

Vulnerabilidade das microrregiões do Estado de Minas Gerais ao COVID-19

Relatório 2- 30/03/2020 - 2:00 PM

Observatório COVID19 - Grupo: Redes de Contágio^a & Eduardo X. F. G. Migon^b

^a - *Participantes do COVID-19BR* -(<https://covid19br.github.io/>): Grupo Redes de Contágio: Kate P. Maia¹, Marília Palumbo Gaiarsa², Pamela Santana¹, Danilo G. Muniz¹, Leandro Giacobelli¹, Ana P. de Assis¹, Erika Marques Santana¹, Irina Birskis-Barros³, Lucas P. Medeiros⁴, Flavia M. D. Marquitti⁵, Wesley Dáttilo⁶, Mauricio Cantor⁷, Paula Lemos-Costa⁸, Rafael L. G. Raimundo⁹, Cecília Andreazzi¹⁰, Mathias M. Pires¹¹, Paulo R. Guimarães Jr.¹

^b - Laboratório de Estudos de Defesa, Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (LED/ECEME)

¹ - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo;

² - Department of Entomology, University of California, Riverside, EUA;

³ - School of Natural Sciences, University of California, Merced, EUA;

⁴ - Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, EUA;

⁵ - Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas;

⁶ - Instituto de Ecología AC, México;

⁷ - Departamento de Ecologia e Zoologia, Universidade Federal de Santa Catarina; Max Planck Institute of Animal Behaviour, Alemanha.

⁸ - Department of Ecology & Evolution, University of Chicago, EUA;

⁹ - Departamento de Engenharia e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba;

¹⁰ - Instituto Oswaldo Cruz - RJ;

¹¹ - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas.

Índice

Resultados principais	2
Detalhamento das análises e resultados	2
Figura 1. Rede que descreve o fluxo rodoviário entre as microrregiões de Minas Gerais.	3
Figura 2. A identificação dos módulos rodoviários no mapa de Minas Gerais	4
Figura 3. Descritores quantitativos da rede que descreve o fluxo rodoviário.	5
Figura 4. Vulnerabilidades à propagação da COVID-19 das microrregiões de MG - 30/03.	7
Tabela 1. Vulnerabilidades à propagação da COVID-19 das microrregiões de MG - 30/03.	8
Limitações	11
Agradecimentos	12
Referências	12

1. Resultados principais

Neste primeiro relatório integramos os dados de casos no Estado de Minas Gerais até o dia 30/03, informação sobre o fluxo rodoviário no Estado e teoria de redes para estimar para as diferentes microrregiões as suas vulnerabilidades à e potencial influência na propagação da COVID-19.

Principais resultados até o momento

- I. A rede rodoviária de Minas Gerais é formada por oito módulos rodoviários, isto é, conjuntos regionais de microrregiões que estão mais conectadas entre si pelo fluxo rodoviário do que com outras microrregiões (**Figura 1 e 2**).
- II. A análise de modularidade permitiu evidenciar que, ao contrário do Estado de São Paulo, as microrregiões de Minas Gerais são mais similares quanto a potencial importância para a propagação da COVID-19, com exceção de **Belo Horizonte** que se conecta de forma marcante com múltiplas microrregiões em seus arredores (seu próprio módulo rodoviário) e com outros módulos rodoviários (**Figura 3, Tabela 1**).
- III. As microrregiões mais vulneráveis à epidemia são: **Itabira, Caratinga, Pará de Minas, Guanhães e Conselheiro Lafaiete** (**Figura 3, Tabela 1**).
- IV. As microrregiões com maior potencial de emissão de pacientes infectados: **Belo Horizonte, Divinópolis, Sete Lagoas, Ipatinga e Governador Valadares** (**Figura 3, Tabela 1**).

