto nos municípios da fronteira, o que sugere um efeito heterogêneo nos municípios da sub-região complementar. Além disso, esse resultado fornece evidência de identificação do efeito estimado para MG e ES, conjuntamente, sugerindo que o impacto estimado está associado ao rompimento e não a outros fatores específicos e essa região atuantes concomitantemente.

Foram empregados os métodos de Controle Sintético no primeiro conjunto de resultados que investiga o impacto nas sub-regiões mencionadas e no segundo conjunto de resultados que examina evidências de propagação do choque do rompimento para a sub-região complementar. Essa metodologia foi utilizada em outros estudos sobre os impactos do rompimento da Barragem de Fundão, no tocante à produção extrativa mineral, por exemplo, Castro e Almeida (2019) encontram impactos negativos para Espírito Santo (-25,01%) e em Minas Gerais (-15,58%) entre novembro de 2015 a novembro de 2016⁵. Especificamente sobre a produção industrial total, os autores

⁵ Neste trabalho, a frequência dos dados é mensal.

encontram uma queda de 18,22% no estado capixaba, sem impacto significativo em Minas Gerais.

Resumidamente, o método de Controle Sintético fornece um procedimento para obter uma região sintética que replica o comportamento do PIB da região atingida (digamos, MG e ES conjuntamente) no período anterior ao rompimento. A diferença entre o PIB observado da região atingida e o PIB estimado da região sintética no período pós-rompimento fornece a estimativa de impacto. Também na análise de propagação do choque do rompimento, implementa-se o método de Diferenças em Diferenças. Grosso modo, o método compara o comportamento de duas unidades, chamadas “tratado” e “controle”, no caso, as sub-regiões dos estados de MG e ES (tratamento) e sub-regiões de demais estados (controle), por exemplo. Com base na tendência da região de controle, pode-se investigar se desvios em relação a essa tendência no período em torno do rompimento trazem evidências de efeitos dos seus sobre o PIB dessas sub-regiões, a partir de inferência estatística convencional.

Em resumo, este estudo amplia o escopo da análise anterior fornecendo uma estimação dos impactos potenciais sobre as demais regiões dos estados de MG e ES – referidas, em conjunto, como região complementar – que não foram contempladas na investigação das sub-regiões. Essa análise permite quantificar e corroborar os impactos mensurados para as sub-regiões atingidas mencionadas, relativamente ao impacto total, evidenciando o grau de interação econômica entre as sub-regiões atingidas mencionadas e a região complementar. Além disso, apresenta-se a estimação dos impactos do rompimento sobre os municípios da fronteira do estado de Minas Gerais. Esta análise permite avaliar a dimensão geográfica dos efeitos do desastre bem como prover evidências sugestivas de que o impacto agregado mensurado para os estados em conjunto são decorrentes do rompimento e não de outros choques concomitantes ao rompimento e específicos a esses estados.

O texto segue da seguinte forma: a Seção 2 descreve brevemente os recortes sub-regionais analisados. A Seção 3 apresenta a metodologia baseada na técnica econométrica de Controle Sintético utilizada na estimação dos impactos sobre o PIB. A Seção 4 mostra os resultados das estimações para cada recorte separadamente e a Seção 5 fornece uma síntese dos resultados para a região diretamente impactada. Na sequência, a Seção 6 apresenta uma breve descrição e os resultados para as regiões indiretamente impactadas. A Seção 7 discute a análise de robustez e sensibilidade do impacto total sobre MG e ES. A Seção 8, por sua vez, apresenta os impactos sobre os municípios da fronteira de MG estimados através da técnica econométrica de Diferenças em Diferenças. Por fim, a Seção 9 fornece uma conclusão.

2 PERFIL DAS SUB-REGIÕES ANALISADAS

Com o objetivo de explorar o impacto do rompimento da Barragem de Fundão em 2015, localizada em Mariana (MG), sobre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, este estudo implementa duas técnicas econométricas (Controle Sintético e Diferenças em Diferenças, descritas na próxima seção) em recortes sub-regionais de ambos os estados. Desse modo é possível examinar os efeitos potencialmente heterogêneos sobre o PIB e a Renda Agregada de diferentes níveis de desagregação desses territórios. A seguir, apresenta-se uma descrição do perfil econômico dos diferentes recortes sub-regionais utilizados na análise de impacto, dando ênfase no PIB como variável de interesse.

A Figura 1 destaca os estados de MG e ES juntamente com as sub-regiões analisadas neste estudo. Em primeiro lugar, destaca-se o município de Mariana (MG), o epicentro do desastre (círculo amarelo). A partir daí os rejeitos percorreram os municípios ao longo da calha do Rio Doce desde Minas Gerais até o Espírito Santo, onde tem sua foz no oceano Atlântico. Os 40 municípios que margeiam o Rio Doce estão destacados em marrom na figura. Em conjunto com os 5 municípios do Litoral Adjacente (em laranja), formam os 45 municípios definidos como atingidos pelo TTAC⁶.

Além destes recortes, analisa-se o impacto nos municípios pertencentes à sub-bacia do Rio Doce (em azul escuro). A sub-bacia do Rio Doce integra as 76 sub-bacias hidrográficas do Brasil. Esta é composta por 215 municípios (sendo 194 municípios em Minas Gerais e 21 no Espírito Santo) que possuem alguma parte do seu território contida nas delimitações da sub-bacia hidrográfica. O conceito de sub-bacia foi proposto pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (Dnaee) em 1972, de modo que a partir das bacias hidrográficas subdividiu-se em regiões menores para o gerenciamento das informações (Agência Nacional de Águas, s.d.).

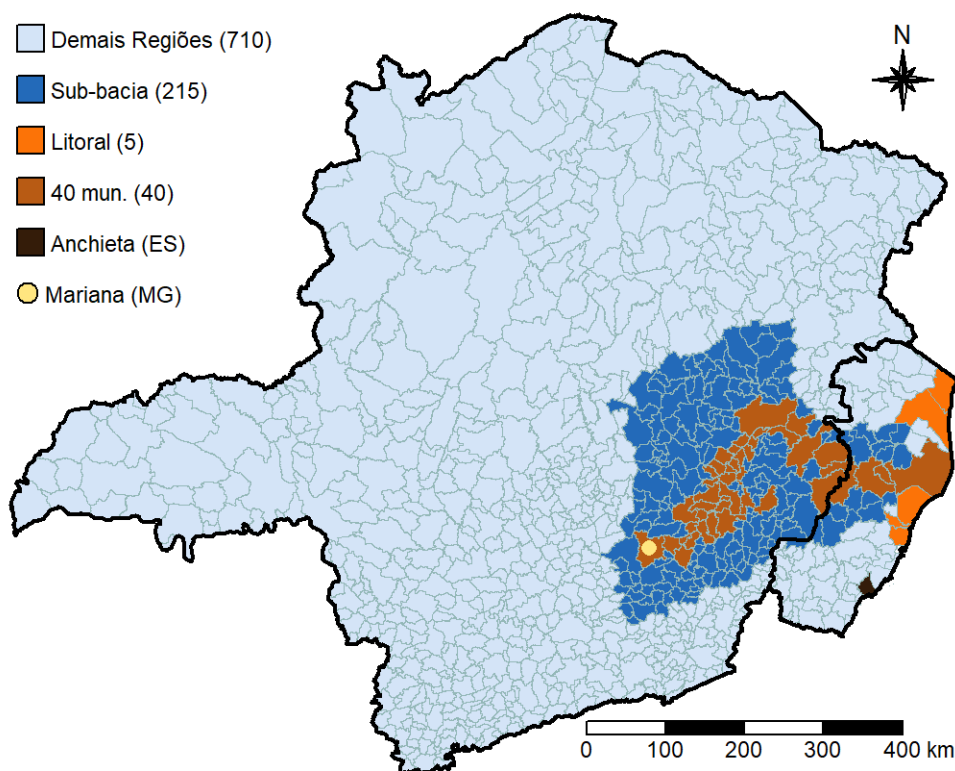
Em seguida, destaca-se o município de Anchieta (ES) (em preto) que integra a cadeia produtiva de exportação do minério de ferro através do processo de pelletização pela mineradora Samarco S.A. e exportação do minério via porto de Ubu.

Por fim, examina-se o impacto do rompimento sobre a região complementar constituída dos demais municípios de MG e ES excluindo aqueles da sub-bacia do Rio Doce, Litoral e Anchieta (ES) (uma vez que os 40 municípios integram a sub-bacia do Rio Doce).

⁶ A lista de municípios atingidos considerada no presente documento é composta pelo conjunto de 45 municípios citados no TTAC (BRASIL, 2016) e na Deliberação nº 58 do CIF (BRASIL, 2017) além de Ponte Nova, devido ao fato de a comunidade de Chopotó, localizada nesse município, ter sido atingida. Ressalta-se que essa lista de municípios atingidos não configura um posicionamento da FGV quanto à delimitação de áreas atingidas para qualquer finalidade.

Como mostra a figura, a região complementar é composta por 710 municípios. Examina-se a região complementar utilizando tanto a metodologia de Controle Sintético na região como um todo – para investigar a potencial existência de propagação do choque para outras regiões indiretamente afetadas –, quanto através da metodologia de Diferenças em Diferenças utilizando os municípios fronteiriços, dentro e fora de MG, em busca de evidências de choques específicos ao estado que podem confundir o efeito do rompimento.

Figura 1 — Recortes sub-regionais de MG e ES utilizados na estimação do impacto do rompimento



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Números indicados em parênteses nas legendas correspondem ao total de municípios contidos na área sob análise.

Dentre os 45 municípios atingidos, 5 deles foram intitulados como “Litoral Adjacente” por se localizarem na costa do litoral capixaba próximos a Linhares/ES e estão presentes em estudos anteriores, são eles: Aracruz, Conceição da Barra, Fundão, São Mateus e Serra. A Seção 4.2 analisa, separadamente, o impacto sobre o PIB agregado dos 40 municípios restantes, sendo 4 municípios no Espírito Santo e 36 em Minas

Gerais. A Tabela 1 apresenta a lista completa dos municípios definidos como atingidos até o presente ano.

Tabela 1 — Municípios atingidos

Minas Gerais		Espírito Santo
Aimorés	Marlândia	Aracruz*
Alpercata	Naque	Baixo Guandu
Barra Longa	Periquito	Colatina
Belo Oriente	Pingo-D'Água	Conceição da Barra*
Bom Jesus do Galho	Ponte Nova	Fundão*
Bugre	Raul Soares	Linhares
Caratinga	Resplendor	Marilândia
Conselheiro Pena	Rio Casca	São Mateus*
Córrego Novo	Rio Doce	Serra*
Dionísio	Santa Cruz do Escalvado	
Fernandes Tourinho	Santana do Paraíso	
Galileia	São Domingos do Prata	
Governador Valadares	São José do Goiabal	
Iapu	São Pedro dos Ferros	
Ipaba	Sem-Peixe	
Ipatinga	Sobralia	
Itueta	Timóteo	
Mariana	Tumiritinga	

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Área de abrangência definida pelo TTAC. *Litoral adjacente.

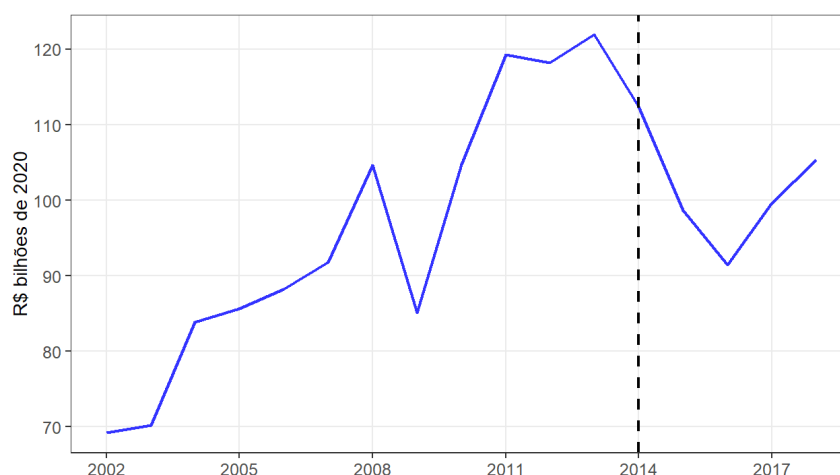
Na sequência, faz-se uma descrição da trajetória do PIB agregado dos diversos recortes sub-regionais analisados neste estudo, apresentando evidências de queda do produto no período subsequente ao desastre em 2015 e uma recuperação parcial em 2017-2018. Como será mostrado, esse comportamento do PIB é compartilhado por todos os recortes com algumas especificidades por sub-região. Esta análise busca explorar evidências dos potenciais efeitos sobre as regiões diretamente impactadas pelo desastre.

O Gráfico 1 apresenta a trajetória do PIB agregado dos municípios que compõem a sub-bacia do Rio Doce de 2002 a 2018. Destaca-se o ano de 2014 como o último ano anterior ao desastre. Como é possível notar, o PIB da região, em valores de reais de 2020, apresenta uma trajetória crescente no período anterior ao desastre com uma forte queda durante a crise financeira de 2008. Já no período pós-desastre há uma queda significativa de 17,7% entre 2014 e 2016, o período datado da última recessão brasileira.

É importante notar que a queda do PIB já se inicia em 2014 e que o rompimento ocorreu em novembro de 2015, de modo que não seria possível atribuir alguma evidência do impacto do rompimento a essa queda inicial.

Como veremos a seguir, esse comportamento do PIB da sub-bacia do Rio Doce é bastante similar entre os demais recortes sub-regionais. Por essa razão, a utilização da técnica de Controle Sintético se faz necessária pois permite controlar efeitos de choques concomitantes que ocorreram de forma paralela entre as regiões afetadas e aquelas que compõem a região sintética.

Gráfico 1 — PIB agregado dos municípios da sub-bacia do Rio Doce



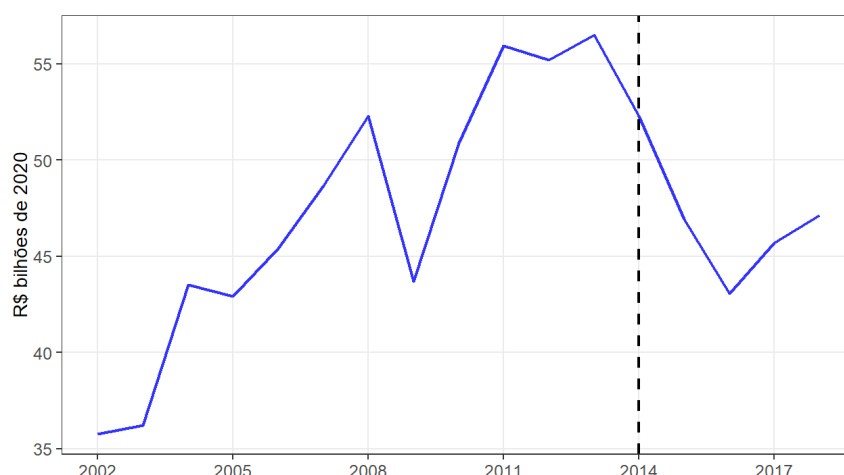
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: A sub-bacia do Rio Doce é composta por 215 municípios de MG e ES.

O Gráfico 2, por sua vez, mostra a trajetória do PIB agregado dos 40 municípios atingidos no período 2002 a 2018, destacando o ano de 2014 pré-rompimento. Os valores estão em reais de 2020. Como é possível observar, o comportamento da variável de interesse é bastante similar ao comportamento do PIB agregado da sub-bacia do Rio Doce analisada na seção anterior, embora esta possua uma abrangência maior em número de municípios. Em conjunto, os 40 municípios representam cerca de 46,5% do PIB agregado e 40,0% da população da sub-bacia do Rio Doce em 2014.

Desse modo, as mesmas características estão presentes como, por exemplo, crescimento constante no período pré-rompimento (exceto pela crise financeira em 2008) e queda expressiva do PIB agregado após 2014 com recuperação em 2017-2018. Ademais, a queda no PIB agregado tem início já em 2013 e se aprofundou no período posterior ao desastre.

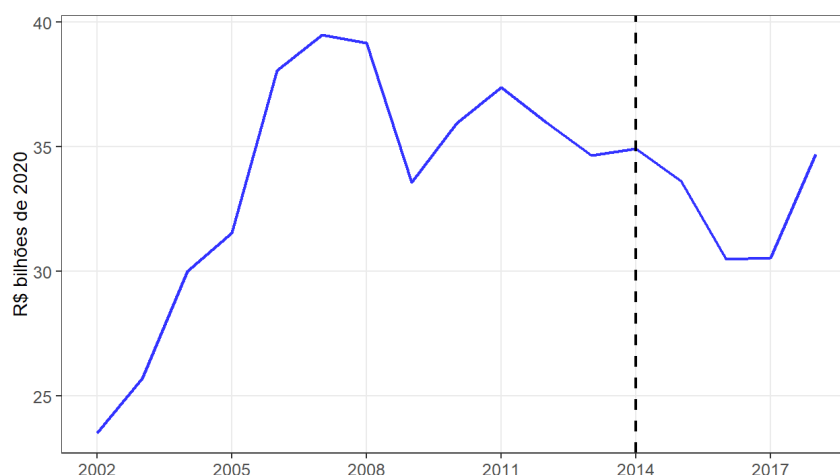
Gráfico 2 — PIB agregado dos 40 municípios atingidos



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Em relação ao Litoral Adjacente, o Gráfico 3 mostra o comportamento do PIB agregado dos municípios que o compõem no período antes (pré-2014, destacado no gráfico) e depois do rompimento. Diferentemente do comportamento dos recortes sub-regionais analisados anteriormente, o PIB do Litoral Adjacente apresenta uma trajetória crescente até 2007, com crescimento de 10,9% ao ano, e, a partir daí, PIB conjunto é decrescente no período anterior ao desastre (à taxa de -1,7% a.a.). Já no período pós-rompimento, há uma forte queda anual em 2016 (-9,3% ante 2015), que persiste até 2017 com uma recuperação em 2018.

Gráfico 3 — PIB agregado dos municípios do Litoral Adjacente de ES

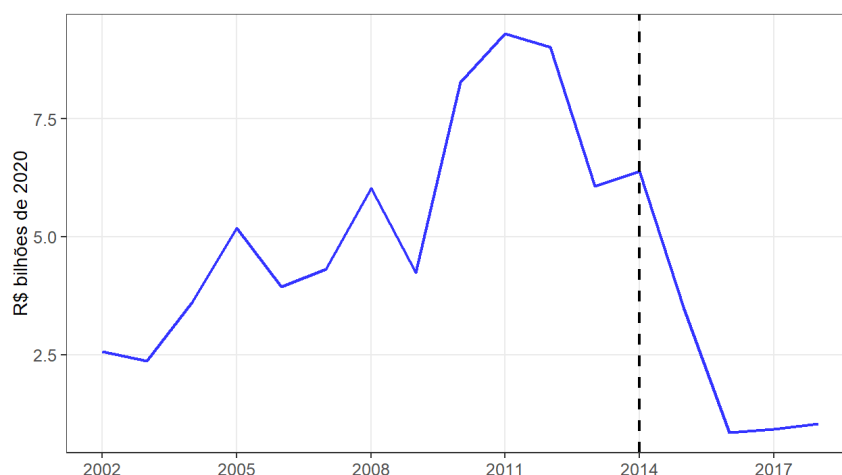


Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: O Litoral Adjacente é composto por 5 municípios do litoral capixaba: Aracruz, Conceição da Barra, Fundão, São Mateus e Serra.

Em seguida, descreve-se o comportamento do PIB do município de Anchieta (ES), como apresentado no Gráfico 4. Em linha com a análise dos 40 municípios, o PIB de Anchieta (ES) apresenta uma tendência de crescimento no período pré-rompimento (anterior ao ano de 2014, destacado no gráfico), com significativo aumento até 2011. Também de forma similar à análise dos 40 municípios, é possível notar uma queda no PIB que se inicia anterior ao rompimento. Entretanto, uma diferencial em relação a esta análise é a profunda queda do PIB no período pós-rompimento, em especial no ano de 2016 cuja queda foi de 75,7% ante 2014, fazendo com que o PIB atingisse níveis inferiores ao observado em toda série. Mais ainda, o até o ano de 2018 o PIB não apresenta uma recuperação e se mantém em níveis historicamente baixos.

Gráfico 4 — PIB do município de Anchieta (ES)



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Uma vez examinada a trajetória do PIB das diversas regiões impactadas pelo rompimento, a análise a seguir explora o comportamento do produto da região complementar no período pré e pós-2014. Esse estudo é importante para identificar potenciais efeitos de propagação (ou “*spillover*”) sobre outras regiões dos estados de MG e ES que guardam conexões econômicas com as áreas supracitadas. Essas interações podem estar relacionadas a questões de comércio entre as regiões, mas também relacionadas a cadeias produtivas de fornecimento de bens intermediários (à exemplo do município de Anchieta – ES, discriminado neste estudo), bem como questões relativas a regras fiscais e tributárias, grau de integração dos mercados de trabalho e residência física de empresas com múltiplas plantas de produção.

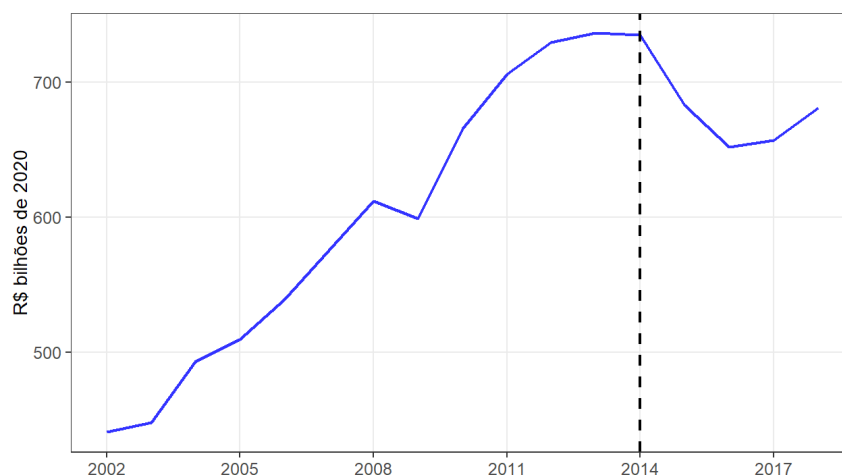
Como um primeiro passo na investigação de evidência de propagação do choque do rompimento sobre as demais regiões do estado, apresenta-se a seguir o comportamento do PIB da região complementar no período em torno do desastre. Complementarmente, as Seções 6 e 8 fornecem uma análise dos potenciais impactos utilizando as metodologias econométricas mencionadas.

Nessa linha, o Gráfico 5 mostra a série do PIB agregado dos municípios da sub-região complementar no período anterior ao rompimento (até 2014 destacado no gráfico) e após o mesmo, a preços de 2020. É possível observar que o PIB da sub-região complementar apresenta um crescimento relativamente estável no período pré-rompimento (em torno de 4,4% a.a.), com uma queda devido à crise financeira de 2008. No período pós-desastre o PIB da sub-região exibe uma queda acentuada até 2016, chegando a níveis inferiores a 2010. Nos dois anos seguintes há uma recuperação do PIB.

É importante ressaltar a diferença em termos de magnitudes do PIB da região complementar e da região diretamente afetada pelo rompimento analisada anteriormente. De fato, a título de comparação, o PIB agregado da região complementar corresponde a 4,8 vezes o PIB das demais regiões impactadas em 2014, ano anterior ao desastre. Por essa razão, choques na sub-região complementar podem gerar grandes perdas em termos absolutos (de fato, como será discutido na Seção 5, a maior proporção do impacto total encontrado se deve à região complementar).

Outro ponto importante é a ressalva de que a queda no período pós-rompimento (bem como a recuperação subsequente) por si só não é um indicativo do efeito do desastre, uma vez que pode haver diversos outros choques concomitantes. Desse modo, a técnica de Controle Sintético busca exatamente obter evidências do efeito do rompimento que levem em conta choques agregados da economia.

Gráfico 5 — PIB agregado dos municípios da sub-região complementar



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Para esse exercício retirou-se os 221 municípios de MG e ES já incluídos nas demais análises (215 da sub-bacia, 5 do litoral adjacente e Anchieta – ES).

Para completar a descrição dos recortes sub-regionais, apresentam-se as estatísticas populacionais e de composição setorial no período em torno do rompimento. A Tabela 2 mostra a população das sub-regiões entre 2014 e 2018. Vale destacar que os 45 municípios atingidos correspondem a 9,1% da população total de MG e ES no período.

Tabela 2 — População das sub-regiões (milhões de habitantes)

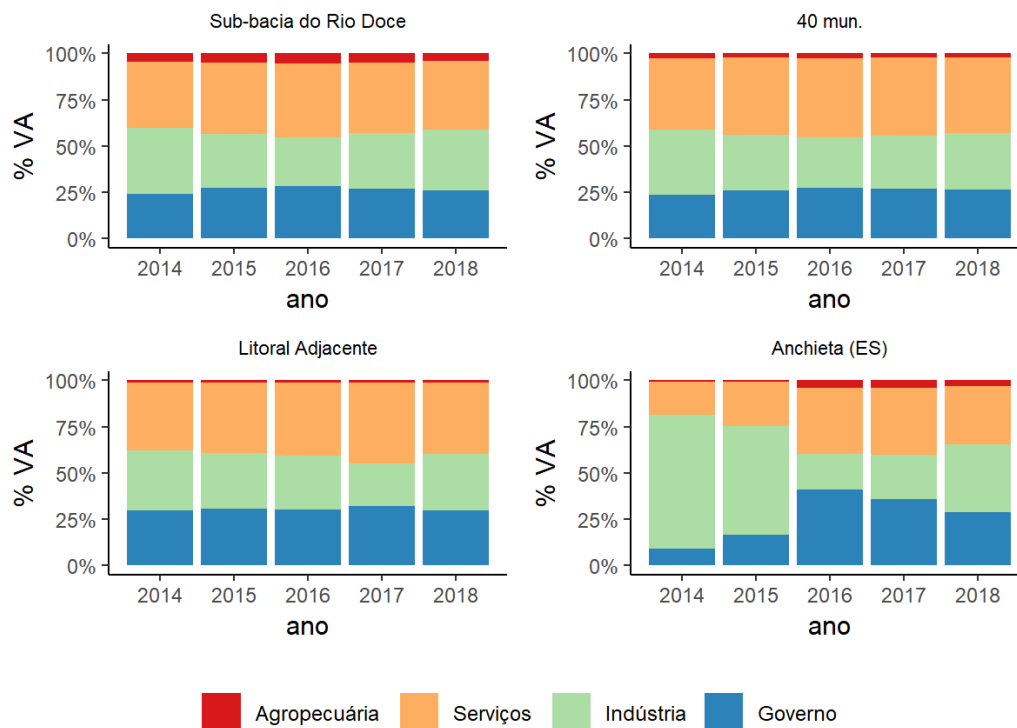
Ano	MG e ES	Sub-bacia	40 mun.	Litoral	Anchieta
2014	24,619	3,700	1,482	0,743	0,027
2015	24,799	3,719	1,493	0,756	0,028
2016	24,971	3,737	1,503	0,769	0,028
2017	25,136	3,754	1,513	0,782	0,029
2018	25,013	3,713	1,503	0,787	0,029

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Em relação à composição setorial, O Gráfico 6 mostra a participação dos setores da agropecuária, indústria, serviços e serviços governamentais – que incluem os gastos e tributos – no período de 2014 a 2018, para as sub-regiões diretamente atingidas. Como discutido nesta seção, o PIB de todos os recortes apresentou queda após 2014. Assim, a figura mostra que essa queda foi acompanhada de uma redução relativamente maior no setor da indústria que contém a indústria extrativa mineral. Embora esse comportamento seja observado para todas as sub-regiões reportadas, o município de Anchieta (ES) se destaca pela queda substancial em 2016 com recuperação parcial nos

dois anos seguintes. Por outro lado, a queda de participação nas demais sub-regiões é relativamente menos acentuada embora ainda presente.

Gráfico 6 — Composição setorial dos PIBs das sub-regiões



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

3 METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DO IMPACTO DO ROMPIMENTO

Apresentam-se brevemente nesta seção as metodologias aplicadas para a mensuração do impacto na renda agregada. Utiliza-se, primeiramente, a técnica econométrica de Controle Sintético proposta por Abadie e Gardeazabal (2003) e Abadie, Diamond e Hainmueller (2010) que consiste em construir uma região hipotética, semelhante à unidade atingida, formada por uma média ponderada de regiões que, se conjectura, não foram afetadas. Esse procedimento tem como objetivo estimar os pesos dessa média utilizando as informações do período anterior ao rompimento. O impacto na renda agregada será, portanto, a diferença entre o PIB da região atingida e o PIB da respectiva região hipotética no período pós-rompimento, entre 2015-2018. O detalhamento da estimação dos impactos via controle sintético e o levantamento da literatura sobre a avaliação econômica de desastres se encontram no Produto 4 do EDT 2 (FGV, 2019a). Na sequência, a subseção seguinte descreve a técnica econométrica de Diferenças em Diferenças utilizada na Seção 8 a fim de estimar os potenciais efeitos sobre os municípios que estão geograficamente distantes de Mariana (MG), onde ocorreu o desastre.

3.1 Controle Sintético e a construção dos contrafactuais

Assim como no Produto 4 do EDT 2 (FGV, 2019a), constroem-se cinco estratégias de contrafactuais para as estimativas a nível de unidade federativa e sub-bacia. Entre os cinco contrafactuais, o primeiro considera, de forma simples, a variação do PIB brasileiro sem os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Os demais cenários contrafactuais são construídos por meio do método de Controle Sintético e descrito, detalhadamente, na seção 3 do Produto 4 do EDT 2 (FGV, 2019a). Cada cenário considera variáveis diferentes na caracterização e construção do estado hipotético. Estas variáveis são referidas como covariadas. Em todos os resultados apresentados ao longo deste documento, os números referentes aos contrafactuais (1, 2, 3, 4, 5) correspondem às seguintes especificações das covariadas:

- Contrafactual 1: taxa de crescimento do Brasil excluindo MG e ES entre 2014 e 2017;
- Contrafactual 2: passado do PIB *per capita* de 2002 a 2014;
- Contrafactual 3: média das demais covariadas de 2002 a 2014 e PIB *per capita* de 2002 a 2004 e de 2011 a 2014;

- Contrafactual 4: média das demais covariadas e a média do PIB *per capita* de 2002 a 2014;
- Contrafactual 5: média das demais covariadas de 2002 a 2014 e PIB *per capita* de 2011 a 2014.

As demais covariadas são relacionadas à estrutura produtiva e a fatores de produção importantes para a determinação do nível de produção dos estados, são elas: densidade populacional e composição do PIB (participação dos setores agropecuário, indústria e serviços). Vale ressaltar que no caso das estimativas para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo acrescentaram-se as covariadas de capital humano, área produtiva e percentual do setor extrativo no PIB, uma vez que essas informações são obtidas apenas em nível estadual.

Por meio dessa metodologia, calculam-se os pesos de cada unidade comparável (grupo de controle) para compor uma região sintética que seja semelhante à unidade atingida, tanto na dinâmica da renda agregada quanto em relação às outras características capturadas pelas covariadas. Os pesos são escolhidos de forma a minimizar a diferença entre a região sintética e a atingida pelo rompimento, com base nas informações contidas nas covariadas. Desse modo, o ajuste da variável de interesse estimada (nesse caso, o PIB da região analisada) em relação ao observado indica a qualidade da estimação. Para o caso das unidades federativas, por exemplo, como os pesos são escolhidos utilizando a informação pré-rompimento, é possível criar um estado hipotético de Minas Gerais e Espírito Santo tal que o rompimento não ocorreu. Esse estado é composto com base nas informações dos outros estados brasileiros os quais, por hipótese, não foram afetados pelo rompimento. O mesmo é feito para todas as demais regiões analisadas.

3.2 Diferença-em-Diferenças sobre os municípios da fronteira de MG

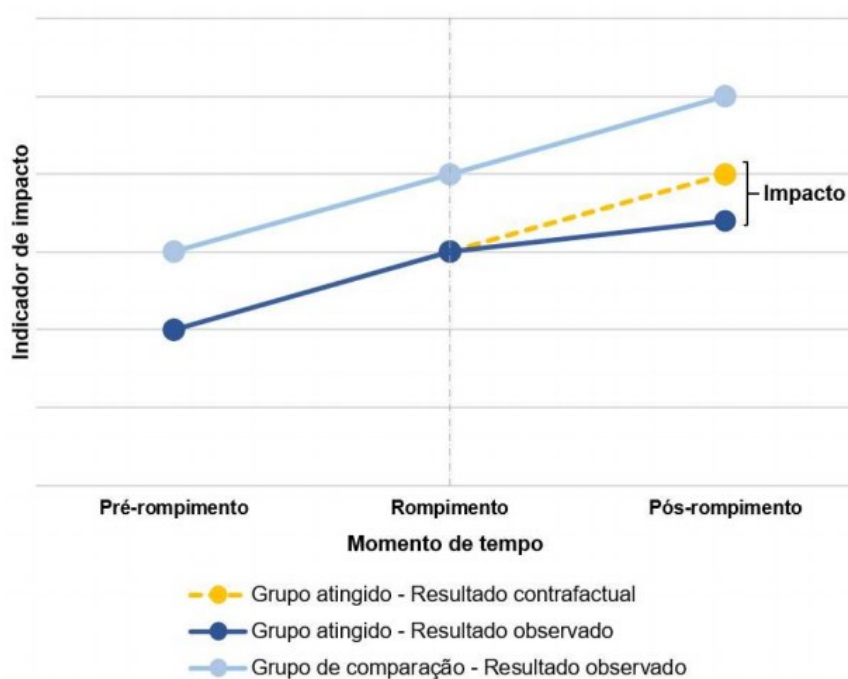
Esta seção introduz uma metodologia alternativa para se analisar o impacto do rompimento da Barragem de Fundão nos indicadores de renda agregada: os modelos de Diferença-em-Diferenças. Essa estratégia é amplamente utilizada como padrão em estudos sobre avaliação de impactos socioeconômicos⁷, e está presente também em

⁷ CARD, D. The impact of the Mariel boatlift on the Miami labor market. *ILR Review*, 1990, p. 245-257; e JOSHUA ANGRIST, G. I. **Identification and estimation of local average treatment effects**. National Bureau of Economic Research, 1995.

estudos anteriores relacionados ao rompimento (FGV, 2019b; FGV, 2019c; FGV, 2019d).

O Gráfico 7 a seguir – replicada de FGV (2019c) no estudo com enfoque nos indicadores de educação dos 45 municípios ao longo do Rio Doce – ilustra intuitivamente o processo de estimação do modelo de Diferença-em-Diferenças e contribui no entendimento das hipóteses necessárias para se obter estimadores com propriedades desejáveis (consistentes e não viesados) do impacto do rompimento sobre o indicador de interesse. É importante ressaltar que isso é válido inclusive quando o valor é considerado nulo, a saber, estatisticamente não significativo sob a hipótese de que não houve impacto.

Gráfico 7 — Ilustração do método de Diferença-em-Diferenças



Fonte: FGV (2019c).

No presente estudo, define-se como “Grupo atingido” o conjunto de municípios que, sob hipótese a ser testada, são considerados atingidos na dimensão de perda de renda agregada em face do rompimento da Barragem de Fundão. O grupo de comparação, por sua vez, corresponde ao conjunto de municípios os quais não foram atingidos (por hipótese) e possuem características que contemplam as hipóteses necessárias à estimação apontadas ao longo desta subseção. O resultado contrafactual aqui tem a mesma interpretação da metodologia de Controle Sintético, apresentada na seção

anterior, correspondendo ao resultado que ocorreria na região caso não houvesse o rompimento.

O primeiro ponto a se destacar é que esse método requer que haja disponibilidade de dados para ambos os grupos (atingido e de comparação) no período anterior ao desastre e no período imediatamente posterior, no sentido de se estimar a perda de renda de curto prazo. Desta forma, ao se calcular a primeira diferença (no tempo), elimina-se a variação temporal dos respectivos grupos (atingido e de comparação), o que também exclui efeitos de características invariantes no tempo, como localização geográfica, dotação de recursos naturais, sendo importante para não enviesar a magnitude do impacto estimado.

Em FGV (2019c), apresentam-se as hipóteses necessárias para que o impacto médio estimado sobre o grupo atingido possa ser interpretado como consequência do rompimento. A proposta desta seção é sintetizar os principais pontos para que os resultados possam ser interpretados. O modelo é denominado Diferença-em-Diferenças em face do procedimento de estimação, que se dá em duas etapas:

1. Primeira diferença: variação média ao longo tempo (“primeiras diferenças”)

$$\Delta y^{atingido} = E[y_i | di = 1, t = 1] - E[y_i | di = 1, t = 0]$$

$$\Delta y^{comparação} = E[y_i | di = 0, t = 1] - E[y_i | di = 0, t = 0]$$

2. Subtrai-se a variação média do grupo de comparação da variação média do grupo atingido (“diferença das diferenças”)

$$Impacto\ médio = \Delta y^{atingido} - \Delta y^{comparação}$$

Dentre o conjunto de hipóteses de identificação do método é importante destacar a referente a “tendências paralelas” sob a qual se pressupõe que, na ausência do rompimento, os indicadores de impacto – neste caso, o PIB dos municípios da fronteira de MG – dos grupos atingidos e de comparação apresentariam evoluções semelhantes ao longo do tempo. A subseção a seguir detalha a aplicação do método a partir das variáveis de interesse.

