

Avaliação do desastre de Brumadinho no desempenho econômico de Minas Gerais

Evaluation of the Brumadinho disaster on economic performance in Minas Gerais

Lucas Siqueira de Castro ⁽¹⁾

Eduardo Almeida ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

⁽²⁾ Universidade Federal de Juiz de Fora

Abstract

This study aims to evaluate the effect of the Brumadinho disaster on economic performance in Minas Gerais. As for empirical strategy, contrafactual trajectories for Minas Gerais were elaborated in order to obtain the effect of this technological disaster. In addition to inserting serially lagged outcome variables, a methodological advance was achieved by including the spatially lagged outcome variable as well, in order to generate the counterfactual trajectories with the lowest mean squared prediction error (MSPE). The results reveal that the mining industry in the state of Minas Gerais was not affected by the Brumadinho disaster.

Keywords

Brumadinho, technological disaster, synthetic control, spatial lags.

JEL Codes C15, O1, Q54, R11.

Resumo

O objetivo deste artigo é avaliar o efeito do desastre de Brumadinho no desempenho econômico em Minas Gerais. Quanto à estratégia empírica, elaboraram-se trajetórias contrafactuais para a economia de Minas Gerais, por meio do controle sintético, para se obter o efeito desse desastre tecnológico. Além das defasagens temporais da variável de resultado, um avanço metodológico foi alcançado por incluir também as defasagens espaciais da variável de resultado para gerar as trajetórias contrafactuais com menor Root Mean Squared Prediction Error (RMPSE). Os resultados revelam que o setor industrial de Minas Gerais não foi afetado pelo desastre de Brumadinho.

Palavras-chave

Brumadinho, desastre tecnológico, controle sintético, defasagens espaciais.

Códigos JEL C15, O1, Q54, R11.

1 Introdução

A relação entre os recursos naturais, sobretudo a exploração mineral, e o desenvolvimento das nações não é recente, sendo discutida na literatura econômica desde Adam Smith em 1776. No Brasil, por exemplo, essa associação pode ser estabelecida a partir do século XVII, com o primeiro grande ciclo mineral proporcionado pelo ouro (Minas Gerais e Goiás), tornando o país o maior produtor mundial à época. O segundo grande ciclo mineral, por sua vez, ocorreu no século XX, propiciado pelas jazidas de manganês (Amapá), petróleo, ferro (Minas Gerais), carvão (Paraná e Rio Grande do Sul), cobre (Rio Grande do Sul), chumbo (Bahia e Minas Gerais), nióbio (Minas Gerais), bauxita (Minas Gerais e Pará), estanho (Rondônia), dentre outras (Barreto, 2001).

Em 2018, a indústria extrativa mineral contribuiu com 1,4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, gerando diretamente cerca de 195 mil postos de trabalho. Três foram os estados responsáveis por 93,94% do valor da produção mineral comercializada no mesmo ano, a saber: Pará (48,22%), Minas Gerais (40,84%) e Goiás (4,88%) (IBGE, 2020). Além disso, esses mesmos três estados geraram 86.850 postos de trabalho em 2018, com destaque para Minas Gerais, responsável por 58.815 vagas (Brasil, 2018). Entre os produtos de destaque, o país figura como o maior produtor mundial de nióbio e o segundo maior de ferro. A participação na balança comercial brasileira é expressiva: entre bens primários, semimanufaturados, manufaturados e compostos químicos, registrou-se o saldo de aproximadamente 35 bilhões de dólares (ANM, 2020).

Para dar suporte à atividade da mineração, barragens de rejeitos são construídas, respeitando a legislação ambiental. Em fevereiro de 2019 o país registrou a existência de 769 barragens, das quais 425 foram enquadradas no Sistema Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Do total de barragens, 45,6% se concentraram em Minas Gerais e 13,5% no Pará (ANM, 2020).

Embora com baixa probabilidade, situações que resultem em rupturas de barragens já ocorreram em diversos países. Segundo o banco de dados *World Mine Tailings Failures*, entre os anos de 1915 e 2019, foram computados 356 casos em todo o mundo (WMTF, 2019). Frequentemente, de acordo com Duarte (2008), duas são as causas para os rompimentos: fenômenos naturais de grandes proporções (terremotos, tempestades etc.) e

falhas no planejamento estrutural em termos de operação, manutenção e segurança. Os resultados desses eventos geram danos socioeconômicos e ambientais, bem como o reordenamento populacional/territorial.

No estado de Minas Gerais, o contexto envolvendo o risco de acidentes não é diferente. Levando-se em conta o período entre 1986 e 2019, foram registrados ao menos sete rompimentos de barragens de rejeitos minerais, sendo os dois últimos considerados desastres tecnológicos¹ de grandes proporções, tanto em nível nacional quanto mundial: Mina do Pico de São Luiz (1986) – Itabirito; Macacos (2001) – Nova Lima; Florestal Cataguases Ltda. (2003) – Zona da Mata Mineira; São Francisco da Mineradora Rio Pomba Cataguases Ltda. (2007) – Miraí; B1 da Herculano Mineradora (2014) – Itabirito; Fundão da Mineradora Samarco S.A. (2015) – Mariana; Córrego do Feijão da Vale S.A. (2019) – Brumadinho.

Na tentativa de estimar os impactos de desastres tecnológicos no Brasil, seis foram os estudos encontrados na literatura, sendo apenas um relacionado ao colapso da barragem de Brumadinho. Por exemplo, Simonato (2017) simulou os impactos econômicos regionais do rompimento da barragem de Mariana. Para tanto, foi elaborado um modelo dinâmico de equilíbrio geral computável, capaz de calcular os efeitos em municípios direta e indiretamente afetados entre os anos de 2016 e 2020. De maneira geral, os resultados mostraram que o período estipulado se revelou insuficiente para a recuperação dos níveis de produção, consumo das famílias, emprego, investimento e comércio registrados anteriormente.

Já Silva *et al.* (2019) averiguaram a capacidade de resiliência econômica dos municípios mineiros atingidos pelo rompimento da barragem de Mariana. Metodologicamente, aplicou-se o indicador de resistência econômica de Martin *et al.* (2016), além do método *shift-share*. Chegou-se à conclusão de que a especialização produtiva, atrelada ao baixo dinamismo econômico dos setores restantes, foram os motivos que afetaram a capacidade de recuperação pós-choque dos municípios mineiros investigados.

Castro e Almeida (2019) estudaram como o desastre de Mariana afetou as economias de Minas Gerais e do Espírito Santo. Para esse fim, os auto-

.....
 1 Desastres são definidos como eventos que ocorrem de maneira repentina, acometendo os indivíduos e o seu entorno (ambiente), gerando externalidades negativas. A classificação de um desastre como do tipo tecnológico é feita considerando a forma de origem do evento, como em situações envolvendo substâncias radioativas, produtos perigosos, incêndios urbanos, obras civis (industriais) e o transporte de passageiros e cargas não perigosas (Castro; Almeida, 2019).

res elaboraram controles sintéticos para obter grupos de comparação contrafactual. De fato, foram computadas perdas nos estados, seja pela produção industrial geral, apenas no Espírito Santo, ou pela produção extrativa mineral, em ambos. Todavia, foi no Espírito Santo onde o choque negativo foi maior. Uma possível explicação para isso relaciona-se à grande dependência do setor extrativista mineral em sua economia, em comparação à de Minas Gerais.

Niquito *et al.* (2021) analisaram os impactos econômicos de curto prazo do rompimento da barragem de Mariana na renda e no emprego. Por meio da técnica de diferenças-em-diferenças, foram encontrados impactos diretos negativos em relação ao PIB geral, ao PIB industrial, ao emprego industrial, à produção de produtos de metal e de vestuários e acessórios.

Usando também a técnica das diferenças-em-diferenças, Carrillo *et al.* (2020) investigaram o efeito do rompimento da barragem de Mariana nas condições de saúde de recém-nascidos que foram expostos à tragédia na região quando estavam ainda no útero materno. Descobriu-se que o efeito do rompimento provocou perda do peso dos recém-nascidos e aumento da mortalidade infantil. Ademais, esse efeito foi mais acentuado para crianças cujas mães eram mais pobres e menos educadas.

