

Vulnerabilidade das microrregiões da Região Sul do Brasil à pandemia do novo coronavírus (SARS-CoV-2)

Vulnerability of the micro-regions of the South of Brazil to the new coronavirus (SARS-CoV-2) pandemic

Carine Emer^{1*}
Kate P. Maia²
Pamela Santana²
Erika M. Santana²
Danilo G. Muniz²
Leandro Giacobelli²
Ana P. A. Assis²
Gustavo Burin²
Mauricio Cantor³
Paula Lemos-Costa⁴
Viviana M. Velásquez⁵
Irina Birsakis-Barros⁶
Marília P. Gaiarsa^{6,7}
Lucas P. Medeiros⁸
Flavia M. D. Marquitti⁹
Marina C. Côrtes¹⁰
Wesley Dáttilo¹¹
Cecilia S. Andreazzi¹²
Mathias M. Pires¹³
Diogo Melo¹⁴
Eduardo X. F. G. Migon^{15*}
Rafael L. G. Raimundo¹⁶
Paulo R. Guimarães Jr^{2*}

¹ Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Aves Silvestres, Cabedelo – PB;

² Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo;

³ Departamento de Ecologia e Zoologia, Universidade Federal de Santa Catarina;
Department for the Ecology of Animal Societies, Max Planck Institute of Animal Behaviour,
Alemanha;

⁴ Department of Ecology & Evolution, University of Chicago, EUA;

⁵ Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba;

⁶ School of Natural Sciences, University of California, Merced, EUA;

⁷ Department of Entomology, University of California, Riverside, EUA;

⁸ Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, EUA;

⁹ Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas;

¹⁰ Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro;

¹¹ Instituto de Ecología AC, México;

¹² Instituto Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro;

¹³ Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas;

¹⁴ Departamento de Genética e Biologia Evolutiva, Instituto de Biociências, USP

¹⁵ Laboratório de Estudos de Defesa, Escola de Comando e Estado-Maior do Exército;

¹⁶ Departamento de Engenharia e Meio Ambiente, Centro de Ciências Aplicadas e Educação
(CCAEE), UFPB.

*Autores para correspondência:

Carine Emer: c.emer09@gmail.com

Eduardo Migon: eduardomigon@gmail.com

Paulo Guimarães Jr: prguima@usp.br

Sumário de resultados e recomendações

Este é o primeiro relatório do *Observatório COVID19¹ - Grupo: Redes de Contágio – Laboratório de Estudos de Defesa* para a região Sul do Brasil. Combinamos dados de casos confirmados do novo coronavírus (SARS-CoV-2) para o Sul, disponíveis até o dia 17/04/2020, com análises estruturais da rede de rotas rodoviárias intra e interestaduais para estimarmos a vulnerabilidade e potencial influência das microrregiões sulinas na propagação da doença.

This is the first report of the '*Observatório COVID19¹ - Grupo: Redes de Contágio – Laboratório de Estudos de Defesa*' for the South region of Brazil. We have combined data of confirmed cases of the new coronavirus (SARS-CoV-2) for the South available up to 17/04/2020, with structural analyses of road networks, from within and between states, to estimate the vulnerability and potential influence of the South micro-regions to propagate the disease.

1.1. Principais resultados até o momento

I. A rede de fluxo rodoviário da região Sul tem seis módulos que indicam conjuntos de microrregiões mais conectadas entre si do que com outras microrregiões sulinas (Figura 1 e 2): Módulo S1- composto por microrregiões dos Estados de Santa Catarina e Paraná; Módulo S2 - composto por microrregiões do Paraná e Santa Catarina e uma microrregião do Rio Grande do Sul; Módulo S3 e S4 - estão contidos no Rio Grande do Sul; Módulos S5 e S6 - estão contidos no Paraná. Logo, um aspecto fundamental do fluxo rodoviário no Sul é que ele não se mapeia nas divisões dos estados, o que sugere que medidas para conter a pandemia poderão ser mais eficientes se supra-estaduais.