3.2.1 Aplicação do método

Satisfeitas as hipóteses de identificação, o modelo de Diferença-em-Diferenças é utilizado de duas formas distintas para obter estimativas do impacto do rompimento: i) o efeito médio do rompimento sobre o grupo atingido no período pós-rompimento; e ii) o efeito médio do rompimento sobre o grupo atingido considerando cada ano pós-rompimento individualmente, onde comparam-se as médias em 2014 (ano

imediatamente anterior ao rompimento) e em cada ano pós-rompimento entre os grupos atingido e de comparação (FGV, 2019c).

Cada uma dessas formas é representada por uma equação de especificação diferente que será utilizada no modelo de regressão. A primeira estratégia citada pode ser representada da seguinte maneira:

Equação 1

$$Y_{mt} = \alpha + \beta D_{mt} + \theta D_{mt=2015} + \gamma_m + \rho_t + u_{mt}$$

onde m indexa os municípios; t indica o ano; Y_{mt} corresponde ao indicador de impacto do município m no ano t ; D_{mt} é uma variável binária que assume o valor 1 quando m se refere a um município do grupo atingido no momento pós-desastre ($t \geq 2015$ e $t \leq 2018$) e 0 caso contrário; $D_{mt=2015}$ é similar a D_{mt} , porém assume o valor 1 somente quando m é um município atingido e o ano é 2015⁸; γ_m é o efeito fixo de município; ρ_t é o efeito fixo de ano e u_{mt} corresponde ao termo de erro. O parâmetro de interesse é dado por β , que captura o efeito médio sobre o grupo atingido no período pós-rompimento (FGV, 2019c).

A segunda estratégia citada pode ser representada pela seguinte equação:

Equação 2

$$Y_{mt} = \alpha + \sum_{\substack{\tau=-3, \\ \tau \neq -1}}^3 \beta_{\tau} \times D_{m\tau} + \gamma_m + \rho_{\tau} + e_{mt}$$

onde m indexa os municípios; t indica o ano; τ é definido por $\tau = t - 2015$; Y_{mt} corresponde ao indicador de impacto do município m no ano t (no caso o PIB *per capita* do município); $D_{m\tau}$ é uma variável binária que assume o valor 1 se a observação se refere a um município m do grupo atingido no momento de tempo τ e 0 caso contrário; γ_m é o efeito fixo de município; ρ_{τ} é o efeito fixo de ano e e_{mt} corresponde ao termo de erro. Os parâmetros de interesse são os β_{τ} , que capturam o efeito médio do rompimento sobre o grupo atingido no momento de tempo τ em relação ao ano de referência. Dessa forma, quando τ diz respeito a um ano pós-rompimento, β_{τ} corresponde ao impacto naquele ano específico, sempre tomando como referência o ano imediatamente anterior

⁸ O rompimento da Barragem de Fundão ocorreu em novembro de 2015, no entanto, os indicadores de impacto utilizados na análise possuem periodicidade anual e refletem informações sobre cada ano como um todo. Assim, nos dados de 2015 estão incluídos tanto períodos pré quanto pós-rompimento. Dessa forma, optou-se por incluir nas estimações um parâmetro específico para o ano de 2015, uma vez que incluir esse ano no conjunto de anos pós-rompimento poderia levar a uma possível subestimação dos impactos (considerando que a maior parte do ano de 2015 não se trata de um período pós-rompimento) (FGV, 2019c).

ao rompimento ($t = 2014$, $\tau = -1$). Já para os casos em que τ se refere a um ano pré-rompimento, os parâmetros β_τ podem ser utilizados para verificar a plausibilidade da hipótese de tendências paralelas, uma vez que medem a diferença média entre grupos da diferença entre o ano τ e o ano imediatamente anterior ao rompimento.

Assim como em FGV (2019c), ao estimar os modelos apresentados assegurou-se que os erros-padrão fossem calculados de forma a acomodar a autocorrelação municipal⁹. Ou seja, a capacidade de avaliar precisão e significância estatística dos estimadores de impacto é preservada mesmo que a série de interesse (variável endógena) de cada município seja correlacionada ao longo do tempo. Isto é importante porque os erros-padrão determinam o tamanho dos intervalos de confiança das estimativas. Intuitivamente, esses intervalos oferecem uma medida das incertezas que cercam a estimação, desde problemas na produção dos dados utilizados até a existência de eventos não relacionados com o desastre que podem também influenciar os indicadores de interesse.

Por meio dos intervalos de confiança, é possível avaliar quão precisas são as estimativas obtidas. Um intervalo pequeno significa que, se a magnitude verdadeira estiver dentro do intervalo, então ela estará relativamente próxima ao valor da estimativa. Em contraste, um intervalo demasiadamente amplo permite que, mesmo se a magnitude verdadeira estiver no intervalo, o seu valor possa ser bastante diferente da estimativa, tornando esta última pouco informativa.

⁹ Em outras palavras, os erros-padrão são robustos à heteroscedasticidade intra-*cluster*, sendo os *clusters* da análise compostos por subconjuntos dos municípios da amostra.

4 RESULTADOS NAS SUB-REGIÕES DE MG E ES

Em estudos anteriores estimaram-se os impactos do rompimento para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo considerados como uma unidade atingida para o período pós-desastre entre 2015 e 2016 (FGV, 2019a). Seguindo essa linha, o estudo subsequente atualizou os valores dos impactos agregados para o ano de 2017 (FGV, 2020i) e estendeu as análises para determinadas sub-regiões dos estados supracitados. Esta seção apresenta as atualizações dos impactos para recortes sub-regionais desses estados para 2018. Além das sub-regiões analisadas anteriormente, quais sejam, a sub-bacia do Rio Doce, o Litoral adjacente e o município de Anchieta (ES), esta nota adiciona o recorte dos 40 municípios de MG e ES que, em conjunto com os municípios do litoral, compõem os 45 municípios considerados atingidos pelo TTAC. Além disso, todos os valores foram atualizados a preços de 2020.

Este primeiro conjunto de resultados foca na mensuração (e atualização) da magnitude do impacto do rompimento sobre o PIB dos estados atingidos (considerados como uma unidade) e sobre os diversos recortes sub-regionais desses estados, no período 2015 a 2018, de forma a investigar como o impacto afetou diferentes áreas a partir do impacto inicial em Mariana (MG). Além de fornecer uma perspectiva de valoração, intensidade e localização do impacto, esse exercício pode ser entendido como um teste de consistência interna das estimativas agregadas. Visto que as regiões sintéticas estimadas para cada sub-região analisada são independentes entre si, a comparação entre os seus resultados permite avaliar, em certa medida, a coerência das diversas estimativas em relação ao impacto total.

Nesse sentido, a Seção 5 discute de forma integrada os resultados de todas as sub-regiões apresentando uma primeira estimativa da propagação (ou *spillover*, do termo em inglês) do impacto para outras regiões. A propagação do choque é entendida como o efeito sobre a região complementar (composta dos municípios de MG e ES fora da sub-bacia do Rio Doce, Litoral Adjacente e Anchieta (ES) e mensurada, nesta seção, como o resíduo das estimativas sub-regionais em relação ao impacto total.

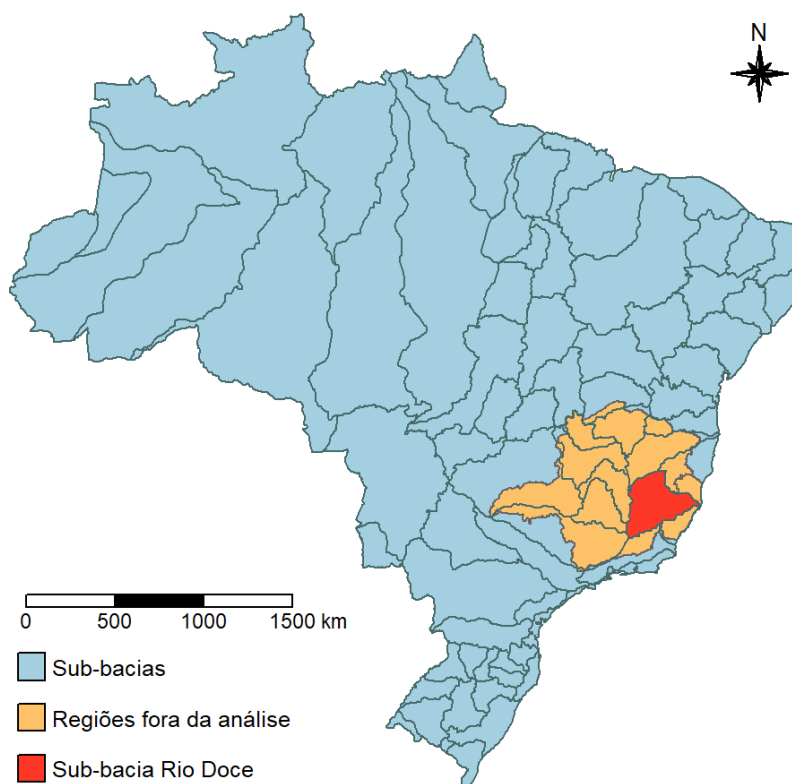
O segundo conjunto de resultados busca investigar em maior detalhe os efeitos de propagação do choque do rompimento sobre a economia dos municípios pertencentes à sub-região complementar, já documentada no estudo “Impactos do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada nos Estados e Sub-Regiões de Minas Gerais e Espírito Santo” (FGV, 2020i). Esses resultados são explorados na Seção 6 que aplica a metodologia de Controle Sintético aos municípios da sub-região complementar e compara os resultados com aqueles obtidos como resíduo nesta seção, e na Seção 8

que lança mão da metodologia de Diferenças em Diferenças para estudar o impacto do rompimento sobre os municípios da fronteira de MG – que fazem parte da região complementar – e fazer uma análise de robustez do impacto total estimado.

4.1 Sub-bacia do Rio Doce

Nesta seção, apresentam-se os resultados da estimação dos impactos ao nível da sub-bacia do Rio Doce no período seguinte ao desastre entre 2015 e 2018. Como descrito nas seções anteriores, as variáveis de interesse como PIB e população municipais foram devidamente agregadas para refletir a classificação geográfica das sub-bacias hidrográficas nacionais. Em particular, a sub-bacia do Rio Doce é composta por 215 municípios dos estados de MG e ES. A Figura 2 a seguir mostra as sub-bacias utilizadas na construção da sub-bacia sintética. A sub-bacia do Rio Doce está representada em vermelho e em laranja estão destacadas as sub-bacias que compõem a área dos estados de MG e ES que foram excluídas da composição da região sintética, uma vez que essas áreas potencialmente sofreram os efeitos do impacto como será discutido na Seção 6.

Figura 2 — Sub-bacias hidrográficas e sua utilização na estimação do impacto



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados da ANA (BRASIL, s.d.).

Observação: A sub-bacia do Rio Doce é composta por 215 municípios de MG e ES.

Nesse sentido, a Tabela 3 apresenta os resultados do impacto sobre o PIB da sub-bacia do Rio Doce entre 2015 e 2018 sob diversas formas alternativas de estimação da sub-bacia sintética como descrito na Seção 3. Além disso, os impactos para cada contrafactual foram calculados a partir das séries do PIB com e sem ajuste pelo preço do minério de ferro. Os valores estão em reais de 2020¹⁰.

Em relação ao impacto acumulado no período, a perda de PIB da sub-bacia do Rio Doce entre as diversas estimativas da região sintética varia entre um mínimo de R\$ 25,7 bilhões (Contrafactual 2 sem ajuste) e um máximo de R\$ 93,3 (Contrafactual 5 com ajuste). Uma medida objetiva da qualidade do ajustamento da estimativa da região sintética é a estatística do RMSE¹¹ apresentada nas duas últimas linhas da tabela. Quanto menor o valor do RMSE, melhor a qualidade do ajuste da trajetória contrafactual da região sintética em relação à região considerada tratada (isto é, menor é a distância entre as duas séries). Assim, um critério padrão utilizado na literatura é a escolha do menor RMSE pré-rompimento que mostra o ajuste sem os efeitos do rompimento. Sob esse critério, os Contrafactuais 2 e 3 apresentam os menores RMSE para ambas as estimativas, com e sem o ajuste pelo preço do minério de ferro. Uma vez que ambos os estados possuem uma importante participação da indústria extrativa mineral, a estimativa com ajuste pelo preço do minério de ferro foi escolhida como a estimativa de referência por permitir mitigar os efeitos (amplificadores ou redutores) do preço da *commodity* sobre o impacto mensurado no PIB da sub-bacia do Rio Doce. Esta estimativa de referência será utilizada na Seção 5, onde se discute a síntese dos resultados por recortes sub-regionais.

Assim, os resultados de referência (Contrafactual 2 com ajuste) mostram um impacto anual do rompimento sobre a sub-bacia do Rio Doce de R\$ 12,7 bilhões em 2015 (ou 11,3% do PIB contrafactual), R\$ 18,3 bilhões em 2016 (ou 16,5% do PIB contrafactual), R\$ 12,3 bilhões em 2017 (ou 10,9% do PIB contrafactual) e R\$ 5,3 bilhões em 2018 (ou 4,7% do PIB contrafactual). No acumulado do período o impacto é de R\$ 48,6 bilhões, o que corresponde, em média, a 10,9% do PIB contrafactual.

¹⁰ Para fins de comparabilidade, os resultados reportados em Fundação Getulio Vargas (2019a) e (2020i) estão a preços de 2016. Em todos os casos utilizou-se o deflator implícito do PIB como índice de preços.

¹¹ Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio, da sigla em inglês.

Tabela 3 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB dos municípios da sub-bacia do Rio Doce (R\$ de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ bilhões	-8,3	-12,7	-9,3	-11,9	-5,1	-15,9	-11,4	-21,2
	% do PIB ^{CF}	-7,7	-11,3	-8,6	-10,6	-4,9	-13,8	-10,4	-17,5
	p-valor	0,18	0,08	0,15	0,08	0,33	0,07	0,10	0,04
2016	R\$ bilhões	-9,5	-18,3	-10,3	-12,8	-7,9	-18,5	-13,5	-22,7
	% do PIB ^{CF}	-9,4	-16,5	-10,2	-12,1	-7,9	-16,7	-12,8	-19,7
	p-valor	0,19	0,07	0,21	0,14	0,25	0,04	0,15	0,04
2017	R\$ bilhões	-7,0	-12,3	-10,8	-4,4	-8,4	-25,3	-11,1	-28,7
	% do PIB ^{CF}	-6,6	-10,9	-9,8	-4,2	-7,7	-20,2	-10,0	-22,3
	p-valor	0,28	0,21	0,17	0,51	0,31	0,07	0,17	0,10
2018	R\$ bilhões	-0,9	-5,3	-5,0	0,4	-1,7	-18,3	-3,1	-20,8
	% do PIB ^{CF}	-0,9	-4,7	-4,6	0,4	-1,6	-14,7	-2,8	-16,4
	p-valor	0,83	0,50	0,44	0,99	0,88	0,15	0,69	0,17
Acumulado	R\$ bilhões	-25,7	-48,6	-35,5	-28,7	-23,1	-78,0	-39,0	-93,3
	% do PIB ^{CF}	-6,1	-10,9	-8,2	-6,7	-5,5	-16,4	-9,0	-19,0
	p-valor	0,24	0,47	0,14	0,46	0,47	0,31	0,07	0,35
RSME	Pré	0,53	1,11	0,68	1,33	1,17	2,71	0,80	3,12
	Pós	1,93	3,48	2,45	2,41	1,70	5,30	2,82	6,31

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético. A sub-bacia do Rio Doce é composta por 215 municípios de MG e ES. O p-valor é construído a partir dos 71 placebos, em cada simulação define-se uma sub-bacia como atingida e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

Em relação a esse resultado é importante mencionar o formato de U-invertido das perdas de PIB da sub-bacia com o impacto máximo sendo alcançado em 2016, tanto em termos absolutos quanto em proporção ao PIB da sub-bacia sintética. Como será mostrado mais à frente, o aumento da magnitude do impacto neste ano é devido a uma menor queda do PIB da sub-bacia sintética relativamente à sub-bacia diretamente afetada pelo rompimento. Assim, os resultados sugerem que o desastre pode ter aprofundado a queda do PIB da sub-bacia do Rio Doce durante o período da recessão em relação à região sintética. Ademais, o resultado para o Contrafactual 3 é semelhante nesse sentido, como pode ser visto na Tabela 3. O APÊNDICE B contém os resultados do impacto sobre o PIB *per capita* da sub-bacia do Rio Doce sob os diversos contrafactuais.

Na sequência, a Tabela 4 e a Figura 3 descrevem as sub-bacias que possuem pesos positivos, isto é, as que foram selecionadas pelo Controle Sintético para compor a sub-bacia contrafactual e seus respectivos pesos para os dois contrafactuais com menor RMSE pré-rompimento (Contrafactual 2 e 3) considerando as séries do PIB da sub-bacia com e sem ajuste pelo preço do minério de ferro. Como podemos observar na

tabela, a sub-bacia sintética no cenário de referência é composta por 7 sub-bacias com seus pesos bem distribuídos, sendo Verde Grande – São Francisco (28,7%), Itajaí (15%) e Uruguai, Chapecó, Passo Fundo e outros (14,9%) as três bacias com maior peso. A segunda coluna da Tabela 4 contém o número identificador de cada sub-bacia selecionada que pode ser observado na Figura 3. Além disso, o ajuste da série do PIB das sub-bacias pelo preço do minério de ferro altera não somente a seleção, como também o número de sub-bacias com peso positivo. Pela Figura 3 Painel (b) vemos que as sub-bacias selecionadas pelo Controle Sintético estão espalhadas pelas regiões Norte, Nordeste e Sudeste do país.

É importante ressaltar que a técnica do Controle Sintético seleciona os pesos que melhor aproximam a sub-bacia sintética da trajetória pré-rompimento do PIB da sub-bacia do Rio Doce com base nas covariadas utilizadas em cada contrafactual. Assim, em certo sentido, a técnica busca replicar essa trajetória levando em conta a proximidade dessas regiões em termos das informações e características capturadas pelas covariadas. Dito de outra forma, a proximidade em termos de atributos das sub-bacias que compõem a sub-bacia contrafactual está restrita às informações contidas nas covariadas, de modo que outros aspectos como, por exemplo, clima, geografia, vegetação não compõem informações para a estimação do PIB da sub-bacia sintética.

Tabela 4 — Pesos estimados pelo Controle Sintético das sub-bacias que compõem a sub-bacia do Rio Doce sintético – contrafactuais selecionados

Sub-bacias	Identificador no mapa	Contrafactual 2		Contrafactual 3	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
Amazonas, entre o lago Coari e o rio Purus	7	26,2		0,6	20,7
Amazonas, entre os rios Javari e Auati-Paraná	10				7,4
Cachoeira, São João e outros	16			18,1	12,1
Camaquã, Jacuí, lagoa dos Patos e outros	17			0,1	
Grande	23			0,2	
Itajaí	27		15	0,1	13,1
Itapicuru, Vaza Barris e outros	28			0,5	
Jequitinhonha	32	15,6	12,1	10,5	12,7
Litorâneas do Ceará	35				0,6
Litorâneas do Espírito Santo	36		13,8	1,9	10,6
Litorâneas do Rio de Janeiro	38	10,8		0,1	
Madeira	39		4,3		
Negro	40			0,1	
Paraíba do Sul	45			0,1	
Pardo, Cachoeira e outros	52				22,9

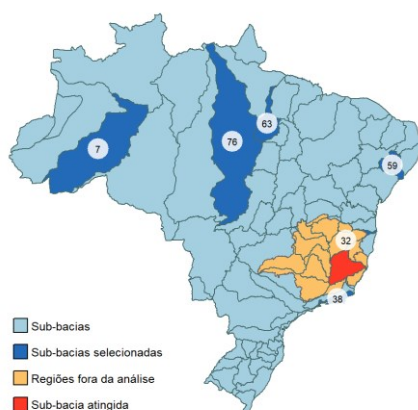
Sub-bacias	Identificador no mapa	Contrafactual 2		Contrafactual 3	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
Pelotas	54			0,1	
Piranhas, Açú e outros	56			39,3	
São Francisco, a jusante do Pajeú	59	13,6		7,5	
Taquari	62			0,1	
Tocantins, entre o rio Araguaia e a foz	63	20,2	11,2	19,7	
Tocantins, entre os rios Preto e Paranã	66			0,1	
Tubarão, Capivari e outros	67			0,1	
Uruguai, Chapecó, Passo Fundo e outros	70		14,9		
Verde Grande – São Francisco	75		28,7		
Xingu e Paru	76	13,6			

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

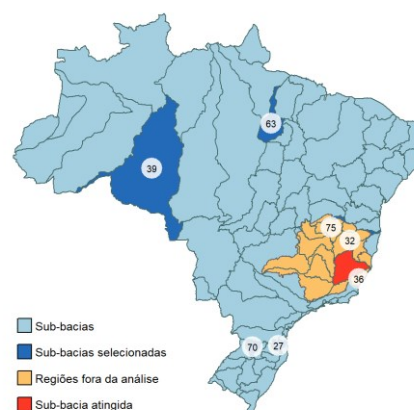
Observação: Sub-bacias com pesos não nulos dentre as 72 sub-bacias do conjunto de potenciais controles.

Figura 3 — Sub-bacias que compõem a sub-bacia do Rio Doce contrafactual selecionadas pelo Controle Sintético

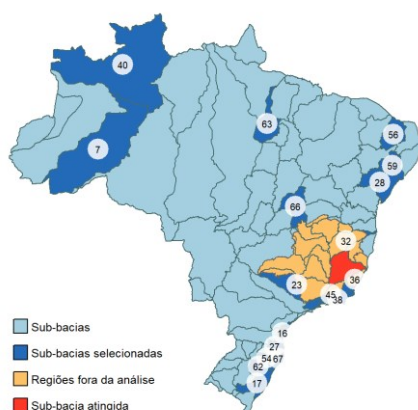
(a) Contrafactual 2 – sem ajuste



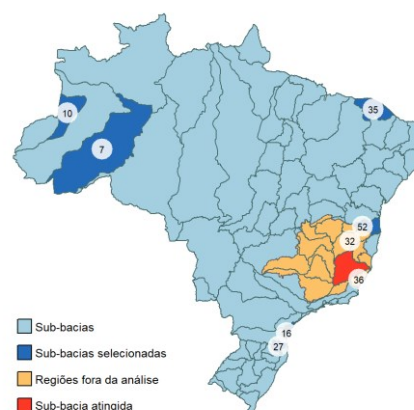
(b) Contrafactual 2 – com ajuste



(c) Contrafactual 3 – sem ajuste



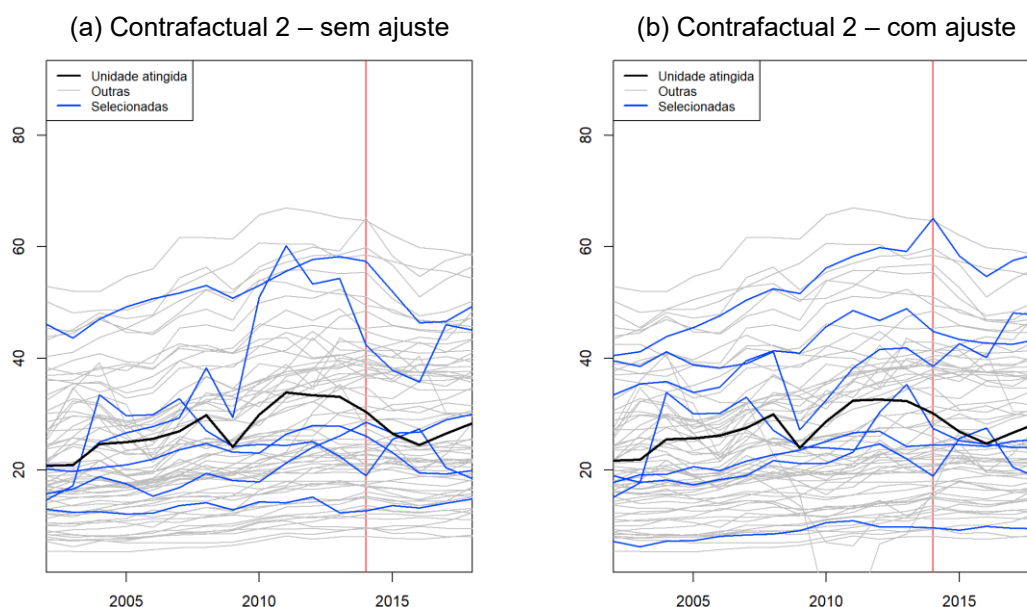
(d) Contrafactual 3 – com ajuste

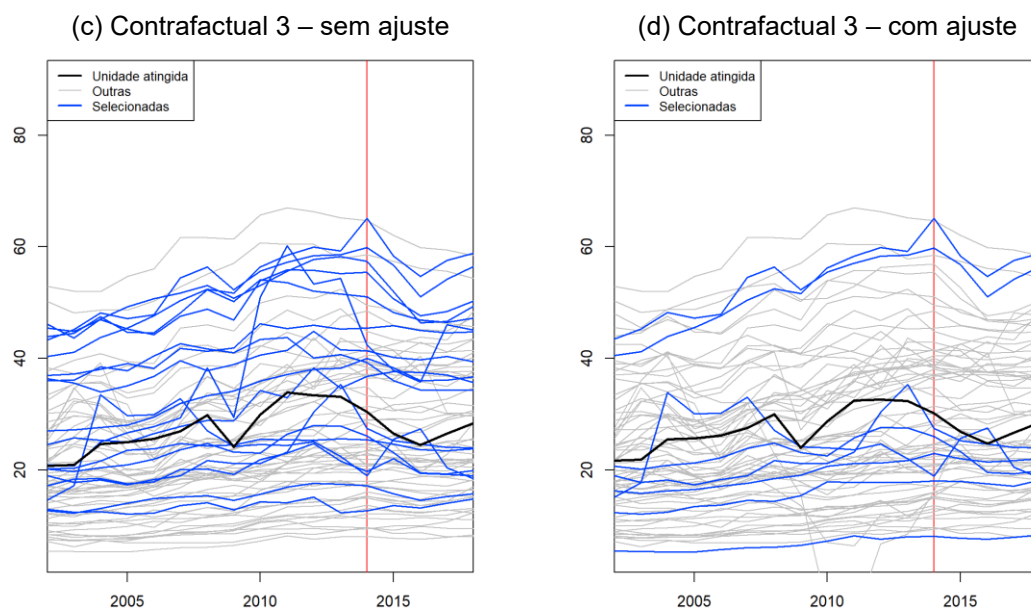


Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Nessa linha, o Gráfico 8 mostra a trajetória do PIB *per capita* de todas as sub-bacias consideradas na análise dando ênfase naquelas que compõem a sub-bacia sintética (linhas em azul) e a do Rio Doce (linha em preto) nos Contrafactuais 2 e 3, considerando as séries com e sem ajuste do PIB pelo preço do minério de ferro. O gráfico evidencia que as trajetórias das sub-bacias selecionadas apresentam uma ampla variação em termo no nível do PIB *per capita*, selecionando inclusive sub-bacias no extremo inferior da distribuição como no caso do Contrafactual 3 – com ajuste (Painel d do Gráfico 8), por exemplo. Mais ainda, não somente o nível, mas também o comportamento em termos da variação anual do PIB *per capita* da sub-bacia fornece informações relevantes para a seleção das mesmas. Na mesma linha da discussão da Tabela 4, o gráfico mostra o efeito do ajuste da série do PIB na seleção das sub-bacias pelo Controle Sintético, alterando o número de sub-bacias selecionadas.

Gráfico 8 — PIB *per capita* das sub-bacias selecionadas pelo Controle Sintético e da sub-bacia do Rio Doce (atingida)

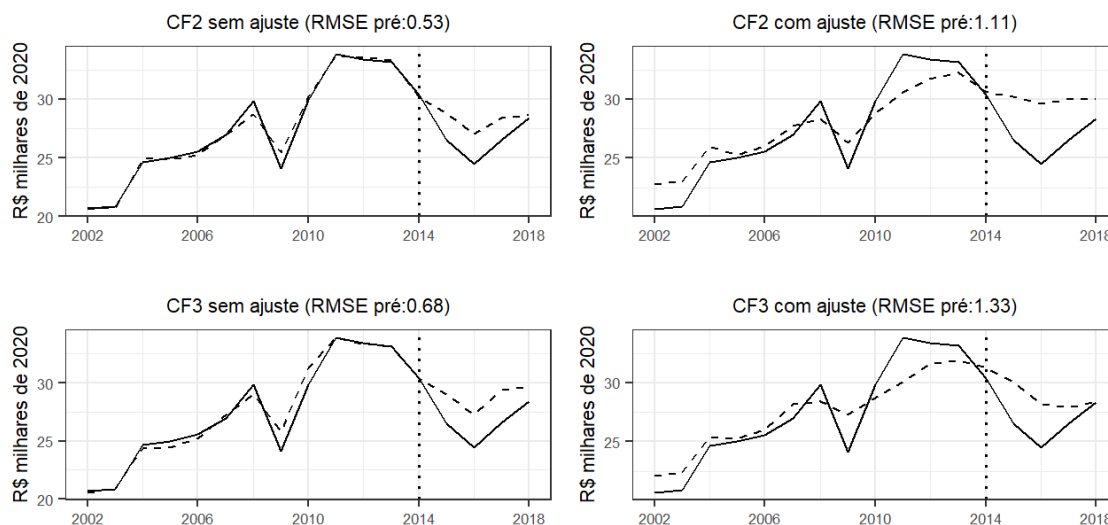




Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados IBGE

Para ilustrar a comparação entre o PIB *per capita* observado da sub-bacia do Rio Doce e a sub-bacia sintética, o Gráfico 9 apresenta a trajetória temporal do PIB *per capita* dos municípios da sub-bacia do Rio Doce e a trajetória da sub-bacia sintética estimada nos Contrafactuais 2 e 3, considerando as séries de PIB com e sem ajuste. Como se pode observar, em todos os casos, após 2014 (ano imediatamente pré-rompimento), os valores contrafactuais do PIB *per capita* são superiores aos valores observados do PIB *per capita* da sub-bacia do Rio Doce, indicando perda de renda agregada em todos os anos – resultado já apresentado na Tabela 3. Além disso, em todos os contrafactuais apresentados é possível notar a menor queda da região sintética em 2016 relativamente à região impactada, como descrito anteriormente, o que resulta numa maior perda anual de PIB da sub-bacia do Rio Doce no referido ano.

Gráfico 9 — PIB *per capita* dos municípios da sub-bacia do Rio Doce e da sub-bacia sintética



Legenda: — Realizado --- Região Sintética

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: RSME pré se refere ao ajuste da região sintética com relação à observada entre 2002 e 2014.

Com o intuito de avaliar os resultados, aplicam-se duas estratégias comuns nessa literatura. A primeira é feita por meio da permutação da sub-bacia potencialmente atingida, ou seja, supõe-se que cada sub-bacia foi atingida pelo rompimento construindo um estado sintético para esta e, em seguida, calcula-se o respectivo impacto sobre o PIB. O conjunto desses impactos são denominados de placebos. A partir daí, é possível identificar em qual posição ordenada está o impacto sobre a unidade atingida analisada. Desse modo obtém-se o “p-valor” apresentado na Tabela 3. Note que este “p-valor” difere daquele utilizado em inferência estatística usual. Aqui, essa probabilidade refere-se ao ordenamento da razão do RMSE pós sobre o RMSE pré-rompimento entre os placebos e não à probabilidade extrema mensurada a partir da distribuição da estatística de teste sob hipótese nula.

Na análise anual dos resultados de referência (Contrafactual 2 com ajuste) apresentada na Tabela 3, os p-valores são 0,08, 0,07, 0,21 e 0,50 para os anos de 2015 a 2018, respectivamente. Assim, os impactos estão entre os maiores observados dentre os placebos para todos os anos, em especial, nos dois anos seguintes ao desastre. Já o p-valor acumulado – que é calculado a partir da razão do RMSE pré e pós – está em linha com a análise anual mostrando que o impacto se encontra entres os maiores no período analisado, quando se leva em consideração o impacto total relativamente ao ajuste pré-rompimento da região sintética.

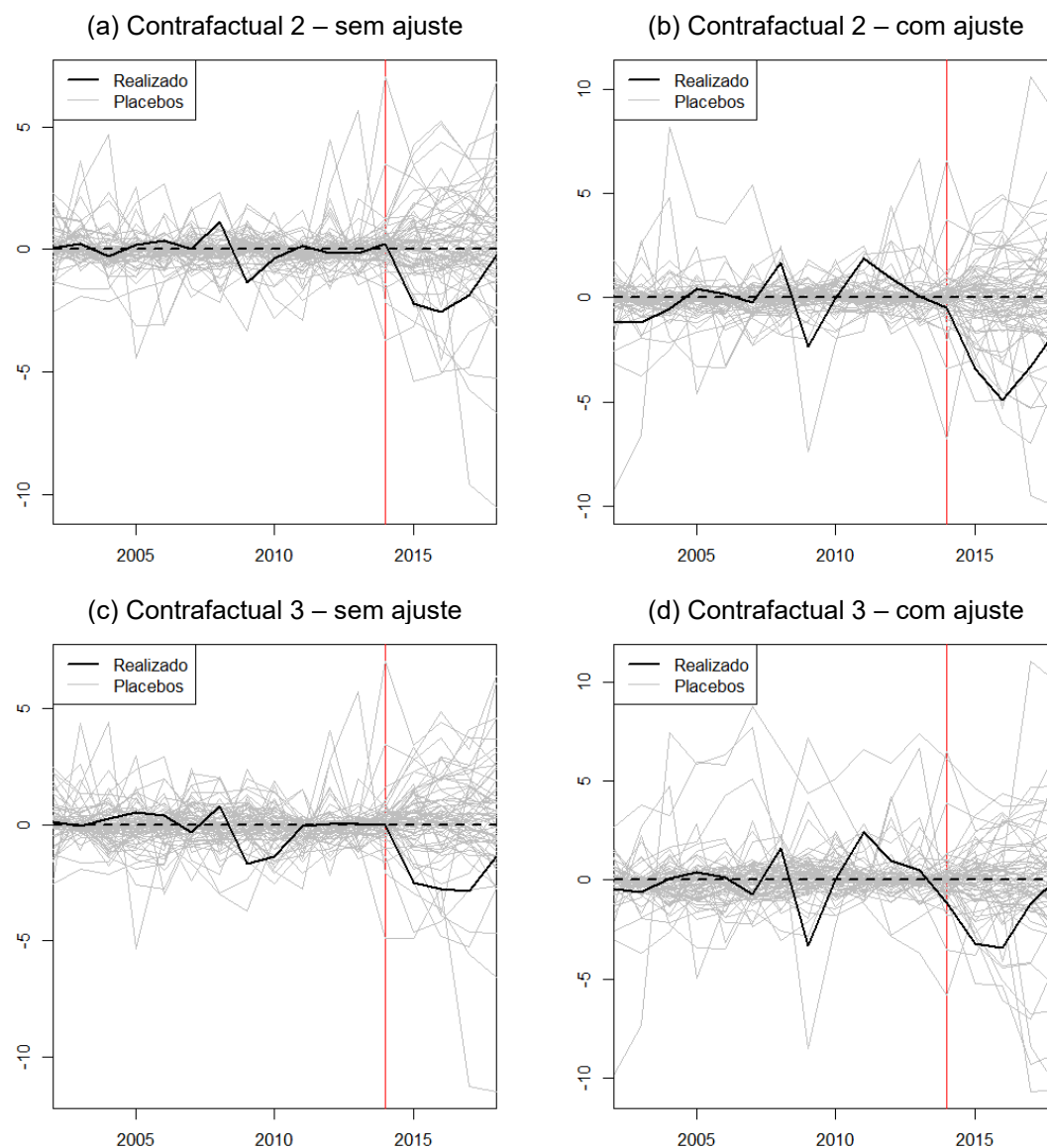
Uma análise complementar ao p-valor consiste em inspecionar graficamente a distribuição dos impactos da sub-bacia do Rio Doce e dos placebos nos períodos pré e pós-rompimento. O Gráfico 10 mostra a diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético para a sub-bacia do Rio Doce e dos placebos para os Contrafactuais 2 e 3 e ambos ajustes do PIB. Neste e no Gráfico 11 seguinte, foram excluídos os placebos cujo RMSE pré-rompimento são superiores a 5 vezes àquele da sub-bacia atingida. O intuito é não prejudicar a análise com estimativas muito discrepantes (*outliers*, do termo em inglês) cujos ajustes são significativamente distantes do observado.

Como é possível notar, a trajetória da diferença do PIB *per capita* da sub-bacia do Rio Doce no período anterior ao rompimento (a linha vermelha destaca o ano de 2014, último ano anterior ao desastre) se encontra próxima da linha do zero, indicando um bom ajuste da sub-bacia sintética aos valores observados. Entretanto, observa-se uma queda significativa nos anos pós-rompimento, o que sugere a presença do efeito do desastre reduzindo o PIB *per capita* observado em maior proporção que o PIB *per capita* da sub-bacia sintética – como visto anteriormente, ambas as trajetórias apresentam queda e recuperação nesse período. Ademais, o tamanho do impacto negativo para a sub-bacia do Rio Doce encontra-se entre as maiores em comparação aos placebos, o que dá suporte à evidência de impacto.