Com um enfoque alternativo, Domingues *et al.* (2020) projetaram impactos econômicos oriundos da suspensão parcial da atividade de mineração de Minas Gerais, devido ao desastre de Brumadinho. Tendo como base os modelos de equilíbrio geral computável, foram observados efeitos negativos em variados setores da economia. No curto prazo, a queda estimada no PIB foi de 0,47%. No longo prazo, além da queda de 0,60% no PIB, também foram afetados os níveis de consumo das famílias, investimento e emprego.

A partir desta revisão de literatura selecionada, percebe-se que, os trabalhos investigaram, em sua maioria, o desastre de Mariana. Desse modo, este artigo busca avaliar o efeito do desastre tecnológico de Brumadinho no desempenho econômico² de Minas Gerais. Para tal finalidade, será construída uma trajetória para Minas Gerais na qual não ocorreria o desastre, adotando a técnica de controle sintético, para contrapô-la à situação real vigente. Do ponto de vista metodológico, para elaborar a trajetória sintética, além de defasagens temporais da variável de resultado, como proposto

2 O desempenho econômico mineiro, nesse caso, foi mensurado a partir do índice da produção física industrial mineira (PFIM).

por Abadie *et al.* (2010), serão usadas defasagens espaciais da variável de resultado a fim de se atingir um melhor ajuste proporcionado pela redução do *Root Mean Squared Prediction Error* (RMPSE). Até onde se sabe, esta é a primeira vez que se propõem defasagens espaciais para se conseguir um melhor ajuste na elaboração das trajetórias sintéticas e para se modelar eventualmente as interações espaciais subjacentes ao fenômeno estudado.

Além desta introdução, o trabalho é composto de mais quatro seções. Na segunda seção, são fornecidas informações acerca do desastre e da área de estudo. Já a terceira seção traça a estratégia empírica, bem como apresenta a base de dados. Na quarta seção, discutem-se os resultados encontrados. Por fim, na derradeira seção, tecem-se as considerações finais.

2 Características do desastre de Brumadinho

Pertencente à região metropolitana e localizada a 60 km de Belo Horizonte, Brumadinho, o município desencadeador do desastre, conta com uma população estimada de 40 mil habitantes em uma área de 639,43 km². Sendo elevado à categoria de município em 1938, sua história se mistura à dos bandeirantes, cuja busca por atividades mineradoras e seus espólios redimensionaram inúmeras regiões. Em 2017, o município registrou o 29º maior PIB *per capita* do estado em decorrência do desempenho do consolidado setor extrativista mineral e do crescimento do setor turístico (IBGE, 2020).

No dia 25 de janeiro de 2019, houve o colapso da barragem B1 da Vale S.A.³ Construída na década de 1970 com a tecnologia chamada de “alteamento a montante”,⁴ pela empresa alemã Ferteco, e adquirida pela Vale em 2001, essa barragem era responsável por conter rejeitos de minério de ferro pertencentes à mina de Córrego do Feijão. Aproximadamente 13 milhões de m³ de detritos foram lançados, os quais alcançaram a bacia do Rio Paraopeba, chegando a atingir uma velocidade de escoamento de 80 km/h

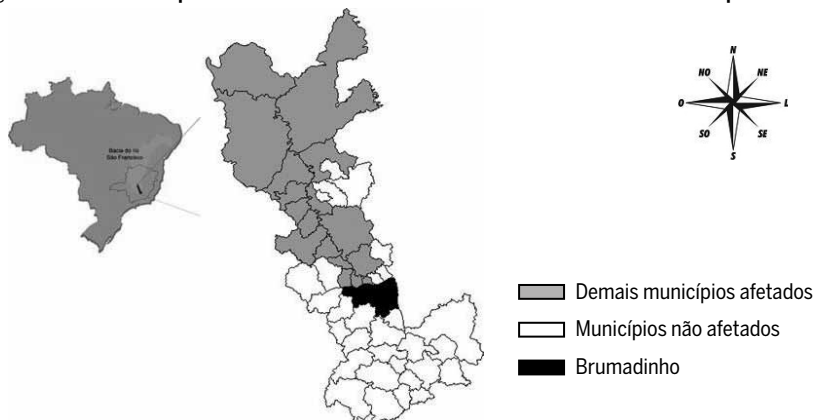
.....
3 Até o seu rompimento, entre as 29 barragens registradas no município, a B1 possuía um critério de risco baixo (CRI) e um alto dano potencial associado (DPA), de acordo com a Classificação de Barragens de Mineração (2019).

4 Existem três tecnologias de construção de barragens, a saber, alteamento a jusante, alteamento de linha de centro e alteamento a montante. Essa última tecnologia, usada em Brumadinho para construir a barragem, caracteriza-se pelo seu crescimento por meio de degraus com os próprios rejeitos acumulados sobre o dique de partida. Cabe destacar que essa tecnologia é considerada a mais barata e insegura.

e, nesse processo, outras barragens de contenção de sedimentos também foram rompidas: B IV e B IV-A (ME, 2019; Brasil, 2019).

Além das externalidades negativas infligidas pelas perdas socioeconômicas⁵ e ambientais,⁶ em seu entorno, foram computados 259 óbitos e onze desaparecimentos ao longo do curso da lama, entre trabalhadores da empresa e moradores locais, tornando-o um dos maiores acidentes de trabalho/desastres tecnológicos do país (Freitas; Silva, 2019).

Figura 1 O alcance espacial do desastre de Brumadinho na bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Adaptado de CIBAPAR (2009, apud Matos; Dias, 2011).

Nota: o mapa maior mostra o alcance do desastre de Brumadinho através dos municípios da bacia do Rio Paraopeba. O município marcado em preto é Brumadinho, o epicentro do rompimento da barragem. Os municípios destacados em cinza são aqueles atingidos pelos detritos do rompimento, ao passo que os municípios em branco não foram afetados. O mapa menor exhibe onde está a área de estudo no estado de Minas Gerais, enquanto a mancha cinza claro representa a bacia do Rio São Francisco.

Dos 48 municípios pertencentes à bacia do Paraopeba, além de Brumadinho, 18 foram afetados diretamente com o avanço dos detritos ao longo do Rio Paraopeba, a saber: Betim, Curvelo, Esmeraldas, Felixlândia, Florestal, Fortuna de Minas, Igarapé, Juatuba, Maravilhas, Mário Campos, Papagaios, Pará de Minas, Paraopeba, Pequi, Pompéu, São Joaquim de Bicas, São José da Varginha e Três Marias. O alcance espacial do colapso da barragem pode ser visto na Figura 1.

5 Perdas proporcionadas pela paralisação das atividades mineradoras, agropecuárias, turísticas e pesca.

6 Essas perdas referem-se a danos causados à fauna e à flora (terrestre e aquático), à qualidade do ar e da água, a unidades de conservação, entre outros.

Tabela 1 Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) dos 19 municípios afetados pelo Desastre de Brumadinho em Minas Gerais

Unidade geográfica	Total
Betim	98.728
Brumadinho	21.437.207
Curvelo	70.643
Esmeraldas	61.881
Felixlândia	13.852
Fortuna de Minas	5.406
Igarapé	243.238
Juatuba	7.643
Maravilhas	4.060
Mário Campos	331.486
Papagaios	156.157
Pará de Minas	328.169
Paraopeba	50.191
Pequi	2.149
Pompéu	49.595
São Joaquim de Bicas	62.358
São José da Varginha	43
Três Marias	2.699
Minas Gerais	495.728.266

Fonte: ANM, 2020.

Nota: a tabela mostra a distribuição dos valores em R\$ do CFEM entre os 19 municípios atingidos pelo desastre. Esses dados são provenientes da Associação Nacional de Mineração (ANM) para 2017. Na última linha da tabela, é informado o valor do CFEM para todo o estado de Minas Gerais.