2. Detalhamento das análises e resultados

Nós integramos dados rodoviários, ciência de redes complexas e noções de modelos epidemiológicos para prever áreas com maior risco à chegada de pessoas com COVID-19 e áreas com maior chance de enviarem pessoas contaminadas a outros locais. A partir dos dados do transporte rodoviário intermunicipal do Estado de Minas Gerais (IBGE, 2016), criamos uma rede (grafo) na qual cada microrregião é representado por um ponto, e as viagens de ônibus ligando diferentes micro-regiões são representados por linhas. As linhas são ponderadas pela quantidade de viagens realizadas entre os municípios e direcionadas, isto é, são considerados separadamente os números de ônibus que chegam à microrregião e os números de ônibus que saem da microrregião. Para este relatório nós incorporamos uma análise de cartografia de redes complexas que detecta módulos nas redes rodoviária (Newman 2006, Brandes *et al.* 2008.). Ressaltamos que esses *módulos rodoviários* não são mesorregiões administrativas, mas sim grupos formados por microrregiões conectadas por intenso fluxo rodoviário (**Figura 1**).

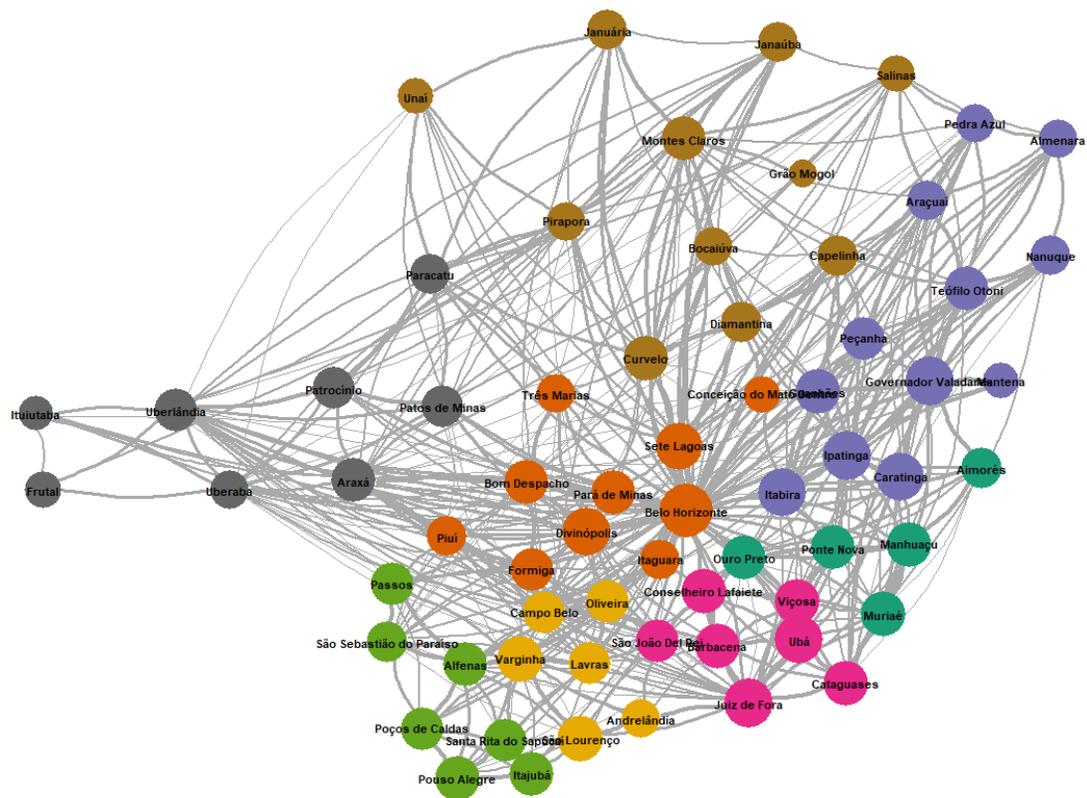


Figura 1. Rede que descreve o fluxo rodoviário entre as microrregiões em Minas Gerais. Microrregiões com as mesmas cores formam módulos rodoviários, isto é, microrregiões altamente conectadas e que podem apresentar de forma conjunta o desenvolvimento da COVID-19.