Note que a presença de placebos com impactos negativos maiores não é necessariamente indicativo de que o efeito capturado para a unidade investigada (sub-bacia do Rio Doce) está relacionada a outros fatores, uma vez que a qualidade do ajuste no período anterior em conjunto com a magnitude observada no período pós-rompimento precisam ser levados em consideração na análise das evidências do impacto.

Na mesma linha da análise gráfica do impacto anterior, o Gráfico 11 mostra a distribuição acumulada da razão entre o RMSE pré e pós-rompimento para a sub-bacia do Rio Doce e dos placebos nos Contrafactuais 2 e 3 sob ambos ajustes do PIB. A razão pré e pós-RMSE é a estatística utilizada para o cálculo do p-valor acumulado dos anos de 2015 e 2018. O gráfico apresenta uma inspeção visual da forma de cálculo do p-valor do impacto acumulado apresentado na Tabela 3. O ponto vermelho (realizado) indica a razão calculada para a sub-bacia do Rio Doce e os demais pontos se referem às respectivas razões dos placebos. Como já indicado na tabela, o p-valor calculado para a sub-bacia do Rio Doce se encontra entre os maiores nos contrafactuais apresentados, em especial, no caso das séries sem ajuste do PIB.

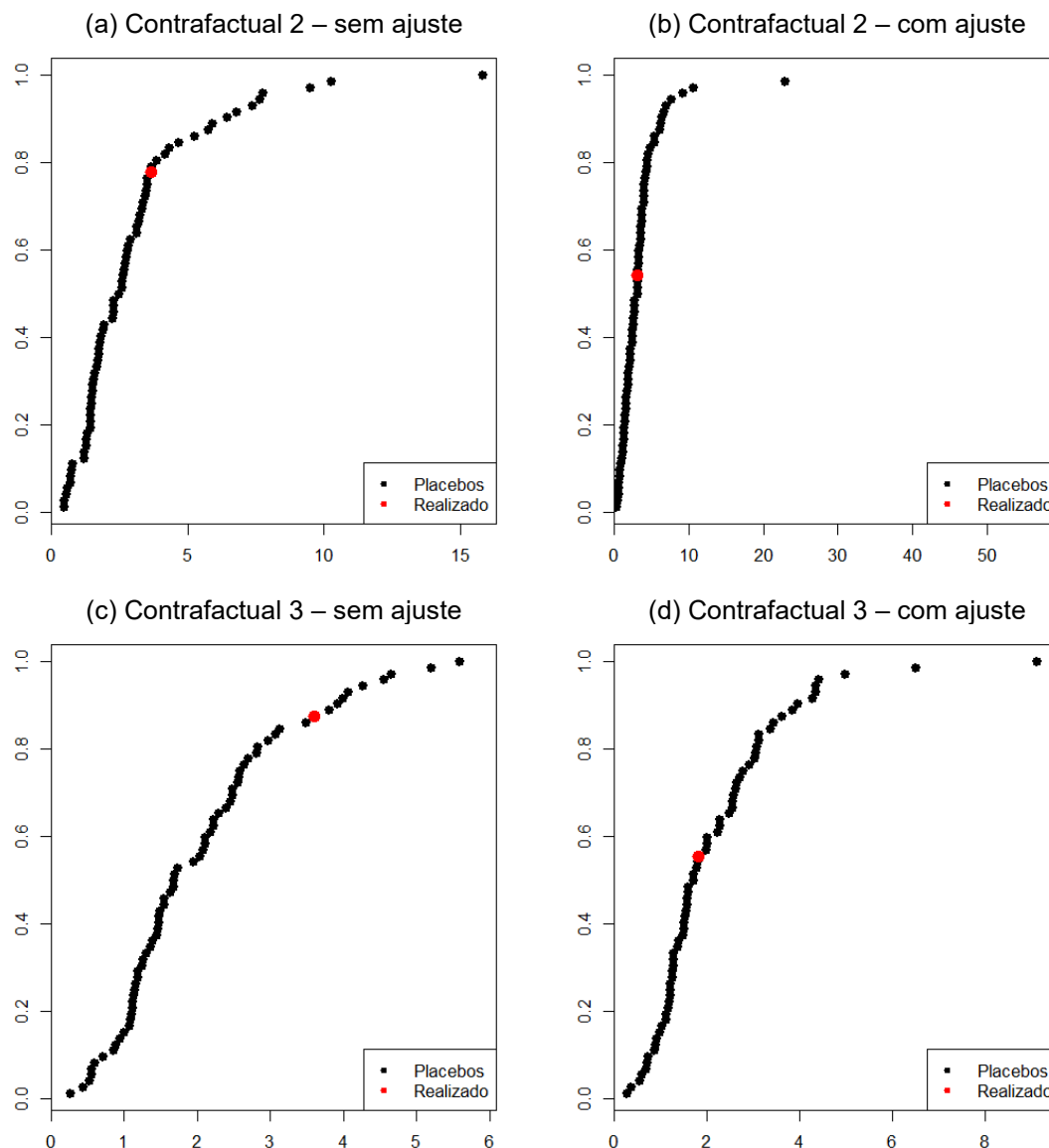
Gráfico 10 — Diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético para a sub-bacia do Rio Doce (realizado) e placebos



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré da sub-bacia do Rio Doce.

Gráfico 11 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para a sub-bacia do Rio Doce (realizado) e placebos



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

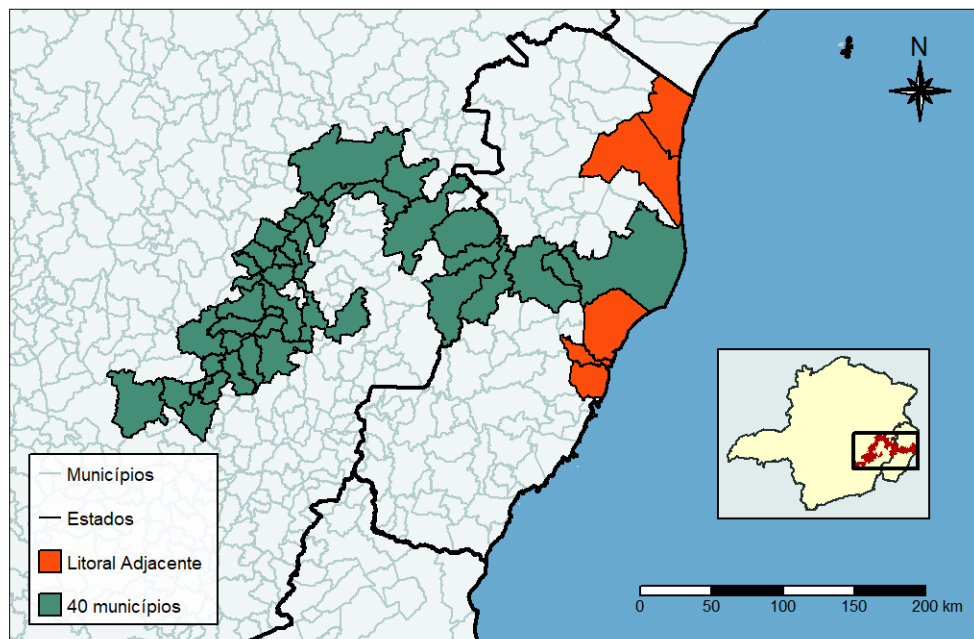
Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes o RMSE pré da sub-bacia do Rio Doce.

4.2 40 municípios atingidos

Nesta seção, apresentam-se os resultados da estimação dos impactos ao nível dos 40 municípios considerados atingidos no período seguinte ao desastre entre 2015 e 2018. A seção subsequente descreve os resultados para os 5 municípios do Litoral Adjacente restantes que, em conjunto com os municípios analisados nesta seção, compõem os 45 municípios definidos como atingidos pelo TTAC. A figura a seguir apresenta o mapa da localização dos 40 municípios (destacados em verde) e do Litoral Adjacente (destacados em laranja) atingidos pelos rejeitos do rompimento da barragem, todos eles

pertencentes aos estados de MG e ES. Ademais, os 40 municípios fazem parte da sub-bacia do Rio Doce, analisada na seção anterior, e tem o Rio Doce em seus limites municipais.

Figura 4 — Localização geográfica dos 45 municípios atingidos



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

No tocante à unidade de análise no presente estudo, definiu-se como uma unidade atingida os 40 municípios conjuntamente. Os potenciais controles constituem as 72 sub-bacias fora de Minas Gerais e Espírito Santo, apresentadas na Seção 4.1. A Tabela 5 apresenta os resultados das estimativas pelo Controle Sintético do impacto do rompimento sobre o PIB dos 40 municípios atingidos para todos os contrafactuais (que utilizam diferentes covariadas na estimação dos pesos que compõe o PIB dos 40 municípios sintético) estimados com as séries com e sem ajuste pelo preço do minério de ferro. Analisando primeiramente o efeito acumulado, os resultados mostram que os impactos estimados estão entre uma perda do PIB agregado mínima de R\$ 13,4 bilhões (Contrafactual 4 sem ajuste) e máxima de R\$ 48 bilhões (Contrafactual 4 com ajuste). Tendo em vista o critério objetivo de escolha das estimativas com base no RMSE pré-rompimento mínimo, o Contrafactual 2, novamente, é o resultado que atende a este critério. Além disso, foca-se nos resultados deste contrafactual que utiliza a série do PIB

com ajuste. Portanto, o Contrafactual 2 com ajuste é o resultado de referência desta seção e que será discutido na Seção 5 sobre a síntese dos resultados¹².

De forma análoga aos resultados da seção anterior, as estimativas de perda do PIB dos 40 municípios no resultado de referência também apresentam um formato de U-invertido, tendo seu impacto máximo em 2016. Em particular, no Contrafactual 2 com ajuste, a perda de PIB anual foi de R\$ 8,2 bilhões (ou 14,9% do PIB contrafactual), R\$ 11,8 bilhões (ou 21,4% do PIB contrafactual), R\$ 8,8 bilhões (ou 16,1% do PIB contrafactual) e R\$ 6,8 bilhões (ou 12,5% do PIB contrafactual) no período 2015-2018, respectivamente. No acumulado do período, a perda estimada do PIB dos 40 municípios atingidos é de R\$ 35,6 bilhões, o que representa, em média, 16,2% do PIB contrafactual acumulado no período.

Tabela 5 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB dos 40 municípios atingidos (R\$ de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ bilhões	-5,4	-8,2	-7,2	-9,1	-2,7	-10,3	-6,3	-9,5
	% do PIB ^{CF}	-10,4	-14,9	-13,2	-16,1	-5,4	-17,9	-11,8	-16,8
	p-valor	0,08	0,01	0,03	0,01	0,26	0,03	0,04	0,04
2016	R\$ bilhões	-6,4	-11,8	-8,7	-10,2	-4,4	-10,7	-9,5	-12,2
	% do PIB ^{CF}	-12,9	-21,4	-16,8	-19,1	-9,4	-19,8	-18,1	-22,0
	p-valor	0,11	0,01	0,03	0,01	0,19	0,03	0,03	0,03
2017	R\$ bilhões	-4,0	-8,8	-6,6	-8,7	-4,0	-14,0	-6,8	-12,3
	% do PIB ^{CF}	-8,1	-16,1	-12,6	-16,0	-8,0	-23,5	-13,0	-21,2
	p-valor	0,18	0,06	0,08	0,08	0,21	0,04	0,11	0,11
2018	R\$ bilhões	-2,4	-6,8	-4,0	-7,6	-2,3	-13,0	-4,5	-10,2
	% do PIB ^{CF}	-4,9	-12,5	-7,9	-13,9	-4,7	-21,6	-8,6	-17,8
	p-valor	0,38	0,11	0,31	0,11	0,50	0,07	0,24	0,13
Acumulado	R\$ bilhões	-18,3	-35,6	-26,5	-35,6	-13,4	-48,0	-27,0	-44,2
	% do PIB ^{CF}	-9,1	-16,2	-12,7	-16,3	-6,8	-20,8	-12,9	-19,4
	p-valor	0,20	0,14	0,06	0,06	0,51	0,03	0,06	0,17
RSME	Pré	0,75	0,98	0,99	1,31	1,57	2,06	1,10	2,35
	Pós	3,20	6,04	4,55	5,96	2,30	8,05	4,65	7,39

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético. O p-valor é construído a partir dos 71 placebos, em cada simulação define-se uma sub-bacia como atingida e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

¹² Para uma discussão mais detalhada sobre o RMSE e o ajuste pelo preço do minério de ferro, o leitor é referido à Seção 4.1 anterior.

Para fins de comparabilidade, no estudo sobre os impactos do rompimento da Barragem de Fundão para 41 dos 45 municípios incluídos no TTAC, Niquito e coautores (2019) utilizaram um modelo de Diferença-em-Diferenças Espacial¹³, considerando o universo de controle todos os demais municípios de Minas Gerais e Espírito Santo para avaliar o impacto na renda agregada desses municípios em 2016. O PIB total dos municípios apresentou queda de 6,94%, enquanto que o PIB industrial apresentou um recuo de 18,66%. Os autores também encontram impactos na perda de postos de trabalho (emprego industrial)¹⁴.

Para compor a região sintética do PIB dos 40 municípios atingidos no presente estudo, seguiu-se a abordagem da seção anterior utilizando-se o conjunto de sub-bacias fora dos estados de MG e ES como potenciais controles. Nessa linha, a Tabela 6 a seguir apresenta as sub-bacias com pesos não nulos em cada especificação dos Contrafactuais 2 e 3 (sem e com ajuste). A segunda coluna contém o número identificador de cada sub-bacia selecionada que pode ser observado na Figura 5 seguinte. No resultado de referência (Contrafactual 2 com ajuste), as três sub-bacias com maior peso são, respectivamente, Uruguai, Chapecó, Passo Fundo e outros (36,9%), Jequitinhonha (25,7%) e Tocantins, entre o rio Araguaia e a foz (14,6%). Note que o ajuste pelo preço do minério de ferro altera não somente a seleção das sub-bacias, mas também a composição das mesmas.

Tabela 6 — Pesos estimados pelo Controle Sintético das sub-bacias que compõem a região sintética dos 40 municípios – contrafactuais selecionados

Sub-bacias	Identificad or no mapa	Contrafactual 2		Contrafactual 3	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
Amazonas, entre o lago Coari e o rio Purus	7	14,2	0,7		
Cachoeira, São João e outros	16	9,0		8,9	36,1
Camaquã, Jacuí, lagoa dos Patos e outros	17			0,1	
Grande	23			0,2	
Grande e outros – São Francisco	24				
Guamá e outros	25			0,1	
Itajaí	27		8,5		
Jequiriçá, Paraguaçu e outros	31			7,8	20,7

¹³ Mais especificamente um SDEM (*Spatial Durbin Error Model*, da sigla em inglês).

¹⁴ Em contraste, as evidências desenvolvidas neste estudo sugerem impactos maiores como proporção do PIB. Esse resultado está em linha com a evidência na Seção 6 de que a sub-região complementar – utilizada como controle em Niquito e coautores (2019) – também está sujeita ao impacto do rompimento, embora esse efeito seja heterogêneo como mostra a Seção 7.

Sub-bacias	Identificad or no mapa	Contrafactual 2		Contrafactual 3	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
Jequitinhonha	32	24,4	25,7	26,7	20,0
Litorâneas de São Paulo	34	11,4		35,7	
Litorâneas do Ceará	35			0,1	12,0
Litorâneas do Rio de Janeiro	38	13,5			
Negro	40	6,4			
Paracatu e outros – São Francisco	43	0,4			
Paraíba do Sul	45			0,3	
Paraná, Tietê e outros	49		3,5		
São Francisco, a jusante do Pajeú	59	6,4			
Tocantins, entre o rio Araguaia e a foz	63	14,3	14,6	19,6	11,2
Tocantins, entre os rios Preto e Paraná	66			0,1	
Uruguai, Chapecó, Passo Fundo e outros	70		36,9		
Verde Grande – São Francisco	75		10,0		

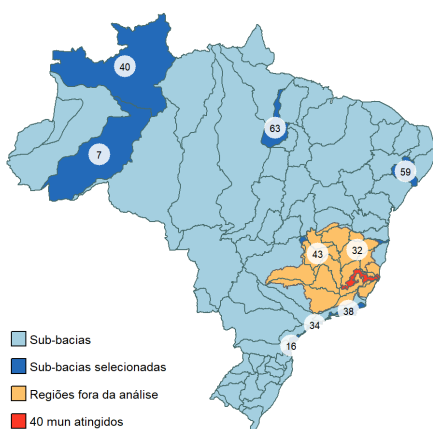
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Demais sub-bacias receberam peso igual a zero nessas composições.

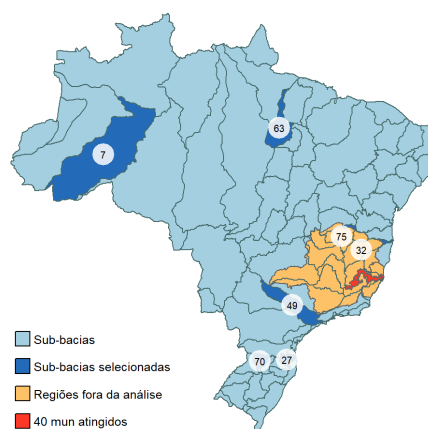
Na sequência a Figura 5 fornece a localização geográfica das sub-bacias selecionadas pelo Controle Sintético para os mesmos contrafactuais selecionados. Note que em todos os contrafactuais as unidades selecionadas estão distribuídas ao longo das regiões do país. Em particular, no resultado de referência (Painel b), as sub-bacias selecionadas se encontram nas regiões Norte, Sul, Sudeste e Nordeste.

Figura 5 — Sub-bacias que compõem a sub-região contrafactual selecionadas pelo Controle Sintético

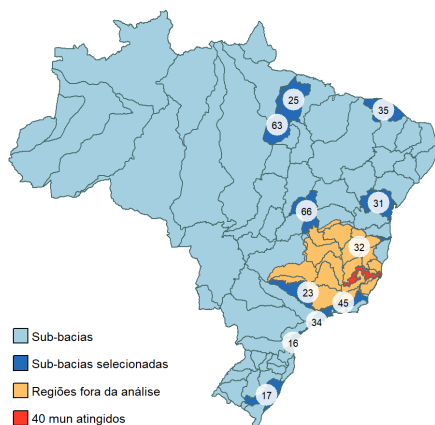
(a) Contrafactual 2 – sem ajuste



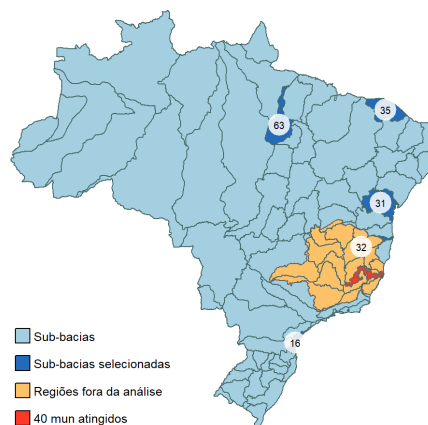
(b) Contrafactual 2 – com ajuste



(c) Contrafactual 3 – sem ajuste



(d) Contrafactual 3 – com ajuste

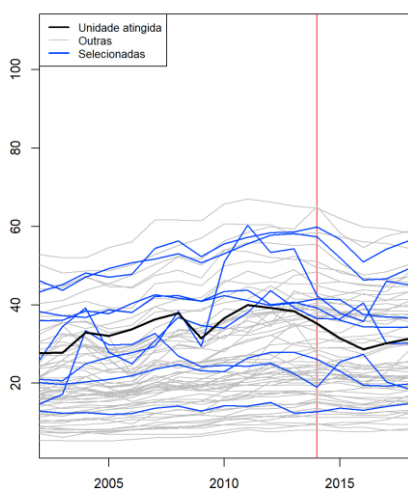


Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

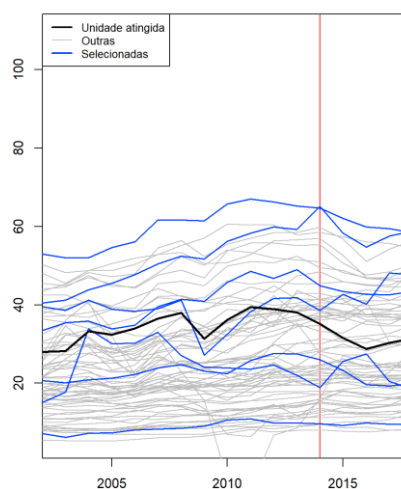
O Gráfico 12, por sua vez, apresenta a trajetória temporal do PIB *per capita* dos 40 municípios atingidos destacada na linha preta (calculado pela soma do PIB dividido pela soma da população por município), das sub-bacias selecionadas (linhas em azul) e das demais sub-bacias que potencialmente comporiam a região sintética (linhas em cinza). O resultado de referência (Painel b), por sua vez, mostra que a composição da região sintética não está concentrada em sub-bacias com o nível de PIB *per capita* similar. Ao contrário, a região contrafactual é formada por sub-bacias com diferentes trajetórias e níveis de PIB *per capita*. Além disso, o gráfico mostra o efeito do ajuste do PIB na escolha das trajetórias que, combinadas, mais se aproximam da trajetória do PIB dos 40 municípios, como apresentado na Tabela 6.

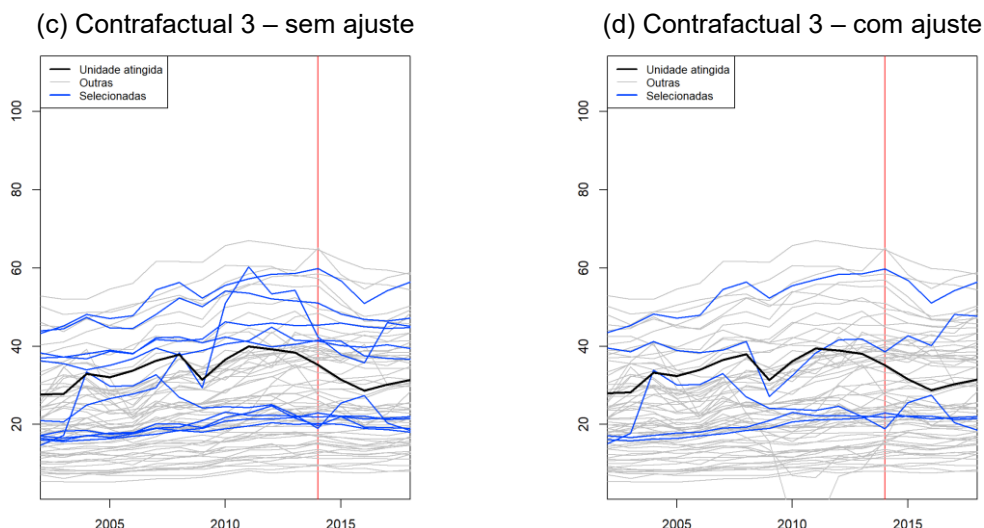
Gráfico 12 — PIB *per capita* das sub-bacias selecionadas pelo Controle Sintético e dos 40 municípios atingidos (Unidade atingida)

(a) Contrafactual 2 – sem ajuste



(b) Contrafactual 2 – com ajuste

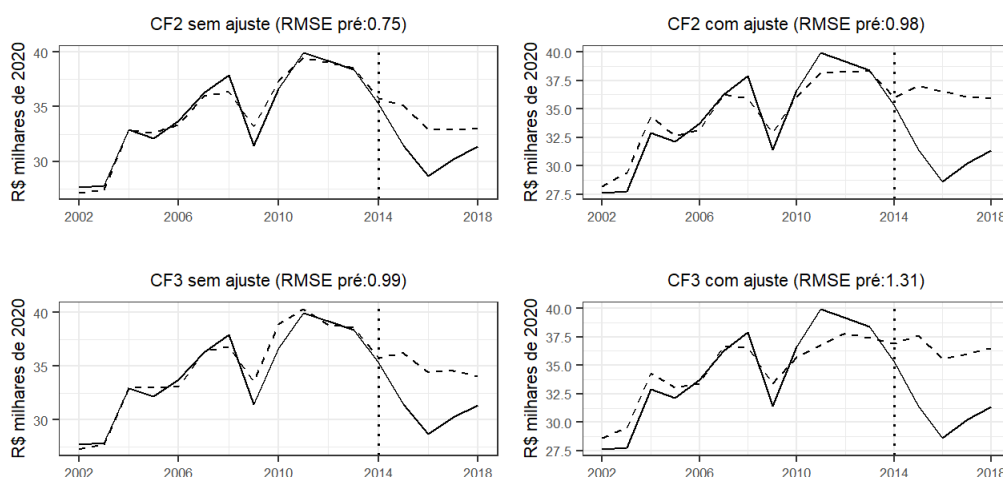




Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Em seguida, o Gráfico 13 mostra a comparação entre a trajetória observada do PIB *per capita* dos 40 municípios e da região sintética para os contrafactuais selecionados. No período pré-rompimento, ambas as trajetórias seguem muito próximas no resultado de referência, porém, após 2014, a região contrafactual apresenta um comportamento relativamente constante enquanto há uma queda significativa no PIB da região atingida. Ademais, o gráfico mostra que o pico da perda em 2016 se deve a uma queda acentuada do PIB *per capita* observado, enquanto a região contrafactual se mantém relativamente estável.

Gráfico 13 — PIB *per capita* dos 40 municípios atingidos e da região sintética



Legenda: — Realizado --- Região Sintética

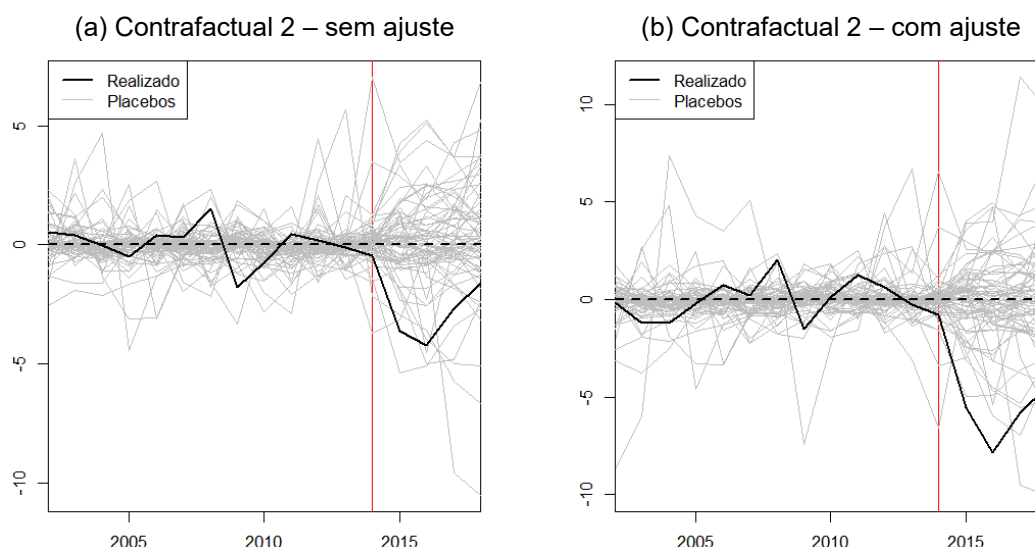
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

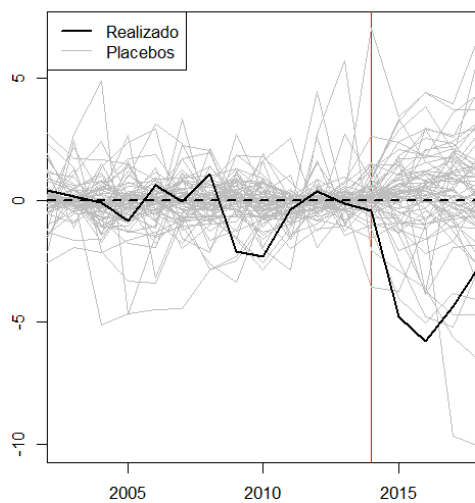
Por fim, é importante discutir a qualidade do ajustamento da região sintética à trajetória observada do PIB dos 40 municípios. Como discutido na seção anterior, há duas formas: primeira, a análise da estatística do p-valor, e a segunda é a inspeção gráfica dos efeitos ao longo dos períodos pré e pós-rompimento. Em relação ao p-valor, a Tabela 5 mostra que tanto as estimativas anuais de perda quanto a perda acumulada, no resultado de referência, estão entre as maiores estimativas de impacto comparadas aos placebos – lembrando a interpretação do p-valor aqui como a probabilidade (ou frequência) de obtermos impactos placebos com RMSE maior ou igual ao RMSE observado para a região atingida. Este resultado também se verifica no Contrafactual 2 sem ajuste e no Contrafactual 3. Na mesma linha, o p-valor acumulado em todos os contrafactuais apresentados (exceto Contrafactual 4 sem ajuste) corrobora a análise anual mostrando que o impacto se encontra entre os maiores no período analisado, quando se leva em consideração o impacto total relativamente ao ajuste pré-rompimento da região sintética.

Na análise de inspeção visual do impacto, o Gráfico 14 mostra a estimativa do impacto anual para os 40 municípios e placebos, tanto no período anterior ao desastre quanto no período pós-rompimento, separados pela linha vermelha que marca o ano de 2014. Novamente, neste e no Gráfico 15 seguinte, foram excluídos os placebos com RMSE pré 5 vezes superior ao da unidade atingida. É possível notar que as estimativas para os contrafactuais selecionados estão próximos à linha do zero antes do rompimento, tornando-se negativos e relativamente abaixo dos demais impactos placebos indicando evidência do impacto do rompimento.

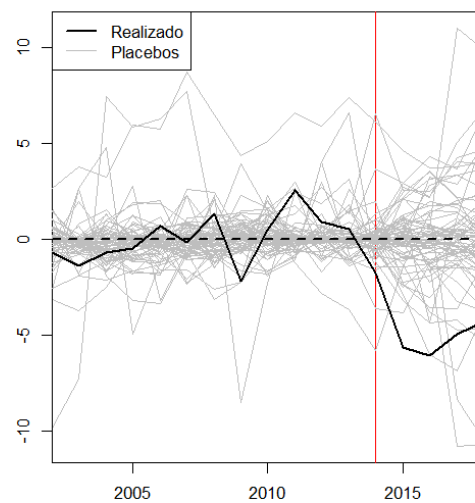
Gráfico 14 — Diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético para os 40 municípios atingidos (realizado) e placebos



(c) Contrafactual 3 – sem ajuste



(d) Contrafactual 3 – com ajuste



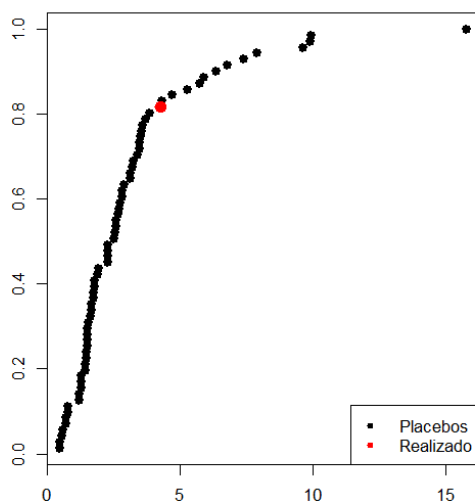
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré dos 40 municípios.

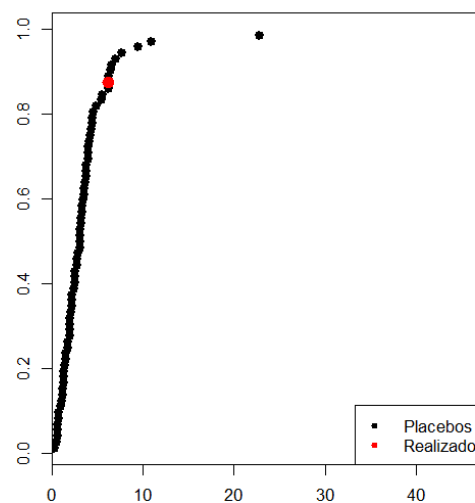
Finalmente, o Gráfico 15 apresenta a distribuição acumulada da razão entre o RMSE pós-rompimento e o pré-rompimento que indica um maior descolamento das trajetórias observadas e sintéticas do PIB dos 40 municípios entre esses períodos quanto maior o seu valor. Assim, o impacto acumulado do período 2015-2018 está no extremo da distribuição dos impactos em ambos os contrafactuais, dando suporte à evidência de impacto do rompimento no período.

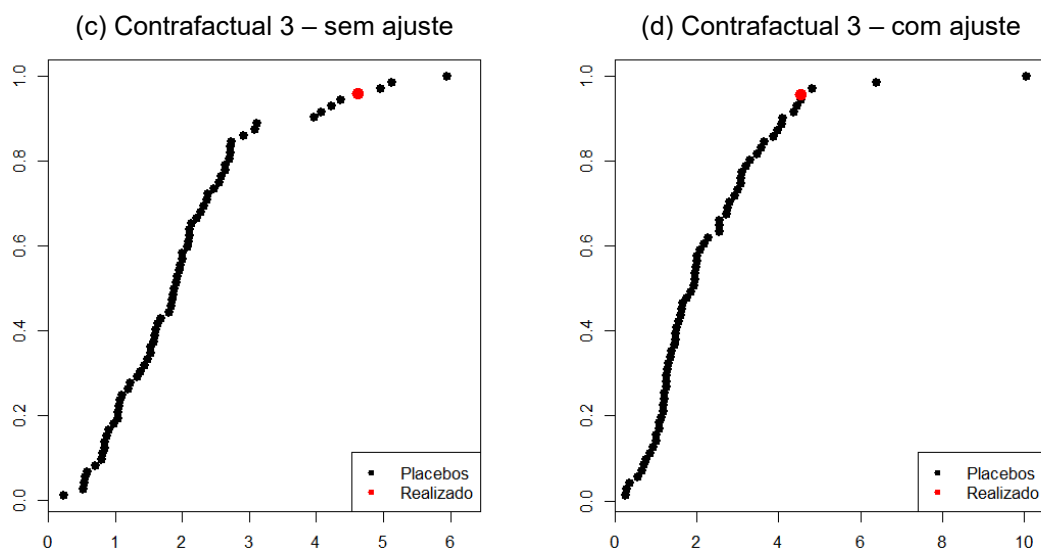
Gráfico 15 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para os 40 municípios atingidos (realizado) e placebos

(a) Contrafactual 2 – sem ajuste



(b) Contrafactual 2 – com ajuste





Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré dos 40 municípios.

4.3 Litoral Adjacente

Nesta seção, apresentam-se os resultados da estimação dos impactos do rompimento sobre o Litoral Adjacente no período seguinte ao desastre, entre 2015 e 2018. Como mencionado anteriormente, os 5 municípios do Litoral Adjacente compõem, em conjunto com os municípios analisados na seção anterior, os 45 municípios definidos como atingidos pelo TTAC. A título de completude, os 5 municípios definidos como “Litoral Adjacente” – já apresentados na Seção 2 (ver Tabela 1) –, por se localizarem na costa do litoral capixaba, próximos a Linhares, são: Aracruz, Conceição da Barra, Fundão, São Mateus e Serra. Os mesmos municípios foram examinados em estudos anteriores (FGV, 2020i).

Como mencionado em FGV (2020i), os municípios do litoral diferem dos demais em diversos pontos quando comparados com os da sub-bacia do Rio Doce. A começar pelo tamanho da população, em geral superior aos municípios da sub-bacia. Por exemplo, a população média dos municípios da sub-bacia é de 17.208 habitantes, enquanto no caso do litoral é de 148.580 habitantes. Outra questão é o tamanho da economia: comparando o produto interno bruto municipal, os cinco municípios do litoral concentram 28,4% do PIB conjunto dos municípios da sub-bacia (com 215 municípios) e os do litoral.

Diferentemente dos municípios analisados nas duas seções anteriores, os municípios do Litoral Adjacente não estão sob uma agregação sub-regional bem definida. De sorte que, para analisar o impacto do rompimento sobre o PIB desses municípios, optou-se por seguir uma estratégia análoga à utilizada nas seções anteriores, mas que considera

os municípios que estão fora dos estados de MG e ES como potenciais controles para a unidade atingida considerada no Controle Sintético, isto é, os municípios do Litoral Adjacente em conjunto. Entretanto, a possibilidade de muitos municípios serem selecionados pelo Controle Sintético, pode levar a estimação a incorrer em problemas de alta dimensionalidade (Abadie & L'Hour, 2020)¹⁵. Assim, optou-se por realizar uma pré-seleção de municípios com características parecidas a partir das distâncias de Mahalanobis via características geográficas e demográficas para o ano de 2014, o ano imediatamente anterior ao rompimento da barragem. Dentre as características consideradas estão a participação dos setores da agropecuária, indústria e serviços no PIB dos municípios, a densidade populacional, a população e a distância do centroide dos municípios em relação ao mar. Os detalhes desse procedimento se encontram no APÊNDICE D.

A Figura 6 apresenta os 55 municípios selecionados a partir da distância de Mahalanobis para compor o grupo de controle potencial. É possível notar que os municípios selecionados estão espalhados por toda a região costeira desde a região Sul à região Norte, não havendo concentração em localidades específicas. O APÊNDICE E apresenta uma análise de robustez em relação ao número de municípios selecionados.

Com base na seleção pré-seleção dos municípios do grupo de controle, podemos proceder à estimativa do impacto sobre a renda pelo Controle Sintético e avaliar evidências de que a queda acentuada no período pós-2014 está associada aos impactos do rompimento.

¹⁵ Dentre os problemas de alta dimensionalidade podemos citar: a ausência de uma solução única para a construção do controle sintético e a sobre-estimação com a seleção de um número excessivo de municípios para a unidade sintética.