II. Seis microrregiões têm possivelmente forte influência sobre a dinâmica da epidemia na região Sul: Erechim, Ponta Grossa, São Miguel do Oeste, Curitiba, Chapecó e Frederico Westphalen. Outras regiões têm uma influência regional marcada: Cruz Alta, Francisco Beltrão, Wenceslau Braz, Rio do Sul, Caxias do Sul e Campo Mourão. Um grande número de microrregiões têm papel estrutural de conectores intermodulares da rede, ligando grupos de microrregiões (Figura 3).

¹ <https://covid19br.github.io/>

III. O Estado do Rio Grande do Sul apresenta o maior número de microrregiões classificadas como de ‘alta vulnerabilidade’ à chegada da pandemia: 21, ou seja 60% das microrregiões do Estado (Figura 4). Destas, apenas quatro ainda não apresentam casos confirmados de coronavírus: Frederico Westphalen, Soledade, Santo Ângelo e Três Passos (Tabela 1).

IV. O Rio Grande do Sul também apresenta as 10 microrregiões com maior alto potencial de emissão de pacientes infectados entre os Estados da região Sul, ou seja, microrregiões com alta vulnerabilidade e com casos infectados já registrados (Figura 4, Tabela 1).

V. O Estado de Santa Catarina apresenta 25% (5) das suas microrregiões altamente vulneráveis à pandemia, enquanto que o Estado do Paraná têm 15% (6) das suas microrregiões nesta categoria (Figura 5, Tabela 1). Em ambos casos, quatro das cinco microrregiões com alto potencial de emissão de pacientes infectados estão no interior dos Estados.

VI. Ressalta-se que a nossa análise é regional e ignora os efeitos de fronteiras nacionais e do Paraná com o Estado de São Paulo, atual epicentro da pandemia no Brasil.

1.2. Recomendações

I. Sugere-se ao Governo do Estado do Rio Grande do Sul planejamento para uma potencial situação epidemiológica emergencial em escala estadual. Essa previsão está baseada na análise estrutural da rede de fluxos rodoviários, que indica a concentração de várias microrregiões com (i) alta centralidade topológica, (ii) contíguas e (iii) com alta vulnerabilidade à propagação da pandemia ou (iv) alta probabilidade de tornarem-se núcleos propagadores dentro da dinâmica epidemiológica em escala geográfica. Tais microrregiões se distribuem nas mesorregiões metropolitana de Porto Alegre, Nordeste Rio-grandense, Centro-Oriental Rio-grandense e Noroeste Rio-grandense.

II. Sugere-se aos governos dos três estados sulinos que atuem de forma conjunta para diminuir o fluxo de pessoas entre as microrregiões importantes para disseminação da pandemia entre as grandes áreas da região Sul: Erechim (RS), Ponta Grossa (PR), São Miguel do Oeste (SC), Curitiba (PR), Chapecó (SC) e Frederico Westphalen (RS) (Figura 1, 3). Ressaltamos especial atenção às microrregiões com nenhum (Frederico Westphalen) ou poucos casos (Erechim, São Miguel do Oeste) em 17/04/2020. Deve-se evitar ao máximo a chegada do SARS-CoV-2 nessas microrregiões pois essas possuem grande potencial de disseminação para regiões vizinhas devido ao tráfego rodoviário intenso. Da mesma forma, sugere-se aos respectivos governos e prefeituras municipais que reforcem as

medidas de isolamento social principalmente nas microrregiões com maior potencial de disseminação da pandemia: Cruz Alta e Caxias do Sul (RS, 1 e 64 casos respectivamente), Rio do Sul (SC, 4 casos), e Francisco Beltrão, Wenceslau Braz e Campo Mourão (PR, 3, 3 e 34 casos, respectivamente). Campanhas de conscientização da população sobre medidas de isolamento social podem contribuir para evitar ou postergar ao máximo o estágio de transmissão comunitária e o crescimento exponencial do número de casos nas microrregiões identificadas como potencial núcleo propagador da epidemia em escala geográfica.