No tocante à sua relevância econômica, os 19 municípios afetados pelo desastre colaboraram com 6,32% do PIB mineiro em 2017. A produção mineral desses municípios correspondeu a 4,62% do montante estadual nesse mesmo ano.⁷ Por sua vez, a participação da produção mineral desses municípios no PIB total de Minas Gerais, no mesmo ano, foi de apenas 0,0039787%. Para se ter ideia da participação da área de estudo para o setor mineral, mais informações sobre a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) dos 19 municípios afetados pelo desastre em Minas Gerais para o ano de 2017 estão disponíveis na Tabela 1.

7 A proxy utilizada para a produção mineral mineira foi a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM).

3 Estratégia empírica

3.1 Construção do controle sintético para Minas Gerais

Tendo o objetivo de mensurar o efeito do desastre de Brumadinho no desempenho econômico de Minas Gerais, é importante contrapor a situação deste estado após a ocorrência do choque tecnológico proporcionado pelo desastre, com a situação que prevaleceria, caso não houvesse ocorrido o desastre. Sabe-se que a última situação pode ser apenas conjecturada, pois não é observada. Portanto, é necessário construir um contrafactual para Minas Gerais a fim de se fazer a devida comparação entre a situação real, ou seja, Minas Gerais com o choque tecnológico de Brumadinho, e a situação hipotética, isto é, Minas Gerais sem esse choque tecnológico.

A saída, nesse caso, seria a de trabalhar com quase-experimentos, em que se possa usar os dados observacionais disponíveis com frequência mensal. Por ter ocorrido recentemente, e considerando a disponibilidade de dados/observações, o uso de métodos convencionais para a avaliação de impacto, como diferenças-em-diferenças, mostra-se inapropriado na análise do efeito do desastre de Brumadinho na produção mineral do estado de Minas Gerais. A opção mais viável é a do controle sintético (CS), método adotado na investigação de estudos de caso comparativos, que utilizam dados agregados geograficamente,⁸ ou em situações em que o tratamento afeta muito poucas unidades de observação. Além disso, o controle sintético leva em conta características idiossincráticas não observáveis, variantes e invariantes no tempo, diferentemente do método de diferenças-em-diferenças, que considera apenas as características invariantes no tempo que são removidas pela dupla diferenciação (Abadie; Garzeabadal, 2003; Abadie *et al.*, 2010; Abadie *et al.*, 2015).

Dessa maneira, o controle sintético foi adotado para a elaboração de uma trajetória contrafactual do desempenho econômico para o estado de Minas Gerais, a única unidade da federação que sofreu o efeito do choque tecnológico ocasionado pelo desastre de Brumadinho. A criação de um grupo de controle visa sintetizar a trajetória do resultado contrafactual para esse estado afetado, usando informações de outras unidades da fede-

.....
8 É possível utilizar também o método do controle sintético para dados desagregados. Para mais detalhes, veja Abadie e L'Hour (2021).

ração com características semelhantes, mas com pesos específicos, usados na composição de uma média ponderada.

Na implementação do controle sintético, costuma-se ainda assumir o pressuposto de que não há interferência entre as unidades de observação (Rosenbaum, 2007; Abadie *et al.*, 2010, 2015). Entretanto, problemas surgem quando esse pressuposto é violado. No estudo em questão, uma possível interferência – e violação desse pressuposto – seria o acidente de Brumadinho ter afetado o preço do minério de ferro ou estimulado a aprovação de normas regulatórias mais rígidas pelos órgãos competentes, influenciando no custo de produção dos outros estados minerais e, com isso, no seu desempenho econômico. Outra forma de interferência teria ocorrido se a lama da ruptura da barragem de Brumadinho tivesse não apenas contaminado o Rio Paraopeba, mas avançado até o Rio São Francisco, fazendo com que os detritos expelidos tivessem causado danos também nas atividades econômicas da Bahia na parte do seu território que é banhada por este último rio. Se esses estados estivessem participando com algum peso da construção da trajetória sintética, a série contrafactual seria contaminada pelo efeito de transbordamento (*spillover*) do choque tecnológico em Brumadinho.

Na literatura de controle sintético, o modo convencional de se evitar tal contaminação das potenciais unidades de controle implica que, na definição da composição do banco de doadores de características (*donor pool*), esses estados afetados precisam ser excluídos da análise (Abadie *et al.* 2010; 2015). De acordo com Abadie *et al.* (2015, p. 500):

Construir um banco de doadores de unidades de comparação requer alguns cuidados. Em primeiro lugar, as unidades afetadas pelo evento ou intervenção de interesse ou por eventos de natureza semelhante devem ser excluídas do donor pool. Além disso, as unidades que podem ter sofrido grandes choques idiossincráticos na variável de resultado de interesse durante o período do estudo também devem ser excluídas se tais choques não tivessem afetado a unidade tratada na ausência do tratamento.

Esse modo de se lidar com a violação da ausência de interferência entre as unidades será adotado na definição de dois *donor pools* utilizados em nosso estudo para Brumadinho (DP2 e DP3). Entretanto, o ponto defendido é que, na presença de dependência espacial, essa forma pode ser considerada inadequada porque as interações espaciais, que geram as interferências entre as unidades de observação, não estão sendo levadas em conta na modelagem, fazendo com que exista uma subestimação do efeito total do desastre.

Contudo, no desastre de Brumadinho, talvez seja razoável assumir que não houve mesmo efeitos de *spillover* e, conseqüentemente, o pressuposto de não interferência entre as unidades da federação seja válido. Como o minério de ferro é uma *commodity* cujo preço é determinado no mercado internacional, o efeito do desastre de Brumadinho não foi suficiente para afetar o preço dessa *commodity* e, conseqüentemente, não tendo impacto na produção mineral. Ainda, com relação à outra possibilidade de contaminação das unidades potenciais de controle, é sabido que a lama expelida pelo desastre de Brumadinho não atingiu o Rio São Francisco, com isso, não afetando negativamente o desempenho da economia baiana. É possível, então, alegar que não houve interferência entre as unidades da federação e, dessa forma, não é preciso retirar nenhum estado do banco de doadores de características (*donor pool*). De qualquer modo, essa pressuposição de não interferência entre as unidades será testada posteriormente, considerando essas duas possibilidades de contaminação da trajetória sintética.

A escolha dos estados possíveis candidatos ao grupo de controle foi definida pela compatibilidade de dados em relação à variável de resultado, a saber, a PFIM, o que permitiu que se reunissem informações suficientes apenas para 12 estados: Amazonas (AM), Bahia (BA), Ceará (CE), Espírito Santo (ES), Goiás (GO), Pará (PA), Paraná (PR), Pernambuco (PE), Rio Grande do Sul (RS), Rio de Janeiro (RJ), Santa Catarina (SC) e São Paulo (SP). É para essas 12 unidades da federação (UF), além de Minas Gerais, que se têm os dados da variável de resultado PFIM e das variáveis preditoras.

Para tratar a eventual interferência entre as unidades, foram definidos três bancos de doadores de características (*donor pools*). O primeiro *donor pool* (DP1) é composto pelas 12 potenciais unidades federativas de controle, descritas anteriormente, sem fazer nenhuma exclusão. A ideia é que a interferência entre as unidades é modelada por meio de uma defasagem espacial da variável de resultado (*WPFIM*), incluída como um preditor, capturando as interações e os efeitos de *spillover* eventualmente existentes entre as UFs. Uma vez que o número de unidades federativas incluído no estudo é reduzido, cabe alertar que considerável parte dessas interações espaciais pode não ser adequadamente captada em razão da ausência de unidades federativas vizinhas.

O segundo *donor pool* definido (DP2) exclui as unidades federativas que podem ter sofrido variações de preço ou de produção de minério de ferro no mercado internacional dessa *commodity* em decorrência dos efeitos

econômicos do desastre de Brumadinho. Assim, esse *donor pool* (DP2) é formado por nove unidades federativas, excluindo Pará, Bahia e Goiás, os grandes estados produtores minerais, além de Minas Gerais. O terceiro *donor pool* (DP3) é composto por sete unidades da federação, excluindo as UFs contíguas a Minas Gerais, ou seja, Bahia, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Goiás. Esse *donor pool* suprime os efeitos do desastre nesses estados fronteiriços, eliminando da análise, por exemplo, o efeito da lama que potencialmente tenha avançado pelo Rio São Francisco no seu trecho que banha municípios baianos.