Figura 6 — Municípios selecionados pela distância de Mahalanobis como potenciais controles para o Litoral Adjacente



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: * Conjunto de 55 municípios selecionados a partir da distância de Mahalanobis. O Litoral Adjacente é composto por 5 municípios do litoral capixaba: Aracruz, Conceição da Barra, Fundão, São Mateus e Serra.

A Tabela 7 apresenta os resultados da estimativa de impacto sobre o PIB do Litoral Adjacente para todos os contrafactuais considerados e ambas as séries, com e sem ajuste, do PIB em valores reais de 2020. Vamos iniciar a análise pelo efeito acumulado no período 2015-2018. A tabela mostra que as estimativas do impacto estão entre uma perda de PIB mínima de R\$ 15,2 bilhões (Contrafactual 2 com ajuste) e máxima de R\$ 30,8 bilhões (Contrafactual 3 sem ajuste). Seguindo a análise das seções anteriores, concentraremos a atenção nos resultados com menor RMSE e com ajuste do PIB pelo preço do minério de ferro¹⁶. Assim, novamente, o Contrafactual 2 com ajuste é o resultado de referência também analisado na Seção 5 de síntese dos resultados.

Como nas análises das seções anteriores, a perda de PIB estimada para a região no resultado de referência apresenta um formato de U-invertido, porém atingindo um pico

¹⁶ Para mais detalhes sobre esse critério ver a Seção 4.1.

em 2017 e não em 2016 como nas sub-regiões anteriormente analisadas. Em particular, os impactos anuais são R\$ 4,2 bilhões (11,2%), R\$ 4,8 bilhões (13,6%), R\$ 5,3 bilhões (14,8%) e R\$ 0,9 bilhões (2,5%) entre 2015 e 2018, respectivamente, onde os valores entre parênteses referem-se ao percentual da perda em relação ao PIB contrafactual. No acumulado do período, o impacto é de R\$ 15,2 bilhões, o que representa, em média, 10,5% do PIB contrafactual.

Tabela 7 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB do Litoral Adjacente (R\$ de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ bilhões	-5,9	-4,2	-8,9	-7,7	-7,8	-8,1	-7,7	-6,7
	% do PIB ^{CF}	-14,9	-11,2	-20,9	-18,6	-18,8	-19,3	-18,6	-16,7
	p-valor	0,21	0,25	0,11	0,13	0,09	0,11	0,13	0,14
2016	R\$ bilhões	-5,7	-4,8	-9,4	-8,9	-6,4	-6,6	-8,0	-7,4
	% do PIB ^{CF}	-15,8	-13,6	-23,6	-22,6	-17,4	-17,8	-20,9	-19,5
	p-valor	0,29	0,33	0,13	0,16	0,14	0,23	0,14	0,20
2017	R\$ bilhões	-6,4	-5,3	-8,7	-8,5	-5,7	-7,1	-7,2	-7,3
	% do PIB ^{CF}	-17,4	-14,8	-22,1	-21,7	-15,6	-18,8	-19,1	-19,2
	p-valor	0,32	0,35	0,14	0,18	0,25	0,23	0,21	0,14
2018	R\$ bilhões	-1,7	-0,9	-3,9	-3,9	-1,0	-2,3	-2,3	-2,7
	% do PIB ^{CF}	-4,7	-2,5	-10,0	-10,1	-2,9	-6,3	-6,3	-7,2
	p-valor	0,57	0,75	0,30	0,41	0,75	0,59	0,59	0,41
Acumulado	R\$ bilhões	-19,8	-15,2	-30,8	-29,0	-20,9	-24,1	-25,3	-24,1
	% do PIB ^{CF}	-13,3	-10,5	-19,2	-18,3	-13,9	-15,7	-16,3	-15,7
	p-valor	0,71	0,84	0,29	0,41	0,43	0,48	0,41	0,30
RSME	Pré	3,45	3,64	3,81	3,86	5,37	6,09	3,79	3,82
	Pós	6,86	5,43	10,42	9,74	7,58	8,35	8,75	8,23

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético. O p-valor é construído a partir dos 55 placebos, em cada simulação define-se um estado como atingido e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

A Tabela 8 mostra os municípios e os respectivos pesos na composição da região sintética. No resultado de referência, a região sintética é composta por seis municípios dentre os quais as três maiores participações são Jaraguá do Sul – SC (33,7%), Itapetinga – BA (21,8%) e Taubaté – SP (21,6%). Diferentemente das análises das seções anteriores, o ajuste do PIB não altera significativamente a composição da região

sintética, incluindo apenas o município de Ipojuca – PE (0,4%) no caso com ajuste. Contudo, há uma mudança importante na composição, como pode ser visto na tabela.

Tabela 8 — Pesos estimados pelo Controle Sintético do municípios que compõem a região sintética do Litoral Adjacente – contrafactuais selecionados

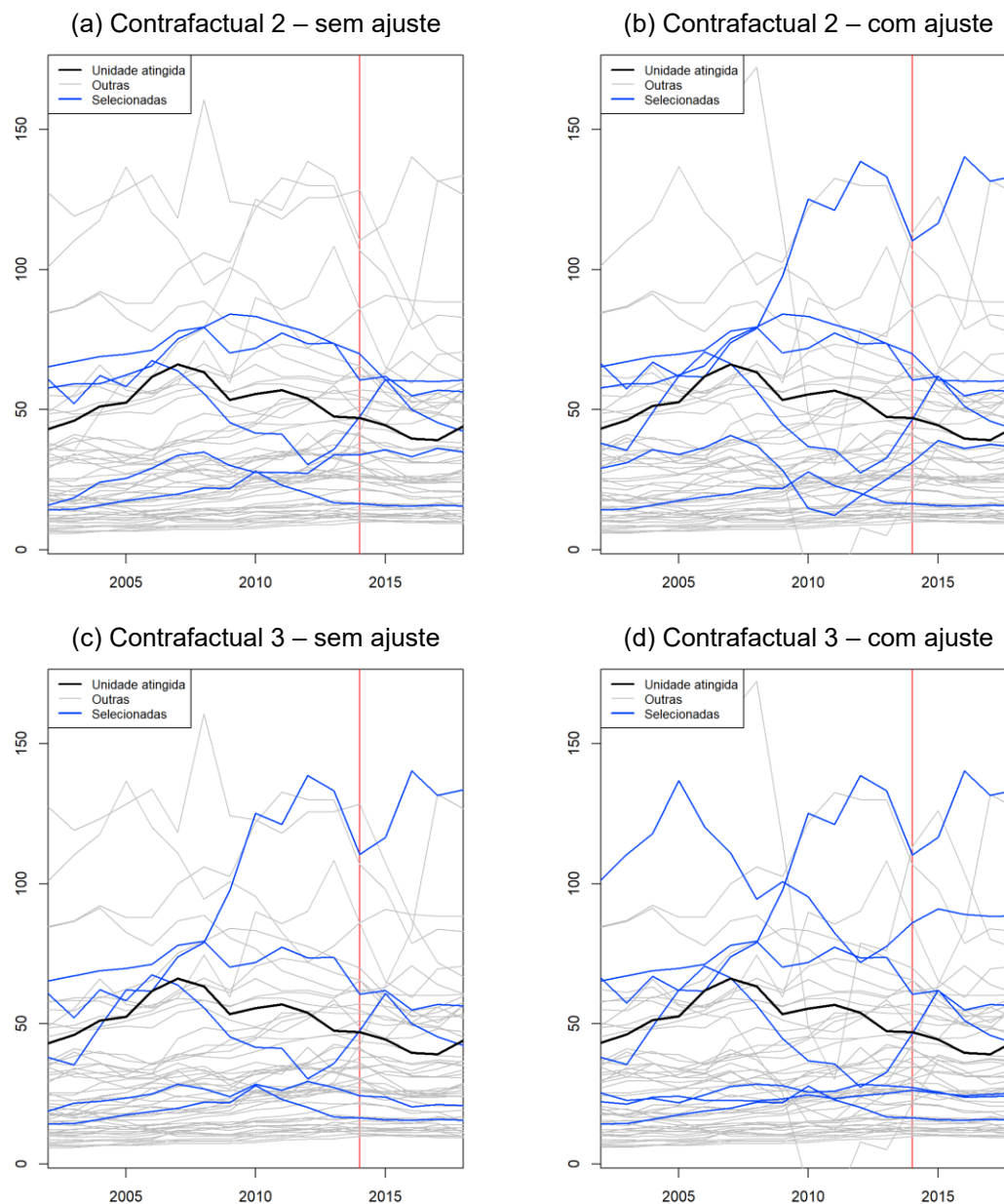
Sub-bacias	Contrafactual 2		Contrafactual 3	
	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
Barcarena (PA)	21,3	14,9	26,7	28
Camaçari (BA)				1,3
Ipojuca (PE)		0,4	2	9,3
Itapetinga (BA)	8,9	21,8	20,1	26,6
Jaraguá do Sul (SC)	32,9	33,7	30,1	34,6
Macaíba (RN)			4,1	
Marabá (PA)	19,5	7,5		
São José dos Pinhais (PR)				0,1
Taubaté (SP)	17,3	21,6	17	

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Demais municípios dentre os 55 receberam peso igual a zero nessas composições.

Para melhor analisar a composição da região sintética estimada, o Gráfico 16 a seguir mostra a trajetória temporal do PIB *per capita* dos municípios que compõem a estimação da região sintética dando destaque aos municípios selecionados pelo Controle Sintético (linha em azul) e a trajetória observada do PIB *per capita* do Litoral Adjacente em contrafactuais selecionados. A linha vertical vermelha separa o período pré-rompimento. De modo similar aos resultados anteriores, as trajetórias selecionadas para compor a região sintética apresentam uma variação do nível e comportamento ao longo do tempo em relação à unidade atingida no resultado de referência. Apesar da trajetória do PIB *per capita* do município de Ipojuca (PE) ter um comportamento crescente em todo período, diferente da trajetória observada para o Litoral Adjacente, este possui um peso muito pequeno (0,4%) na composição da região sintética.

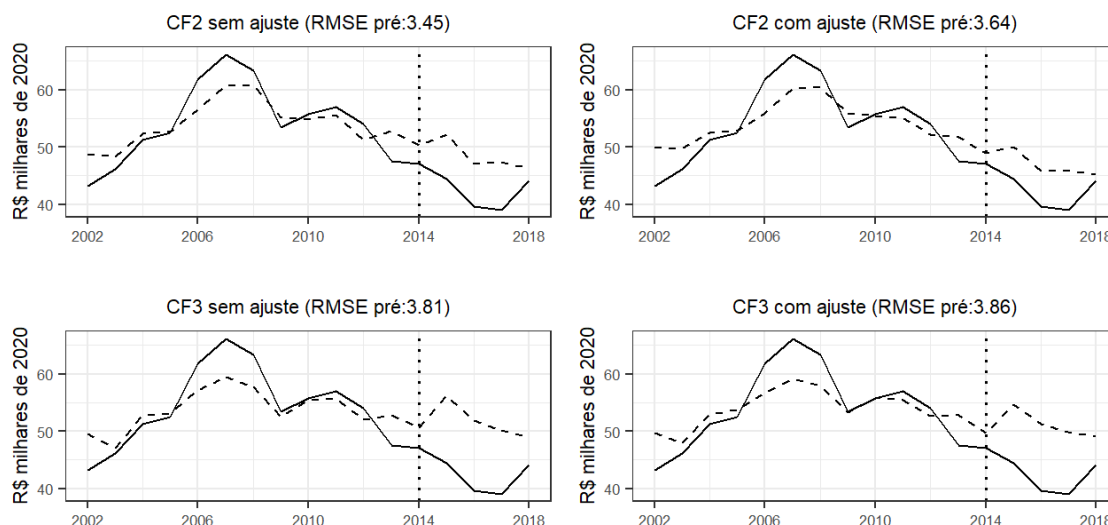
Gráfico 16 — PIB *per capita* dos municípios selecionados pelo Controle Sintético e do Litoral Adjacente (Unidade atingida)



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Na sequência, o Gráfico 17 mostra o PIB *per capita* do Litoral Adjacente e da região sintética estimada, no período pré e pós-rompimento. Observe que a trajetória do PIB *per capita* da região sintética, no resultado de referência, é relativamente próxima à unidade atingida nos anos anteriores a 2014, enquanto no período pós-rompimento apresenta uma queda menor. Em particular, a região sintética apresenta um aumento no PIB *per capita* em 2015.

Gráfico 17 — PIB *per capita* do Litoral Adjacente e da região sintética



Legenda: — Realizado --- Região Sintética

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

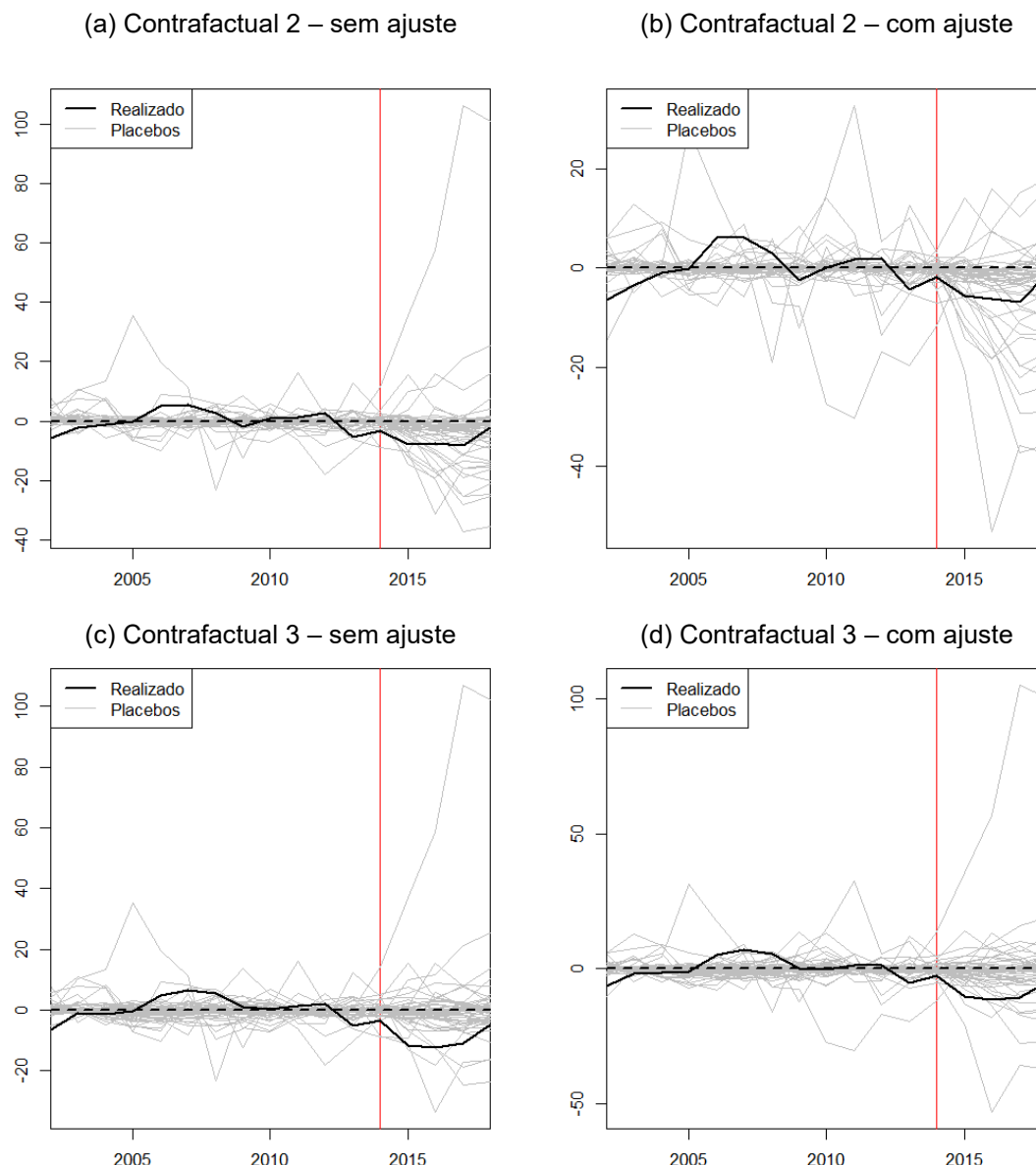
Observação: RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

A análise da qualidade do ajustamento através do p-valor – que indica o ordenamento da razão do RMSE entre os placebos – na Tabela 7, mostra que as estimativas anuais do impacto, no resultado de referência, estão entre as maiores quando comparadas aos impactos estimados para os placebos, com exceção do ano de 2018 (quanto menor o p-valor mais extremo é o impacto calculado em relação à distribuição dos impactos placebos). Esse mesmo resultado se observa no Contrafactual 2 sem ajuste e Contrafactual 3, sendo que, neste último, a perda em 2018 também se encontra entre os maiores impactos, nos casos com e sem ajuste do PIB.

Como discutido nas seções anteriores, outra forma de avaliar a qualidade do ajustamento da região sintética à unidade atingida é pela inspeção visual do impacto antes e depois do rompimento. Nessa linha, o Gráfico 18 apresenta a diferença entre o PIB *per capita* do Litoral Adjacente e da região sintética para contrafactuais selecionados. Seguindo as seções anteriores, neste e no Gráfico 19 a seguir, foram excluídos os placebos com RMSE pré 5 vezes superior ao da unidade atingida.

Em todos os contrafactuais apresentados, em especial no resultado de referência, a diferença das trajetórias pré-rompimento permanece relativamente próxima ao eixo do zero, indicando um bom ajustamento. Contudo, o impacto pós-2014 é relativamente pequeno, em relação aos placebos.

Gráfico 18 — Diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético para o Litoral Adjacente (realizado) e placebos



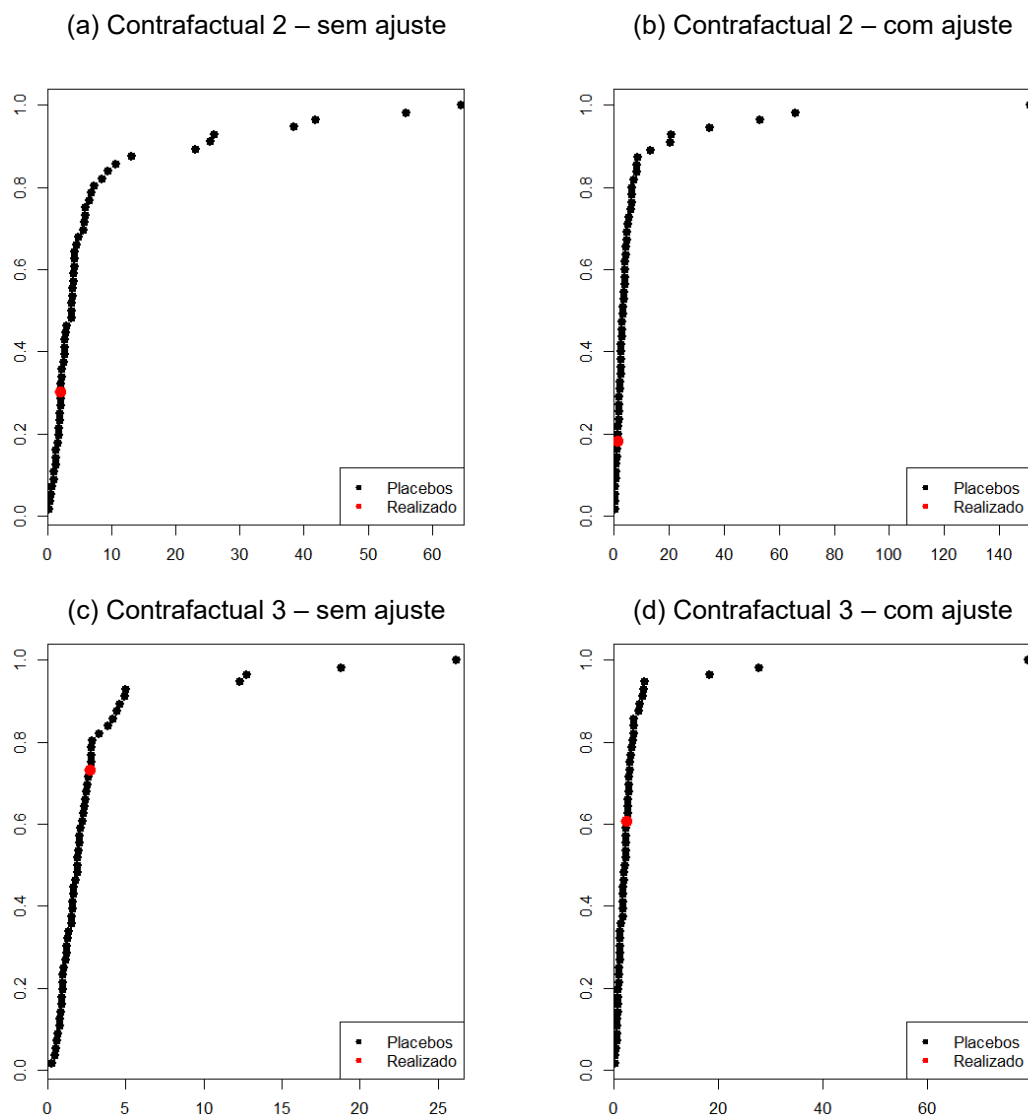
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré do Litoral Adjacente.

Nessa mesma linha, o Gráfico 19 apresenta a distribuição da razão do RMSE pós sobre o RMSE pré-rompimento. Como pode ser visto, ainda que haja um bom ajuste da região sintética no período pré-rompimento para o resultado de referência, a razão do RMSE indica que o impacto estimado está entre os menores relativamente aos demais placebos. Entretanto, como discutido anteriormente nesta seção, esse resultado para a perda acumulada está relacionado ao menor impacto em 2018, enquanto as demais estimativas anuais sugerem uma perda estimada entre as maiores relativamente aos placebos.

Na seção seguinte, serão apresentados os resultados para o município de Anchieta (ES) que abriga uma parte importante da etapa de comercialização do minério de ferro.

Gráfico 19 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para o Litoral Adjacente (realizado) e placebos



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré do Litoral Adjacente.

4.4 Anchieta (ES)

Esta seção apresenta o impacto na renda agregada no município litorâneo de Anchieta (ES), marcado pela importância econômica da pelotização dos minérios de ferro da Mineradora Samarco assim como pelo escoamento do produto no porto Samarco. Esta seção apresenta um controle sintético especificamente para esse município, que possui uma dinâmica diferente das demais localidades analisadas até aqui.

Em linha com os passos de estimação da região sintética para os municípios do Litoral Adjacente descritos na seção anterior, a estimação do Controle Sintético para o município de Anchieta (ES) também se utilizou da pré-seleção de municípios que constituem o potencial grupo de controle através da distância de Mahalanobis. Novamente, a utilização de um grande número de potenciais controles pode gerar problemas na estimação devido à alta dimensionalidade. Desse modo, a aplicação da distância de Mahalanobis permite a estimação do Controle Sintético num subconjunto dos municípios que guardam semelhanças econômicas e geográficas, como descrito na Seção 4.3. Para maiores detalhes, o leitor é referido ao APÊNDICE D.

A Figura 7 apresenta a localização geográfica dos 55 municípios selecionados como potenciais controles pela distância de Mahalanobis e destaca o município de Anchieta (ES) em laranja. Em geral, os municípios pré-selecionados se encontram próximos ao litoral – o que é esperado uma vez que a distância ao mar é uma das variáveis consideradas no seu cômputo – e estão dispersos desde a região Sul à região Sudeste, sem haver nenhuma concentração em particular. Evidentemente, os municípios selecionados aqui diferem daqueles selecionados para o Litoral Adjacente uma vez que a distância é calculada em relação às características de Anchieta (ES). O APÊNDICE E descreve a análise de robustez do impacto estimado relativa ao número de municípios escolhidos.

Figura 7 — Municípios selecionados pela distância de Mahalanobis como potenciais controles para o município de Anchieta (ES)



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: * Conjunto de 55 municípios selecionados a partir da distância de Mahalanobis.

Uma vez pré-selecionado o grupo de municípios de controle, é possível proceder às estimativas do impacto do rompimento sobre o PIB do município de Anchieta (ES), cujos resultados estão reportados na Tabela 9, para todos os contrafactuais considerados. Em relação ao impacto acumulado no período 2015 a 2018, as estimativas de perda de PIB estão entre um mínimo de R\$ 0,5 bilhão (Contrafactual 4 com ajuste) e um máximo de R\$ 14,1 bilhão (Contrafactual 2 sem ajuste).

Sob o critério de menor RMSE e resultados com o PIB ajustado pelo preço do minério de ferro (discutido na Seção 4.1), o Contrafactual 2 com ajuste é, novamente, o resultado de referência e será examinado na Seção 5 de síntese dos resultados. Os resultados sugerem um padrão de impacto do rompimento diferente do observado nas seções até aqui. A perda do PIB do município de Anchieta (ES) tende a crescer ao longo dos anos. Em particular, a perda anual estimada no resultado de referência é de R\$ 2,4 bilhões (39,9%), R\$ 2,8 bilhões (74,5%), R\$ 3,4 bilhões (77,7%) e R\$ 4,4 bilhões (79,9%) entre 2015 e 2018, respectivamente, onde os valores em parênteses referem-se ao percentual da perda em relação ao PIB contrafactual. Como será discutido mais

à frente, essa perda crescente resulta da recuperação do PIB da região sintética a partir de 2016, o que não ocorre com o PIB de Anchieta (ES).

Tabela 9 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB do município de Anchieta (ES) (R\$ de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ bilhões	-2,8	-2,4	-2,0	-1,5	1,1	1,2	-2,8	-1,9
	% do PIB ^{CF}	-44,9	-39,9	-36,0	-29,2	48,3	51,8	-44,3	-34,0
	p-valor	0,09	0,13	0,11	0,16	0,14	0,14	0,09	0,11
2016	R\$ bilhões	-3,0	-2,8	-1,9	-1,7	-0,3	-0,2	-2,9	-2,1
	% do PIB ^{CF}	-78,2	-74,5	-69,5	-63,3	-26,4	-16,6	-77,5	-69,2
	p-valor	0,07	0,09	0,09	0,13	0,63	0,75	0,05	0,09
2017	R\$ bilhões	-3,6	-3,4	-2,4	-2,2	-0,5	-0,5	-3,5	-2,7
	% do PIB ^{CF}	-79,6	-77,7	-72,4	-69,2	-36,4	-32,7	-79,0	-73,5
	p-valor	0,07	0,07	0,11	0,13	0,34	0,36	0,05	0,09
2018	R\$ bilhões	-4,6	-4,4	-3,8	-3,4	-1,1	-1,1	-4,6	-3,8
	% do PIB ^{CF}	-81,9	-79,9	-78,5	-75,8	-52,6	-49,7	-81,7	-77,7
	p-valor	0,07	0,07	0,09	0,11	0,20	0,20	0,09	0,09
Acumulado	R\$ bilhões	-14,1	-12,9	-10,0	-8,8	-0,8	-0,5	-13,7	-10,5
	% do PIB ^{CF}	-69,2	-66,1	-61,5	-56,9	-11,8	-7,3	-68,7	-61,4
	p-valor	0,46	0,43	0,38	0,38	0,98	0,91	0,23	0,21
RSME	Pré	34,4	31,5	36,1	33,5	91,0	80,5	34,6	32,3
	Pós	126,5	116,8	92,0	81,4	30,5	30,5	123,6	96,3

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético. O p-valor é construído a partir dos 55 placebos, em cada simulação define-se um município como atingido e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

A Tabela 10, a seguir, apresenta os municípios selecionados pelo Controle Sintético e seus respectivos pesos na composição da região sintética para contrafactuais selecionados. No resultado de referência o município de Anchieta (ES) sintético é composto por 5 municípios com pesos positivos, dentre os quais os municípios de São João da Barra – RJ (50,3%), Canindé de São Francisco – SE (18,0%) e Triunfo – RS (15,9%) apresentam os maiores pesos. Note que em relação ao contrafactual sem ajuste do PIB não há alteração dos municípios selecionados, apenas mudanças na sua composição.

Tabela 10 — Pesos estimados pelo Controle Sintético dos municípios que compõem o município de Anchieta (ES) sintético – contrafactuais selecionados

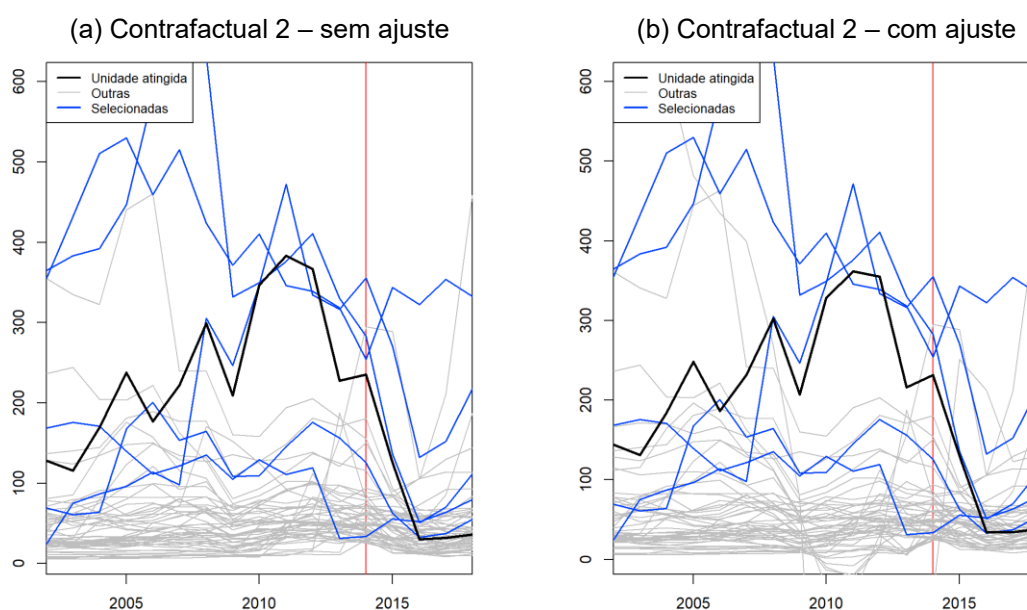
Sub-bacias	Contrafactual 2		Contrafactual 3	
	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
Canindé de São Francisco (SE)	13,6	18,0	22,2	26,5
Casimiro de Abreu (RJ)	8,0	7,8		
Quissamã (RJ)	5,9	8,0	19,6	22,1
São João da Barra (RJ)	57,0	50,3	58,2	51,5
Triunfo (RS)	15,5	15,9		

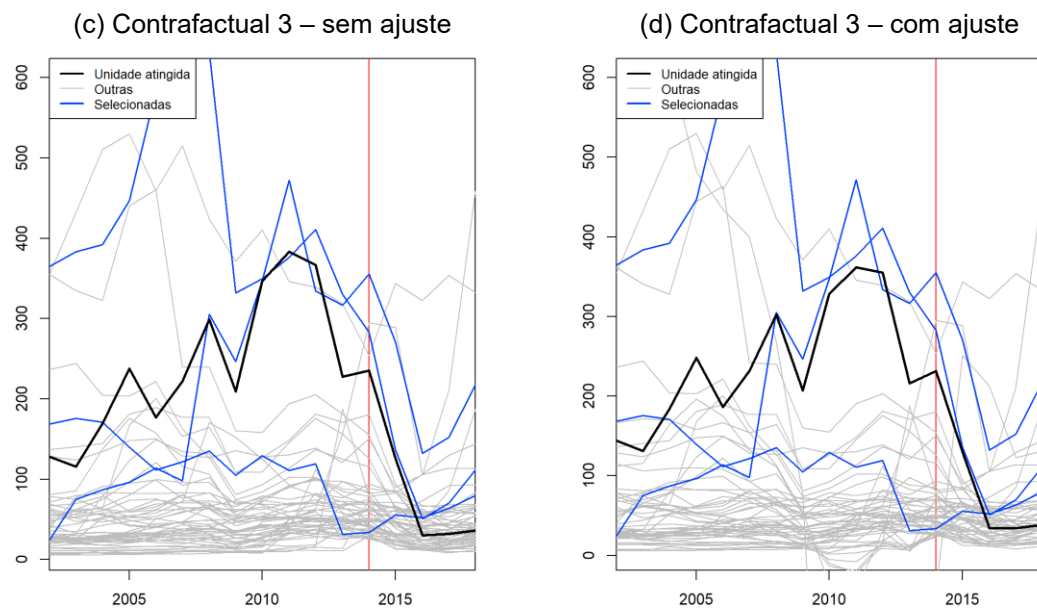
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Demais municípios dentre os 55 receberam peso igual a zero nessas composições.

Na sequência, o Gráfico 20 apresenta a trajetória de PIB *per capita* do conjunto dos municípios considerados na análise, destacando os municípios selecionados (linhas em azul) e o municípios de Anchieta (ES) (linha preta), para contrafactuais selecionados. Os municípios selecionados pelo Controle Sintético possuem um maior nível de PIB *per capita* em relação aos demais municípios considerados, seguindo característica similar apresentada pela região atingida. Além disso, não há alteração dos municípios selecionados entre as trajetórias com e sem ajuste em ambos os contrafactuais apresentados (apenas na composição). Em particular, isso é verdade para o resultado de referência, como já mostrado na Tabela 10.

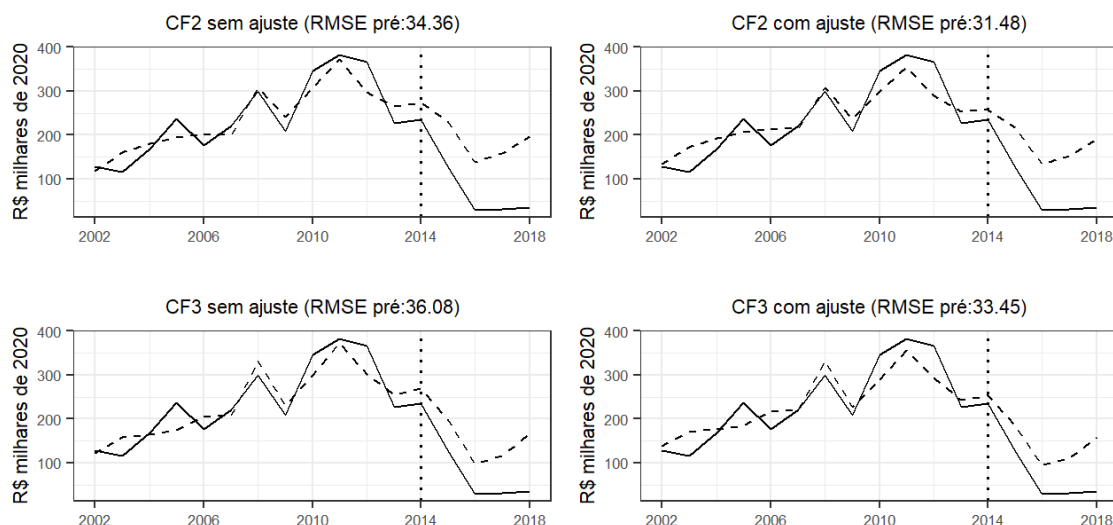
Gráfico 20 — PIB *per capita* dos municípios selecionados pelo Controle Sintético e do municípios de Anchieta (ES) (atingida)





De forma complementar aos resultados apresentados na Tabela 9 anterior, o Gráfico 21 mostra as séries do PIB *per capita* de Anchieta-ES e do município sintético no período pré e pós rompimento (delimitados pelo ano de 2014 realçado nos gráficos). Observa-se que a trajetória contrafactual é próxima à trajetória de Anchieta-ES no período anterior ao rompimento, apresentando um descolamento após 2014 em ambos os contrafactuais. Em particular, no resultado de referência, é possível notar que a recuperação do município sintético em conjunto com a relativa estagnação do PIB *per capita* da unidade atingida após 2016 resulta num impacto crescente sobre o PIB apresentado anteriormente.

Gráfico 21 — PIB *per capita* do município de Anchieta-ES e do município sintético



Legenda: — Realizado --- Região Sintética

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados IBGE.