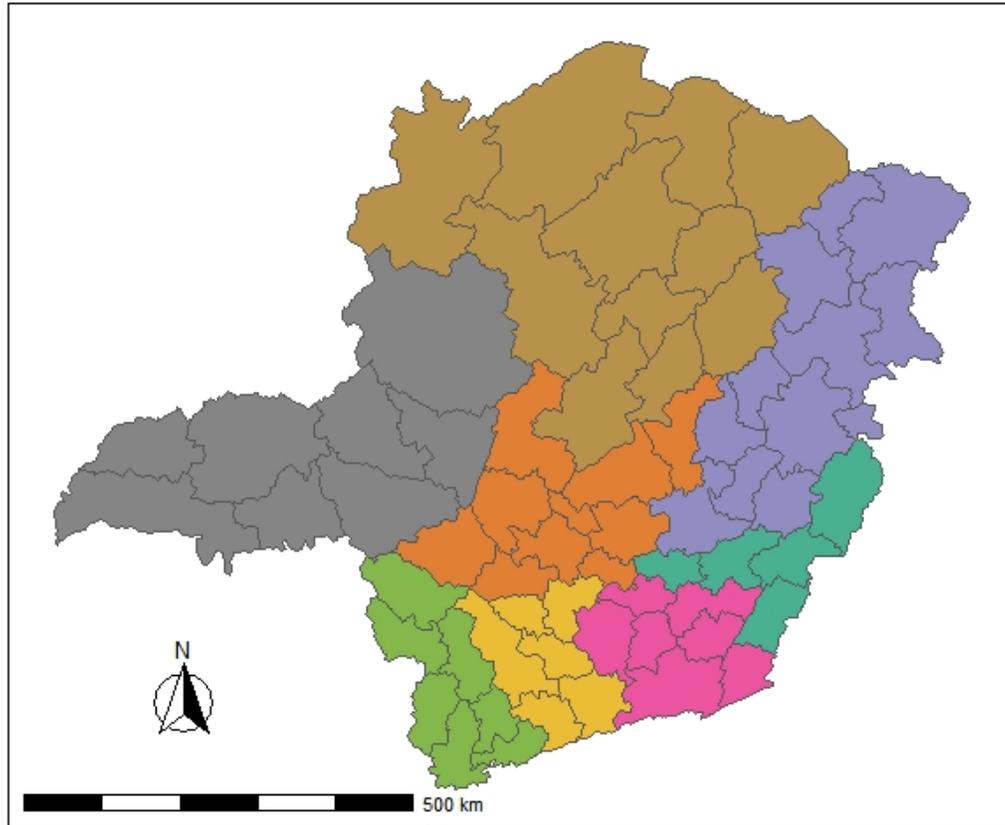


Figura 2. A identificação dos módulos rodoviários no mapa de Minas Gerais.

Nós então computamos descritores que caracterizam a conectividade das microrregiões e que levam em conta os oito módulos rodoviários identificados. Conectividade aqui representa o número total de viagens no qual a microrregião está envolvida. Nós então usamos descritores que capturam o quanto dessa conectividade envolve viagens entre módulos rodoviários. Nós também usamos descritores do papel topológico dentro dos módulos rodoviários (Amaral *et al.* 2000). De forma heurística, podemos identificar dois grupos de microrregiões que talvez mereçam especial atenção (**Figura 3**).