III. Recomenda-se a estrita observação das recomendações das autoridades sanitárias e o reforço das medidas de isolamento social em todas as microrregiões. Esta recomendação aplica-se inclusive às microrregiões ainda não afetadas ou classificadas como de vulnerabilidade intermediária ou baixa, independentemente das análises aqui apresentadas. Vale ressaltar que o escopo do presente relatório refere-se à vulnerabilidade e influência das microrregiões nas redes de propagação da epidemia em escala geográfica e não implicam portanto, em qualquer tipo de avaliação, inferência ou recomendação sobre as situações locais da severidade da epidemia de SARS-CoV-2.

Tabela 1. Sumário das microrregiões sulinas com altos índices de vulnerabilidade à chegada de pessoas infectadas com SARS-CoV-2, com base em suas centralidades nas redes de fluxos rodoviários da região Sul. Microrregiões sem casos confirmados em 17/04/2020 estão classificadas como *altamente vulneráveis*. Microrregiões com casos confirmados nessa data estão classificadas como *núcleo propagadores de alta centralidade*, referente à potencial influência sobre a dinâmica geográfica da epidemia em função de sua centralidade topológica na rede de fluxos rodoviários. As microrregiões estão agrupadas conforme seus respectivos estados e mesorregiões.

Estado do Rio Grande do Sul

Mesorregião Metropolitana de Porto Alegre

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Porto Alegre	484	Núcleo propagador de alta centralidade
Osório	24	Núcleo propagador de alta centralidade
Montenegro	9	Núcleo propagador de alta centralidade
Gramado-Canela	8	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Nordeste Rio-grandense

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Caxias do Sul	64	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Centro-Oriental Rio-grandense

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Lajeado-Estrela	37	Núcleo propagador de alta centralidade
Santa Cruz do Sul	3	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Noroeste Rio-grandense

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Carazinho	2	Núcleo propagador de alta centralidade
Guaporé	11	Núcleo propagador de alta centralidade
Passo Fundo	46	Núcleo propagador de alta centralidade
Frederico Westphalen	0	Microrregião altamente vulnerável

Estado de Santa Catarina
Mesorregião Oeste Catarinense

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Chapecó	10	Núcleo propagador de alta centralidade
São Miguel do Oeste	1	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Vale do Itajaí

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Itajaí	178	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Norte Catarinense

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Joinville	87	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Grande Florianópolis

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Florianópolis	254	Núcleo propagador de alta centralidade

Estado do Paraná
Mesorregião Oeste Paranaense

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Foz do Iguaçu	40	Núcleo propagador de alta centralidade
Cascavel	75	Núcleo propagador de alta centralidade
Toledo	15	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Metropolitana de Curitiba

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Curitiba	406	Núcleo propagador de alta centralidade

Mesorregião Sudoeste Paranaense

Microrregião	Casos confirmados	Classificação
Francisco Beltrão	3	Núcleo propagador de alta centralidade
Capanema	0	Microrregião altamente vulnerável

2. Detalhamento das análises e resultados

2.1. Estrutura da rede rodoviária e papéis topológicos das microrregiões.

Integramos dados sobre rotas rodoviárias, análises estruturais de redes e princípios de epidemiologia para prever áreas com maior probabilidade de chegada de pessoas com SARS-CoV-2 e áreas com maior chance de enviar pessoas infectadas a outros locais. Usamos dados do fluxo de transporte rodoviário intermunicipal nos estados da região Sul (IBGE, 2016) para criar uma rede na qual cada microrregião é representada por um ponto, e trajetos de ônibus ligando diferentes microrregiões são representados por linhas. Realizamos então uma análise de cartografia de redes que detecta módulos (Newman 2006, Brandes *et al.* 2008). Módulos rodoviários são grupos de microrregiões mais conectadas entre si por fluxos rodoviários do que com o restante das microrregiões da rede (**Figura 1**).

Foram detectados seis módulos: S1 e S2, inteiramente compostos por microrregiões paranaenses; S3, que apesar de composto por microrregiões dos três estados, tem sua maior extensão em território paranaense; S4, formado por microrregiões do Paraná e majoritariamente de Santa Catarina; e S5 e S6, inteiramente contidos no Rio Grande do Sul (**Figuras 1 e 2**).