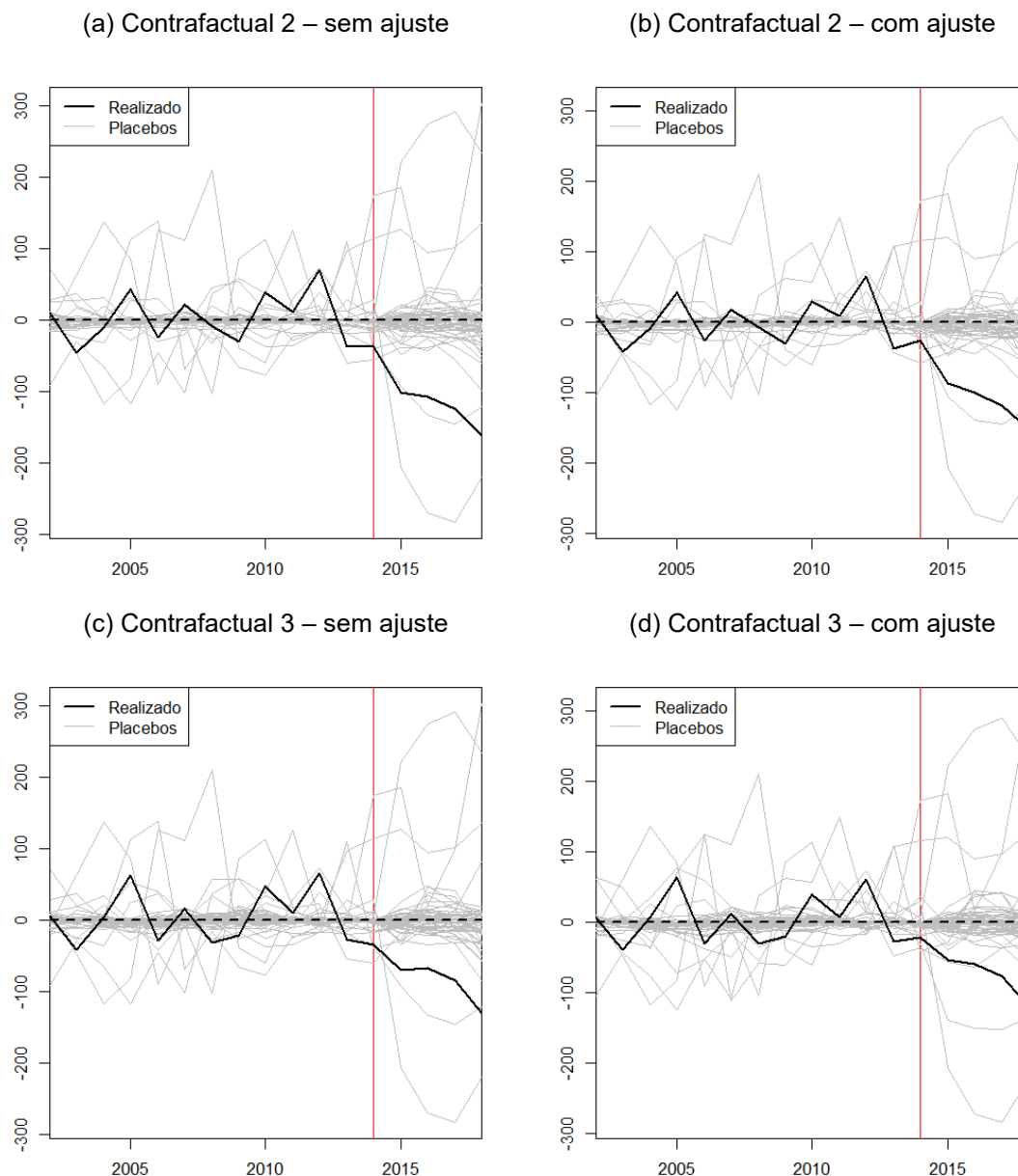
Observação: RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

Em relação à avaliação do ajuste das estimativas, o p-valor reportado na Tabela 9 anterior – que mede o ordenamento da razão do RMSE –, mostra que as estimativas anuais de impacto sobre o município de Anchieta-ES, no resultado de referência, estão entre as maiores em comparação aos placebos para todo período. De fato, esse resultado também se observa para as perdas anuais no Contrafactual 2 sem ajuste e no Contrafactual 3.

Em termos da inspeção visual do ajuste, o Gráfico 22 mostra a diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético para o município de Anchieta-ES, em contrafactuais selecionados no período antes e depois do rompimento. Em linha com as seções anteriores, foram excluídos os placebos com RMSE-pré 5 vezes superior ao da unidade atingida, neste e no Gráfico 23 a seguir.

Nota-se que em ambos os contrafactuais apresentados, com e sem ajuste, a diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético é relativamente menor no período pré rompimento que os diversos placebos. Além disso, o impacto mensurado no período 2015-2018 está entre as maiores magnitudes calculadas, quando se compara aos diversos placebos, sugerindo evidência do impacto do rompimento.

Gráfico 22 — Diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético para o município de Anchieta (ES) (realizado) e placebos



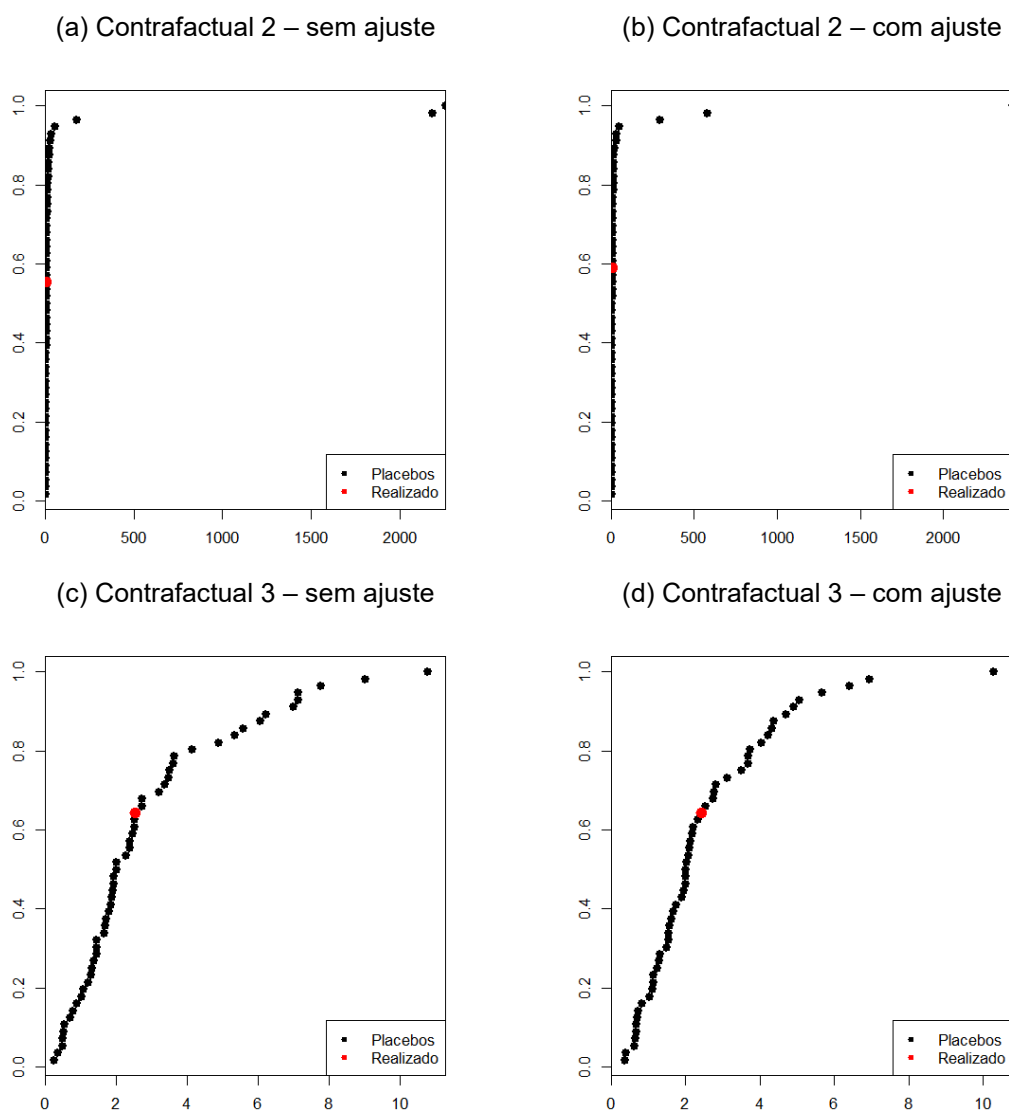
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré de Anchieta (ES).

Nessa mesma linha, o Gráfico 23 apresenta a distribuição da razão entre o RMSE pós e pré da unidade atingida (ponto vermelho) e dos demais placebos. A razão avalia o impacto acumulado do período 2015 a 2018. No resultado de referência (assim como nos demais contrafactuais representados), a razão do RMSE se encontra entre as maiores relativamente aos placebos. Mais ainda, os impactos anuais estimados se encontram no extremo da distribuição corroborando a estimativa acumulada.

Vale ressaltar que parte dos placebos com maior razão do RMSE apresentados no gráfico dizem respeito a valores de impacto positivo destes (o que pode ser visto no Gráfico 22 anterior) –, sinal oposto ao esperado para o efeito do rompimento. Ademais, o valor positivo de impacto para alguns placebos se mantém mesmo com o ajuste do preço do minério, sugerindo que estes não decorrem de reações compensatórias do preço do minério.

Gráfico 23 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para o município de Anchieta (ES) (realizado) e placebos



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré de Anchieta (ES).

5 SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS REGIÕES DE INTERESSE

Uma vez analisados os impactos do rompimento para diversos recortes sub-regionais dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e, sob as especificações dos contrafactuais apresentados nas subseções anteriores, esta seção reúne os resultados do Contrafactual 2 apresentados ao longo da Seção 4. De forma a manter a exposição dos resultados mais completa, apresentam-se, primeiramente, os resultados sem ajustes pelo preço do minério de ferro e, em seguida, os resultados com ajuste, os quais compõem os resultados de referência.

A Tabela 11 apresenta a síntese das perdas estimadas de PIB dos estados de MG e ES e seus recortes sub-regionais devido ao impacto do rompimento da barragem no período 2015 a 2018. Utiliza-se a série do PIB observado (i.e., sem ajuste) e a preços de reais de 2020 nos resultados apresentados na tabela. Os resultados sugerem uma perda acumulada de R\$ 206,6 bilhões (6,1%) enquanto a perda acumulada na região complementar é de R\$ 147,0 bilhões (5,2%), onde os percentuais entre parênteses se referem à proporção relativa ao PIB contrafactual. O impacto na região complementar é obtido como o resíduo do impacto para MG e ES excluindo a soma dos impactos sub-regionais, isto é, subtraindo a soma dos impactos sobre a sub-bacia do Rio Doce (sub-bacia), o Litoral Adjacente (Litoral) e o municípios de Anchieta (ES) (uma vez que os 40 municípios fazem parte da sub-bacia do Rio Doce). Como será mostrado mais à frente, a perda de PIB acumulada da região complementar estimada pela série observada é bastante similar ao caso com ajuste.

Em termos anuais, a perda total em MG e ES, já reportada em Nota Técnica anterior (FGV, 2020i), é de R\$ 41,9 bilhões (4,9%), R\$ 47,5 bilhões (5,8%), R\$ 71,8 bilhões (8,4%) e R\$ 45,4 bilhões (5,2%) entre 2015 e 2018, respectivamente. Por sua vez, os resultados sugerem um impacto anual na região complementar de R\$ 24,9 bilhões (3,5%), R\$ 29,2 bilhões (4,3%), R\$ 54,8 bilhões (7,7%) e R\$ 38,1 bilhões (5,3%) entre 2015 e 2018, respectivamente.

Vale ressaltar que a perda anual como proporção do PIB contrafactual, nesse caso, tende a ser menor quando comparada à perda conjunta de MG e ES, à perda dos 40 municípios, do Litoral Adjacente e de Anchieta (ES), com exceção do ano de 2018. Em comparação à sub-bacia do Rio Doce, o impacto como proporção do PIB contrafactual na região complementar é inferior nos anos de 2015 e 2016. Além disso, a perda em 2017 representa 6,6% do PIB contrafactual comparado a 7,7% na região complementar, e 0,9% do PIB contrafactual em 2018 contra 5,3% na região complementar. Assim,

observa-se uma maior intensidade do impacto nas sub-regiões atingidas examinadas nas seções anteriores relativamente à sub-região complementar, no período analisado.

Tabela 11 — Síntese das estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB sem ajuste para diversos recortes sub-regionais (R\$ bilhões de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2 sem ajuste					
		MG e ES	Sub-bacia	40 mun.	Litoral	Anchieta	Restante
2015	R\$ bilhões	-41,9	-8,3	-5,4	-5,9	-2,8	-24,9
	% do PIB ^{CF}	-4,9	-7,7	-10,4	-14,9	-44,9	-3,5
	p-valor	0,15	0,18	0,08	0,21	0,09	-
2016	R\$ bilhões	-47,5	-9,5	-6,4	-5,7	-3,0	-29,2
	% do PIB ^{CF}	-5,8	-9,4	-12,9	-15,8	-78,2	-4,3
	p-valor	0,27	0,19	0,11	0,29	0,07	-
2017	R\$ bilhões	-71,8	-7,0	-4,0	-6,4	-3,6	-54,8
	% do PIB ^{CF}	-8,4	-6,6	-8,1	-17,4	-79,6	-7,7
	p-valor	0,15	0,28	0,18	0,32	0,07	-
2018	R\$ bilhões	-45,4	-0,9	-2,4	-1,7	-4,6	-38,1
	% do PIB ^{CF}	-5,2	-0,9	-4,9	-4,7	-81,9	-5,3
	p-valor	0,38	0,83	0,38	0,57	0,07	-
Acumulado	R\$ bilhões	-206,6	-25,7	-18,3	-19,8	-14,1	-147,0
	% do PIB ^{CF}	-6,1	-6,1	-9,1	-13,3	-69,2	-5,2
	p-valor	0,23	0,24	0,20	0,71	0,46	-

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético.

A Tabela 12, a seguir, mostra uma síntese dos impactos estimados incluindo a estimativa do impacto total em MG e ES e a estimativa na região complementar para a série de PIB com ajuste. Os resultados sugerem um impacto acumulado no período de R\$ 225,3 bilhões a preços de 2020, como já discutido em Nota Técnica anterior (FGV, 2021a). Esse impacto representa 6,6% do PIB contrafactual estimado. Em termos anuais, as perdas do PIB agregado de MG e ES são de R\$ 44,5 bilhões (5,1% do PIB contrafactual), R\$ 54,7 bilhões (6,6% do PIB contrafactual), R\$ 76,3 bilhões (8,8% do PIB contrafactual) e R\$ 49,8 bilhões (5,7% do PIB contrafactual) entre 2015 e 2018, respectivamente.

Tabela 12 — Síntese das estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB com ajuste para diversos recortes sub-regionais (R\$ bilhões de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2 com ajuste					
		MG e ES	Sub-bacia	40 mun.	Litoral	Anchieta	Restante
2015	R\$ bilhões	-44,5	-12,7	-8,2	-4,2	-2,4	-25,2
	% do PIB ^{CF}	-5,1	-11,3	-14,9	-11,2	-39,9	-3,5
	p-valor	0,19	0,08	0,01	0,25	0,13	-
2016	R\$ bilhões	-54,7	-18,3	-11,8	-4,8	-2,8	-28,8
	% do PIB ^{CF}	-6,6	-16,5	-21,4	-13,6	-74,5	-4,2
	p-valor	0,23	0,07	0,01	0,33	0,09	-
2017	R\$ bilhões	-76,3	-12,3	-8,8	-5,3	-3,4	-55,3
	% do PIB ^{CF}	-8,8	-10,9	-16,1	-14,8	-77,7	-7,8
	p-valor	0,19	0,21	0,06	0,35	0,07	-
2018	R\$ bilhões	-49,8	-5,3	-6,8	-0,9	-4,4	-39,3
	% do PIB ^{CF}	-5,7	-4,7	-12,5	-2,5	-79,9	-5,5
	p-valor	0,46	0,50	0,11	0,75	0,07	-
Acumulado	R\$ bilhões	-225,3	-48,6	-35,6	-15,2	-12,9	-148,5
	% do PIB ^{CF}	-6,6	-10,9	-16,2	-10,5	-66,1	-5,3
	p-valor	0,31	0,47	0,14	0,84	0,43	-

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético. A região “Complementar”, por sua vez, é obtida via resíduo do impacto total menos o impacto nas demais sub-regiões.

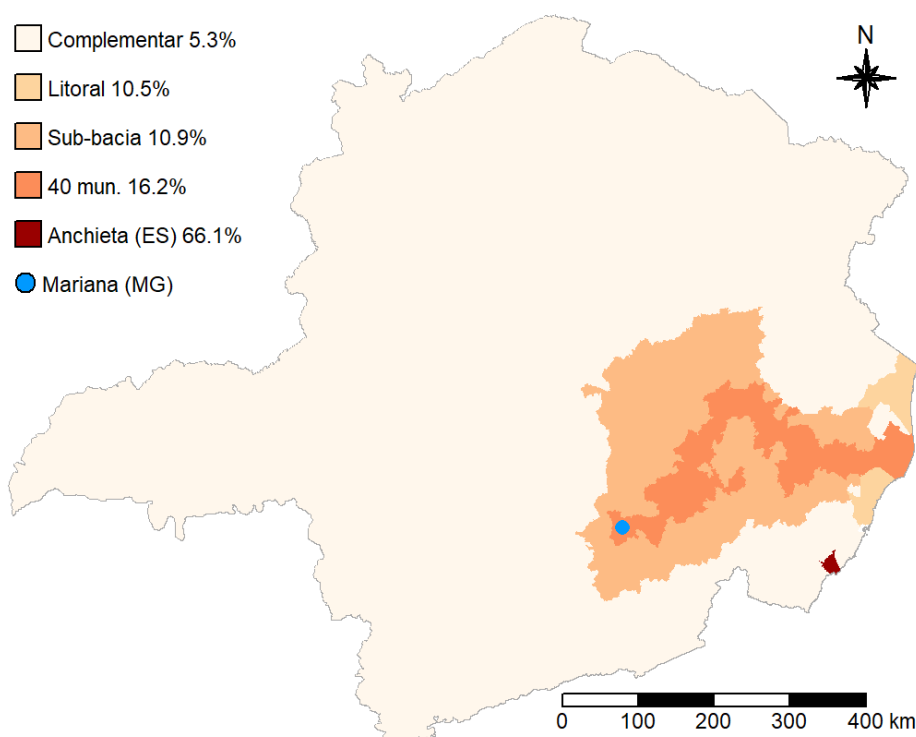
Nessa mesma linha, o impacto acumulado na região complementar no período é de R\$ 148,5 bilhões (5,3% do PIB contrafactual). Note que esse valor é muito próximo ao obtido no caso do PIB sem ajuste. De modo que a diferença entre os resultados sobre o PIB total de MG e ES com e sem ajuste se devem, em sua maior parte, aos efeitos sobre a sub-bacia do Rio Doce.

Por sua vez, os resultados sugerem uma perda em termos anuais na região complementar de R\$ 25,2 bilhões (3,5%), R\$ 28,8 bilhões (4,2%), R\$ 55,3 bilhões (7,8%) e R\$ 39,3 bilhões (5,5%) entre 2015 e 2018, respectivamente. Assim, o impacto estimado sobre as sub-regiões diretamente impactadas corresponde a 34,1% do impacto total. O impacto residual na região complementar sugere uma importante propagação do impacto para demais áreas dos estados de MG e ES, o que já foi documentado no estudo anterior (FGV, 2020i). Dada a importância desse resultado, a Seção 6 apresenta evidências do impacto sobre a sub-região complementar utilizando a técnica de Controle Sintético (a mesma abordagem das subseções anteriores) mostrando valores próximos aos apresentados nesta seção. Adicionalmente, a Seção 8

discute evidências de que o impacto na sub-região complementar não é homogêneo, através da aplicação técnica de Diferenças em Diferenças para os municípios na fronteira de MG.

A Figura 8, a seguir, apresenta os estados de MG e ES, atingidos pelo rompimento, e os recortes sub-regionais para os quais foram estimados os impactos sobre o PIB. O ponto azul-claro na figura mostra a localização do município de Mariana (MG) onde ocorreu o rompimento da Barragem de Fundão. Como pode ser visto, os 40 municípios fazem parte da sub-região da bacia do Rio Doce (em laranja-escuro no gráfico), enquanto os 5 municípios do litoral adjacente e o município de Anchieta (ES) estão fora da bacia do Rio Doce. Por sua vez, a área complementar é composta do restante do estado exceto os recortes sub-regionais considerados. Finalmente, estão descritos, entre parênteses, os percentuais do impacto com relação ao PIB contrafactual.

Figura 8 — Perda acumulada das regiões e sub-regiões de MG e ES utilizadas na estimação do impacto do rompimento de 2015 a 2018 (% do PIB contrafactual)



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

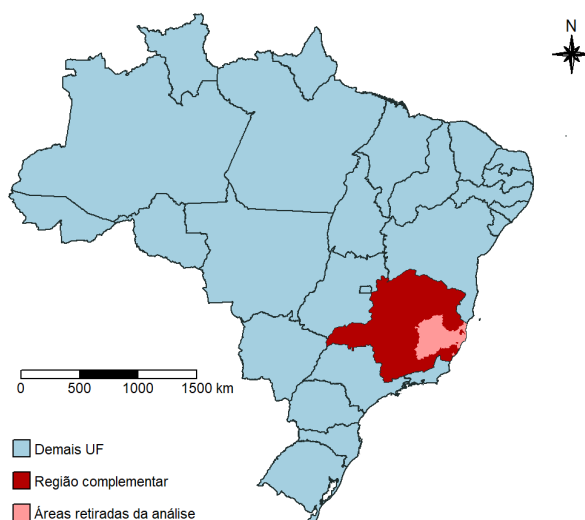
Observação: Percentuais das perdas calculadas com base nos Contrafactuais 2 com ajuste em cada uma das sub-regiões. A região “Complementar”, por sua vez, é obtida via resíduo do impacto total menos o impacto nas demais sub-regiões.

6 RESULTADOS NA REGIÃO COMPLEMENTAR

A seção anterior iniciou a discussão das evidências de propagação dos impactos do rompimento sobre o PIB das regiões complementares dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, ou seja, regiões fora das áreas consideradas legalmente como diretamente afetadas e o município de Anchieta (ES). Uma vez que a magnitude de impacto encontrada responde pela maior proporção em relação ao impacto total, esta seção se dedica a investigar as evidências de efeito sobre o PIB da região complementar utilizando a mesma metodologia de Controle Sintético das seções anteriores.

A Figura 9 mostra a localização no mapa da região complementar dos estados de MG e ES, considerada a unidade de análise nesta seção (destacada em vermelho). Esta região é composta por todos os municípios dos estados mencionados excluindo aqueles pertencentes à sub-bacia do Rio Doce (215 municípios de MG e ES), discutidos na Seção 4.1, os 5 municípios do litoral, discutidos na Seção 4.3 e o município de Anchieta (ES), discutido na Seção 4.4. De forma análoga à estimação do impacto sobre os municípios que compõem a sub-bacia do Rio Doce, os municípios diretamente afetados (área rosa) foram excluídos da região de potenciais controles, para fins de estimação do impacto na área complementar. No gráfico, os municípios excluídos estão destacados em rosa. Assim, os demais estados (exceto MG e ES) são os potenciais controles para efeito da estimação do Controle Sintético.

Figura 9 — Delimitação geográfica da sub-região complementar



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Para esse exercício retirou-se os 221 municípios de MG e ES já incluídos nas demais análises (215 da sub-bacia, 5 do litoral e Anchieta – ES)

A Tabela 13 apresenta os impactos sobre o PIB agregado da sub-região complementar para as diversas especificações contrafactuais e ambos os ajustes da série do PIB no período 2015-2018. Analisando primeiramente o impacto acumulado, a tabela mostra que a estimativa de impacto na sub-região está entre um mínimo de R\$ 82,6 bilhões (Contrafactual 4 sem ajuste) e um máximo de R\$ 160,2 bilhões (Contrafactual 5 com ajuste), a preços de 2020.

Sob o critério de ajustamento de menor RMSE pré-rompimento e estimativas com ajuste pelo preço do minério de ferro – relembre a discussão mais ampla sobre o critério na Seção 4.1 –, o Contrafactual 2 com ajuste, novamente, é o resultado de referência desta seção. De modo similar, aos impactos estimados para a sub-bacia do Rio Doce e para os 40 municípios, o impacto anual da sub-região complementar também apresenta uma forma de U-invertido. Contudo, o impacto máximo se dá em 2017. Mais especificamente, as perdas anuais do PIB agregado são de R\$ 26,0 bilhões (3,7%), R\$ 30,3 bilhões (4,4%), R\$ 54,1 bilhões (7,6%) e R\$ 34,2 bilhões (4,8%) entre 2015 a 2018, onde os percentuais entre parênteses referem-se à perda como proporção do PIB contrafactual.

Um importante resultado desta seção é a perda acumulada estimada, em torno de R\$ 144,6 bilhões (5,1%) no período. Este valor é muito próximo ao valor de R\$ 148,5 bilhões (5,3%) calculado como resíduo das estimativas totais e das regiões diretamente atingidas discutido na Seção 5 anterior. Assim, o resultado desta seção corrobora as estimativas obtidas anteriormente. Vale ressaltar que esse resultado não é obtido diretamente por se tratar de uma área complementar e pelo fato de existir a estimativa para a perda da região MG e ES conjunta. A estimação dos pesos para a série de PIB *per capita* da região complementar independe das estimações já realizadas às demais sub-regiões. Dito de outra forma, nada garante que encontraríamos valores semelhantes ao resíduo previamente calculado ao de computar o controle sintético aqui apresentado. Portanto, esse resultado indica uma robustez do valor estimado anteriormente – partindo de caminhos diferentes e encontrando valores consistentes.

Tabela 13 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB agregado dos municípios da sub-região complementar (R\$ de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ bilhões	-24,4	-26,0	-24,1	-26,0	-12,0	-32,4	-34,1	-38,8
	% do PIB ^{CF}	-3,4	-3,7	-3,4	-3,7	-1,7	-4,5	-4,8	-5,4
	p-valor	0,27	0,27	0,31	0,31	0,50	0,19	0,23	0,19
2016	R\$ bilhões	-26,4	-30,3	-26,0	-30,3	-25,4	-46,0	-47,8	-51,1
	% do PIB ^{CF}	-3,9	-4,4	-3,8	-4,4	-3,7	-6,6	-6,8	-7,2
	p-valor	0,38	0,46	0,31	0,38	0,38	0,23	0,23	0,19
2017	R\$ bilhões	-53,5	-54,1	-53,1	-54,1	-41,0	-50,7	-58,5	-54,5
	% do PIB ^{CF}	-7,5	-7,6	-7,5	-7,6	-5,9	-7,2	-8,2	-7,6
	p-valor	0,15	0,19	0,15	0,19	0,35	0,19	0,19	0,19
2018	R\$ bilhões	-33,7	-34,2	-33,2	-34,2	-4,3	-10,8	-18,5	-15,8
	% do PIB ^{CF}	-4,7	-4,8	-4,7	-4,8	-0,6	-1,6	-2,6	-2,3
	p-valor	0,38	0,46	0,50	0,50	0,92	0,77	0,81	0,65
Acumulado	R\$ bilhões	-137,9	-144,6	-136,4	-144,7	-82,6	-139,8	-158,9	-160,2
	% do PIB ^{CF}	-4,9	-5,1	-4,9	-5,1	-3,0	-5,0	-5,6	-5,6
	p-valor	0,19	0,31	0,31	0,19	0,62	0,42	0,42	0,50
RSME	Pré	0,62	0,59	0,62	0,59	1,13	1,25	1,21	1,39
	Pós	1,77	1,84	1,75	1,84	1,21	1,87	2,07	2,09

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: PIB^{CF} se refere ao PIB contrafactual, isto é, o PIB sintético obtido pela estimação do Controle Sintético. Para esse exercício retirou-se os 221 municípios de MG e ES já incluídos nas demais análises (215 da sub-bacia, 5 do litoral adjacente e Anchieta – ES)

A discussão seguinte mostra em algum detalhe a composição da sub-região complementar sintética selecionada pelo Controle Sintético. A Tabela 14 apresenta os estados selecionados e a sua participação na composição da sub-região sintética, para contrafactuais selecionados. Em todos estes, foram selecionados basicamente três estados com pesos positivos (exceto o Contrafactual 3 que seleciona um quarto estado, Rio de Janeiro, com peso de 0,1%). Em particular, no resultado de referência, foram selecionados os estados de Santa Catarina (49,7%), Pernambuco (30,7%) e Rondônia (19,6%). Importante notar o efeito do ajuste pelo preço do minério de ferro que altera a seleção dos estados que compõem a sub-região sintética. Notadamente, o estado do Pará é selecionado na série sem ajuste, porém possui peso zero quando se utiliza a série com ajuste uma vez que o estado tem importante atividade extrativa mineral.

Tabela 14 — Pesos estimados pelo Controle Sintético dos estados que compõem a sub-região complementar sintética – contrafactuais selecionados

Estados	Contrafactual 2		Contrafactual 3	
	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
Pará	30,7		31	
Pernambuco		30,7		30,7
Rio de Janeiro			0,1	
Rondônia	18,8	19,6	18,5	19,6
Santa Catarina	50,5	49,7	50,4	49,7

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

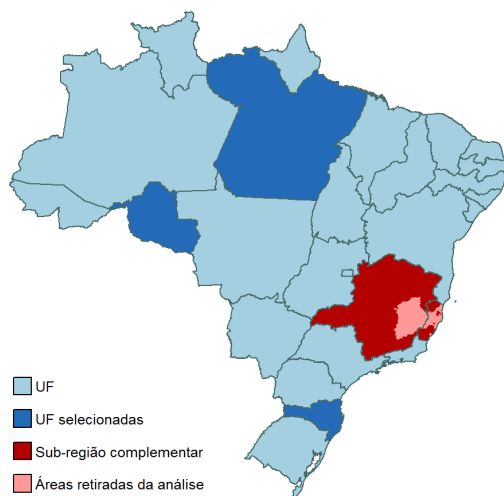
Observação: Para esse exercício retirou-se os 221 municípios de MG e ES já incluídos nas demais análises (215 da sub-bacia, 5 do litoral adjacente e Anchieta – ES)

A Figura 10, por sua vez, mostra os estados selecionados pelo Controle Sintético para compor a sub-região complementar sintética. O Painel (b) mostra que, no resultado de referência, a região sintética é composta pelos estados de Rondônia, Pernambuco e Santa Catarina. Interessante observar que o estado do Pará é selecionado no Contrafactual 2 sem ajuste pelo preço do minério de ferro, uma vez que este também concentra uma grande atividade extrativa mineral. Vale ressaltar que os estados selecionados nos Contrafactuais 2 e 3 são os mesmos, alterando apenas as suas ponderações.

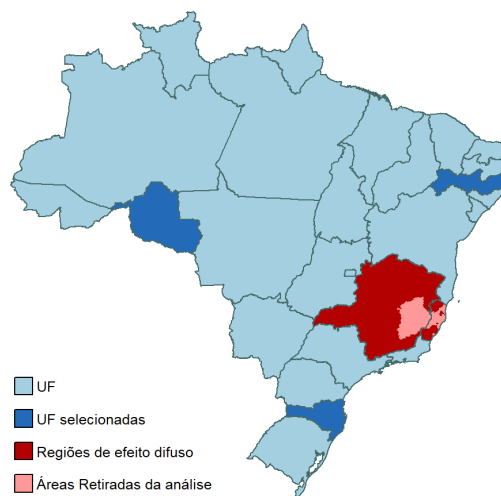
Na sequência, o Gráfico 24 mostra a série do PIB *per capita* de todos os estados do conjunto de controle, destacando em azul os estados selecionados pelo Controle Sintético e a linha preta destacando o PIB *per capita* da região complementar. A linha vertical vermelha destaca o ano de 2014. Vale mencionar que as trajetórias dos estados selecionados, no resultado de referência (Painel b), estão no meio da distribuição de PIB *per capita* e apresentam um comportamento similar.

Figura 10 — Estados que compõem a sub-região complementar sintética selecionadas pelo Controle Sintético – contrafactuais selecionados

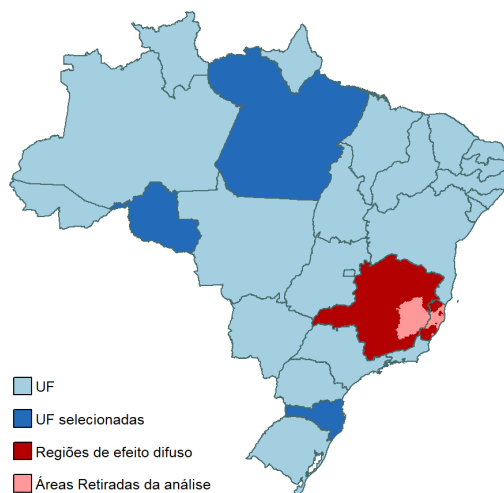
(a) Contrafactual 2 – sem ajuste



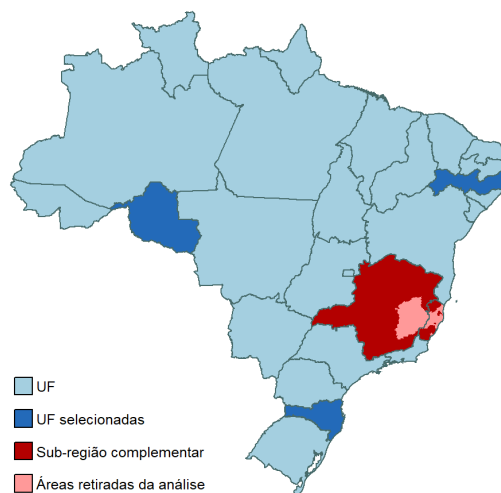
(b) Contrafactual 2 – com ajuste



(c) Contrafactual 3 – sem ajuste

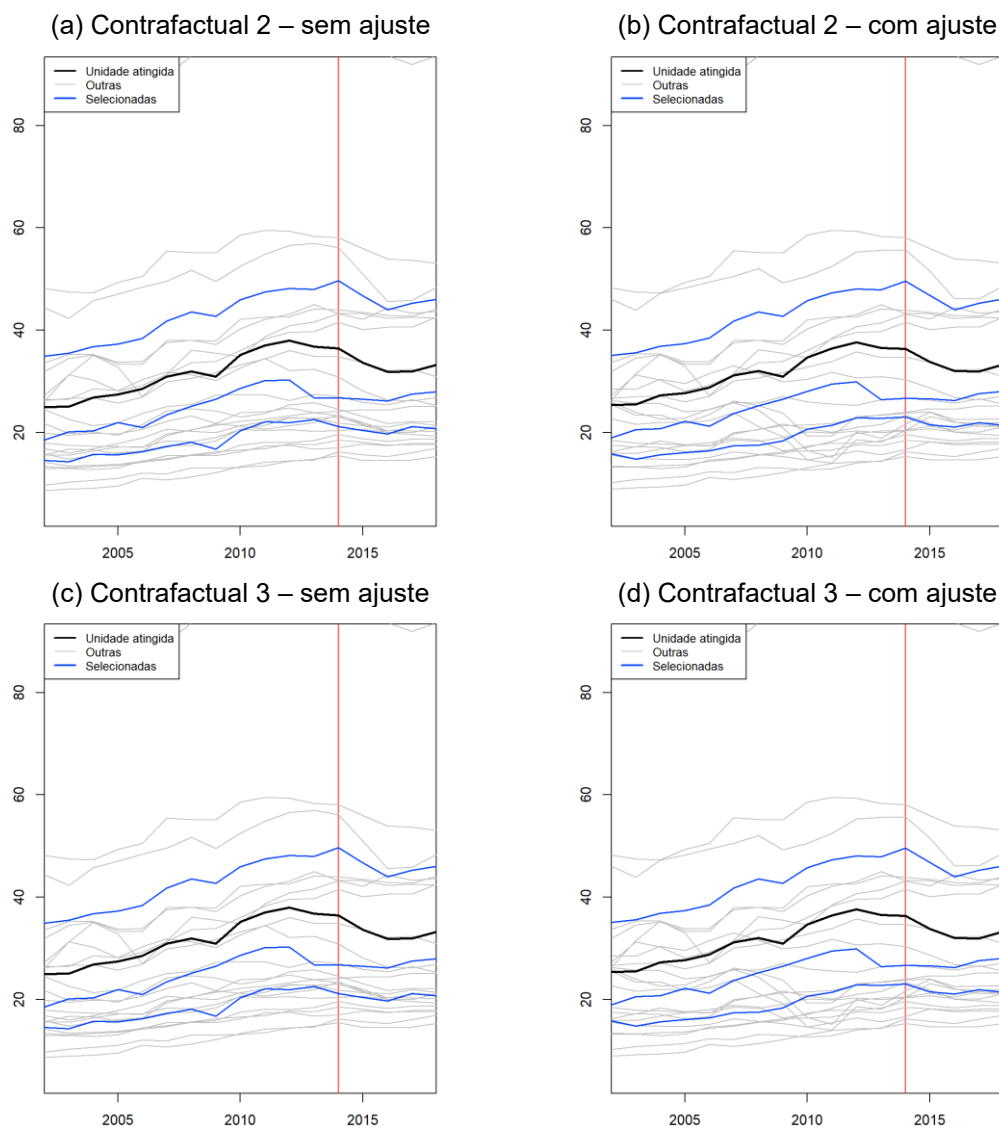


(d) Contrafactual 3 – com ajuste



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

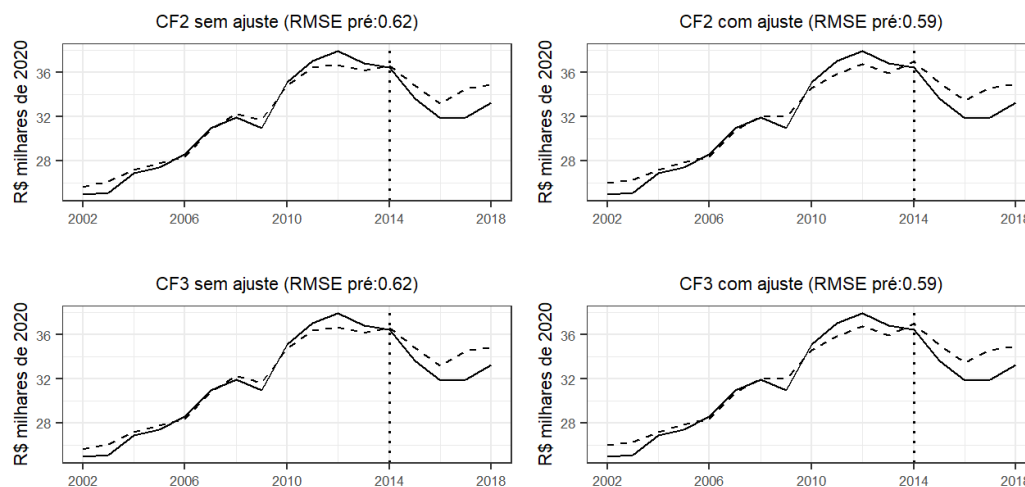
Gráfico 24 — PIB *per capita* dos estados selecionados pelo Controle Sintético e da sub-região complementar (Unidade atingida)



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Em termos do principal resultado desta seção, o Gráfico 25, a seguir, mostra uma análise visual do impacto através do PIB *per capita* da sub-região complementar, observado e sintético, no período antes e depois do rompimento para contrafactuais selecionados. No resultado de referência (Painel b), assim como nos demais apresentados, ambas as séries estão bastante próximas nos anos pré-rompimento, sugerindo um bom ajuste das estimativas. Por sua vez, há um descolamento entre as séries após o rompimento, indicando evidência do impacto do rompimento. Em particular, o gráfico mostra que o impacto máximo em 2017, apresentado na Tabela 13 anterior, resulta de uma recuperação do PIB *per capita* da sub-região complementar sintética enquanto a observada se mantém relativamente constante.