É possível afirmar que um controle sintético se resume à composição de uma média ponderada das unidades potenciais doadoras de características. Os pesos dessa média são definidos com o intuito de minimizar a diferença ao longo do tempo entre o nível anterior do crescimento econômico de Minas Gerais sintética e o nível anterior do crescimento econômico de Minas Gerais real.⁹ O objetivo da minimização dessa diferença é escolher variáveis preditoras que levem ao menor *Root Mean Squared Prediction Error* (RMPSE) da variável de resultado no período de pré-intervenção, fazendo com que a trajetória sintética e a trajetória real se aproximem e que, idealmente, fiquem superpostas.¹⁰ Nesse caso, para atingir essa minimização do RMPSE é importante também selecionar adequadamente as variáveis preditoras com base em considerações teóricas. No caso limite, em que as duas trajetórias coincidam antes do momento da intervenção, todos os fatores observados e não observados, variantes ou invariantes no tempo, estariam controlados pelo método do controle sintético por intermédio da apropriada escolha das variáveis preditoras. De modo prático, cabe, então, selecionar não apenas variáveis preditoras observáveis justificadas pela teoria subjacente, mas também valores pré-intervenção da variável de resultado que possam capturar os fatores não observados, variantes e/ou invariantes no tempo (Abadie *et al.*, 2015).

As variáveis preditoras observáveis, empregadas para a construção do controle sintético, foram escolhidas a partir da teoria do crescimento econômico (Solow, 1956; Romer, 1986; Lucas, 1988; Mankiw *et al.*, 1992) e

9 De acordo com Abadie *et al.* (2015), os pesos do controle sintético são não negativos, bem como a sua soma é igual a um para se evitar vieses de extrapolação, comuns à análise de regressão linear.

10 Mais informações sobre o método, consultar Abadie e Garzeabadal (2003), Abadie *et al.* (2010; 2015), Ben-Michael *et al.* (2021), Botosaru e Ferman (2019), Ferman e Pinto (2021) e Abadie e L'Hour (2021).

associadas à disponibilidade de dados mensais, tais como capital físico, capital humano, trabalho não qualificado e fundo de participação dos estados (FPE).

Em que pese a teoria seja um guia fundamental para a escolha das variáveis preditoras observáveis, provavelmente fatores não observados variantes ou invariantes no tempo ainda continuam omitidos da análise. A prática de se usar a variável de resultado defasada serialmente é um método corriqueiro em estudos econométricos, mesmo que imperfeito, para controlar variáveis não observadas variantes no tempo no âmbito da análise de regressão (Wooldridge, 2013). Por isso, vários autores¹¹ que adotaram o método CS incluíram variáveis de resultado defasadas serialmente (temporalmente) como preditoras adicionais em estudos aplicados, além das variáveis sugeridas por considerações teóricas. Nesse sentido, as variáveis defasadas serialmente são capazes de capturar um efeito de inércia ou de histerese que pode estar correlacionado com fatores não observados persistentes no tempo.

De forma análoga, em aplicações com dados agregados regionalmente, a existência de variáveis omitidas autocorrelacionadas espacialmente costuma ser muito comum (Lesage; Pace, 2009; Gibbons; Overman, 2012). A inclusão da variável de resultado defasada espacialmente tem a capacidade de servir de uma *proxy* para fatores idiossincráticos não observados variantes ou invariantes no tempo que apresentam um determinado padrão espacial, frequentemente de concentração espacial. A hipótese é de que a inclusão dessa defasagem espacial do desempenho econômico (*WPFIM*), como uma variável preditora adicional, permita que o *Root Mean Squared Prediction Error* (RMPSE) se reduza ainda mais, além de captar eventualmente as interações espaciais entre as unidades federativas.

Seria possível argumentar que a inclusão das defasagens espaciais das variáveis preditoras também poderia controlar a omissão de variáveis não observadas espacialmente autocorrelacionadas em substituição à defasagem espacial da variável de resultado. O problema aqui reside no fato de que isso implicaria a inclusão de mais quatro variáveis preditoras, fazendo a equação exageradamente parametrizada, e reduzindo ainda mais os poucos graus de liberdade existentes para a elaboração do controle sintético. Nesse sentido, e como proposta pioneira deste artigo, a inclusão de uma

11 Para ver uma relação de estudos que usaram defasagens da variável de resultado no período pré-tratamento, veja Botosaru e Ferman (2019).

única defasagem espacial da variável de resultado ($WPFIM$) substitui aquelas outras defasagens espaciais mencionadas anteriormente.¹²

3.2 Dados

A unidade de observação adotada no estudo foram os estados da federação. Este trabalho empregou o índice mensal de produção física industrial mineira (PFIM) como *proxy* para o desempenho econômico. Os dados foram retirados da Pesquisa Industrial Mensal – Produção Física (PIMPF), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Conforme sugerido pela teoria do crescimento econômico, as variáveis observáveis utilizadas foram capital físico, capital humano, trabalho não qualificado e fundo de participação dos estados (FPE).

Convém descrever a *proxy* para o capital físico. Como é sabido, as agências estatísticas brasileiras não fornecem informações sobre estoque de capital físico em nível estadual no período de análise. Portanto, optou-se por utilizar a frota de veículos automotores produtivos relacionados ao setor mineral, isto é, caminhonetes, caminhões e caminhões-tratores, como uma *proxy* para a variável teórica “capital físico”, similar ao que foi feito em Speight e Thompson (2006), Soares (2015) e Castro (2016). Ainda que não corresponda a investimentos diretos realizados pelos estados, Soares (2015) registrou uma forte associação linear entre o logaritmo do estoque de capital e da frota de veículos no Brasil, entre os anos de 1950 e 2008, atestando a qualidade dessa *proxy*.

Adicionalmente, também foram utilizadas defasagens temporais ($PFIM_{t-1}$, $PFIM_{t-2}$, $PFIM_{t-3}$, e $PFIM_{t-4}$), e a defasagem espacial da variável de resultado ($WPFIM$),¹³ com o intuito de ajudar a minimizar o RMPSE da variável de resultado no período pré-intervenção, além de tentar captar eventualmente interações entre as unidades da federação. Informações complementares sobre as variáveis utilizadas estão disponíveis no Quadro 1.

12 A inclusão da defasagem espacial da variável de resultado ($WPFIM$) pode implicar a presença de simultaneidade espacial. Em vez dessa defasagem espacial, a inclusão das defasagens espaciais das variáveis preditoras quando estas são exógenas exibe uma vantagem, posto que é razoável supor que tais defasagens espaciais sejam, por sua vez, também exógenas.

13 Foi usada uma matriz de ponderação espacial baseada em três vizinhos mais próximos.

Quadro 1 Descrição das variáveis utilizadas

Variável	Símbolo	Tipo de variável	Proxy/Descrição	Fonte
Desempenho econômico	<i>PFIM</i>	Dependente/ interesse	Índice da Produção Física Industrial Mineira de base fixa (média de 2012 = 100) e sem ajuste sazonal	IBGE
Capital físico	<i>CF</i>	Preditora	Quantidade de veículos automotores produtivos relacionados ao setor extrativista mineral: caminhonetes, caminhões e caminhões-tratores	DENATRAN
Capital humano	<i>CH</i>	Preditora	Estoque de trabalhadores do setor extrativista mineral com ensino superior completo	MTE
Repasses	<i>FPE</i>	Preditora	Fundo de Participação dos Estados (R\$)	STN
Trabalho não qualificado	<i>TNQ</i>	Preditora	Estoque de trabalhadores do setor extrativista mineral sem ensino superior completo	MTE
Defasagem temporal	<i>PFIM_{t-n}</i>	Preditora	Defasagens temporais do Índice da Produção Física Industrial Mineira de base fixa (média de 2012 = 100) e sem ajuste sazonal	Elaborada pelos autores com base no IBGE
Defasagem espacial	<i>WPFIM</i>	Preditora	Defasagem espacial do Índice da Produção Física Industrial Mineira de base fixa (média de 2012 = 100) e sem ajuste sazonal	Elaborada pelos autores com base no IBGE

Fonte: Elaboração própria.