Computamos descritores dos papéis topológicos das microrregiões, com a ponderação de sua conectividade (influência) considerada em dois níveis: dentro de seus módulos (z), e com microrregiões de outros módulos (c) (Amaral *et al.* 2000). De forma heurística, identificamos dois grupos de microrregiões com potencial relevância central na dinâmica epidemiológica em escala geográfica (**Figura 3**).

O primeiro grupo de microrregiões com elevado potencial de influência na dinâmica epidemiológica é formado por áreas com menor conectividade global (baixo valor de c), mas localmente bastante conectadas (alto valor de z) e que podem catalisar a propagação da epidemia entre cidades, incluindo **Cruz Alta (RS)**, **Francisco Beltrão (PR)**, **Wenceslau Braz (PR)**, **Rio do Sul (SC)**, **Caxias do Sul**

(RS) e Campo Mourão (PR) (Figura 3). O segundo grupo é composto por microrregiões que atuam como conectores intermodulares da rede (alto valor de c) e que podem potencializar a disseminação da SARS-CoV-2 entre módulos, ou seja entre áreas maiores. Essas microrregiões são **Erechim (RS)**, **Ponta Grossa (PR)**, **São Miguel do Oeste (SC)**, **Curitiba (PR)**, **Chapecó (SC)** e **Frederico Westphalen (RS)**. Outras microrregiões, apesar de comparativamente menos importantes, apresentam alta conectividade dentro do seu módulo: **Toledo e Passo Fundo**.