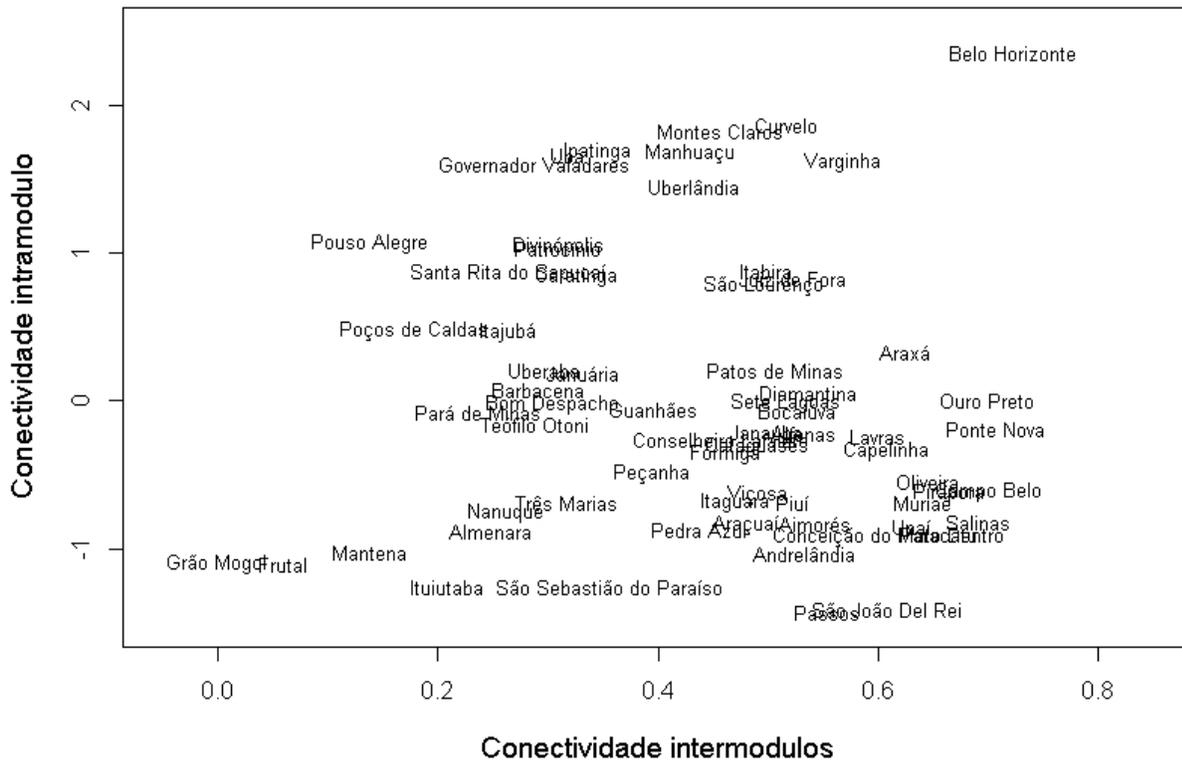


Figura 3. Descritores quantitativos da conectividade entre os módulos (*intermódulo*) e dentro dos módulos (*intramódulo*). Ressaltamos que os módulos rodoviários são grupos formados por microrregiões conectadas por intenso fluxo rodoviário. Valores altos de conectividade intramódulo indicam microrregiões com grande tráfego rodoviário com outras microrregiões próximas. Valores altos de conectividade intermódulos indicam microrregiões com grande tráfego rodoviário entre módulos rodoviários. *Hubs* regionais e conectores são, portanto, as microrregiões que conectam diferentes grupos de microrregiões. As diferentes microrregiões variam marcadamente na sua conectividade intramódulo. Porém, apenas Belo Horizonte apresentou valores altos de conectividade intermódulos.

O primeiro grupo inclui apenas **Belo Horizonte**, a microrregião que conecta grupos de microrregiões (valores altos tanto para conectividade intramódulo quanto para conectividade intermódulos) (**Figura 3**). O segundo grupo é formado por múltiplas microrregiões regionais que potencialmente podem ajudar a espalhar a doença pelo estado. Essas cidades apresentam um alto fluxo rodoviário com microrregiões no mesmo módulo rodoviário (alta conectividade intramódulo, > 0.60). Porém é importante notar que **Belo Horizonte** é muito mais central para a rede rodoviária.