O horizonte temporal investigado contemplou o período mensal entre 2017 e 2019, totalizando 36 meses, sendo que, deste total, 24 meses são considerados anteriores ao desastre, compondo o período pré-desastre. De acordo com Abadie *et al.* (2010; 2015), a técnica do controle sintético é otimizada quando o número de observações anterior ao evento analisado é maior relativamente à quantidade de observações posteriores a tal evento.

4 Resultados e discussão

A seção de resultados é subdividida em duas partes. A primeira investiga os impactos do desastre de Brumadinho no desempenho econômico do

setor industrial mineiro, conforme os três *donors pools* definidos anteriormente. Já a segunda parte executa testes de placebo que buscam fazer a inferência estatística dos resultados.

4.1 O Desastre de Brumadinho e o desempenho econômico mineiro

Os pesos computados para a formação dos controles sintéticos estão reportados na Tabela 2.¹⁴ A princípio, foram estimados três modelos para o primeiro *donor pool* (DP1): o modelo sem defasagens; o modelo somente com defasagens temporais; e o modelo com defasagens temporais e espaciais. E dois modelos para o segundo e terceiro *donor pool* (DP2 e DP3, respectivamente): o modelo sem defasagens e o modelo somente com defasagens temporais. A razão para não incluir defasagens espaciais nos *donors pools* DP2 e DP3 é porque a composição desses bancos de doadores de características respeita o tratamento da não interferência entre as unidades, proposto por Abadie *et al.* (2010; 2015), que adotam a exclusão de unidades de controle e não a modelagem explícita das interações espaciais. Além disso, a exclusão de mais unidades federativas reduz o número de vizinhos, fazendo com seja perdida uma parte das interações espaciais a ser capturada pela defasagem espacial *WPFIM*.

Considerando o primeiro *donor pool*, quatro foram os estados que contribuíram com os pesos para o modelo sem defasagens: Bahia (29%), Pernambuco (7%), Rio Grande do Sul (53%) e São Paulo (11%). Por sua vez, no modelo que também contou com defasagens temporais, três foram os estados que formaram a produção física industrial mineira (PFIM) sintética mineira: Amazonas (18%), Espírito Santo (44%) e São Paulo (38%). E, no último controle sintético, que incorporou, além das defasagens temporais, a defasagem espacial da variável de resultado (*WPFIM*), três foram os estados selecionados: Amazonas (17%), Espírito Santo (41%) e São Paulo (42%). Desses três controles sintéticos, o que apresentou o menor RMSPE (2,76) foi este último controle sintético (Tabela 2), indicando que possui o melhor ajuste entre a trajetória real da variável de resultado e a sua trajetória sintética. Convém notar que a inclusão da defasagem espacial da variável de resultado (*WPFIM*) ajudou a reduzir o RMSPE em 5,5% com relação

14 Os pesos das variáveis preditoras para cada controle sintético são apresentados na Tabela A.1 do Anexo.

ao valor deste critério de ajuste para o controle sintético que inclui apenas defasagens temporais (2,92), além das variáveis preditoras sugeridas pela teoria do crescimento econômico.

Tabela 2 Contribuição dos estados para a formação dos pesos, segundo *donor pool*, dos controles sintéticos para a produção física industrial mineira (PFIM) sem e com defasagens

Estados	DP1			DP2		DP3	
	PFIM sem defasagens	PFIM com defasagens temporais	PFIM com defasagens temporais e espacial	PFIM sem defasagens	PFIM com defasagens temporais	PFIM sem defasagens	PFIM com defasagens temporais
Amazonas	-	0,18	0,17	-	0,16	-	0,46
Bahia	0,29	-	-	X	X	X	X
Ceará	-	-	-	-	-	-	-
Espírito Santo	-	0,44	0,41	-	0,33	X	X
Goiás	-	-	-	X	X	X	X
Pará	-	-	-	X	X	-	-
Paraná	-	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	0,07	-	-	0,20	-	0,14	-
Rio Grande do Sul	0,53	-	-	0,72	-	0,86	0,54
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	X	X
Santa Catarina	-	-	-	-	-	-	-
São Paulo	0,11	0,38	0,42	0,08	0,51	X	X
RMSPE	6,79	2,92	2,76	7,74	2,63	8,28	5,51

Fonte: Elaboração própria.

Nota: a tabela mostra os pesos das unidades federativas em cada controle sintético por *donor pool* usado. O *donor pool* DP1 não exclui nenhuma das 12 unidades federativas. O *donor pool* DP2 elimina os estados do Pará, Goiás e Bahia, enquanto o *donor pool* DP3 exclui os estados contíguos a MG, ou seja, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia e Goiás. A sigla RMSPE significa raiz do erro de previsão quadrático médio. O sinal "X" significa que o estado foi excluído de cada *donor pool*, ao passo que o sinal "-" indica que, mesmo estando disponível no *donor pool*, o estado não foi selecionado para compor a média ponderada constituinte do controle sintético.

No segundo *donor pool*, Pernambuco (20%), Rio Grande do Sul (72%) e São Paulo (8%) apresentaram pesos para o controle sintético sem defasagens,

ao passo que Amazonas (16%), Espírito Santo (33%) e São Paulo (51%) são os pesos para o controle sintético com defasagens temporais. Desses dois controles sintéticos, o que ostentou melhor ajuste é o segundo, que apresentou um RMPSE de 2,63.

E, no terceiro *donor pool*, Pernambuco (14%) e Rio Grande do Sul (86%) registaram pesos para o controle sintético sem defasagens, enquanto Amazonas (46%) e Rio Grande do Sul (54%) são os pesos definidos pelo método para o controle sintético com defasagens temporais. Desses dois, o controle sintético com defasagens temporais é o que possui o melhor ajuste, como indicado pelo seu RMSPE (5,51). Mesmo assim, esse valor de RMSPE, com o terceiro *donor pool*, é aproximadamente duas vezes maior do que o controle sintético melhor ajustado com DP2 (RMSPE de 2,63) ou com DP1 (RMSPE de 2,76). Convém destacar que quanto mais distante estiver o critério RMSPE de zero, menor a qualidade de ajuste do controle sintético e mais descolada estará a trajetória sintética da trajetória real da PFIM para Minas Gerais, tornando inadequado o contrafactual.

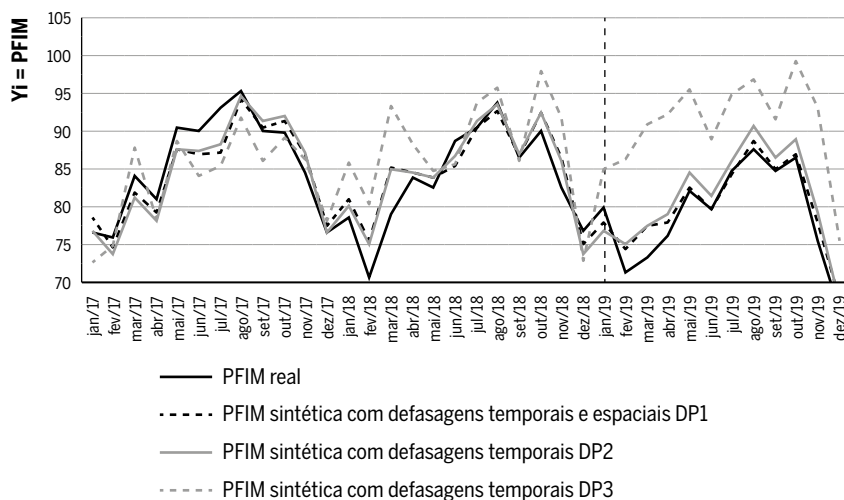
Pela Figura 2, é possível observar a trajetória real da PFIM de Minas Gerais, suas alternativas sintéticas por *donor pool*, com menores RMSPE, bem como os desempenhos pós-desastre. De maneira geral, nota-se que as trajetórias sintéticas da PFIM do DP1 e do DP2 continuaram acompanhando de perto a trajetória real da PFIM, enquanto, para o DP3, há descolamento das trajetórias. Portanto, a conclusão seria que os efeitos do desastre frente ao desempenho setorial foram irrelevantes no curto prazo para os controles sintéticos que adotam os *donor pools* DP1 e o DP2.