Gráfico 25 — PIB *per capita* da sub-região complementar e da sub-região sintética



Legenda: — Realizado --- Região Sintética

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Para esse exercício retirou-se os 221 municípios de MG e ES já incluídos nas demais análises (215 da sub-bacia, 5 do litoral adjacente e Anchieta – ES)

Para a análise da qualidade do ajuste das estimativas de impacto, é importante retornar à estimativa do p-valor reportado na Tabela 13. É necessário frisar que a análise do p-valor aqui difere da análise estatística de teste de hipóteses convencional, uma vez que este é calculado a partir da ordenação da razão do RMSE pré e pós da unidade atingida e dos placebos. Dado que o número de impactos mensurados é limitado a 26 estimativas (unidade atingida mais placebos), a probabilidade de estar no extremo da distribuição será mecanicamente maior (no extremo o menor p-valor seria de pelo menos $1/26 \cong 0,04$).

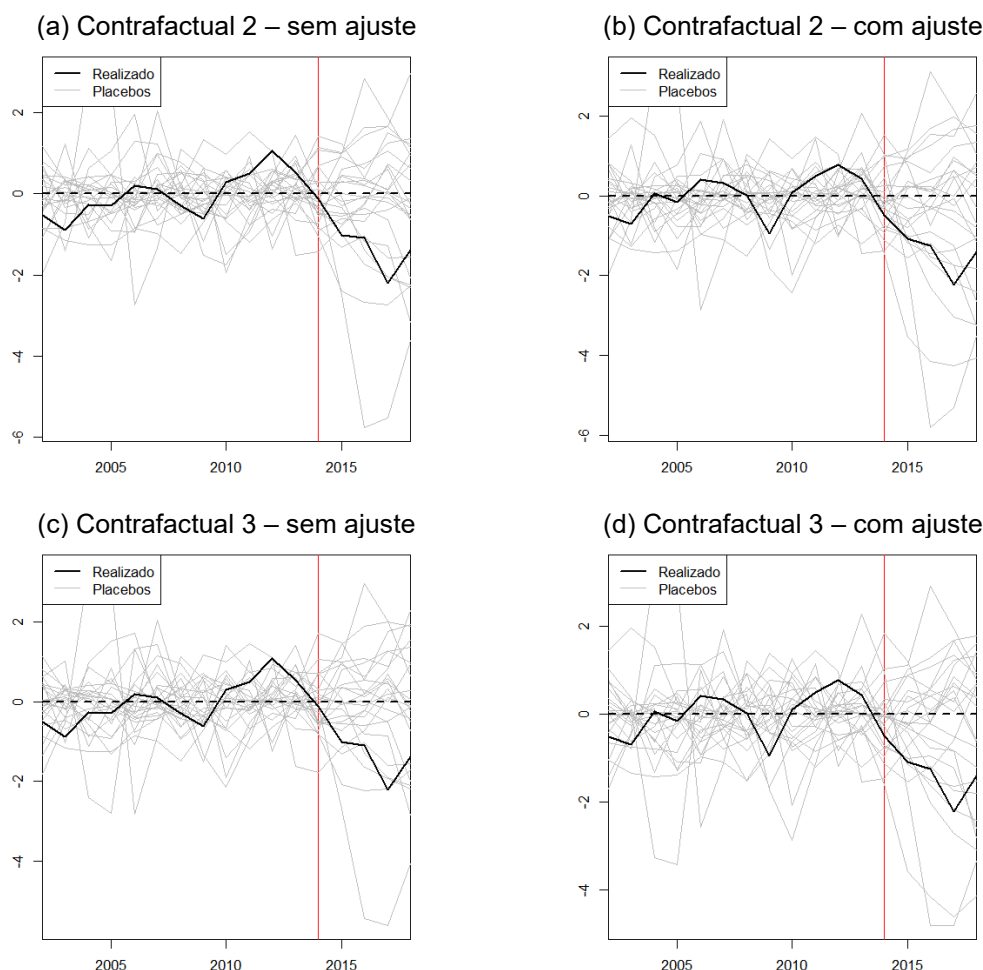
Com essa ressalva em mente, a tabela mostra que o p-valor obtido para as estimativas anuais de perda, no resultado de referência, implicam que estas se encontram entre as maiores quando comparadas aos placebos (p-valor relativamente baixo). Este resultado também se verifica para o Contrafactual 2 sem ajuste e Contrafactual 3, embora neste último, o ano de 2018 apresente uma perda mediana. Por sua vez, o p-valor acumulado – que é calculado a partir da razão do RMSE pré e pós – corrobora a análise anual mostrando que o impacto se encontra entre os maiores no período analisado, quando se leva em consideração o ajuste pré-rompimento da região sintética.

Outra forma de analisar a qualidade do ajuste é pela inspeção visual do impacto. Nessa linha, o Gráfico 26 mostra a diferença entre o PIB *per capita* observado e sintético da

sub-região complementar no período anterior e posterior ao rompimento (delimitado pela linha vertical vermelha em 2014), para contrafactuais selecionados. Novamente, foram excluídos os placebos com RMSE pré 5 vezes superior ao da unidade atingida, neste e no Gráfico 27 seguinte.

O gráfico sugere que a diferença observada no período pré-rompimento não está entre as maiores em relação aos placebos, enquanto a estimativa de impacto após 2014 figura entre as maiores no período, para os contrafactuais apresentados e, em particular, para o resultado de referência (Painel b). Esse comportamento da diferença entre os valores observado e sintético sugere a presença do efeito do rompimento.

Gráfico 26 — Diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético para a sub-região complementar (realizado) e placebos

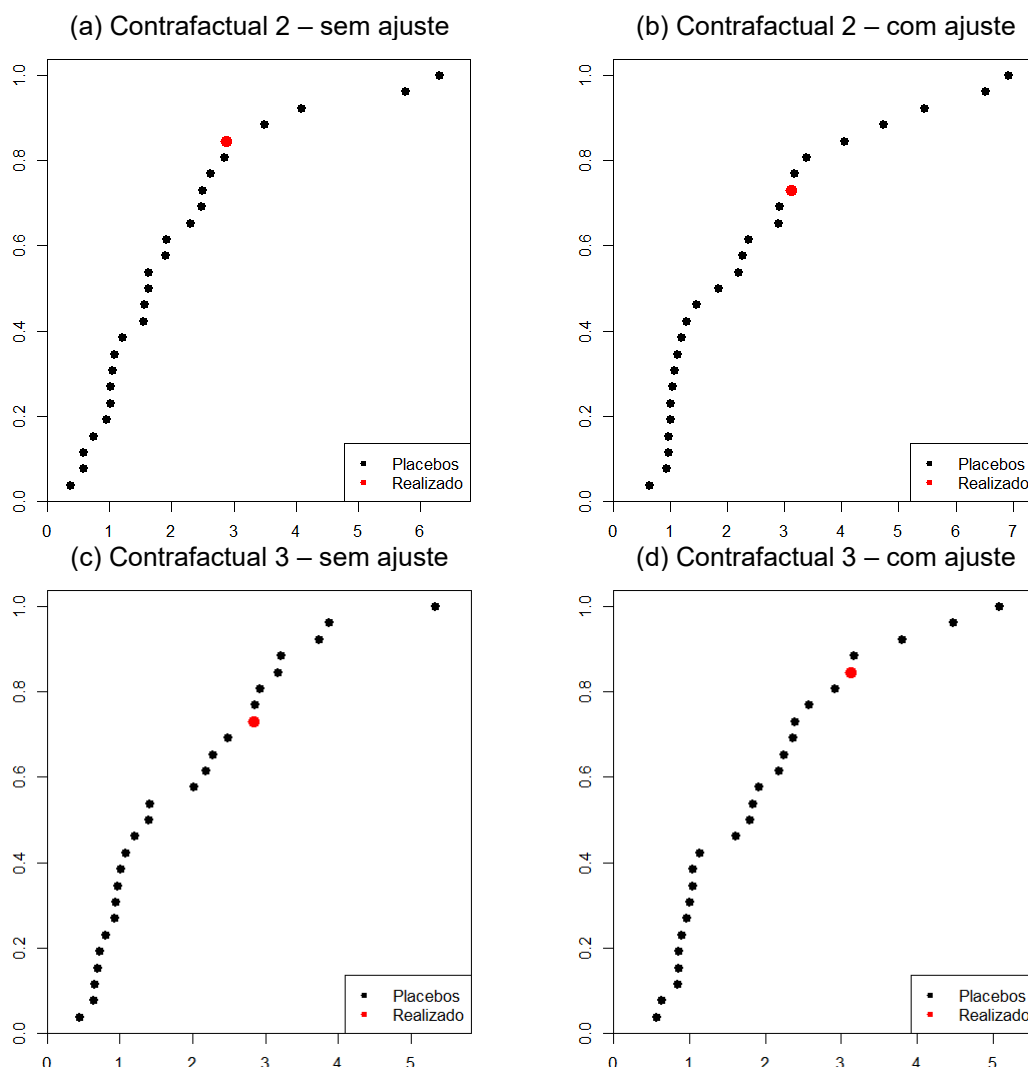


Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré da sub-região complementar.

Por fim, o Gráfico 27 apresenta a distribuição da razão entre o RMSE pós e pré-rompimento para a unidade atingida (ponto vermelho) e os placebos. Esta análise permite avaliar a evidência do efeito acumulado do período 2015 a 2018. No resultado de referência (Painel b), a razão pré e pós-RMSE da região complementar se encontra entre os maiores efeitos. Nos demais contrafactuais apresentados no gráfico, a razão de RMSE está ainda mais no extremo da distribuição, indicando a presença do impacto acumulado. Vale pontuar, no entanto, que o resultado de referência apresenta o menor RMSE pré dentre as especificações contrafactuais apresentadas anteriormente.

Gráfico 27 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para a sub-região complementar (realizado) e placebos



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem sub-bacias com RMSE pré-rompimento superior a 5 vezes ao RMSE pré da sub-região complementar.

7 ROBUSTEZ E SENSIBILIDADE: IMPACTO CONJUNTO EM MINAS GERAIS E ESPÍRITO SANTO

Esta seção tem como intuito explorar a robustez do impacto total estimado para os estados de MG e ES, conjuntamente. O efeito foi mensurado através do método de Controle Sintético e apresentado na Nota Técnica “Rompimento da Barragem de Fundão: Estimativas da Perda Acumulada do PIB para os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo com Base nos Dados Observados até 2018” (FGV, 2021a). Em virtude da relevância do impacto total estimado para a discussão dos efeitos nas sub-regiões deste estudo, bem como para a investigação da propagação do choque do rompimento para as economias de outras regiões desses estados, é importante explorar exercícios adicionais que auxiliem na compreensão desse resultado. Por essa razão, apresenta-se a seguir os exercícios de placebo temporal – no qual se supõe que o rompimento tenha ocorrido em 2013 – para os mesmos contrafactuais alternativos e utilizando as séries com e sem ajuste do PIB. Na seção seguinte, apresenta-se o exercício de robustez que mede o impacto do rompimento sobre os municípios da fronteira de MG (excluindo aqueles na fronteira do estado do ES) a partir do método de Diferença-em-Diferenças.

7.1 Análise placebo temporal

Na discussão que se segue propõe-se implementar o método do Controle Sintético deslocando o ano-base, anterior ao rompimento, para o ano de 2012 em lugar de 2014, como de fato observado. Dessa forma, o comportamento do PIB dos estados do grupo de controle nos anos de 2002 a 2012 (em conjunto com as diversas covariadas utilizadas em cada contrafactual) constituirá o conjunto de informação na construção do estado sintético. A partir daí, calcula-se o impacto hipotético do rompimento caso tivesse ocorrido em 2013 em lugar de 2015, avaliando o efeito nos dois anos anteriores ao rompimento (2013-2014). O intuito dessa análise é buscar evidências de que o impacto calculado para os anos 2015 a 2018 tem respaldo na qualidade do ajustamento da região sintética estimada. A ausência de impacto em ano anterior (e este, em princípio, não sujeito a outros choques equivalentes) sugere um bom ajuste do modelo e, consequentemente, corrobora a estimativa do efeito encontrado.

A Tabela 15 a seguir apresenta os resultados do exercício de robustez temporal do impacto do rompimento sobre o PIB conjunto de MG e ES supondo sua ocorrência em 2013 em lugar de 2015 (como de fato observado) e estima-se o impacto nos anos de 2013 e 2014. Os valores estão a preços de bilhões de reais de 2020.

Em consonância com a discussão da Nota Técnica anterior (FGV, 2021a), concentra-se a discussão no Contrafactual 2 com ajuste do PIB, sendo este, também, o resultado de referência neste estudo, e apresentam-se os contrafactuais de 2 a 5 como exercícios de robustez das estimativas de impacto (ou ainda, especificações alternativas da estimação do impacto).

Em termos dos pesos estimados para o Contrafactual 2, a Tabela 15 mostra que o estado sintético é composto pelos estados do Pará (30,5%), Rondônia (17,7%) e Santa Catarina (51,8%), no caso sem ajuste. No caso com o ajuste do PIB, a composição integra os estados de Pernambuco (29,9%), Piauí (8,0%), Rondônia (4,9%) e Santa Catarina (57,3%). Assim, a estimação do estado sintético no caso do PIB com o ajuste pelo preço do minério de ferro exclui o estado do Pará, que possui uma importante atividade de extração mineral.

Em comparação ao resultado do impacto estimado anteriormente para os anos após o rompimento, o Contrafactual 2 do placebo temporal não escolhe peso positivo para o estado do Rio de Janeiro. Uma possível explicação é o fato de o ano de 2014, início da última recessão, fazer parte do conjunto de informação para estimação do estado sintético na estimativa anterior. Uma vez que MG, ES e Rio de Janeiro sofreram uma queda já em 2014 enquanto o PIB da combinação dos estados da região sintética permaneceu relativamente constante. Ao mesmo tempo, de forma similar ao resultado anterior, as estimativas do estado sintético tendem a dar peso significativo para o estado do Pará na série sem ajuste em todos os contrafactuais (por exemplo, 43,1% no Contrafactual 3), mas recebe peso zero nos contrafactuais com ajuste.

A tabela também mostra as magnitudes dos impactos estimados para o placebo temporal. Os resultados para 2013 – o primeiro ano de rompimento hipotético – sugerem impactos que variam entre uma perda de R\$ 23,73 bilhões (Contrafactual 5 sem ajuste) a um ganho de R\$ 28,42 (Contrafactual 4 sem ajuste). Essa variação no sinal do impacto estimado potencial também se observa no Contrafactual 2 onde o impacto sem ajuste é de ganho de R\$ 7,72 bilhões (0,87%), enquanto o impacto no caso com ajuste é uma perda de R\$ 7,49 bilhões (0,84%), onde os percentuais entre parênteses representam a proporção em relação ao PIB contrafactual. Em contraste, as estimativas de impacto no período pós-rompimento são consistentemente negativas em todo o período e para todos os contrafactuais analisados, tanto com ajuste quanto sem ajuste do PIB. Ademais, o impacto tende a ser reduzido como proporção do PIB, menos de 1% na maior parte dos contrafactuais.

Os resultados estimados para o ano de 2014 apresentam perfil semelhante a 2013, exceto por sua magnitude. Os valores variam de uma perda de R\$ 47,40 bilhões (Contrafactual 2 com ajuste) a um ganho de R\$ 37,12 bilhões (Contrafactual 4 sem ajuste), apresentando variações de sinais entre as estimativas. O Contrafactual 2 sugere perda de R\$ 20,22 bilhões (2,22%) na estimação sem ajuste e R\$ 47,40 bilhões (5,08%) no caso com ajuste do PIB. A perda acumulada no resultado de referência é de R\$ 54,88 bilhões ou 2,99% do PIB contrafactual enquanto o resultado do impacto pós-rompimento (não apresentado) é de 6,54% do PIB contrafactual entre 2015-2018. Uma potencial razão para o maior efeito em 2014 pode ser o início da recessão econômica que potencialmente afetou os estados de forma heterogênea.

Tabela 15 — Robustez: placebo temporal do Controle Sintético de MG e ES com os anos 2013 e 2014 (R\$ de 2020)

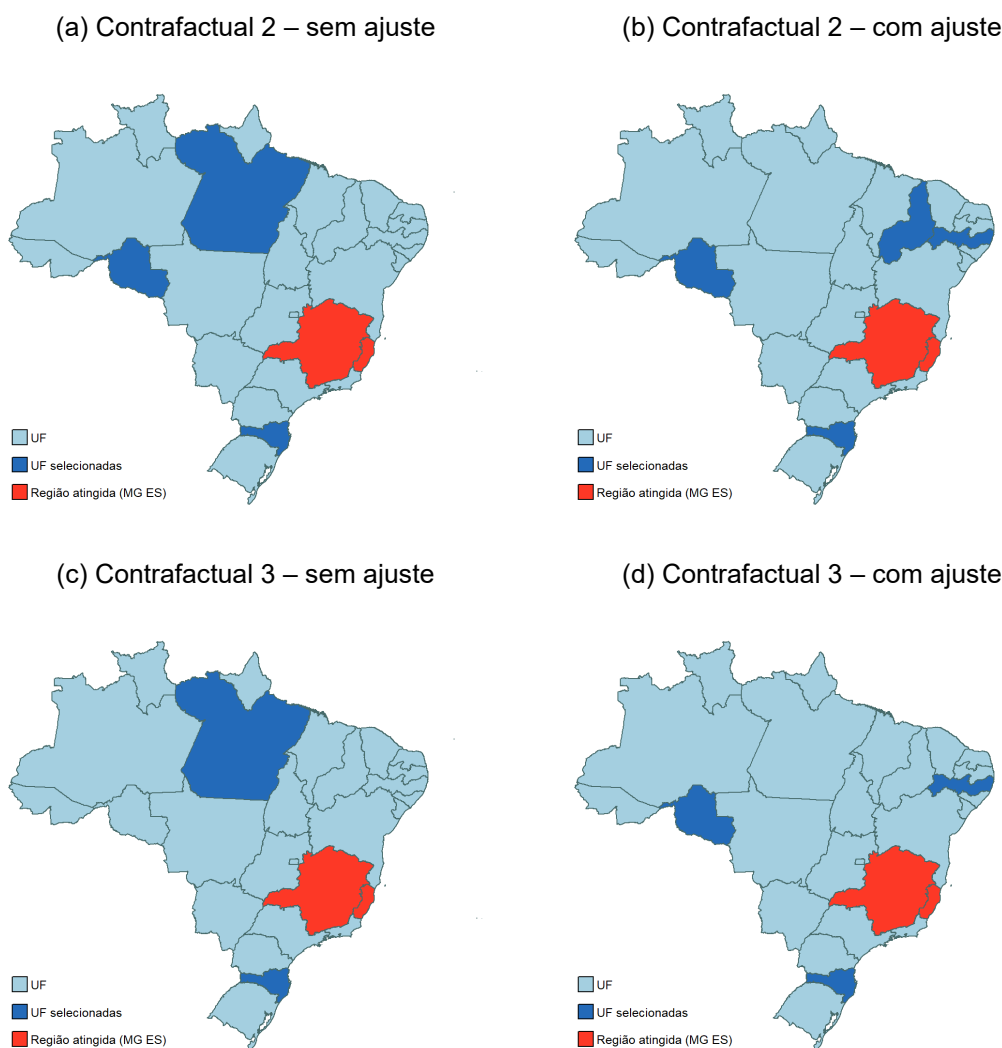
Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2013	R\$ bilhões	7,72	-7,49	-5,39	-7,81	28,42	5,68	-23,73	-8,90
	% do PIB	0,87	-0,84	-0,60	-0,87	3,27	0,64	-2,57	-0,99
	p-valor	0,77	0,81	0,81	0,73	0,38	0,85	0,19	0,73
2014	R\$ bilhões	-20,22	-47,40	-31,05	-43,66	37,12	16,45	-43,80	-37,72
	% do PIB	-2,22	-5,08	-3,38	-4,70	4,36	1,89	-4,70	-4,09
	p-valor	0,77	0,31	0,38	0,23	0,31	0,77	0,15	0,31
Acumulado	R\$ bilhões	-12,50	-54,88	-36,45	-51,46	65,54	22,13	-67,53	-46,62
	% do PIB	-0,69	-2,99	-1,99	-2,81	3,80	1,26	-3,64	-2,55
	p-valor	0,92	0,54	0,62	0,38	0,77	1,00	0,42	0,42
RSME	Pré	0,78	0,79	0,69	0,56	0,09	0,02	0,31	0,32
	Pós	0,62	1,38	0,91	1,27	1,35	0,50	1,43	1,11
UF		Peso das UF selecionadas (%)							
Amazonas						15,7	23,7	2,2	
Ceará						20,6			
Distrito Federal								0,1	
Goiás						0,1			
Pará		30,5		43,1		50,2		41,9	
Paraná						3,1	55,7	2,3	
Pernambuco		29,9		37,3				0,2	47,3
Piauí		8,0							
Rio de Janeiro								7,1	
Rio Grande do Norte								0,1	
Rio Grande do Sul						0,1		0,1	
Rondônia		17,7	4,9	8,5				0,1	
Santa Catarina		51,8	57,3	56,9	54,2	0,5		47,8	39,2
São Paulo						29,9		0,1	11,0

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: O p-valor é construído a partir dos 25 placebos, em cada simulação define-se um estado como atingido e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

A seguir, a Figura 11 apresenta os estados selecionados para compor o estado sintético (destacados em azul) nos Contrafactuais 2 e 3. No Contrafactual 2, o ajuste do PIB muda a seleção dos estados excluindo o Pará e adicionando Pernambuco e Piauí, como descrito anteriormente. No caso do Contrafactual 3, o estado do Pará é substituído por Pernambuco e Rondônia, lembrando que os pesos dos estados que se mantêm sofrem alterações como mostrado na tabela anterior.

Figura 11 — UFs que compõem a região contrafactual selecionadas pelo Controle Sintético (2013-2014)



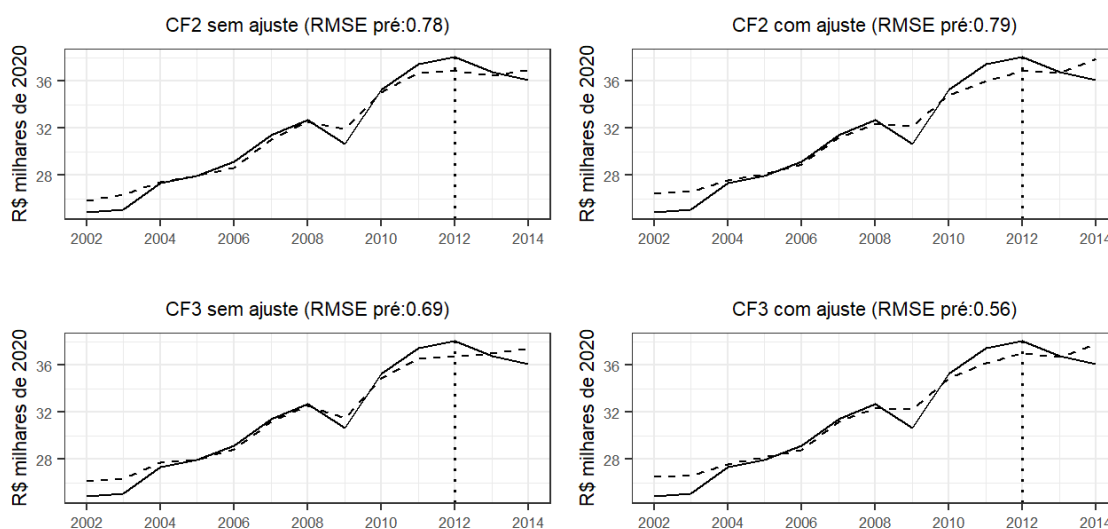
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Em seguida, o Gráfico 28 mostra a trajetória do PIB *per capita* observado e do PIB *per capita* sintético de MG e ES no período 2002 a 2014, sob os Contrafactuais 2 e 3 com e sem ajuste do PIB. Como é possível observar, o estado sintético fornece um bom ajuste pré-rompimento hipotético em 2012, especialmente para os anos intermediários.

De modo que o efeito mensurado do impacto nos dois anos seguintes não difere significativamente dos desvios no período pré-rompimento hipotético. Em particular, a razão pós e pré-RMSE no Contrafactual 2 varia entre 0,79 e 1,75 no caso sem e com ajuste do PIB, respectivamente.

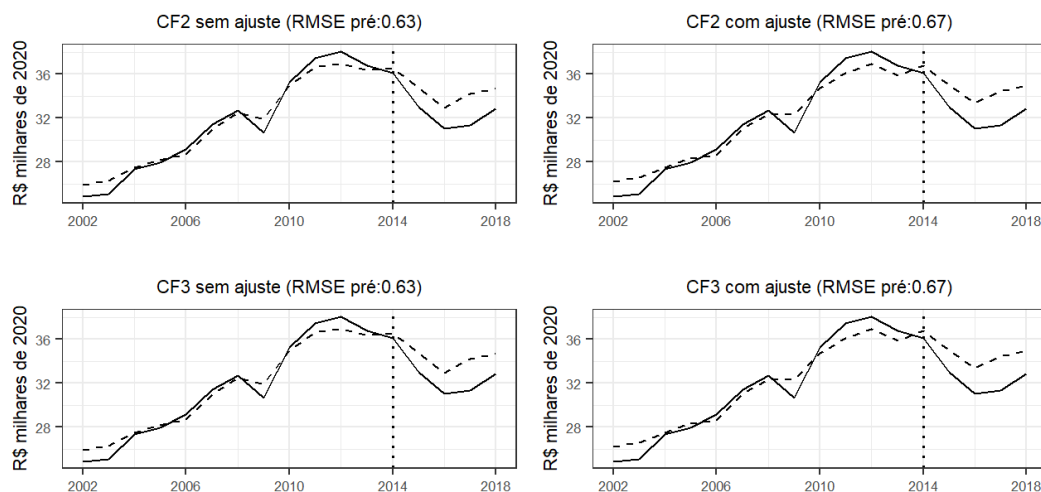
A título de comparação, o Gráfico 29 reproduz a trajetória do PIB *per capita* observado e sintético dos estados de MG e ES, conjuntamente, estimado para o período pós-rompimento observado em FGV (2021a), e sob os mesmos contrafactuais do Gráfico 28. É possível notar um bom ajuste pré-rompimento, similar ao placebo temporal, porém a estimativa de impacto difere em duas dimensões: primeiro, como descrito anteriormente, o efeito é consistentemente negativo; segundo, a diferença em relação aos desvios pré-rompimento é maior. De fato, a razão pós e pré-RMSE no Contrafactual 2 varia entre 2,84 e 2,90 (não apresentados) no caso sem e com ajuste do PIB, respectivamente.

Gráfico 28 — PIB *per capita* dos estados de MG e ES e da região sintética no placebo temporal (2013-2014)



Legenda: — Realizado --- Região Sintética
 Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Gráfico 29 — PIB *per capita* dos estados de MG e ES e da Região Sintética (2015-2018)



Legenda: — Realizado --- Região Sintética

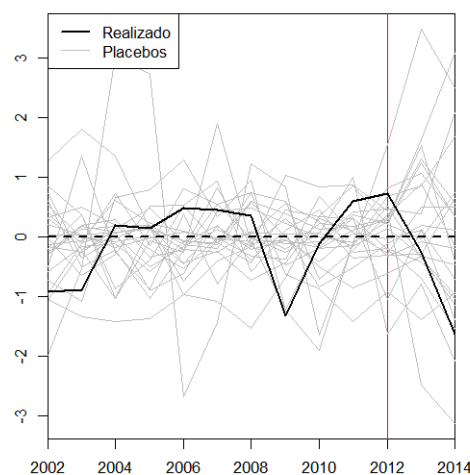
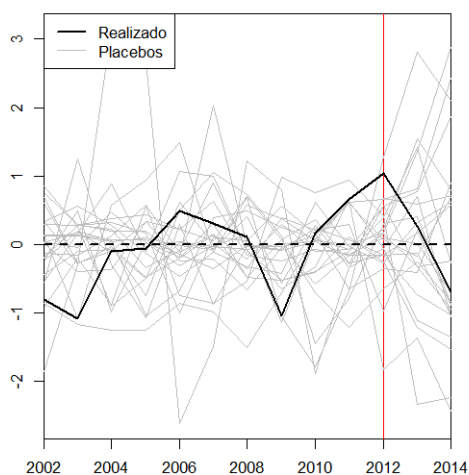
Fonte: FGV (2020).

Como o intuito de analisar mais profundamente o placebo temporal, o Gráfico 30 mostra a análise do placebo geográfico onde se supõe que os demais estados (um a um) são atingidos a partir do ano de 2012. O gráfico mostra os desvios do PIB *per capita* observado e sintético de MG e ES e dos diversos estados (placebos) para os Contrafactuais 2 e 3, com e sem ajuste do PIB. Analisando o período pós-rompimento hipotético, o gráfico sugere não haver grandes diferenças em relação aos desvios do PIB *per capita* no período pré-2012 em nenhum dos contrafactuais e ajustes do PIB.

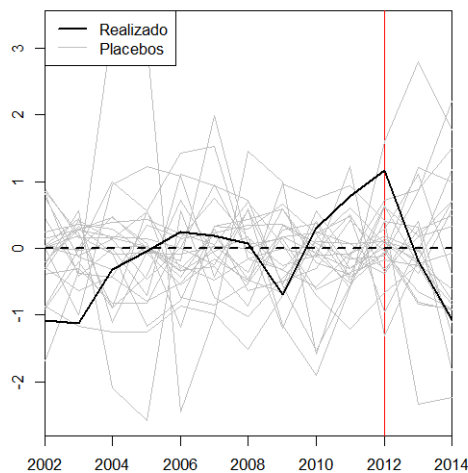
Gráfico 30 — Diferença entre o PIB *per capita* observado e o sintético dos estados de MG e ES (realizado) e placebos – contrafactuais selecionados

(a) Contrafactual 2 – sem ajuste

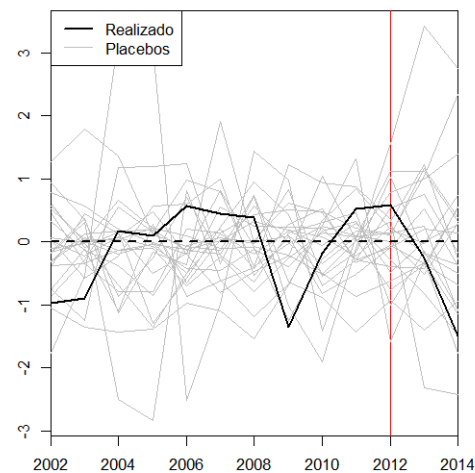
(b) Contrafactual 2 – com ajuste



(c) Contrafactual 3 – sem ajuste



(d) Contrafactual 3 – com ajuste



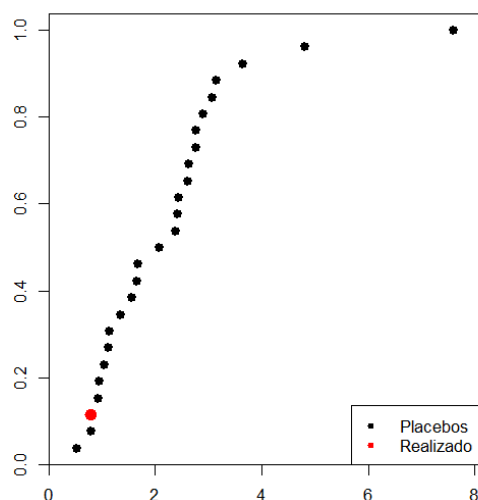
Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem estados com RMSE acima de 5 vezes o de MG e ES.

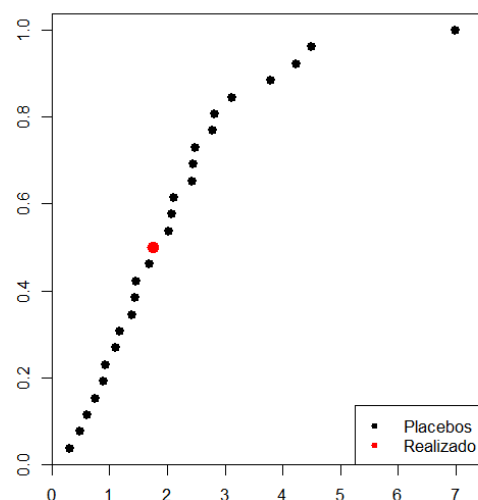
Complementarmente, o Gráfico 31 apresenta a distribuição acumulada da razão do RMSE pós e pré-rompimento no placebo temporal, para os Contrafactuais 2 e 3. Essa estatística mede o tamanho do impacto acumulado no período 2013-2014 em relação ao ajuste pré-rompimento. O gráfico mostra que a razão pós e pré-rompimento do RMSE está entre as menores no caso sem ajuste do PIB para ambos os contrafactuais. No resultado de referência, em particular, a razão de RMSE se encontra no meio da distribuição, sendo o seu p-valor acumulado de 0,54 (Tabela 15).

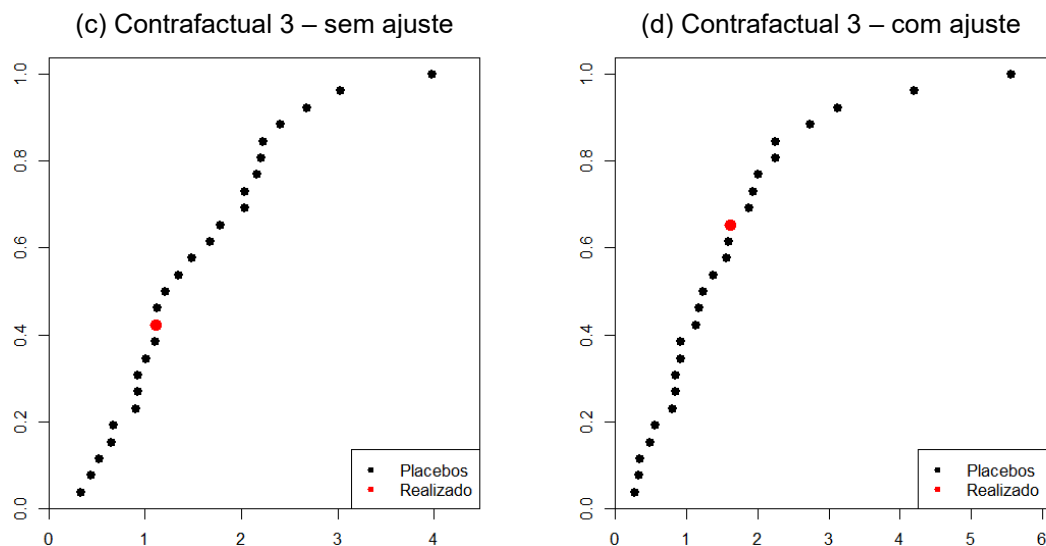
Gráfico 31 — Distribuição acumulada da razão pré e pós-RMSE para a MGES (realizado) e placebos: 2013-2014

(a) Contrafactual 2 – sem ajuste



(b) Contrafactual 2 – com ajuste





Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Gráficos sem estados com RMSE acima de 5 vezes o da sub-bacia do Rio Doce.

Em geral, os exercícios de robustez e sensibilidade dos placebos temporais desta seção indicam que os impactos medidos para 2013-2014, sob suposição de que o rompimento teria ocorrido em 2013 e não em 2015 (como de fato observado) possuem variações de sinais a depender da especificação e não apresentam evidências de uma magnitude significativamente superior aos desvios entre o PIB *per capita* observado e sintético no período pré-rompimento. Assim, os placebos temporais corroboram as estimativas do impacto total sobre o PIB conjunto de MG e ES documentadas no estudo anterior (FGV, 2021a).