As análises acima representam uma tentativa de descrever a vulnerabilidade estrutural da rede rodoviária mineira a epidemias. Combinamos a rede de transporte

rodoviário mineira com dados atualizados (até dia 30/03/2020) de casos confirmados de COVID-19 nos diferentes municípios mineiros (<https://www.saude.mg.gov.br/component/gmg/story/12382-informe-epidemiologico-coronavirus-30-03-2020>). Nós usamos técnicas associadas à descrição de como efeitos se propagam em redes complexas. Especificamente, para o problema em questão, nós adaptamos uma medida que permite computar rotas diretas e indiretas entre microrregiões (centralidade de Katz, [Katz, 1956]). Para calcular essa medida nós computamos a matriz de efeitos diretos e indiretos (Katz, 1956; Guimarães et al., 2017): $\square = (\square - \square \square)^{-1}$, no qual I é a matriz identidade, r é um fator que pesa o efeito de rotas rodoviárias que envolvam múltiplas microrregiões e Q descreve a matriz de fluxo rodoviário entre microrregiões. Nossa abordagem supõe, como aproximação, que se uma microrregião apresenta casos, ela pode propagar a doença para uma região que dela receba passageiros pelo sistema rodoviário. Para isso, utilizamos dados de circulação de ônibus entre as microrregiões do estado (IBGE, link abaixo) para calcular a matriz de efeitos diretos e indiretos como descrito acima. Porém, nós apenas consideramos as rotas rodoviárias diretas e indiretas que partem de áreas com casos comprovados de COVID-19 (até o dia 30/03/2020). Calculamos então a centralidade Katz de entrada de todas as microrregiões como uma medida de vulnerabilidade daquela região, de forma que quanto maior a centralidade, maior o fluxo de passageiros vindos de microrregiões onde a COVID-19 foi confirmada. Como o fluxo de passageiros pode depender também do tamanho populacional de cada microrregião, ponderamos essa medida pelos seus respectivos tamanhos populacionais (em escala logarítmica). Então, dividimos cada valor pelo valor máximo observado para que a medida ficasse entre zero e um, facilitando sua interpretação. Para obter uma medida da potencial influência de cada microrregião como emissora da COVID-19, anotamos as microrregiões mais vulneráveis e que já possuem casos confirmados. Quando maior esse valor, maior o fluxo de passageiros que saem da região onde a COVID-19 foi observada para outras microrregiões por meio de rotas diretas e indiretas. Nessa análise, microrregiões onde a COVID-19 não foi observada têm potencial de emissão zero na propagação da COVID-19. Novamente, dividimos os valores pelo máximo observado para que a medida ficasse entre zero e um.

Abaixo apresentamos um mapa com as microrregiões divididas nos três grupos de risco. Representações espaciais dos índices de vulnerabilidade podem ser obtidas na **Figuras 3**. Ressaltamos que esses grupos estão definidos de forma heurística e tem com objetivo facilitar a tomada de decisões. As cinco regiões mais vulneráveis (ainda sem casos detectados) são **Itabira, Caratinga, Pará de Minas, Guanhães e Conselheiro Lafaiete (Figura 4, Tabela 1)**. Entre as regiões que podem ser importantes emissoras de pessoas infectadas, além de **Belo Horizonte**, merecem especial atenção **Divinópolis, Sete Lagoas, Ipatinga e Governador Valadares (Figura 4)**.