De fato, quando computados os valores dos efeitos médios sobre a PFIM, viu-se uma produção média mensal 1,70% (DP1), 3,19% (DP2) e 13,66% (DP3) abaixo dos valores reais. Com base nos controles sintéticos usando os *donor pools* DP1 ou DP2, observa-se *a priori* que o efeito negativo do desastre de Brumadinho foi pequeno no resultado de Minas Gerais. Por outro lado, se a análise fosse feita exclusivamente com base no controle sintético que usou o terceiro *donor pool* (DP3), que tem um ajuste pobre em termos de RMSPE, poder-se-ia concluir erroneamente que o efeito do desastre de Brumadinho seria negativo no desempenho econômico mineiro. Evidentemente, é preciso executar a avaliação da magnitude de todos esses efeitos por meio de testes de placebo, a serem feitos na próxima subseção.

Na literatura, resultados semelhantes, em termos de magnitude (Ribeiro *et al.*, 2014) e significância (Castro; Almeida, 2019), foram encontrados

considerando a investigação de curto prazo. Ribeiro *et al.* (2014) analisaram o impacto de desastres naturais (chuvas) na produção industrial de Santa Catarina em 2008. De acordo com os autores, a produção industrial mensal do estado catarinense foi, em média, 5,13% menor em comparação ao cenário sem a existência das chuvas. Em contrapartida, Castro e Almeida (2019) também registraram que o desempenho econômico do setor industrial de Minas Gerais não foi afetado pela ação do desastre tecnológico de Mariana em 2015.

Figura 2 **Produção física industrial mineira (PFIM) e seus controles sintéticos por donor pool**



Fonte: Elaboração própria.

Nota: a figura mostra as trajetórias da variável de resultado, ou seja, PFIM para MG entre janeiro de 2017 e dezembro de 2019. A linha vertical tracejada mostra o momento em que ocorreu o desastre de Brumadinho (janeiro de 2019). A linha preta cheia representa a trajetória real da PFIM para MG. A linha cinza tracejada mostra a trajetória sintética da PFIM com o donor pool DP1, incluindo tanto defasagens temporais quanto espaciais. A linha cinza mais escura pontilhada exibe a trajetória sintética da PFIM com donor pool DP2, incluindo somente defasagens temporais. A linha cinza mais clara pontilhada denota a trajetória sintética com o donor pool DP3, incluindo apenas as defasagens temporais.

Observa-se melhoria no ajuste da trajetória contrafactual com a inclusão das defasagens temporais e espaciais, reduzindo os valores da RMSPE. Dessa maneira, é possível reforçar que o uso de defasagens espaciais no método do controle sintético melhora a qualidade de previsão da técnica de

controle sintético, mesmo que, neste estudo, 15 unidades federativas não puderam participar, reduzindo, com isso, o número de vizinhos disponíveis e fazendo com a captura das interações espaciais por intermédio da defasagem espacial da variável de resultado ficasse parcialmente comprometida.

4.2 Testes de placebo

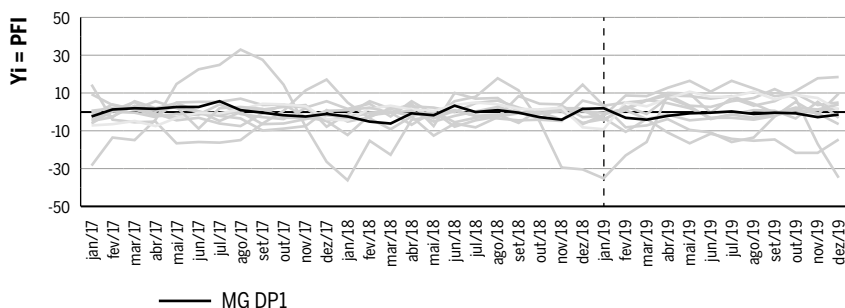
No sentido de avaliar a magnitude dos resultados obtidos, foram aplicados dois testes de placebo. Conforme Abadie *et al.* (2010; 2015), o primeiro teste simula trajetórias sintéticas para os demais estados brasileiros pertencentes ao *donor pool*, simulando a ocorrência do desastre nesses estados. Posteriormente, subtraíram-se os valores obtidos das trajetórias sintéticas de suas trajetórias reais, para reunir os resultados graficamente (Figuras 3 a 5). A ideia desse teste de falsificação consiste em comparar possíveis cenários, simulando o evento ocorrido em Minas Gerais nos demais estados. Uma vez que os resultados da produção física industrial mineira (PFIM) não estejam alocados nos pontos extremos dos gráficos, os efeitos do desastre sobre Minas Gerais não serão significativos (Abadie *et al.*, 2010; 2015).

Observando as Figuras 3, 4 e 5 podem ser vistos dois tipos de comportamentos diferentes. Nas Figuras 3 (DP1) e 4 (DP2) percebe-se que as variáveis de resultado PFIM não se localizaram nas extremidades de suas respectivas figuras. Em outros termos, não há evidência de que tenha havido algum efeito do desastre no desempenho da indústria de mineração do estado de Minas Gerais. De algum modo, esse resultado já era esperado, uma vez que a participação da produção mineral dos 19 municípios atingidos pelo desastre corresponde somente a 4,62% da produção mineral total do estado de Minas Gerais. É possível inferir que o efeito do desastre de Brumadinho no desempenho econômico mais geral de Minas Gerais seja também nulo, dado que a produção mineral desses 19 municípios afetados corresponde a menos do que 0,004% do PIB total do estado.

Contudo, na Figura 5, para o DP3, tem-se o afastamento da PFIM das demais séries (concentrado na parte inferior), o que forneceria evidência do efeito negativo do desastre. Como já salientado, o controle sintético usando o *donor pool* DP3 não é confiável, uma vez que o valor do RMSPE do DP3 foi aproximadamente duas vezes maior do que o valor do RMSPE

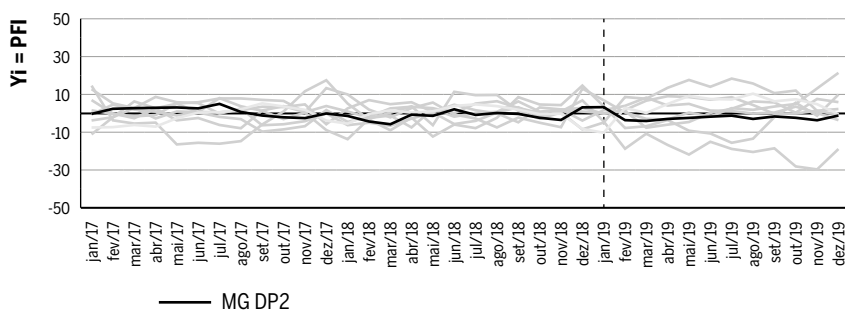
para os controlos sintéticos usando DP1 e DP2. Esse ajuste pobre do controle sintético do DP3 implica uma separação entre a trajetória sintética e a trajetória realmente observada para a variável de resultado no período pré-intervenção, significando, com isso, que tal controle sintético não serve como trajetória contrafactual.¹⁵

Figura 3 Teste de placebo geral para a produção física industrial mineira (PFIM) do DP1, com defasagens temporais e espaciais



Fonte: Elaboração própria.

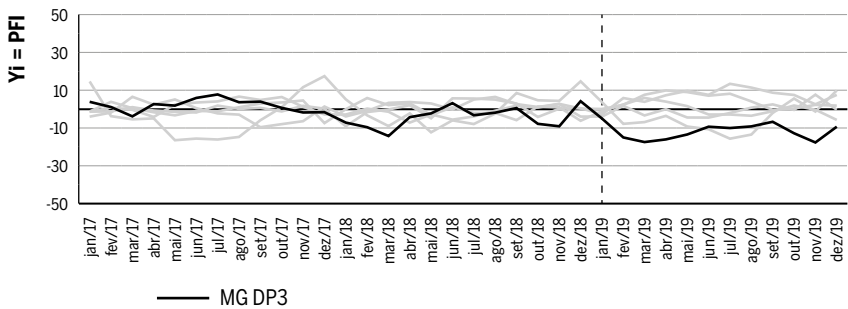
Figura 4 Teste de placebo geral para a produção física industrial mineira (PFIM) do DP2, com defasagens temporais



Fonte: Elaboração própria.