8 ROBUSTEZ E SENSIBILIDADE: IMPACTO SOBRE OS MUNICÍPIOS DA FRONTEIRA DE MG

A Seção 6 anterior apresentou evidências de impacto do rompimento sobre a região complementar. Esse resultado contribui para o entendimento do impacto ao longo das sub-regiões de MG e ES. A presença de impacto sobre as demais regiões sugere uma consistência entre os efeitos mensurados para os estados de MG e ES como um todo e o valor obtido para as sub-regiões, em particular, os municípios da sub-bacia do Rio Doce. O impacto na região complementar sugere a presença de propagação econômica dos seus efeitos para além das regiões diretamente impactadas (em linha com a análise de Anchieta – ES).

Nesse sentido, esta seção tem um duplo objetivo: apresentar um exercício de robustez do impacto agregado estimado para os estados – na mesma linha da Seção 7 –; e, ao mesmo tempo, aprofundar a investigação da propagação econômica do impacto do rompimento, trazendo evidências da heterogeneidade dos efeitos na região através da análise dos municípios da fronteira dos estados de Minas Gerais.

Como apresentado nas seções anteriores, o impacto como proporção do PIB contrafactual (i.e., sem a ocorrência do desastre) é relativamente maior na região do epicentro do desastre quando comparado à região complementar – ou seja, nos 45 municípios atingidos (40 municípios somados com os 5 do litoral adjacente) –, assim como em regiões diretamente afetadas pelos impactos na cadeia minerária, como é o caso de Anchieta (ES), onde se localiza o processo de pelotização. Entretanto, as perdas na região complementar representam a maior parcela do impacto total estimado, uma vez que o PIB desta região é maior. Assim, esta seção analisa em maior detalhe os municípios pertencentes a MG, mas que estão mais afastados geograficamente do desastre, escolhendo-se os municípios na fronteira de MG com os estados vizinhos. Os municípios da fronteira do ES estão fora desta análise devido à presença de municípios do Litoral Adjacente diretamente atingidos, como discutido na Seção 4.3.

De forma simplificada, compara-se o PIB destes municípios aos municípios adjacentes pertencentes aos demais estados no período pré e pós-rompimento. A partir deste exercício é possível identificar a extensão geográfica e intensidade do impacto do rompimento ao longo das regiões dos estados atingidos.

Adicionalmente, a análise dos municípios da fronteira pode ser entendida como um exercício de robustez da estimação conjunta das perdas de PIB dos estados de MG e ES, no sentido de fornecer evidências de que as perdas estimadas estão associadas ao

impacto do rompimento e não a outros fatores específicos a esses estados atuando no mesmo período. De fato, na presença de choques concomitantes alternativos e específicos a esses estados, se esperaria um impacto sobre o PIB dos municípios da fronteira pertencentes a MG em relação aos municípios fronteiriços fora do estado.

Como mostrado mais adiante, a ausência de impacto na comparação entre os municípios da fronteira adiciona evidências de que a perda estimada conjuntamente se deve ao rompimento e não a outros fatores. Ademais, a utilização do método de Diferença-em-Diferenças (*Diff-in-Diff*, na sigla em inglês), detalhado na Seção 3.2, contribui para corroborar os resultados através de um método alternativo ao Controle Sintético.

Esta seção segue apresentando estatísticas descritivas dos municípios da fronteira de MG na Seção 8.1. Na sequência, a Seção 8.2 discute os resultados.

8.1 Estatísticas descritivas

Nesta seção, concentra-se a análise nos municípios da fronteira de MG. A Tabela 16 a seguir apresenta a população e o PIB agregado dos municípios da fronteira de MG, o quais se dividem em 2 grupos: os que estão dentro de MG e os que estão fora do estado. Como se pode observar, o primeiro grupo (definido como atingido nesta abordagem) é composto por 144 municípios, com uma população em 2014 de 3,4 milhões de habitantes e um PIB de R\$ 115,9 bilhões no mesmo ano de referência. No tocante ao segundo grupo (definido como controle nesta abordagem) tem-se 159 municípios, com uma população de 5,2 milhões de habitantes e um PIB de R\$ 215,6 bilhões, ambos em 2014.

Tabela 16 — Estatísticas dos municípios da fronteira (dados de 2014)

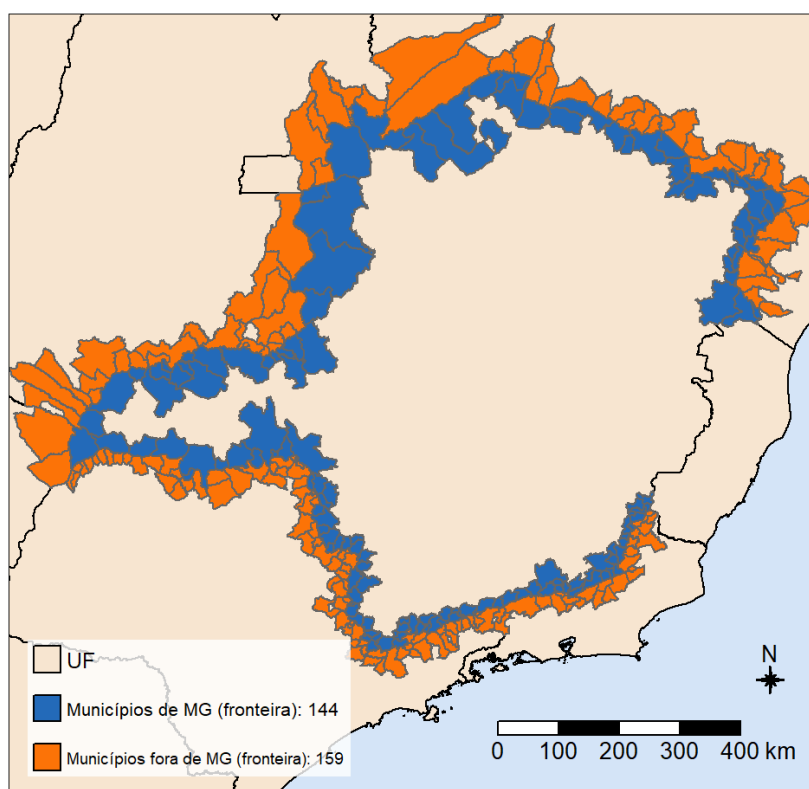
DD	Total de municípios	População total (milhões de hab.)	PIB Total (R\$ bilhões de 2020)
Conjunto Municípios de MG (fronteira)	144	3,4	115,9
Municípios fora de MG (fronteira)	159	5,2	215,6

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Do ponto de vista geográfico, a Figura 12, a seguir, mostra o mapa do estado de Minas Gerais destacando os municípios limítrofes considerados na estimação do impacto da fronteira. Os 144 municípios de MG já mencionados estão destacados em azul. Nota-se a exclusão dos municípios que fazem divisa com o estado do ES, uma vez que esses

pertencem ao Litoral Adjacente (considerado atingido nas análises anteriores). O grupo de comparação para efeito do método de Diferença-em-Diferenças é constituído pelos 159 municípios destacados em laranja e pertencem aos estados da Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Goiás. O município de Mucuri (BA) foi retirado da análise pelo fato de fazer divisa com São Mateus (ES), considerado diretamente atingido. O APÊNDICE G apresenta a lista de municípios contemplados nessas análises.

Figura 12 — Municípios da fronteira de MG

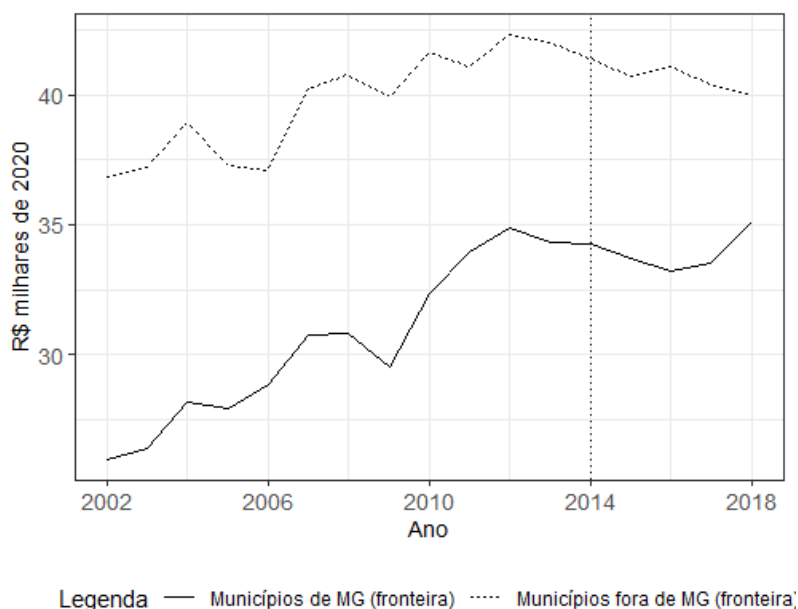


Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

O Gráfico 32 mostra a trajetória do PIB *per capita* agregado dos municípios da fronteira pertencentes a MG e aos estados vizinhos em milhares de reais de 2020. Como é possível observar, os municípios da fronteira dos estados vizinhos a MG apresentam um PIB *per capita*, em média, 21% acima do PIB *per capita* agregado dos municípios da fronteira interna de MG no período 2011-2014, exatamente anterior ao desastre. Dentre os municípios da fronteira que contribuem para o maior PIB *per capita* da região externa fazem parte: São José dos Campos (SP), Franca (SP), Resende (RJ) e Pindamonhangaba (SP).

Além disso, os municípios de MG atingidos (na presente análise) apresentaram um crescimento maior que o grupo de controle (municípios dos estados vizinhos) no período pré-rompimento, da ordem de 0,4% a.a. no primeiro grupo e de 0,2% a.a. no segundo. No período pós-rompimento, no entanto, o PIB *per capita* dos municípios da fronteira dos estados vizinhos apresentam uma queda até 2018 com um pequeno aumento em 2016, enquanto os municípios em MG apresentam queda até 2016 seguida de recuperação nos dois anos seguintes, atingindo níveis superiores ao pico em 2013, pré-rompimento. Na seção seguinte, discute-se os resultados das estimações do impacto na fronteira de MG.

Gráfico 32 — Comparação do PIB *per capita* entre os municípios da fronteira MG



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

8.2 Resultados de Diferença-em-Diferenças

Uma vez definidos os grupos de tratamento, ou seja, os 144 municípios da fronteira de MG pertencentes ao estado, e o grupo de controle, composto dos 159 municípios dos estados vizinhos exceto o estado do ES, é possível proceder à estimação do impacto através do método de Diferença-em-Diferenças.

A Equação 1 apresenta a regressão a ser estimada e os parâmetros de interesse. O parâmetro β captura o efeito diferencial do impacto do rompimento entre os municípios tratados e controle no período 2015 a 2018, pós-desastre. Em outras palavras, este parâmetro mede o efeito médio do impacto diferencial entre os grupos de tratamento e

controle entre o período pré e pós-rompimento. Por sua vez, o parâmetro θ captura o efeito do rompimento especificamente no ano de 2015. Embora o rompimento tenha ocorrido ao final do ano, este parâmetro permite capturar os potenciais efeitos iniciais do desastre.

Na Tabela 17, a seguir, são apresentados os resultados das estimações da Equação 1 para o PIB real (sem ajuste) e o PIB corrigido (com ajuste). Na primeira linha (DiD) estão as estimativas do parâmetro β . Como pode ser visto, as estimativas do impacto diferencial são negativas, indicando uma queda relativamente maior nos municípios da fronteira dentro de MG, embora não seja possível afirmar que houve efeito diferente de zero, já que o parâmetro não é estatisticamente significativo. A linha DiD 2015 mostra a estimativa do parâmetro θ . Aqui, novamente, a estimativa mostra um efeito diferencial negativo para os municípios tratados com valor absoluto maior que o efeito médio do período pós-rompimento (primeira linha). Sob um nível de significância de 5%, a hipótese nula é novamente não rejeitada, o que corresponde a dizer que o efeito não é estatisticamente diferente de zero.

Tabela 17 — Resultados do modelo de Diferença-em-Diferenças

	PIB real	PIB ajustado
DiD	-1,44	-1,43
Erro-padrão	-1,61	-1,61
p-valor	0,37	0,37
DiD 2015	-2,01	-2,01
Erro-padrão	-1,19	-1,19
p-valor	0,09	0,09
N	5.151	5.151

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

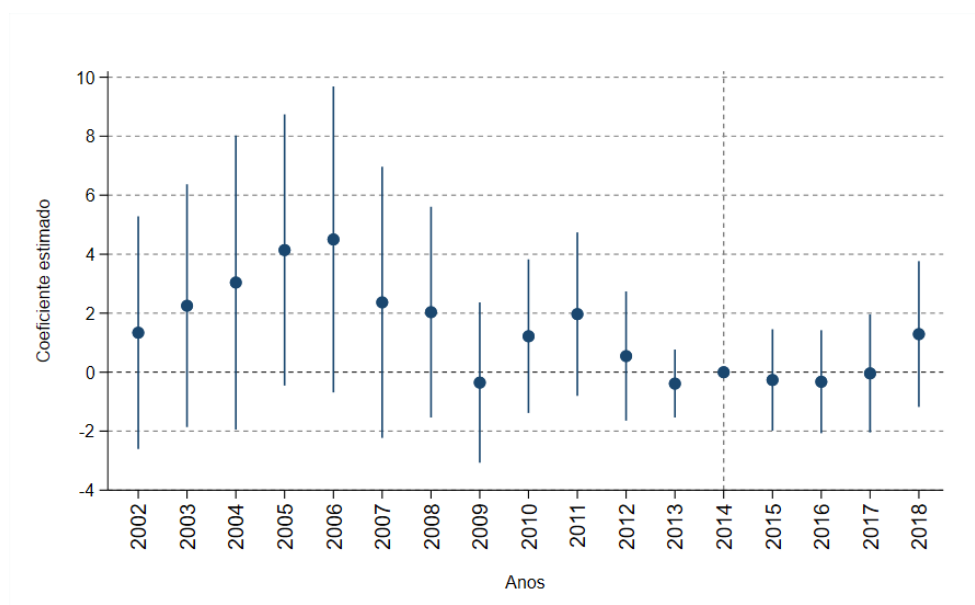
Observação: Total de municípios de MG: 144. Total de municípios nos estados fronteiriços: 159. Período de análise de 2002 a 2018. A especificação do modelo inclui ainda efeitos fixos de tempo e município. Os erros-padrão são robustos à autocorrelação municipal.

Na sequência, são apresentados os resultados das estimações dos impactos no PIB (com e sem ajuste) com base na Equação 2. O parâmetro de interesse, β_τ , captura o efeito diferencial sobre o PIB entre os municípios tratados e controle em relação ao ano-base de 2014. Assim, o parâmetro estimado mede a diferença, entre os dois grupos de municípios, da variação do PIB daquele ano em relação ao ano-base. Assim, o teste estatístico convencional de ausência de “diferença das diferenças” (i.e., testar a hipótese nula $\beta_\tau = 0$) fornece evidência de que não há impacto sobre os municípios tratados naquele ano. Note que a estimativa dos parâmetros para anos anteriores ao rompimento

tem o papel de investigar a plausibilidade da hipótese de tendências paralelas pré-rompimento, ou seja, a evolução do indicador analisado para os grupos atingidos e de comparação no período anterior ao da intervenção em análise. No entanto, é importante manter em mente que as estimativas pós-rompimento são as que capturam os efeitos investigados.

No Gráfico 33 e no Gráfico 34 são exibidos os coeficientes (pontos azuis) com seus respectivos intervalos de confiança (linhas azuis verticais ao redor dos pontos) para os anos pré-rompimento – que caracterizam uma forma de testar a evidência de tendências paralelas pré – e para os anos pós-rompimento – que são os efeitos estimados para os parâmetros de interesse. O primeiro mostra as estimativas para a série sem ajuste pelo preço do minério de ferro, enquanto o último mostra os resultados para a série com ajuste. A análise gráfica permite visualizar quais anos apresentam evidências de impacto estatisticamente significativo ao nível de 5% de significância, ou seja, aqueles nos quais o intervalo de confiança não cruza o eixo do zero.

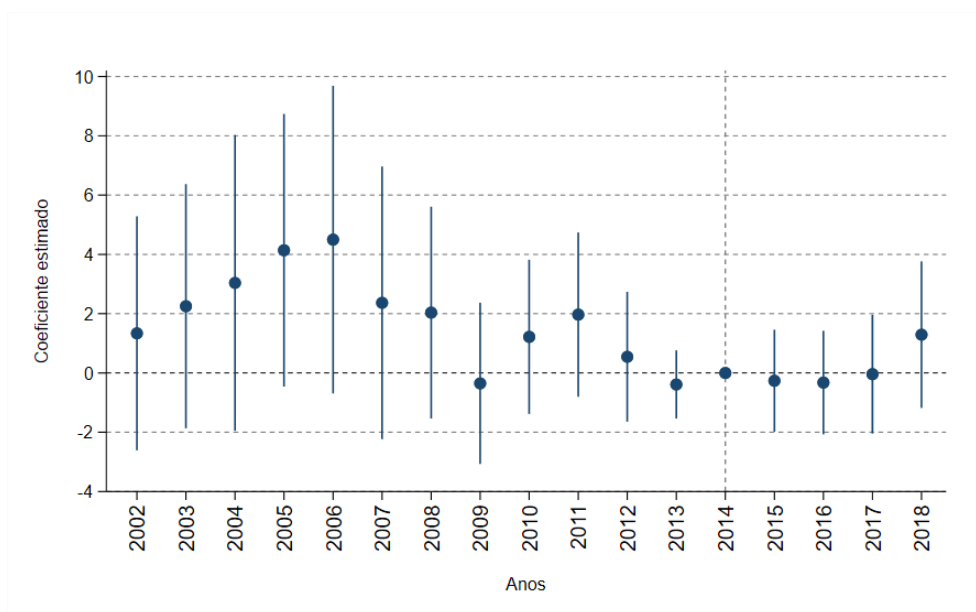
Gráfico 33 — Resultados ano a ano: PIB sem ajuste



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Total de municípios de MG: 144. Total de municípios nos estados fronteiriços: 159.

Gráfico 34 — Resultados ano a ano: PIB com ajuste



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Total de municípios de MG: 144. Total de municípios nos estados fronteiriços: 159.

Considerando os coeficientes estimados para os anos pré-rompimento, nota-se que os parâmetros estimados não são estatisticamente significantes em todos os anos de 2002 a 2018, tanto para a série sem ajuste quanto para a série com ajuste. Assim, não são encontradas evidências de diferenças preexistentes entre as tendências de evolução do PIB *per capita* dos grupos de município de MG (atingido) e de comparação (municípios de estados vizinhos fronteiriços a MG).

Mais ainda, os parâmetros de interesse, que medem o impacto pós-2014, também não apresentam significância estatística em nenhum dos anos analisados. Uma possível interpretação desse resultado é de que há uma heterogeneidade no impacto mensurado para a região complementar. Em particular, à medida em que se distancia geograficamente do município de Mariana (MG), o efeito tende a ser menor ou inexistente. Entretanto, é importante ressaltar que a propagação do choque do rompimento não está necessariamente limitada à distância geográfica, mas também à interdependência econômica das sub-regiões e seu papel na cadeia produtiva da indústria minerária (como é o caso de Anchieta – ES).

Alternativamente, é possível que o rompimento tenha impactado igualmente os municípios da fronteira interna e externa de MG, de modo que não haja impacto diferencial, como indicado nesse resultado. Assim, esse resultado contribui para entender melhor o processo de propagação do rompimento sobre a atividade econômica das demais sub-regiões impactadas.

Além disso, essa análise corrobora as estimativas de impacto conjunto de MG e ES obtidas via Controle Sintético, apresentadas no estudo anterior (FGV, 2020i) e as análises de sensibilidade discutidas na Seção 7. Como discutido no início desta seção, um desafio na estimação do impacto do rompimento sobre o PIB conjunto dos estados é identificar se a perda estimada decorre do rompimento em si ou de outros choques, específicos a esses estados, que possam ter ocorrido simultaneamente.

Choques macroeconômicos que ocorreram paralelamente nos estados atingidos e nos demais estados são, em geral, contemplados pelo método do Controle Sintético devido à estimação se basear na diferença entre as regiões tratada e sintética. Por outro lado, choques específicos a essas regiões podem introduzir viés nas estimativas. Nesse sentido, o resultado apresentado nos gráficos mostra evidências de ausência de choques alternativos específicos aos estados de MG e ES e concomitantes ao rompimento. Ou ainda, se houveram choques específicos a esses estados, estes não tiveram efeito suficiente para gerar impacto diferencial entre as regiões atingidas e os municípios vizinhos a MG. Uma outra possibilidade é de que tanto os municípios da fronteira atingidos quanto os municípios externos a MG e ES foram igualmente afetados por outros choques, o que estaria em acordo com a implementação do Controle Sintético. Assim, esse resultado traz evidência de identificação do impacto do rompimento sobre os estados atingidos, ressaltando, porém, sua característica potencialmente heterogênea.

9 CONCLUSÃO

O presente estudo reuniu um conjunto de evidências do impacto do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG) ocorrido em novembro de 2015 sobre o PIB ou renda agregada dos estados e municípios de MG e ES. Estes exercícios contemplam tanto análises do impacto sobre o PIB conjunto de ambos os estados quanto estimações para diversos recortes sub-regionais dos mesmos.

É possível dividir os resultados estimados do impacto em dois conjuntos de evidências: o primeiro foca em investigar os efeitos em diversas sub-regiões baseadas na proximidade geográfica da passagem dos rejeitos do minério que se seguiu ao rompimento da barragem – é o caso da análise dos 40 municípios de MG e ES, dos 5 municípios do Litoral Adjacente do ES e dos municípios pertencentes à sub-bacia hidrográfica do Rio Doce – ou da sua proximidade econômica devido à sua importância na cadeia produtiva do minério de ferro – como ocorre com o município de Anchieta (ES); o segundo conjunto de evidências explora os efeitos potenciais de propagação do choque (ou *spillover*) do rompimento para a sub-região complementar constituída pelos municípios de MG e ES, excluindo aqueles pertencentes às sub-regiões anteriormente mencionadas.

Em geral, os resultados sugerem a presença do impacto do rompimento sobre o PIB das sub-regiões discriminadas na análise, especialmente, nos três primeiros anos que se seguem ao rompimento. Ademais, as estimativas de impacto nas diversas sub-regiões apresentam uma coerência entre si tanto em termos da sua magnitude relativa ao PIB de cada sub-região quanto em termos da intensidade da perda associada à proximidade física da passagem dos rejeitos ou de relevância na cadeia produtiva do minério. Dito de outro modo, é o tamanho do PIB que determina a perda absoluta, mas é a proximidade física ou econômica ao rompimento que determina a perda relativa (intensidade). Quanto maior o PIB, maior a perda em relação ao impacto total e, quanto mais próxima a região estiver (física ou economicamente) às consequências do rompimento, maior será a perda relativa ao próprio PIB.

De fato, as perdas acumuladas no período 2015-2018 e estimadas de forma individual para os 40 municípios são menores que aquelas estimadas para a sub-bacia do Rio Doce, que contém o primeiro grupo. Igualmente, as perdas acumuladas estimadas para os 5 municípios do Litoral Adjacente são maiores que as mesmas estimadas para o município de Anchieta (ES). Nessa mesma linha, a intensidade do impacto tende a ser maior nos municípios das sub-regiões mencionadas quando comparado ao impacto estimado na região complementar, em termos da proporção do impacto em relação ao

PIB na ausência do rompimento (contrafactual). Entretanto, a propagação do choque para a região complementar tende a ser relevante, respondendo pela maior parte do impacto total estimado para os estados de MG e ES. Vale pontuar, entretanto, que a maior proporção encontrada na região complementar não é de todo surpreendente uma vez que o PIB dessa região corresponde a 4,8 vezes o PIB das demais sub-regiões impactadas em 2014.

A investigação dos efeitos de propagação é importante não somente devido à magnitude relativa do impacto na região complementar em relação ao efeito total estimado nos estados, mas também porque permite trazer evidências da consistência das diversas estimativas (totais e sub-regionais), além de elucidar o grau de interdependência econômica entre as regiões. O exame mais profundo da propagação do choque do rompimento proporciona um melhor entendimento tanto da vulnerabilidade das sub-regiões a choques diversos e, em particular, o impacto do rompimento, quanto da sua flexibilidade em termos de resposta aos mesmos.

Nesse sentido, os resultados estimados do efeito de propagação (isto é, os impactos na região complementar) estão em linha com as estimativas individuais das demais regiões e do impacto total estimado para os estados de MG e ES, conjuntamente. Além disso, a evidência sugere que a propagação do choque é heterogênea entre os municípios pertencentes à região complementar. Em particular, não se encontrou evidência de impacto no período pós-rompimento nos municípios da fronteira de MG (excluindo aqueles na fronteira com o estado do ES). Mais ainda, esse resultado também pode ser entendido como evidência de ausência de outros choques específicos aos estados de MG e ES que poderiam ter ocorrido no mesmo período, confundindo as estimativas do impacto do rompimento em si.

Por fim, este estudo traz uma análise de robustez e sensibilidade estimando qual seria o efeito se conjecturássemos que o rompimento ocorrera no ano de 2013 em lugar de 2015. Os resultados apontam para efeitos não consistentes entre os contrafactuais, com mudança de sinal do impacto entre os mesmos, indicando que o impacto estimado para o período 2013-2014 é possivelmente nulo. Nesse sentido, os resultados sugerem que os impactos encontrados são atribuíveis ao desastre e não a demais fatores idiossincráticos aos estados de MG e ES presentes no período pré-rompimento.

REFERÊNCIAS

ABADIE, A.; DIAMOND, A.; HAINMUELLER, J. Synthetic control methods for comparative studies: Estimating the effect of California's tobacco control program. **Journal of American statistical Association**, 2010, p. 493-505.

_____.; GARDEAZABAL, J. The economic costs of conflict: A case study of the Basque Country. **American Economic Review**, 2003, p. 113-132.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Agência Nacional de Águas. **Sub-bacias Hidrográficas DNAEE**, s.d. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/10480692111f443bb5a38d9bb156851f_0>. Acesso em: 2020.

CARD, D. The impact of the Mariel boatlift on the Miami labor market. **ILR Review**, 1990, p. 245-257.

CASTRO, L. S. D.; ALMEIDA, E. Desastres e desempenho econômico: avaliação do impacto do rompimento da barragem de Mariana. **Geosul**, 2019.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). **Impacto do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada de Minas Gerais e Espírito Santo**. Rio de Janeiro; São Paulo. 2019a. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/documentos/fgv/fgv_impacto-do-rompimento-da-barragem-de-fundao-sobre-a-renda-agregada-de-minas-gerais-e-espirito-santo.pdf>.

_____. **Impactos sobre Assistência Social a partir de Dados Secundários**. FGV. Rio de Janeiro; São Paulo, 2019b, p. 1-132. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/documentos/fgv/fgv_impactos-sobre-assistencia-social-a-partir-de-dados-secundarios.pdf>.

_____. **Impactos sobre Educação Básica a partir de Dados Secundários**. FGV. Rio de Janeiro; São Paulo, 2019c, p. 1-165. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/documentos/fgv/fgv_impactos-sobre-educacao-basica-a-partir-de-dados-secundarios>.

_____. **Impactos sobre Segurança Pública a partir de Dados Secundários**. Rio de Janeiro; São Paulo. 2019d. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/documentos/fgv/fgv_impactos-sobre-seguranca-publica-a-partir-de-dados-secundarios.pdf>.

_____. **Impactos do Rompimento da Barragem de Fundão sobre a Renda Agregada nos Estados e Sub-Regiões de Minas Gerais e Espírito Santo**. São Paulo; Rio de Janeiro. 2020i. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/documentos/fgv/fgv_impacto-do-rompimento-da-barragem-de-fundao-sobre-a-renda-agregada-nos-estados-e-sub-regioes-de-minas-gerais-e-espirito-santo.pdf/view>.

_____. **Rompimento da Barragem de Fundão: Estimativas da Perda Acumulada do PIB para os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo com Base nos Dados Observados até 2018**. São Paulo; Rio de Janeiro, 2021a.

FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL (FMI). World Economic Outlook database. **International Monetary Fund**, 2021. Disponível em:

<<https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2021/October/download-entire-database>>. Acesso em: jun. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema de Contas Nacionais**, 2020. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=o-que-e>>.

JOSHUA ANGRIST, G. I. Identification and estimation of local average treatment effects. **National Bureau of Economic Research**, 1995.

MANLY, B. F.; ALBERTO, J. A. N. **Multivariate statistical methods**: a primer. [S.l.]: CRC press, 2016.

NIQUITO, T. W. et al. Desastres tecnológicos e impacto econômico para uma economia em desenvolvimento: evidências para o Brasil. **ANPEC**, 2019.

APÊNDICE A — Comparação do PIB de MG e ES e Brasil exceto MG e ES

Como mencionado em estudos anteriores¹⁷, o Contrafactual 1 utiliza a taxa de crescimento do Brasil sem MG e ES como o crescimento contrafactual dos estados de MG e ES, conjuntamente, de modo que o seu PIB contrafactual possui a mesma trajetória observada até 2014 e, a partir daí, segue a mesma dinâmica do resto do país. A ideia deste exercício é supor que a economia de MG e ES teriam uma trajetória similar ao resto do país na ausência do rompimento, caso o rompimento não tenha afetado os demais estados. A tabela a seguir apresenta os resultados do impacto para o Contrafactual 1 a preços de 2020.

Tabela 1 — Comparação PIB de MG e ES e Brasil exceto MG e ES (preços de 2020)

	2014	2015	2016	2017	2018
<i>Brasil exceto MG e ES</i>					
PIB (R\$ bilhões)	7.068	6.856	6.648	6.733	6.833
cresc. (%)	0,71	-3,00	-3,02	1,28	1,49
<i>MG e ES</i>					
PIB (R\$ bilhões)	889	819	774	788	822
cresc. (%)	-1,13	-7,86	-5,42	1,72	4,32
<i>MG e ES – Contrafactual 1</i>					
PIB (R\$ bilhões)	889	862	836	847	859
cresc. (%)	0,71	-3,00	-3,02	1,28	1,49
<i>Perda PIB MG e ES</i>					
R\$ bilhões		-43	-61	-59	-37
% do PIB		5,00	7,35	6,94	4,35

Fonte: Elaboração própria (2021) a partir de dados do IBGE.

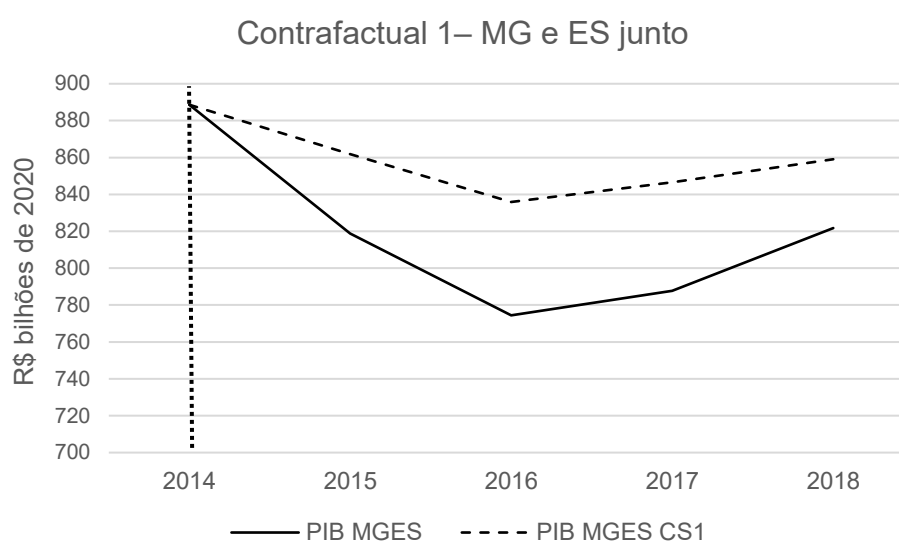
Como se pode observar, as perdas da renda agregada de MG e ES, com base no Contrafactual 1, somam R\$ 201 bilhões no período pós-rompimento, sendo R\$ 43 bilhões (5,0%) em 2015, R\$ 61 bilhões (7,35%) em 2016, R\$ 59 bilhões (6,94%) em 2017 e R\$ 37 bilhões (4,35%) em 2018, onde os percentuais entre parênteses correspondem à proporção em relação ao PIB contrafactual. Importante pontuar que esse valor do impacto acumulado no período pós-rompimento é próximo ao obtido no

¹⁷ Estudos realizados pela FGV (2019a e 2020).

resultado de referência (Contrafactual 2 com ajuste) em Nota Técnica anterior (FGV, 2021a) e reportado na Seção 5. Os valores do impacto acumulado no Contrafactual 2 sem ajuste e com ajuste do PIB são, respectivamente, R\$ 206,6 bilhões e R\$ 225,3 bilhões.

O Gráfico 1, a seguir, apresenta a dinâmica do PIB observado de MG e ES, conjuntamente, e do PIB calculado no Contrafactual 1.

Gráfico 1 — Trajetórias do PIB conjunto de MG e ES observada e no Contrafactual 1 no período pós-rompimento



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

APÊNDICE B — resultados para o PIB *per capita*

Este apêndice complementa a análise da Seção 4 e da Seção 6 reportando os resultados das estimações de impacto via Controle Sintético para a série PIB *per capita* de cada sub-região contemplada neste estudo, sob os Contrafactuais 2 a 5 e as séries do PIB com e sem ajuste pelo preço do minério de ferro.

A Tabela 1 mostra os resultados referentes à sub-bacia hidrográfica do Rio Doce. O impacto acumulado no período pós-rompimento é de R\$ 13,0 mil ou 10,9% do PIB contrafactual, no resultado de referência (Contrafactual 2 com ajuste). Adicionalmente, as estimativas anuais exibem o formato de U-invertido semelhante à estimativa para o PIB.

Tabela 1 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB *per capita* dos municípios da sub-bacia do Rio Doce (R\$ mil de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ mil	-2,2	-3,4	-2,5	-3,2	-1,4	-4,3	-3,1	-5,7
	% do PIB	-7,7	-11,3	-8,6	-10,6	-4,9	-13,8	-10,4	-17,5
	p-valor	0,18	0,08	0,15	0,08	0,33	0,07	0,10	0,04
2016	R\$ mil	-2,6	-4,9	-2,8	-3,4	-2,1	-4,9	-3,6	-6,1
	% do PIB	-9,4	-16,5	-10,2	-12,1	-7,9	-16,7	-12,8	-19,7
	p-valor	0,19	0,07	0,21	0,14	0,25	0,04	0,15	0,04
2017	R\$ mil	-1,9	-3,3	-2,9	-1,2	-2,2	-6,7	-2,9	-7,6
	% do PIB	-6,6	-10,9	-9,8	-4,2	-7,7	-20,2	-10,0	-22,3
	p-valor	0,28	0,21	0,17	0,51	0,31	0,07	0,17	0,10
2018	R\$ mil	-0,2	-1,4	-1,4	0,1	-0,5	-4,9	-0,8	-5,6
	% do PIB	-0,9	-4,7	-4,6	0,4	-1,6	-14,7	-2,8	-16,4
	p-valor	0,83	0,50	0,44	0,99	0,88	0,15	0,69	0,17
Acumulado	R\$ mil	-6,9	-13,0	-9,5	-7,7	-6,2	-20,9	-10,5	-25,0
	% do PIB	-6,1	-10,9	-8,2	-6,7	-5,5	-16,4	-9,0	-19,0
	p-valor	0,24	0,47	0,14	0,46	0,47	0,31	0,07	0,35
RSME	Pré-rompimento	0,53	1,11	0,68	1,33	1,17	2,71	0,80	3,12
	Pós-rompimento	1,93	3,48	2,45	2,41	1,70	5,30	2,82	6,31

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: A sub-bacia do Rio Doce é composta por 215 municípios de MG e ES. O p-valor é construído a partir dos 71 placebos, em cada simulação define-se uma sub-bacia como atingida e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações.

RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

A Tabela 2 a seguir mostra as estimativas para os 40 municípios atingidos. No resultado de referência, estima-se que o impacto acumulado sobre o PIB *per capita*, entre 2015 e 2018, é de R\$ 23,7 mil ou 16,2% do PIB contrafactual. Em linha com os resultados do PIB o impacto anual apresenta um formato de U-invertido sendo o impacto máximo em 2016.

Tabela 2 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB *per capita* dos 40 municípios atingidos (R\$ mil de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ mil	-3,6	-5,5	-4,8	-6,1	-1,8	-6,9	-4,2	-6,4
	% do PIB	-10,4	-14,9	-13,2	-16,1	-5,4	-17,9	-11,8	-16,8
	p-valor	0,08	0,01	0,03	0,01	0,26	0,03	0,04	0,04
2016	R\$ mil	-4,2	-7,8	-5,8	-6,8	-3,0	-7,1	-6,3	-8,1
	% do PIB	-12,9	-21,4	-16,8	-19,1	-9,4	-19,8	-18,1	-22,0
	p-valor	0,11	0,01	0,03	0,01	0,19	0,03	0,03	0,03
2017	R\$ mil	-2,7	-5,8	-4,4	-5,8	-2,6	-9,3	-4,5	-8,1
	% do PIB	-8,1	-16,1	-12,6	-16,0	-8,0	-23,5	-13,0	-21,2
	p-valor	0,18	0,06	0,08	0,08	0,21	0,04	0,11	0,11
2018	R\$ mil	-1,6	-4,5	-2,7	-5,1	-1,5	-8,7	-3,0	-6,8
	% do PIB	-4,9	-12,5	-7,9	-13,9	-4,7	-21,6	-8,6	-17,8
	p-valor	0,38	0,11	0,31	0,11	0,50	0,07	0,24	0,13
Acumulado	R\$ mil	-12,2	-23,7	-17,7	-23,7	-8,9	-31,9	-18,0	-29,4
	% do PIB	-9,1	-16,2	-12,7	-16,3	-6,8	-20,7	-12,9	-19,4
	p-valor	0,20	0,14	0,06	0,06	0,51	0,03	0,06	0,17
RSME	Pré-rompimento	0,75	0,98	0,99	1,31	1,57	2,06	1,10	2,35
	Pós-rompimento	3,20	6,04	4,55	5,96	2,30	8,05	4,65	7,39

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: O p-valor é construído a partir dos 71 placebos, em cada simulação define-se uma sub-bacia como atingida e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

Na sequência, a Tabela 3 mostra os impactos estimados para os municípios do Litoral Adjacente. Como mostra a tabela, a perda acumulada no resultado de referência é de R\$ 19,8 mil ou 10,6% do PIB contrafactual. Nesse caso, a perda máxima ocorre em 2017, em lugar de 2016, como nas duas sub-regiões anteriores.