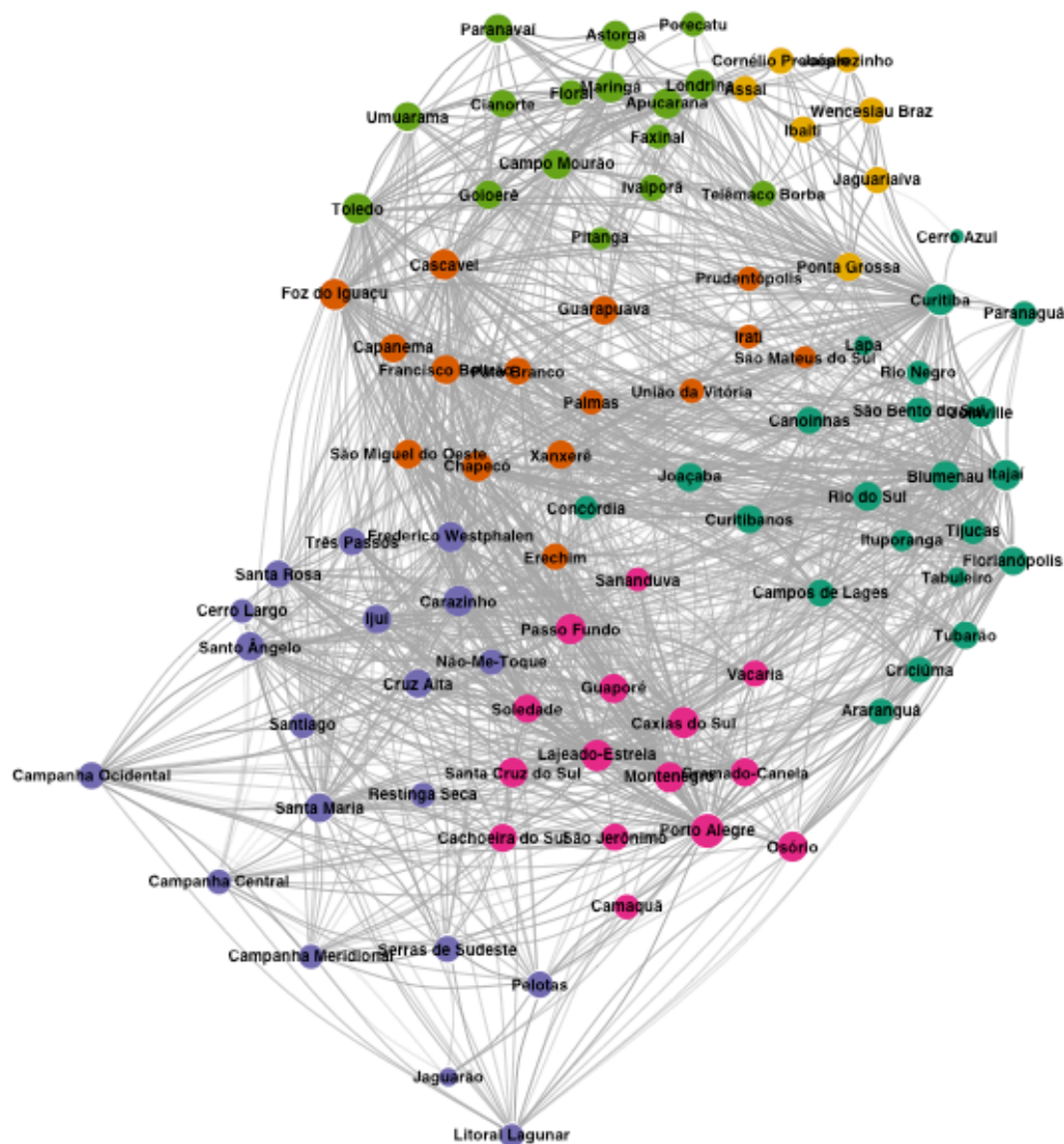


Figura 1. Rede espacial descrevendo o fluxo rodoviário entre as microrregiões da região Sul do Brasil. Microrregiões com as mesmas cores pertencem ao mesmo módulo rodoviário, isto é, são altamente interconectadas por fluxos rodoviários e, portanto, podem apresentar dinâmica epidemiológica relativamente sincronizada. Os pontos da rede (círculos) estão dispostos de acordo com a posição geográfica de cada microrregião.