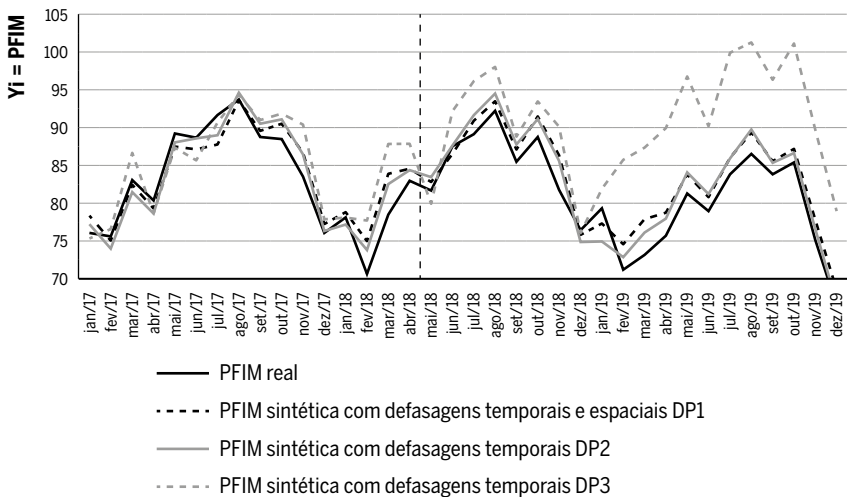
15 Na literatura mais recente, Ben-Michael et. al. (2021) propõem uma extensão do método de controle sintético para a situação em que o ajuste pré-intervenção não é excelente ou para a situação em que esse ajuste não é factível. Na mesma linha, Ferman e Pinto (2021) analisam as propriedades do estimador CS quando o ajuste pré-intervenção é imperfeito. Contudo, a implementação desses novos desenvolvimentos do método está fora do escopo deste artigo.

Figura 5 Teste de placebo geral para a produção física industrial mineira (PFIM) do DP3, com defasagens temporais



Fonte: Elaboração própria.

Figura 6 Teste de placebo temporal para a produção física industrial mineira (PFIM)



Fonte: Elaboração própria.

No que diz respeito ao segundo teste de placebo, de natureza temporal (Figura 6), busca-se comprovar que o efeito estimado do desastre não foi aleatório. Em vista disso, computaram-se novas trajetórias sintéticas para a PFIM, defasando a data do desastre em nove meses, recuando até abril de 2018 como o seu início falso.

Como resposta, observa-se que as novas séries, exibidas na Figura 6, acompanharam o percurso da série da PFIM real semelhante ao padrão apre-

sentado anteriormente na Figura 2. Em outras palavras, a partir desse *gap* temporal há evidências de que os resultados obtidos não foram espúrios.

Em suma, com os testes de placebo, percebe-se a robustez dos resultados alcançados na subseção anterior. De fato, o setor industrial mineiro, de acordo com os controles sintéticos adotando DP1 e DP2, em nível estadual e no curto prazo, não foi afetado de maneira significativa pelo desastre de Brumadinho. Por fim, é preciso destacar a importância da definição do *donor pool* para se fazer a análise adequada do estudo comparativo (Abadie *et al.*, 2010; 2015).

5 Considerações finais

O extrativismo de recursos minerais, ainda hoje, compõe importante parcela do Produto Interno Bruto de muitos países. Entretanto, a forma como é conduzida esta atividade pode gerar externalidades negativas de grande alcance. Situações que resultem em rupturas de barragens de rejeitos, por exemplo, embora ocorram com baixa probabilidade pelo mundo, veem aumentando a sua frequência no Brasil, cabendo um destaque negativo para Minas Gerais.

Por meio da construção de séries sintéticas para a produção física industrial mineira, apoiada pela técnica de controle sintético, este artigo analisou o impacto do colapso da barragem de rejeitos mineiros da Vale S.A., em janeiro de 2019, na cidade de Brumadinho, sobre o desempenho econômico do estado de Minas Gerais.

Após comparações entre a trajetória real de Minas Gerais e controles sintéticos, que simulariam o comportamento do estado caso não houvesse o desastre tecnológico, viu-se que o evento não teve efeito no seu desempenho setorial de curto prazo, em nível estadual, quando se usou o controle sintético com as defasagens temporais e/ou espaciais. Todavia, quando se usou um controle sintético sem defasagens e adotando o *donor pool* definido como DP3, a conclusão era que o desastre de Brumadinho tivera efeito relevante sobre o desempenho econômico de Minas Gerais. A discrepância refere-se ao pobre ajuste obtido com a construção desse último controle sintético, medido pelo elevado valor do RMSPE, o que provoca um descolamento da trajetória sintética do indicador de produção física industrial mineira (PFIM) da sua trajetória real. Isso foi corrigido a partir do

controle sintético com as defasagens temporais e espaciais. Adicionalmente, testes de placebo foram aplicados e confirmaram os resultados obtidos.

O diferencial metodológico nas simulações realizadas aqui foi o de utilizar também defasagens espaciais, ao lado das defasagens temporais. Nesse caso, a inclusão da defasagem espacial da variável de interesse, *WPFIM*, associada às defasagens temporais, melhorou o poder preditivo e contra-factual do controle sintético, reduzindo o valor do RMSPE em quase 60% e, com isso, melhorando consideravelmente o ajuste daquelas trajetórias, aproximando-as.

Em termos de limitações, a abrangência deste trabalho é afetada pela disponibilidade de dados. Visto que o episódio registrado em Brumadinho é relativamente recente, e considerando o intervalo entre coleta, análise e liberação dos dados, pelos órgãos estatísticos responsáveis, chegou-se apenas à desagregação geográfica em nível estadual, com variações mensais. Como agenda futura, pretende-se, com o surgimento de novos dados, explorar as informações em nível municipal para confrontar os resultados obtidos até então. Ademais, possuindo séries temporais mais longas, pretende-se analisar os efeitos do desastre no longo prazo.

Deve-se ressaltar que este trabalho teve como objetivo apenas o desempenho do setor mineral do estado de Minas Gerais, não abrangendo os demais resultados deletérios que envolvem as externalidades negativas do desastre de Brumadinho. Trabalhos futuros poderiam investigar efeitos do desastre no meio ambiente, em indicadores de saúde e de educação, no bem-estar social, no reordenamento geográfico, entre outros temas que possam guiar a formulação de políticas públicas.

Referências

- ABADIE, A.; GARDEAZABAL, J. The economic costs of conflict: A case study of the Basque country. *American Economic Review*, v. 93, n. 1, p. 113-132, 2003.
- ABADIE, A.; DIAMOND, A.; HAINMUELLER, J. Synthetic control methods for comparative case studies: Estimating the effect of California's tobacco control program. *Journal of the American Statistical Association*, v. 105, n. 490, p. 493-505, 2010.
- ABADIE, A.; DIAMOND, A.; HAINMUELLER, J. Comparative politics and the synthetic control method. *American Journal of Political Science*, v. 59, n. 2, p. 495-510, 2015.
- ABADIE, A.; L'HOURL, J. A Penalized synthetic control estimator for disaggregated data. *Journal of the American Statistical Association*, v. 116, n. 536, p. 1.817-1.834, 2021.