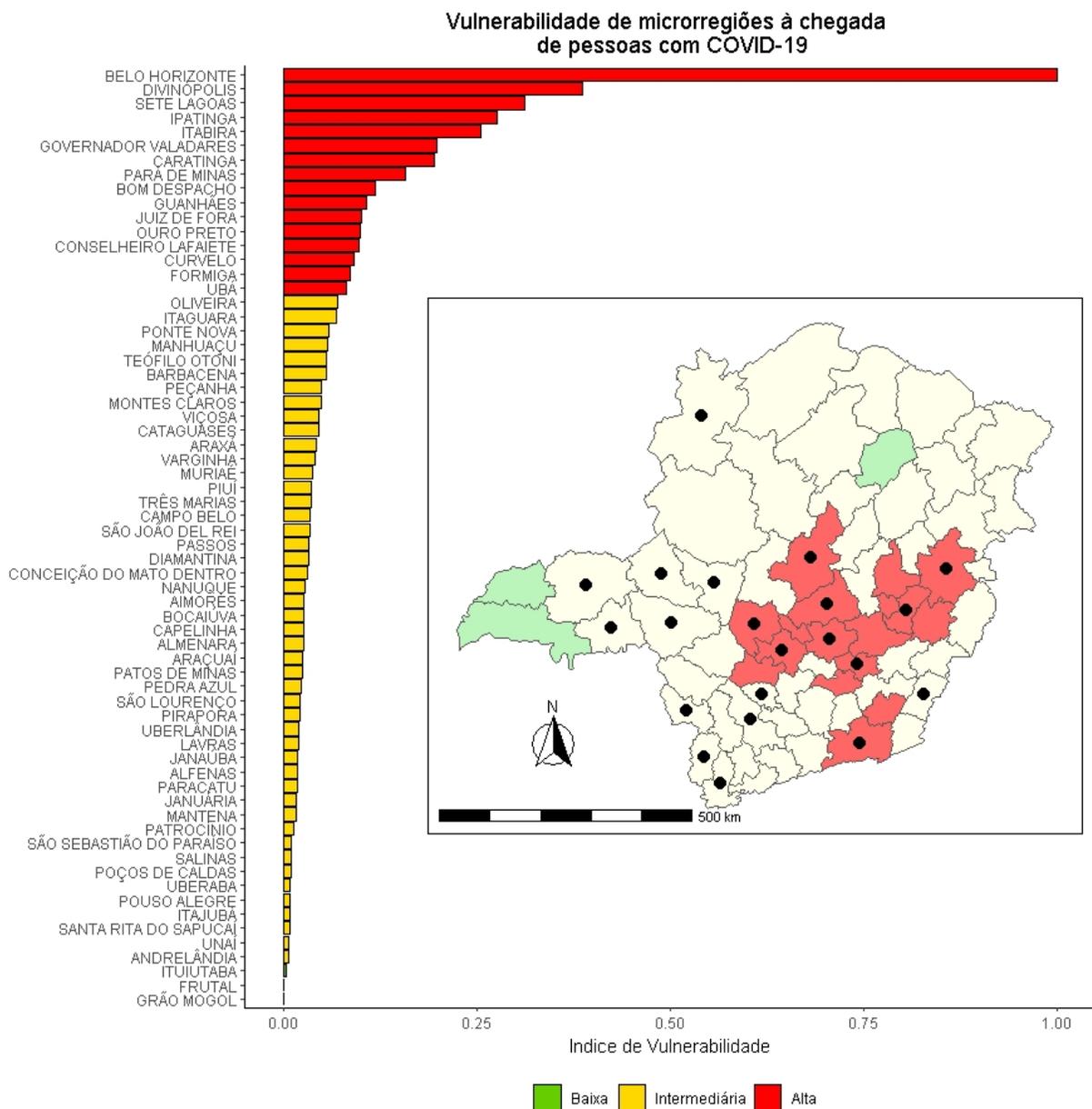


Figura 4. Mapa com as microrregiões de Minas Gerais. As cores indicam a vulnerabilidade da microrregião à chegada de pessoas com COVID-19 em 30/03/2020.

Tabela 1. Índice de vulnerabilidade à propagação da COVID-19 das microrregiões do Estado de Minas Gerais. Quanto maior o valor, maior o potencial daquela microrregião de receber pessoas com COVID-19 em 30/03/2020. Para regiões já infectadas, quanto maior o índice, maior também o potencial daquela microrregião em servir como ponto de propagação (emissão) de infectados para outras microrregiões.