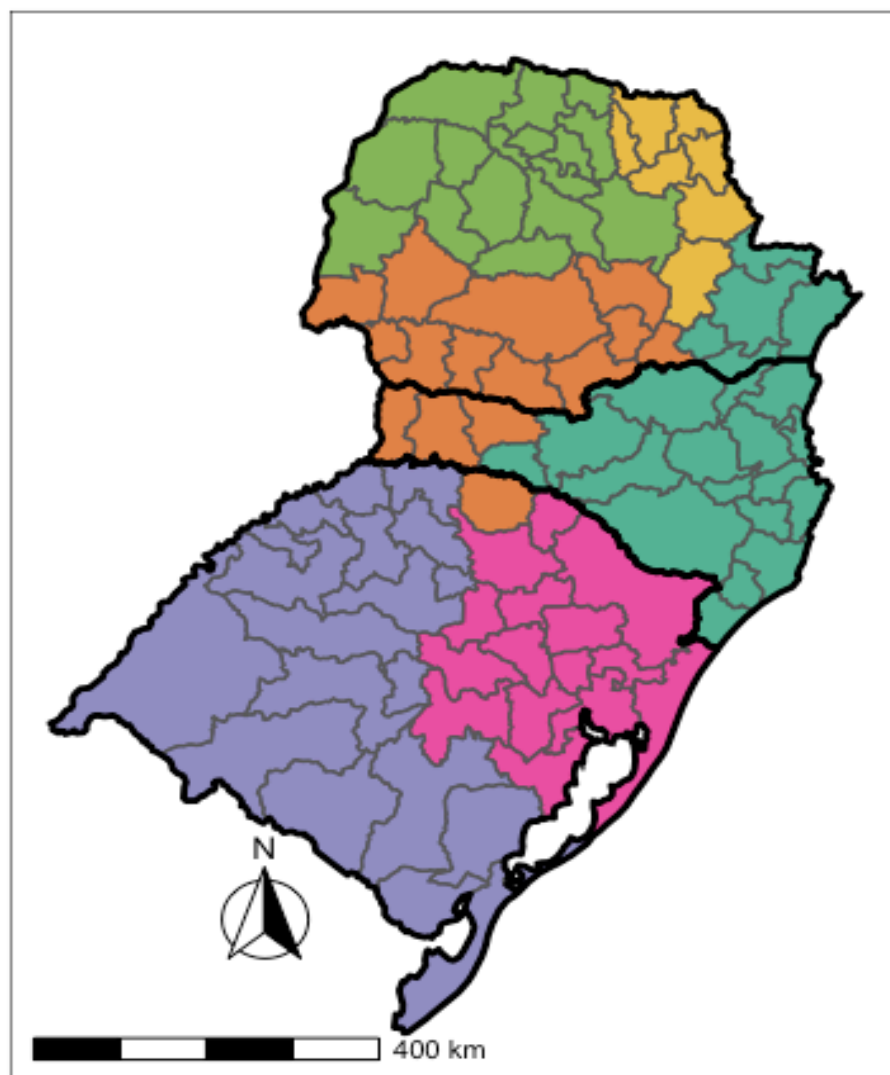


Figura 2. Projeção geográfica dos seis módulos rodoviários (S1-S6) segundo rede de fluxos rodoviários, indicados por diferentes cores, sobre o mapa da região Sul do Brasil. S1 e S2 (amarelo e verde claro, respectivamente), inteiramente contidos no Paraná. S3 (em laranja), formado por microrregiões do Paraná, 3 microrregiões de Santa Catarina e uma do Rio Grande do Sul. S4 (verde escuro), formado por microrregiões do Paraná e Santa Catarina. S5 e S6 (pink e lilás), inteiramente contidos no Rio Grande do Sul. As linhas pretas mais grossas indicam limites estaduais e as linhas pretas mais finas indicam os limites de cada microrregião. Note que os módulos não representam regiões político-administrativas e sim conjuntos de microrregiões mais conectadas entre elas por fluxos rodoviários do que com o restante das microrregiões sulinas.