Tabela 3 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB *per capita* dos municípios do Litoral Adjacente (R\$ mil de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ mil	-7,8	-5,6	-11,7	-10,1	-10,3	-10,7	-10,2	-8,9
	% do PIB	-14,9	-11,2	-20,9	-18,6	-18,8	-19,3	-18,6	-16,7
	p-valor	0,21	0,25	0,11	0,13	0,09	0,11	0,13	0,14
2016	R\$ mil	-7,4	-6,2	-12,3	-11,6	-8,3	-8,6	-10,5	-9,6
	% do PIB	-15,8	-13,6	-23,6	-22,6	-17,4	-17,8	-20,9	-19,5
	p-valor	0,29	0,33	0,13	0,16	0,14	0,23	0,14	0,20
2017	R\$ mil	-8,2	-6,8	-11,1	-10,8	-7,2	-9,1	-9,2	-9,3
	% do PIB	-17,4	-14,8	-22,1	-21,7	-15,6	-18,8	-19,1	-19,2
	p-valor	0,32	0,35	0,14	0,18	0,25	0,23	0,21	0,14
2018	R\$ mil	-2,2	-1,1	-4,9	-4,9	-1,3	-3,0	-3,0	-3,4
	% do PIB	-4,7	-2,5	-10,0	-10,1	-2,9	-6,3	-6,3	-7,2
	p-valor	0,57	0,75	0,30	0,41	0,75	0,59	0,59	0,41
Acumulado	R\$ mil	-25,6	-19,8	-40,0	-37,5	-27,2	-31,3	-32,8	-31,3
	% do PIB	-13,3	-10,6	-19,3	-18,3	-14,0	-15,7	-16,4	-15,7
	p-valor	0,71	0,84	0,29	0,41	0,43	0,48	0,41	0,30
RSME	Pré-rompimento	3,45	3,64	3,81	3,86	5,37	6,09	3,79	3,82
	Pós-rompimento	6,86	5,43	10,42	9,74	7,58	8,35	8,75	8,23

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: O p-valor é construído a partir dos 55 placebos, em cada simulação define-se um estado como atingido e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

Em seguida, a Tabela 4 apresenta as estimativas de impacto para o município de Anchieta (ES). A perda acumulada no período pós-rompimento é de R\$ 456,8 mil ou 65,9% do PIB Contrafactual 2 com ajuste. Diferentemente das estimativas para as demais regiões, as perdas anuais para Anchieta (ES) são crescentes atingindo um pico em 2018. Como discutido na Seção 4.4, embora haja recuperação da atividade econômica na região sintética, o mesmo não ocorre para o município.

Tabela 4 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB *per capita* do município de Anchieta (ES) (R\$ mil de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ mil	-102,4	-86,4	-70,8	-53,8	41,0	44,5	-99,9	-67,0
	% do PIB	-44,9	-39,9	-36,0	-29,2	48,3	51,8	-44,3	-34,0
	p-valor	0,09	0,13	0,11	0,16	0,14	0,14	0,09	0,11
2016	R\$ mil	-108,0	-99,7	-68,4	-58,9	-10,8	-6,8	-103,6	-76,5
	% do PIB	-78,2	-74,5	-69,5	-63,3	-26,4	-16,6	-77,5	-69,2
	p-valor	0,07	0,09	0,09	0,13	0,63	0,75	0,05	0,09
2017	R\$ mil	-125,3	-118,8	-84,4	-76,6	-18,4	-16,6	-121,3	-94,8
	% do PIB	-79,6	-77,7	-72,4	-69,2	-36,4	-32,7	-79,0	-73,5
	p-valor	0,07	0,07	0,11	0,13	0,34	0,36	0,05	0,09
2018	R\$ mil	-161,8	-151,9	-130,5	-119,6	-39,7	-37,8	-160,1	-133,4
	% do PIB	-81,9	-79,9	-78,5	-75,8	-52,6	-49,7	-81,7	-77,7
	p-valor	0,07	0,07	0,09	0,11	0,20	0,20	0,09	0,09
Acumulado	R\$ mil	-497,5	-456,8	-354,0	-308,9	-27,9	-16,7	-484,9	-371,6
	% do PIB	-69,0	-65,9	-61,3	-56,6	-11,1	-6,6	-68,4	-61,1
	p-valor	0,46	0,43	0,38	0,38	0,98	0,91	0,23	0,21
RSME	Pré-rompimento	34,4	31,5	36,1	33,5	91,0	80,5	34,6	32,3
	Pós-rompimento	126,5	116,8	92,0	81,4	30,5	30,5	123,6	96,3

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: O p-valor é construído a partir dos 55 placebos, em cada simulação define-se um município como atingido e calcula-se o impacto. O p-valor, portanto, é o ranque entre todas as simulações. RSME pré e pós se referem ao ajuste da região sintética com relação à observada.

Por fim, a Tabela 5 apresenta os resultados para a sub-região complementar. No resultado de referência, a perda acumulada no período pós-rompimento é de R\$ 7,1 mil ou 5,1% do PIB contrafactual. De forma semelhante ao impacto para o Litoral Adjacente, as perdas anuais apresentam um formato de U-invertido com pico em 2017 e uma arrefecimento moderado da perda no último ano.

Tabela 5 — Estimativas do Controle Sintético de impacto do rompimento sobre o PIB *per capita* dos municípios da sub-região complementar (R\$ mil de 2020)

Ano	Estatística	Contrafactual 2		Contrafactual 3		Contrafactual 4		Contrafactual 5	
		sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste	sem ajuste	com ajuste
2015	R\$ mil	-1,2	-1,3	-1,2	-1,3	-0,6	-1,6	-1,7	-1,9
	% do PIB	-3,4	-3,7	-3,4	-3,7	-1,7	-4,5	-4,8	-5,4
	p-valor	0,27	0,27	0,31	0,31	0,50	0,19	0,23	0,19
2016	R\$ mil	-1,3	-1,5	-1,3	-1,5	-1,2	-2,2	-2,3	-2,5
	% do PIB	-3,9	-4,4	-3,8	-4,4	-3,7	-6,6	-6,8	-7,2
	p-valor	0,38	0,46	0,31	0,38	0,38	0,23	0,23	0,19
2017	R\$ mil	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,0	-2,5	-2,8	-2,6
	% do PIB	-7,5	-7,6	-7,5	-7,6	-5,9	-7,2	-8,2	-7,6
	p-valor	0,15	0,19	0,15	0,19	0,35	0,19	0,19	0,19
2018	R\$ mil	-1,6	-1,7	-1,6	-1,7	-0,2	-0,5	-0,9	-0,8
	% do PIB	-4,7	-4,8	-4,7	-4,8	-0,6	-1,6	-2,6	-2,3
	p-valor	0,38	0,46	0,50	0,50	0,92	0,77	0,81	0,65
Acumulado	R\$ mil	-6,7	-7,1	-6,7	-7,1	-4,0	-6,8	-7,8	-7,8
	% do PIB	-4,9	-5,1	-4,8	-5,1	-3,0	-5,0	-5,6	-5,6
	p-valor	0,19	0,31	0,31	0,19	0,62	0,42	0,42	0,50
RSME	Pré-rompimento	0,62	0,59	0,62	0,59	1,13	1,25	1,21	1,39
	Pós-rompimento	1,77	1,84	1,75	1,84	1,21	1,87	2,07	2,09

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Observação: Para esse exercício retirou-se os 221 municípios de MG e ES já incluídos nas demais análises (215 da sub-bacia, 5 do Litoral Adjacente e Anchieta – ES)

APÊNDICE C — PIB ajustado pelo preço do minério de ferro

No primeiro estudo realizado pela Fundação Getúlio Vargas (2019d) sobre a renda agregada foi proposto um ajuste na série de PIB estadual ajustada pela variação do preço do minério de ferro. O ajuste é realizado com o objetivo de mitigar os efeitos simultâneos de variação do preço do minério de ferro que podem confundir a estimação dos impactos atribuídos especificamente ao rompimento.

O Gráfico 1 a seguir apresenta o preço internacional de comercialização da *commodity* minério de ferro no período de 2002 a 2018. Como se pode observar, o preço do minério se encontrava em queda desde 2013, e manteve-se assim até 2016. A partir desse ano, houve um leve aumento no preço em 2017 e um arrefecimento em 2018.

Haja visto essa trajetória mais volátil do preço entre 2015 e 2018, a ideia dessa correção é filtrar o impacto dos preços externos do minério de ferro dos estados brasileiros, visto que ele é um importante determinante da produção no estado de Minas Gerais e Espírito Santo e afeta de maneira diferente cada um dos demais estados brasileiros, de acordo com a disponibilidade de minas e a presença da extração nos estados.

Gráfico 1 — Preço do minério de ferro no período do Controle Sintético



Fonte: Elaboração própria. FMI (2021), para a série de preço internacional do minério de ferro.

No primeiro estudo realizado pela FGV (2019d) foi proposto a seguinte estimação de um modelo linear com os anos de 2002 a 2014:

$$PIB_{it} = \mu_i + \delta_t + \beta P_t S_i^M + \epsilon_{it}$$

onde,

- PIB_{it} é o PIB do estado i no tempo t ;
- μ_i é o efeito fixo do estado i ;
- δ_t é o efeito específico do ano t comum a todos os estados;
- P_t é o preço do minério de ferro em US\$ negociado em Tianjin (FMI, 2009);
- S_i^M é a média da participação do valor adicionado do setor extrativo para o estado i de 2002 a 2014;
- β é a sensibilidade dos estados a variação no P_t e S_i^M ;
- ϵ_{it} é o erro idiossincrático assumido para satisfazer as hipóteses convencionais.

Deste modo, o PIB ajustado pela variação do preço no minério de ferro ($\widehat{PIB}_{it}$) é definido como:

$$\widehat{PIB}_{it} = PIB_{it} + \Delta_{it}, \text{ onde}$$

$$\Delta_{it} = -\hat{\beta}(P_t - P^M)S_i^M$$

P^M é a média do preço do minério de ferro de 2002 a 2014. O ajuste do PIB é representado por Δ_{it} , a saber, para um dado estado i , no período t , a série de PIB estadual observada (PIB_{it}) acrescida do ajuste resulta na série de PIB ajustada ($\widehat{PIB}_{it}$). Esse cálculo foi estimado a nível de estado, em face à disponibilidade da média da participação do valor adicionado do setor extrativo para cada estado.

Os resultados aqui presentes contemplam outras sub-regiões dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, como é o caso da sub-bacia do Rio Doce, dos 40 municípios, do Litoral Adjacente e de Anchieta (ES), para tanto, faz-se necessário ajustar o PIB a nível municipal e partir disso computar o valor da renda agregada para cada uma das delimitações citadas. A proposta nesse caso foi distribuir o ajuste estadual, Δ_{it} , para os seus respectivos municípios a partir da seguinte estratégia:

$$\widehat{PIB}_{mun_{jt}} = PIB_{mun_{jt}} - \frac{W_j}{\sum_{j=1}^J W_j} \Delta_{it}$$

- $\widehat{PIB}_{mun_{jt}}$ é o PIB municipal ajustado de um município j do estado i no tempo t ;
- $PIB_{mun_{jt}}$ é o PIB municipal de um município j do estado i no tempo t ;
- W_j é a massa salarial do emprego formal do setor extrativo mineral e relacionados de um município j do estado i em 2014;

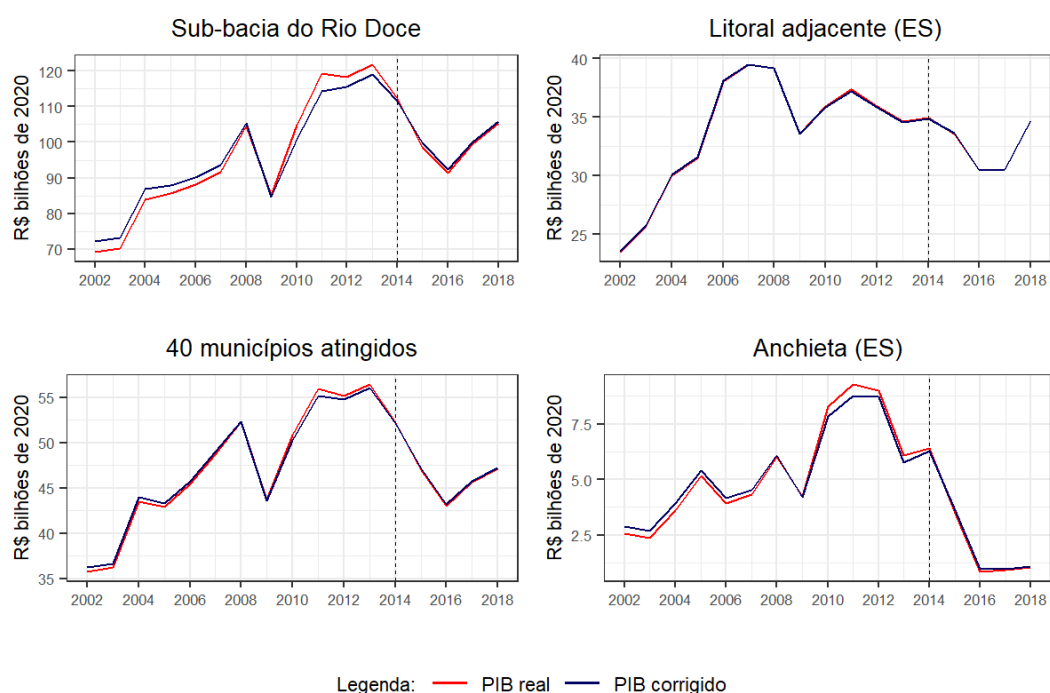
- $\sum_{j=1}^J W_j$ é a massa salarial total do emprego formal do setor extrativo mineral e relacionados do estado i em 2014;

Nota-se, portanto, que o ajuste estadual, Δ_{it} , é distribuído para os municípios a partir da participação dos mesmos na massa salarial do setor extrativo mineral e relacionados em 2014. Desta maneira, as somas dos PIBs municipais ajustados resultam no PIB estadual ajustado no mesmo ano de referência. Como o ajuste se deu com MG e ES conjuntamente, a distribuição para os municípios levou em consideração os estados como uma unidade de análise.

A partir disso, pode-se analisar o ajuste em cada uma das sub-regiões citadas anteriormente. O Gráfico 2, a seguir, compara o PIB observado com o ajustado, ambos a preços de R\$ bilhões de 2020.

A partir da ponderação realizada é de se esperar que municípios que não possuem uma indústria extrativa ligada à mineração em seu território não são afetados (diretamente) pelas oscilações do preço do minério de ferro. Os municípios do Litoral Adjacente, por exemplo, não possuem diferenças entre o PIB observado e o corrigido, isso se deve ao fato da inexistência de trabalhadores da indústria extrativa mineral na região. Nas demais regiões apresentadas é possível constatar que há uma diferença entre ambas as séries.

Gráfico 2 — Comparação PIB versus PIB ajustado para sub-regiões analisadas



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

APÊNDICE D — Pré-seleção dos municípios do Litoral e de Anchieta a partir das distâncias de Mahalanobis

A distância de Mahalanobis é comumente utilizada para medir uma distância de uma observação multivariada a partir de um centro populacional de interesse. Seguindo a nomenclatura proposta por Bryan e Alberto (2016), se $x_1, x_2, \dots, x_p$ são valores para as variáveis dos municípios $X_1, X_2, \dots, X_p$ com uma população centrada em $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p$ e com uma matriz de covariância v^{rs} , então a distância de Mahalanobis D é definida como:

$$D^2 = \left\{ \sum_{r=1}^p \sum_{s=1}^p (x_r - \mu_r) \cdot v^{rs} \cdot (x_s - \mu_s) \right\}$$

Para o presente exercício utilizou-se como população centrada a unidade tratada de interesse em 2014, a saber, para o caso dos municípios do litoral, definiu-se com as covariadas $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p$ as variáveis agregadas que formam a unidade tratada do litoral. O caso é análogo para o controle sintético estimado para Anchieta (ES). Para as covariadas $x_1, x_2, \dots, x_p$, utilizaram-se os valores de 2014 para as seguintes variáveis:

- a proporção do valor adicionado ao PIB do setor agropecuário com relação ao PIB do município;
- a proporção do valor adicionado ao PIB do setor industrial com relação ao PIB do município;
- a proporção do valor adicionado ao PIB do setor de serviços com relação ao PIB do município;
- o logaritmo neperiano da densidade populacional;
- o logaritmo neperiano da população;
- o logaritmo neperiano da distância do centroide do município ao mar.¹⁸

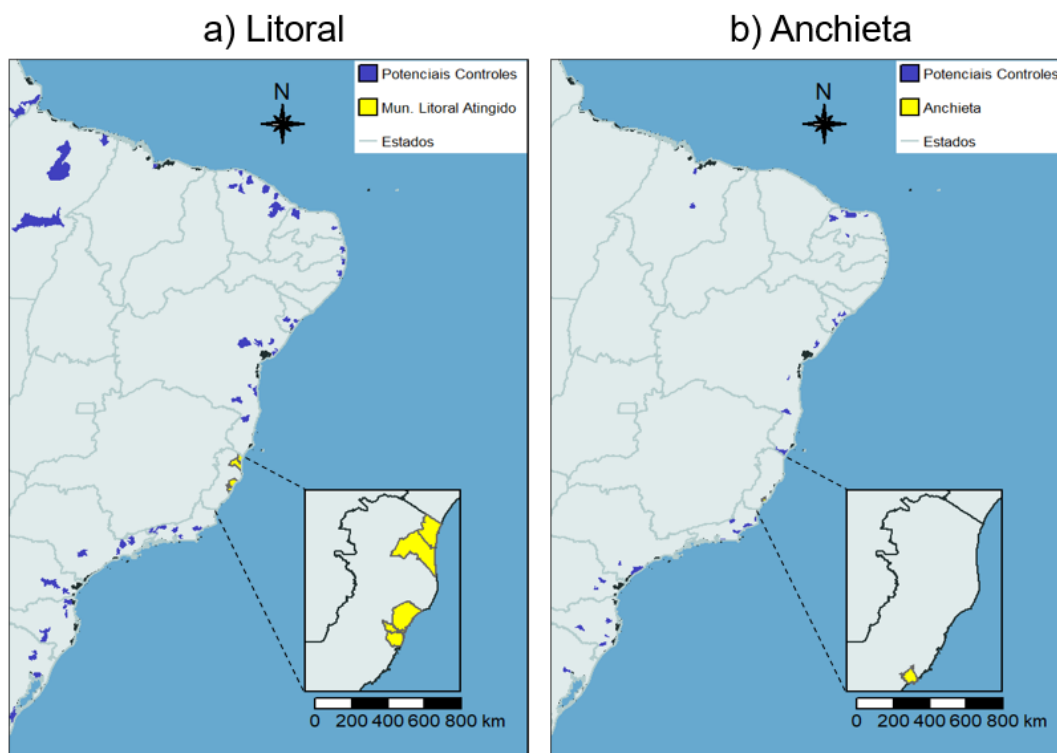
É importante ressaltar que a utilização da função logarítmica nas últimas três variáveis tem como intuito reduzir a escala, assim como a variabilidade dessas variáveis, o que torna a mensuração da distância de Mahalanobis com pesos mais homogêneos entre as covariadas utilizadas. Tanto no caso dos municípios do litoral quanto na análise específica do município de Anchieta (ES) calcularam-se as distâncias para todos os municípios fora de Minas Gerais e Espírito Santo e selecionaram-se os que estavam até

¹⁸ Para o caso da agregação dos municípios do litoral optou-se por computar a média das distâncias dos municípios ao mar.

o 1,2 percentil da distribuição, ranqueada em ordem decrescente, sendo os mais próximos os primeiros, o que corresponde aos 55 municípios mais próximos como potenciais controles. Outra ressalva importante é que as unidades tratadas foram incluídas na matriz de covariância para se calcular a distância de Mahalanobis.

A Figura 1 apresenta o conjunto de municípios selecionados para o caso do litoral (a), e para o município de Anchieta (b). A partir desses municípios, realizaram-se os respectivos controles sintéticos em cada caso. Os municípios em azul-escuro são os escolhidos com base no critério da distância de Mahalanobis com base nas características geográficas e demográficas. Os municípios em amarelo-claro na Figura 1a constituem os cinco municípios do litoral citados anteriormente que pertencem aos 45 municípios atingidos, porém não fazem parte da sub-bacia do Rio Doce, e na Figura 1b o município de Anchieta (ES), profundamente afetado pela interrupção da pelotização.

Figura 1 — Potenciais controles para o Litoral e para Anchieta (ES)



Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Para os resultados apresentados na Seção 4.3, os cinco municípios destacados em amarelo foram consolidados em uma unidade de tratamento considerada atingida. Entre os potenciais controles estão 55 municípios em diferentes estados brasileiros. Os principais critérios para a seleção dos escolhidos foram a proporção do valor agregado

na indústria do município com relação ao PIB total e a distância do município ao mar. A partir desse conjunto de potenciais controles – destacados em azul-escuro na Figura 1 – foram estimadas as regiões sintéticas seguindo as mesmas estratégias de estimação de Controle Sintético apresentadas na Seção 3.2. Para o caso de Anchieta (ES), implementou-se a mesma sequência na estimação dos municípios sintéticos.

APÊNDICE E — Análise de sensibilidade Mahalanobis

Este apêndice tem como intuito avaliar o quão sensível os resultados do Litoral Adjacente e o de Anchieta são a depender da escolha do número de potenciais controles pré-selecionados a partir da distância de Mahalanobis. Como se pode observar, os valores são relativamente estáveis a depender da escolha utilizada.

Tabela 1 — Análise de sensibilidade do Litoral Adjacente

Ano	Estatística	Contrafactual 2 – com ajuste				
		37 mun.	46 mun.	55 mun.	64 mun.	74 mun.
2015	R\$ bilhões	-5,1	-5,4	-5,6	-4,2	-4,3
	% do PIB	-10,3	-10,8	-11,2	-8,7	-8,7
2016	R\$ bilhões	-5,8	-6,2	-6,2	-5,3	-5,3
	% do PIB	-12,8	-13,5	-13,6	-11,8	-11,9
2017	R\$ bilhões	-6,2	-6,7	-6,8	-5,7	-5,7
	% do PIB	-13,6	-14,7	-14,8	-12,7	-12,7
2018	R\$ bilhões	-0,7	-1,3	-1,1	-1,0	-1,0
	% do PIB	-1,6	-2,8	-2,5	-2,3	-2,3
Acumulado	R\$ bilhões	-17,8	-19,6	-19,8	-16,3	-16,3
	% do PIB	-9,6	-10,5	-10,6	-8,9	-8,9
RSME	Pré	3,7	3,7	3,6	3,6	3,6
	Pós	5,0	5,4	5,4	4,5	4,5
Peso dos municípios selecionados						
Barcarena (PA)		17,4	15	14,9	12,4	12,5
Ipojuca (PE)				0,4		
Itapetinga (BA)				21,8	21,5	21,5
Jaraguá do Sul (SC)		30,8	31,1	33,7	15,6	15,9
Marabá (PA)			5,1	7,5	17,1	16,9
Maranguape (CE)		23,9	21			
São Bernardo do Campo (SP)					20,5	20,1
Taubaté (SP)		27,9	27,9	21,6	12,9	13,1

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Tabela 2 — Análise de sensibilidade de Anchieta (ES)

Ano	Estatística	Contrafactual 2 – com ajuste				
		37 mun.	46 mun.	55 mun.	64 mun.	74 mun.
2015	R\$ bilhões	-2,8	-2,8	-2,4	-2,4	-2,4
	% do PIB	-44,0	-44,0	-39,9	-40,3	-40,3
2016	R\$ bilhões	-3,5	-3,5	-2,8	-3,0	-3,0
	% do PIB	-78,3	-78,3	-74,5	-75,7	-75,7
2017	R\$ bilhões	-4,1	-4,1	-3,4	-3,5	-3,4
	% do PIB	-81,0	-81,0	-77,7	-78,0	-78,0
2018	R\$ bilhões	-4,9	-4,9	-4,4	-4,3	-4,3
	% do PIB	-81,8	-81,8	-79,9	-79,5	-79,5
Acumulado	R\$ bilhões	-15,4	-15,4	-12,9	-13,1	-13,1
	% do PIB	-69,8	-69,8	-66,1	-66,4	-66,4
RSME	Pré	32,3	32,3	31,5	31,1	31,1
	Pós	138,0	138,0	116,8	117,9	117,8
Peso dos municípios selecionados						
Aratiba (RS)					0,2	
Canindé de São Francisco (SE)				18	16,9	16,8
Casimiro de Abreu (RJ)				7,8	4,4	4,4
Parazinho (RN)		20,1	20,1			
Pinhal da Serra (RS)					8,6	8,4
Quissamã (RJ)		8,7	8,7	8	10,4	10,5
São João da Barra (RJ)		48,3	48,3	50,3	45,3	45,3
Triunfo (RS)		23	23	15,9	14,4	14,3

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE

Figura 1 — Sub-bacias nomenclaturas

Indicador	Nome	Indicador	Nome
11	Amazonas, entre os rios Madeira e Trombetas	51	Paranaíba
12	Araguaia, a jusante da ilha do Bananal	52	Pardo, Cachoeira e outros
13	Araguaia, a montante da ilha do Bananal	53	Parnaíba
14	Araguaia, trecho da Ilha do Bananal	54	Pelotas
15	Baixo Araguaia	55	Pindaré, Itapecuru, Mearim e outros
16	Cachoeira, São João e outros	56	Piranhas, Açú e outros
17	Camaquã, Jacuí, lagoa dos Patos e outros	57	Ribeira do Iguape
18	Canoas	58	Salitre e outros – São Francisco
19	Contas	59	São Francisco, a jusante do Pajeú
20	Corrente e outros – São Francisco	60	São Mateus, Itanhém e outros
21	Das Velhas – São Francisco	61	Tapajós
22	Doce	62	Taquari
23	Grande	63	Tocantins, entre o rio Araguaia e a foz
24	Grande e outros – São Francisco	64	Tocantins, entre os rios do Sono e Araguaia
25	Guamá e outros	65	Tocantins, entre os rios Paranã e do Sono
26	Ibicuí	66	Tocantins, entre os rios Preto e Paranã
27	Itajaí	67	Tubarão, Capivari e outros
28	Itapicuru, Vaza Barris e outros	68	Urucuia – São Francisco
29	Jaguarão e lagoa Mirim no Brasil e outros	69	Uruguai e Negro
30	Jaguaribe	70	Uruguai, Chapecó, Passo Fundo e outros
31	Jequiriçá, Paraguaçu e outros	71	Uruguai, Ijuí, Piratinim e outros
32	Jequitinhonha	72	Uruguai, Inhanduva, Peixe e outros
33	Litorâneas de Pernambuco e Alagoas	73	Uruguai, Quaraí (M. D.) e outros
34	Litorâneas de São Paulo	74	Uruguai, Várzea, Turvo e outros
35	Litorâneas do Ceará	75	Verde Grande – São Francisco
36	Litorâneas do Espírito Santo	76	Xingu e Paru
37	Litorâneas do Pará e Maranhão		
38	Litorâneas do Rio de Janeiro		
39	Madeira		
40	Negro		

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

APÊNDICE G — Lista de municípios da fronteira de MG

Este apêndice apresenta a lista dos municípios do modelo de Diferença-em-Diferenças. A Tabela 1 contém os nomes dos municípios localizados na fronteira de MG e pertencentes ao estado, enquanto a Tabela 2, por sua vez, apresenta os municípios fronteiriços a MG, porém localizados fora do estado.

Tabela 1 — Diferença-em-Diferenças: municípios de MG

Municípios da fronteira de MG pertencentes ao estado			
Abadia dos Dourados (MG)	Conceição dos Ouros (MG)	Laranjal (MG)	Santa Helena de Minas (MG)
Água Comprida (MG)	Conquista (MG)	Leopoldina (MG)	Santa Maria do Salto (MG)
Águas Vermelhas (MG)	Coromandel (MG)	Limeira do Oeste (MG)	Santa Rita de Jacutinga (MG)
Albertina (MG)	Delfim Moreira (MG)	Machacalis (MG)	Santa Vitória (MG)
Além Paraíba (MG)	Delta (MG)	Manga (MG)	Santana do Deserto (MG)
Andradas (MG)	Divisa Alegre (MG)	Mar de Espanha (MG)	Santo Antônio do Aventureiro (MG)
Antônio Prado de Minas (MG)	Divisópolis (MG)	Marmelópolis (MG)	Santo Antônio do Jacinto (MG)
Araguari (MG)	Douradoquara (MG)	Mata Verde (MG)	São Francisco de Sales (MG)
Araporã (MG)	Espera Feliz (MG)	Matias Barbosa (MG)	São João do Paraíso (MG)
Arceburgo (MG)	Espinosa (MG)	Matias Cardoso (MG)	São Sebastião do Paraíso (MG)
Bandeira (MG)	Estrela Dalva (MG)	Montalvânia (MG)	São Tomás de Aquino (MG)
Barão de Monte Alto (MG)	Eugenópolis (MG)	Monte Alegre de Minas (MG)	Sapucaí-Mirim (MG)
Belmiro Braga (MG)	Extrema (MG)	Monte Carmelo (MG)	Serra dos Aimorés (MG)
Bertópolis (MG)	Faria Lemos (MG)	Monte Santo de Minas (MG)	Simão Pereira (MG)
Bocaina de Minas (MG)	Formoso (MG)	Monte Sião (MG)	Toledo (MG)
Bonito de Minas (MG)	Fronteira (MG)	Montezuma (MG)	Tombos (MG)
Botelhos (MG)	Frutal (MG)	Munhoz (MG)	Tupaciguara (MG)
Brazópolis (MG)	Gameleiras (MG)	Muzambinho (MG)	Uberaba (MG)
Bueno Brandão (MG)	Gonçalves (MG)	Nanuque (MG)	Umburatiba (MG)
Burititis (MG)	Grupiara (MG)	Ninheira (MG)	Unaí (MG)
Cabeceira Grande (MG)	Guaranésia (MG)	Palma (MG)	Vargem Grande do Rio Pardo (MG)
Cabo Verde (MG)	Guarda-Mor (MG)	Palmópolis (MG)	Virgínia (MG)
Cachoeira de Pajeú (MG)	Guaxupé (MG)	Paracatu (MG)	Volta Grande (MG)
Cachoeira Dourada (MG)	Ibiraci (MG)	Paraisópolis (MG)	Wenceslau Braz (MG)
Caiana (MG)	Ipiaçu (MG)	Passa Quatro (MG)	
Caldas (MG)	Itajubá (MG)	Passa Vinte (MG)	
Camanducaia (MG)	Itamogi (MG)	Patrocínio do Muriaé (MG)	
Canápolis (MG)	Itamonte (MG)	Pedra Azul (MG)	
Capetinga (MG)	Itanhandu (MG)	Pedra Dourada (MG)	
Capinópolis (MG)	Itapagipe (MG)	Piranguçu (MG)	
Carangola (MG)	Itapeva (MG)	Pirapetinga (MG)	
Carlos Chagas (MG)	Ituiutaba (MG)	Planura (MG)	
Carneirinho (MG)	Iturama (MG)	Poços de Caldas (MG)	
Cascalho Rico (MG)	Jacinto (MG)	Recreio (MG)	
Cássia (MG)	Jacutinga (MG)	Rio do Prado (MG)	
Centralina (MG)	Januária (MG)	Rio Preto (MG)	
Chapada Gaúcha (MG)	Jordânia (MG)	Rubim (MG)	
Chiador (MG)	Juiz de Fora (MG)	Sacramento (MG)	
Claraval (MG)	Juruáia (MG)	Salto da Divisa (MG)	
Conceição das Alagoas (MG)	Juvenília (MG)	Santa Bárbara do Monte Verde (MG)	

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados do IBGE.

Tabela 2 — Diferença-em-Diferenças: municípios fora de MG

Municípios da fronteira de MG não pertencentes ao estado			
Águas da Prata (SP)	Divinolândia (SP)	Lajedão (BA)	Resende (RJ)
Águas de Lindoia (SP)	Duas Barras (RJ)	Lavrinhas (SP)	Ribeirão do Largo-BA
Altinópolis (SP)	Encruzilhada (BA)	Lindoia (SP)	Rifaina (SP)
Alvorada do Norte (GO)	Espírito Santo do Pinhal (SP)	Lorena (SP)	Rio das Flores (RJ)
Anhanguera (GO)	Eunápolis (BA)	Macarani (BA)	Riolândia (SP)
Aparecida do Taboado (MS)	Feira da Mata (BA)	Maiquinique (BA)	Rubinéia (SP)
Aperibé (RJ)	Flores de Goiás (GO)	Malhada (BA)	Santa Albertina (SP)
Aramina (SP)	Formosa (GO)	Medeiros Neto (BA)	Santa Clara D'Oeste (SP)
Areal (RJ)	Franca (SP)	Mesópolis (SP)	Santa Fé do Sul (SP)
Barra Mansa (RJ)	Gouvelândia (GO)	Miguelópolis (SP)	Santa Rita D'Oeste (SP)
Barretos (SP)	Guaira (SP)	Mira Estrela (SP)	Santo Antônio da Alegria (SP)
Bragança Paulista (SP)	Guaraci (SP)	Miracema (RJ)	Santo Antônio de Pádua (RJ)
Buriti Alegre (GO)	Guaratinga (BA)	Mococa (SP)	Santo Antônio do Jardim (SP)
Buritizal (SP)	Guaratinguetá (SP)	Mogi Guaçu (SP)	Santo Antônio do Pinhal (SP)
Cabeceiras (GO)	Ibirapuã (BA)	Monteiro Lobato (SP)	São Bento do Sapucaí (SP)
Cachoeira Dourada (GO)	Icém (SP)	Mortugaba (BA)	São João da Boa Vista (SP)
Cachoeira Paulista (SP)	Igarapava (SP)	Natividade (RJ)	São José do Rio Pardo (SP)
Caconde (SP)	Igaratá (SP)	Nova Aurora (GO)	São José do Vale do Rio Preto (RJ)
Caçu (GO)	Inaciolândia (GO)	Nova Granada (SP)	São José dos Campos (SP)
Cajuru (SP)	Indiaporã (SP)	Orindiúva (SP)	São Sebastião da Gramma (SP)
Campo Alegre de Goiás (GO)	Ipameri (GO)	Ouroeste (SP)	São Simão (GO)
Campos do Jordão (SP)	Itagimirim (BA)	Ouvidor (GO)	Sapucaia (RJ)
Cândido Sales (BA)	Itajá (GO)	Palestina (SP)	Sebastião Laranjeiras (BA)
Cantagalo (RJ)	Itanhém (BA)	Paraíba do Sul (RJ)	Serra Negra (SP)
Cardoso (SP)	Itaocara (RJ)	Paranaíba (MS)	Sítio D'Abadia (GO)
Carinhanha (BA)	Itapebi (BA)	Paranaiguara (GO)	Socorro (SP)
Carmo (RJ)	Itaperuna-RJ	Patrocínio Paulista (SP)	Sumidouro (RJ)
Cássia dos Coqueiros (SP)	Itapira (SP)	Paulo de Faria (SP)	Tapiratiba (SP)
Catalão (GO)	Itarantim (BA)	Pedra Bela (SP)	Tremedal (BA)
Cocos (BA)	Itarumã (GO)	Pedregulho (SP)	Tremembé (SP)
Colômbia (SP)	Itatiaia (RJ)	Pindamonhangaba (SP)	Três Ranchos (GO)
Comendador Levy Gasparian (RJ)	Itirapuã (SP)	Pinhalzinho (SP)	Três Rios (RJ)
Condeúba (BA)	Itumbiara (GO)	Piquete (SP)	Urandi (BA)
Cordeiros (BA)	Ituverava (SP)	Piracaia (SP)	Valença (RJ)
Corumbáiba (GO)	Iuiu (BA)	Piripá (BA)	Vargem (SP)
Cristais Paulista (SP)	Jaborandi (BA)	Populina (SP)	Vargem Grande do Sul (SP)
Cristalina (GO)	Jacaraci (BA)	Porciúncula (RJ)	Varre-Sai (RJ)
Cruzeiro (SP)	Joanópolis (SP)	Quatis (RJ)	Vereda (BA)
Cumari (GO)	Jucuruçu (BA)	Queluz (SP)	Vila Boa (GO)
Davinópolis (GO)	Laje do Muriaé (RJ)	Quirinópolis (GO)	

Fonte: Elaboração própria (2021), a partir de dados IBGE.