Microrregião	Índice de vulnerabilidade	Categoria
Belo Horizonte	1	alto
Divinópolis	0.3864	alto
Sete Lagoas	0.3121	alto
Ipatinga	0.2759	alto
Itabira	0.254	alto
Governador Valadares	0.1985	alto
Caratinga	0.1947	alto
Pará de Minas	0.1576	alto
Bom Despacho	0.1185	alto
Guanhães	0.1066	alto
Juiz de Fora	0.1004	alto
Ouro Preto	0.0991	alto
Conselheiro Lafaiete	0.0968	alto
Curvelo	0.0914	alto
Formiga	0.086	alto
Ubá	0.0811	alto
Oliveira	0.0691	intermediário
Itaguara	0.0682	intermediário
Ponte Nova	0.0584	intermediário

Manhuaçu	0.0565	intermediário
Teófilo Otoni	0.0543	intermediário
Barbacena	0.0543	intermediário
Peçanha	0.0491	intermediário
Montes Claros	0.0482	intermediário
Viçosa	0.0461	intermediário
Cataguases	0.0456	intermediário
Araxá	0.0413	intermediário
Varginha	0.0405	intermediário
Muriaé	0.037	intermediário
Piuí	0.0359	intermediário
Três Marias	0.035	intermediário
Campo Belo	0.0345	intermediário
São João Del Rei	0.034	intermediário
Passos	0.0321	intermediário
Diamantina	0.0319	intermediário
Conceição do Mato Dentro	0.0303	intermediário
Nanuque	0.0282	intermediário
Aimorés	0.0266	intermediário
Bocaiúva	0.0262	intermediário
Capelinha	0.0256	intermediário
Almenara	0.0251	intermediário
Araçuaí	0.0246	intermediário

Patos de Minas	0.0241	intermediário
Pedra Azul	0.0228	intermediário
São Lourenço	0.0215	intermediário
Pirapora	0.0214	intermediário
Uberlândia	0.02	intermediário
Lavras	0.0192	intermediário
Janaúba	0.0184	intermediário
Alfenas	0.0178	intermediário
Paracatu	0.0175	intermediário
Januária	0.0164	intermediário
Mantena	0.0159	intermediário
Patrocínio	0.0126	intermediário
São Sebastião do Paraíso	0.01	intermediário
Salinas	0.0094	intermediário
Poços de Caldas	0.0093	intermediário
Uberaba	0.0079	intermediário
Itajubá	0.0078	intermediário
Pouso Alegre	0.0078	intermediário
Santa Rita do Sapucaí	0.0077	intermediário
Unai	0.0064	intermediário
Andrelândia	0.0056	intermediário
Ituiutaba	0.0027	baixo
Frutal	0	baixo

3. Limitações

Ressaltamos aqui uma série de limitações em nossas análises. Para sanar algumas delas, estamos trabalhando continuamente com colaboradores. Em outros casos, ressaltamos a importância de dados que no momento não estão disponíveis para que possamos melhorar nossas inferências e, assim, ajudar de forma mais eficiente na tomada de decisões. Por fim, há limitações que são intrínsecas de qualquer análise e que aqui evidenciamos.

Dados sobre a doença: **Uma grande limitação que atualmente enfrentamos é a ausência de dados disponibilizados rapidamente, por município, da doença.** Nossa ideia é usar de ferramentas de *machine learning* para, diariamente, verificar e refinar as previsões em tempo hábil de prover informações técnicas. Porém, sem os dados sobre os pacientes por município, tal abordagem é inviável. Ainda, há outras fontes de erro nos dados associadas a subnotificações, atraso no aparecimento dos sintomas e ausência de testes diagnósticos de um grande número de pessoas.