- ANM – Agência Nacional de Mineração. *Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas 2019*. Brasília: ANM, 2020.
- ANM – Agência Nacional de Mineração. *Barragens*, 2020. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens>>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- ANM – Agência Nacional de Mineração. *Distribuição CFEM por município*, 2020. Disponível em: <https://sistemas.anm.gov.br/arrecadacao/extra/relatorios/distribuicao_cfem_muni.aspx?ano=2017&uf=MG>. Acesso em: 03 jan. 2023.
- BARRETO, M. L. *Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.
- BEN-MICHAEL, E.; FELLER, A.; ROTHSTEIN, J. The augmented synthetic control method. *Journal of the American Statistical Association*, v. 106, p. 1.789-1.803, 2021.
- BOTOSARU, I.; FERMAN, B. On the role of covariates in the synthetic control method. *Econometrics Journal*, v. 22, p. 117-130, 2019.
- BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. *Resumo do Relatório CPI Bruma, 2019*. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/parlamentar-de-inquerito/56a-legislatura/cpi-rompimento-da-barragem-de-brumadinho/documentos/otros-documentos/resumo-do-relatorio-leitura-em-reuniao>>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC). *Manual de desastres humanos: desastres humanos de natureza tecnológica*. Brasília: MI, 2003.
- BRASIL. Ministério da Economia. *Relação Anual de Informações Sociais (RAIS)*. Brasília, DF, 2018.
- CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. *Microeconomics: Methods and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- CARRILLO, B.; DA MATA, D.; EMANUEL, L.; LOPES, D.; SAMPAIO, B. Avoidable environmental disasters and infant health: Evidence from a mining dam collapse in Brazil. *Health Economics*, v. 29, n. 12, p. 1-9, 2020.
- CASTRO, L. S. *Crescimento econômico e infraestrutura: o impacto do ProAcesso em Minas Gerais*. 2016. 144 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, Viçosa, 2016.
- CASTRO, L. S.; ALMEIDA, E. S. Desastres e desempenho econômico: avaliação do impacto do rompimento da Barragem de Mariana. *Geosul*, v. 34, n. 70, p. 406-429, 2019.
- DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; CARDOSO, D. F.; SIMONATO, T. C.; NAHAS, M. Impactos econômicos da paralisação de parte da produção mineral em Minas Gerais decorrentes do desastre de barragem em Brumadinho. *Revista Eletrônica Gestão e Sociedade*, v. 14, p. 3.463-3.479, 2020.
- DUARTE, A. P. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos da mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.
- FERMAN, B.; PINTO, C. Synthetic controls with imperfect pretreatment fit. *Quantitative Economics*, v. 12, p. 1.197-1.221, 2021.

- FREITAS, C. M.; SILVA, M. A. Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, v. 17, n. 1, p. 21-29, 2019.
- FREITAS, R.; ALEMIDA, F. Um ano após tragédia da Vale, dor e luta por justiça unem famílias de 259 mortos e 11 desaparecidos. *G1*, 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/25/um-ano-apos-tragedia-da-vale-dor-e-luta-por-justica-unem-familias-de-259-mortos-e-11-desaparecidos.ghtml>>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- GIBBONS, S.; OVERMAN, H. G. Mostly pointless econometrics? *Journal of Regional Science*, v. 52, n. 2, p. 172-191, 2012.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Sidra*: sistema IBGE de recuperação automática, 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades*, 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/brumadinho/panorama>>. Acesso em: 19 jun. 2020.
- LUCAS, R. On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, v. 22, n. 1, p. 3-42, 1988.
- MANKIW, N. G.; ROMER, D.; WEIL, D. N. Contribution on the empirics of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, v. 107, n. 2, p. 407-435, 1992.
- MATOS, F.; DIAS, R. Consórcios intermunicipais e a bacia hidrográfica do rio Paraopeba. *Revista Espacios*, v. 32, n. 4, p. 24, 2011.
- ME – Ministério da Economia. *Relatório de Análise de Acidente de Trabalho: Rompimento da Barragem BI da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019*, 2019. Disponível em: <https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_Acident es_Trabalho/Relatorio_Analise_Acidentes_SAMARCO-BRUMADINHO.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- NIQUITO, T. W.; POZZOBON, F.; HALMENSCHLAGER, V.; RIBEIRO, F. G. Human-made disasters and economic impact for a developing economy: Evidence from Brazil. *Natural Hazards*, v. 109, p. 2.313-2.341, 2021.
- RIBEIRO, F. G.; STEIN, G.; CARRARO, A.; RAMOS, P. L. O impacto econômico dos desastres naturais: o caso das chuvas de 2008 em Santa Catarina. *Planejamento e Políticas Públicas*, n. 43, p. 299-322, 2014.
- ROMER, P. M. Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, v. 94, n. 5, p. 1.002-1.037, 1986.
- ROSENBAUM, P. R. Interference between units in randomized experiments. *Journal of the American Statistical Association*, v. 102, n. 477, p. 191-200, 2007.
- SILVA, F. F.; SILVA, J. F.; TUPY, I. S. Reflexões sobre resiliência econômica regional: o cenário pós-desastre de Mariana (MG). *Redes*, v. 24, n. 2, p. 1-27, 2019.
- SIMONATO, T. C. *Projeção dos impactos econômicos regionais do desastre de Mariana-MG*. 2017. 182 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Belo Horizonte, 2017.
- SOARES, T. C. *Uma Proposta de avaliação da eficiência ambiental dos municípios brasileiros*. 2015. 166 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, Viçosa, 2015.

- SOLOW, R. A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, v. 70, n. 1, p. 65-94, 1956.
- SPEIGHT, A.; THOMPSON, P. Is investment time irreversible? some empirical evidence for disaggregated UK manufacturing data. *Applied Economics*, v. 38, n. 19, p. 2.265-2.275, 2006.
- WMTF – World Mine Tailings Failures. *World mine tailings failures-from 1915*, 2019. Disponível em: <<https://worldminetailingsfailures.org/>>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- WOOLDRIDGE, J. *Introductory econometrics: a modern approach*. South-Western Cengage Learning, 5th ed., 2013.

Sobre os autores

Lucas Siqueira de Castro – lucancastro@hotmail.com

Departamento de Economia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1006-2702>.

Eduardo Almeida – eduardo.almeida@ufff.br

Departamento de Economia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0045-1672>.

Agradecimentos

Eduardo Almeida agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) o financiamento recebido para esta pesquisa.

Lucas Siqueira de Castro agradece à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) o financiamento recebido para esta pesquisa.

Contribuições dos autores

Eduardo Almeida: coleta de dados, análise de dados, escrita do texto.

Lucas Siqueira de Castro: coleta de dados, análise de dados, escrita do texto.

Sobre o artigo

Recebido em 26 de junho de 2022. Aprovado em 27 de janeiro de 2023.

APÊNDICE

Tabela A1 Pesos das variáveis preditoras conforme *donor pool*

Variável	DP1			DP2		DP3	
	PFIM sem defasagens	PFIM com defasagens temporais	PFIM com defasagens temporais e espacial	PFIM sem defasagens	PFIM com defasagens temporais	PFIM sem defasagens	PFIM com defasagens temporais
<i>CF</i>	0,3346	0,0003	0,0004	0,1783	0,0003	0,4147	0,0000
<i>CH</i>	0,1381	0,0003	0,0004	0,1560	0,0003	0,0676	0,0001
<i>FPE</i>	0,0542	0,0000	0,0000	0,0220	0,0001	0,3394	0,0001
<i>TNQ</i>	0,4731	0,0012	0,0014	0,6437	0,0006	0,1783	0,0001
<i>PFIM_{t-1}</i>	-	0,1117	0,1246	-	0,2439	-	0,1142
<i>PFIM_{t-2}</i>	-	0,3711	0,3406	-	0,6684	-	0,0000
<i>PFIM_{t-3}</i>	-	0,3988	0,3966	-	0,0350	-	0,6439
<i>PFIM_{t-4}</i>	-	0,1167	0,1360	-	0,0516	-	0,2416
<i>WPFIM</i>	-	-	0,00000734	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria.

Nota: A tabela mostra os pesos das variáveis preditoras de acordo com o *donor pool*. A sigla *CF* é capital físico. *CH* denota capital humano, *FPE* é fundo de participação e *TNQ* representa trabalho não qualificado. *PFIM_{t-n}* denota defasagens temporais do Índice da Produção Física Industrial Mineira, sendo *n* o número de meses defasados. *WPFIM* representa defasagem espacial do Índice da Produção Física Industrial Mineira, usando uma matriz de pesos espaciais de três vizinhos mais próximos. O *donor pool DP1* não exclui nenhuma das 12 unidades federativas. O *donor pool DP2* elimina os estados do Pará, Goiás e Bahia, enquanto o *donor pool DP3* exclui os estados contíguos a MG, ou seja, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia e Goiás.