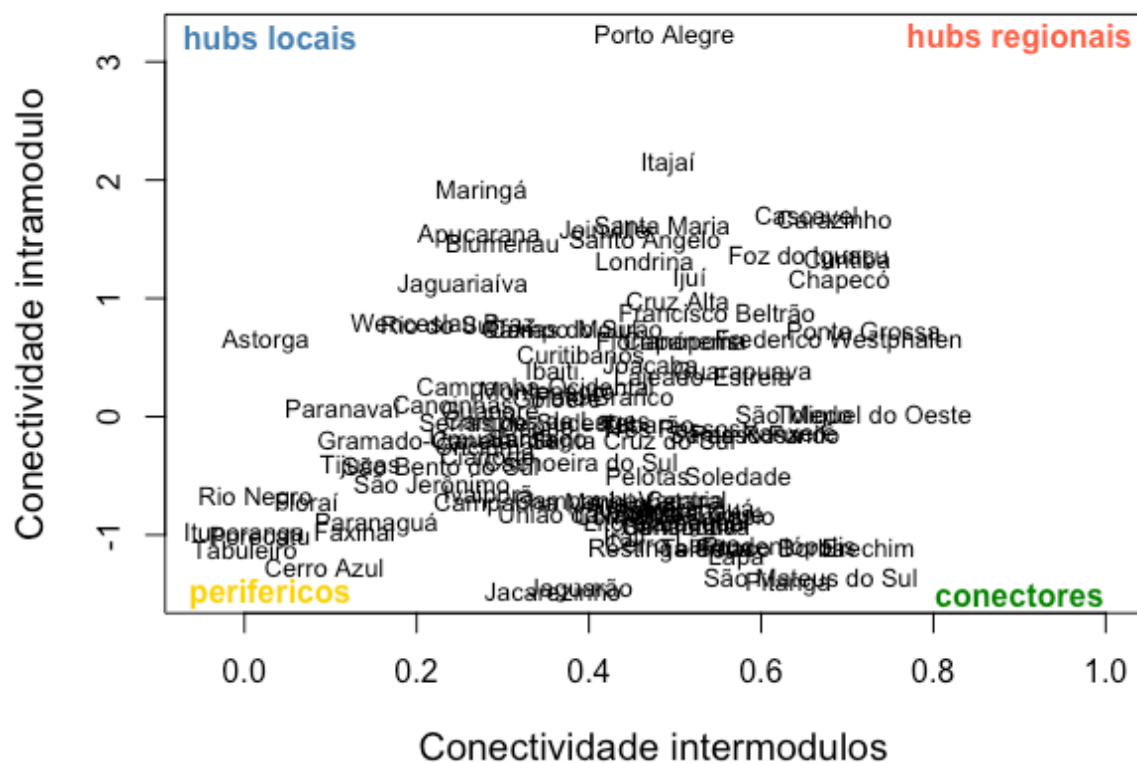


Figura 3. Papéis estruturais das microrregiões sulinas na rede de fluxo rodoviário. Conectividades intermódulo (c) e intramódulo (z). *Hubs* locais têm valores altos de z , i.e., são muito conectados com microrregiões no mesmo módulo. Conectores apresentam altos valores de c e, portanto, alta conectividade com outros módulos. Microrregiões com altos valores de c e z são consideradas *hub* regionais.

2.2. Análise de vulnerabilidade

As análises descritas acima caracterizam a posição relativa das microrregiões na estrutura da rede de fluxo rodoviário, mas podem não capturar adequadamente seus efeitos na propagação geográfica da epidemia, particularmente considerando-se o grande número de rotas indiretas que compõem uma rede geográfica com a dimensão do Sul brasileiro. De forma complementar, portanto, usamos uma técnica apropriada para a descrição da propagação de efeitos em redes complexas que considera a posição das microrregiões sulinas no conjunto de rotas diretas e indiretas que compõem a rede geográfica. Especificamente, adaptamos uma medida que permite computar rotas diretas e indiretas entre microrregiões denominada centralidade de Katz (Katz, 1953). Para calcular a centralidade de Katz para as microrregiões sulinas, computamos a matriz de efeitos diretos e indiretos (Katz, 1953; Guimarães et al., 2017): $T = (I - rQ)^{-1}$, na qual I é a matriz identidade, r é um fator que pesa o efeito de rotas rodoviárias que envolvam múltiplas microrregiões e Q é a matriz de fluxo rodoviário entre microrregiões. Nossa abordagem supõe, como aproximação, que se uma microrregião apresenta casos, a

partir dela a doença pode propagar-se para uma região que dela receba passageiros pelo sistema rodoviário.

Para informar a matriz de efeitos diretos e indiretos conforme descrito acima, utilizamos dados de circulação de ônibus entre as microrregiões dos estados conforme providos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística². Dados dos casos confirmados do SARS-CoV-2 nas microrregiões sulinas foram obtidos no site [Monitoramento do número de casos de COVID-19 no Brasil](#) (Cota, 2020), acessado em 17/04/2020, conforme informados pelo Ministério da Saúde e Secretarias de Estado de Saúde. Apenas consideramos as rotas rodoviárias diretas e indiretas que partem de áreas com casos comprovados do SARS-CoV-2. Calculamos então a centralidade Katz de entrada de todas as microrregiões como uma medida de vulnerabilidade: quanto maior a centralidade, maior fluxo de passageiros vindos de microrregiões com casos confirmados de SARS-CoV-2. Como o fluxo de passageiros depende do tamanho populacional das microrregiões, ponderamos a centralidade de Katz conforme tamanhos populacionais.

Para obter uma medida da potencial influência de cada microrregião como emissora do SARS-CoV-2, anotamos as microrregiões mais vulneráveis e que já possuem casos confirmados. Quanto maior esse valor, maior o fluxo de passageiros que saem de uma região onde o SARS-CoV-2 foi confirmado para outras microrregiões por meio de rotas diretas e indiretas. Nessa análise, microrregiões onde o SARS-CoV-2 não foi observado têm potencial de emissão zero na propagação da epidemia. Dividimos os valores pelo máximo observado para que a medida ficasse padronizada para variar entre zero e um. Os resultados foram sumarizados em um mapa com as microrregiões agrupadas em três categorias de risco (**Figura 4**).

² [Ligações Rodoviárias e Hidroviárias - IBGE | 2016](#).