Dinâmica entre e dentro de microrregiões: epidemias possuem duas dinâmicas de propagação bem distintas apesar de relacionadas, que são a propagação dentro de uma localidade e a propagação entre localidades. Nossa análise se refere apenas à propagação da COVID-19 entre localidades (neste caso, microrregiões de Minas Gerais) e não dentro de uma localidade (neste casos, dentro de cada cidade). Dentro de uma cidade a rede de contatos entre pessoas é determinante para a propagação da doença. Entre regiões, a propagação da doença depende da rede de contatos e também da rede de conexões ligando diferentes microrregiões. Nesse sentido, nossa análise apenas avalia o componente rodoviário do problema. Por isso nossa análise pode apenas ser usada para ajudar a identificar locais que poderão ser mais rapidamente atingidos pela epidemia, mas não permite identificar o quão grande será o número de infectados em cada microrregião. Estamos tentando obter estimativas e incorporando a distância efetiva entre microrregiões, usando como base um modelo epidemiológico desenvolvido pelo Núcleo de Métodos Analíticos para Vigilância em Saúde Pública do PROCC/Fiocruz e EMap/FGV e colaboradores. Com esses novos dados, poderemos incorporar o efeito da dinâmica dentro das microrregiões nas previsões entre microrregiões. Neste sentido, é importante notar que modelos epidemiológicos sugerem que o crescimento de uma epidemia dentro de uma microrregião têm um efeito marcante sobre a propagação da doença entre microrregiões (veja por exemplo o relatório da FIOCRUZ sobre o COVID-19).

Dados do fluxo rodoviário: Nós usamos os dados do transporte rodoviário intermunicipal em Minas Gerais obtidos pelo IBGE (IBGE, 2016 -

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/redes-e-fluxos-geograficos/15794-rodoviaras-e-hidroviarias.html?=&t=o-que-e>). Esses dados são fruto de uma pesquisa feita com o uso de questionários deixados nos guichês dos terminais rodoviários e em pontos lado de fora dos terminais. Desta forma, representa uma amostragem do fluxo rodoviário e nossos resultados podem ser dependentes e influenciados pelos problemas associados à qualquer amostragem. Devido à esta forma de amostragem, sabemos que algumas rotas estão sub-amostradas. Estamos tentando outras formas de estimar o fluxo entre locais, como por exemplo usando um modelo gravitacional ponderado pelos tamanhos populacionais de cada microrregião. **Porém qualquer outra estimativa de fluxo rodoviário (ônibus, carros, veículos por pedágios, por exemplo) poderia nos ajudar a validar a robustez de nossas previsões.** Ainda, é importante notar que não estamos considerando o fluxo de pessoas de outros estados e países, o que provavelmente subestima o papel das microrregiões relacionadas às fronteiras do Estado.

Apesar de todas as fontes de erro listadas acima, ao usar uma abordagem similar para prever a propagação da COVID-19 entre estados por meio da rede aérea, a nossa abordagem explicou > 56% da variação das datas do primeiro registro de COVID-19 por entre os estados brasileiros (por favor, veja em <https://guimaraeslabbr.weebly.com/voos.html>).

4. Agradecimentos

Nossos especiais agradecimentos ao Coronel Eduardo Migon (Exército Brasileiro), a Ana Paula Assis (IB - USP), Marcelo Gomes (Fiocruz) e a Roberto Kraenkel (IFT-UNESP). À FAPESP, CAPES e CNPq por financiarem nossos grupos de pesquisa.

5. Referências

Amaral, L. A. N., Scala, A., Barthelemy, M., & Stanley, H. E. (2000). Classes of small-world networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 97(21), 11149-11152.

Brandes, U.; Dellinger, D.; Gaertler, M.; Gorke, R.; Hofer, M.; Nikoloski, Z.; Wagner, D. (2008). On Modularity Clustering. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 20 (2): 172–188.

Guimarães *et al.* (2017). Indirect effects drive coevolution in mutualistic networks. *Nature*, 550: 511-514.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010: Resultados gerais da amostra [Internet]. (2010). Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_gerais_a_mostra/resultados_gerais_amostra_tab_uf_microdados.shtm

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ligações Rodoviárias e Hidrovias. (2016). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/redes-e-fluxos-geograficos/15794-rodoviaras-e-hidroviarias.html?=&t=o-que-e>

Katz, L. (1953). A new status index derived from sociometric analysis. *Psychometrika*, 18(1), 39-43.

Newman, M. E. J. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 103 (23): 8577–8696.