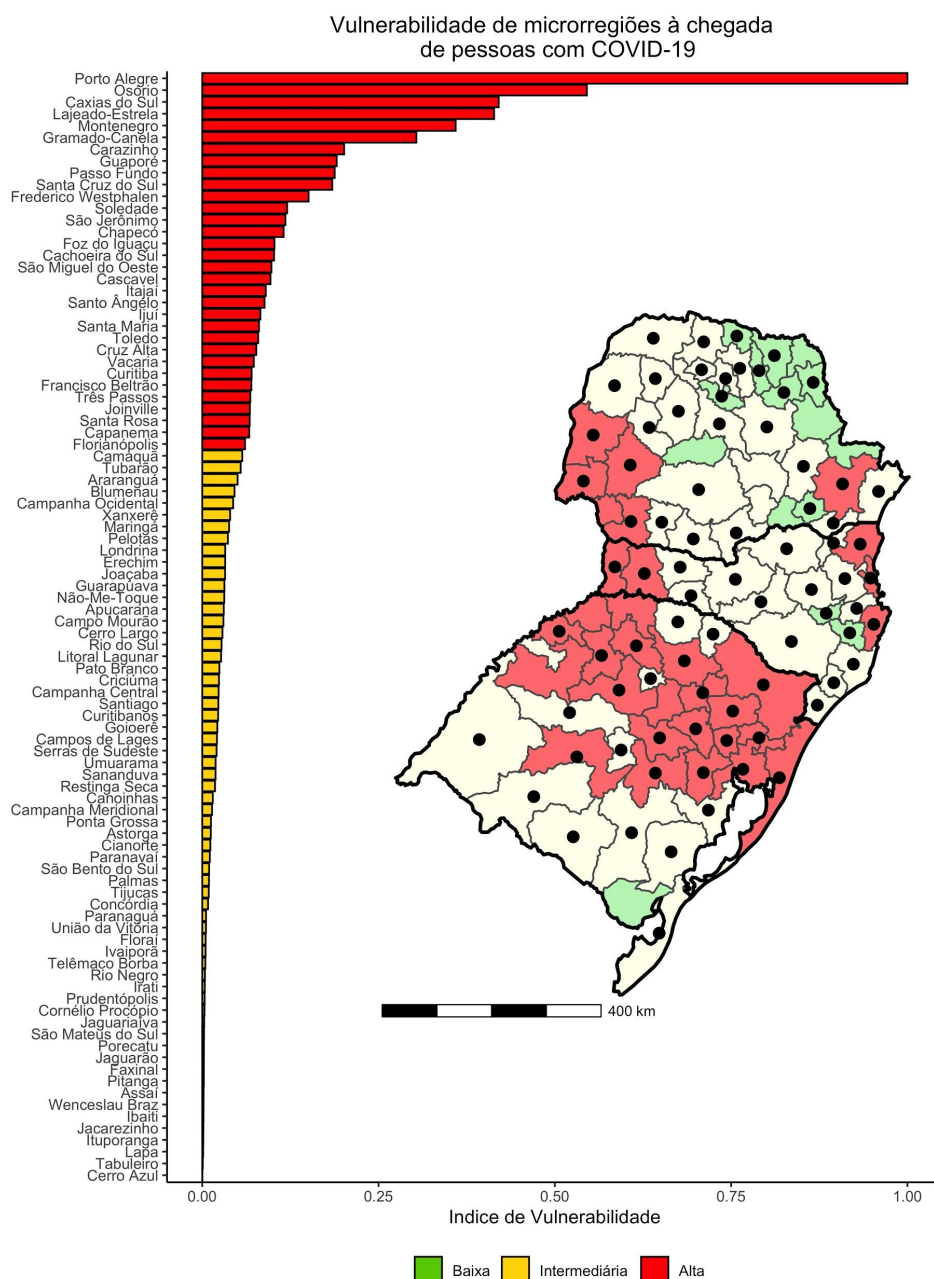


Figura 4. Categorização das microrregiões do Sul do Brasil quanto à vulnerabilidade perante a pandemia de SARS-CoV-2 em 17/04/2020. Microrregiões marcadas com um ponto preto têm casos confirmados do novo coronavírus até a data das análises em 17/04/2020. As barras mostram o valor do índice de vulnerabilidade de cada microrregião. Dados para cada região podem ser obtidos no Anexo 1.

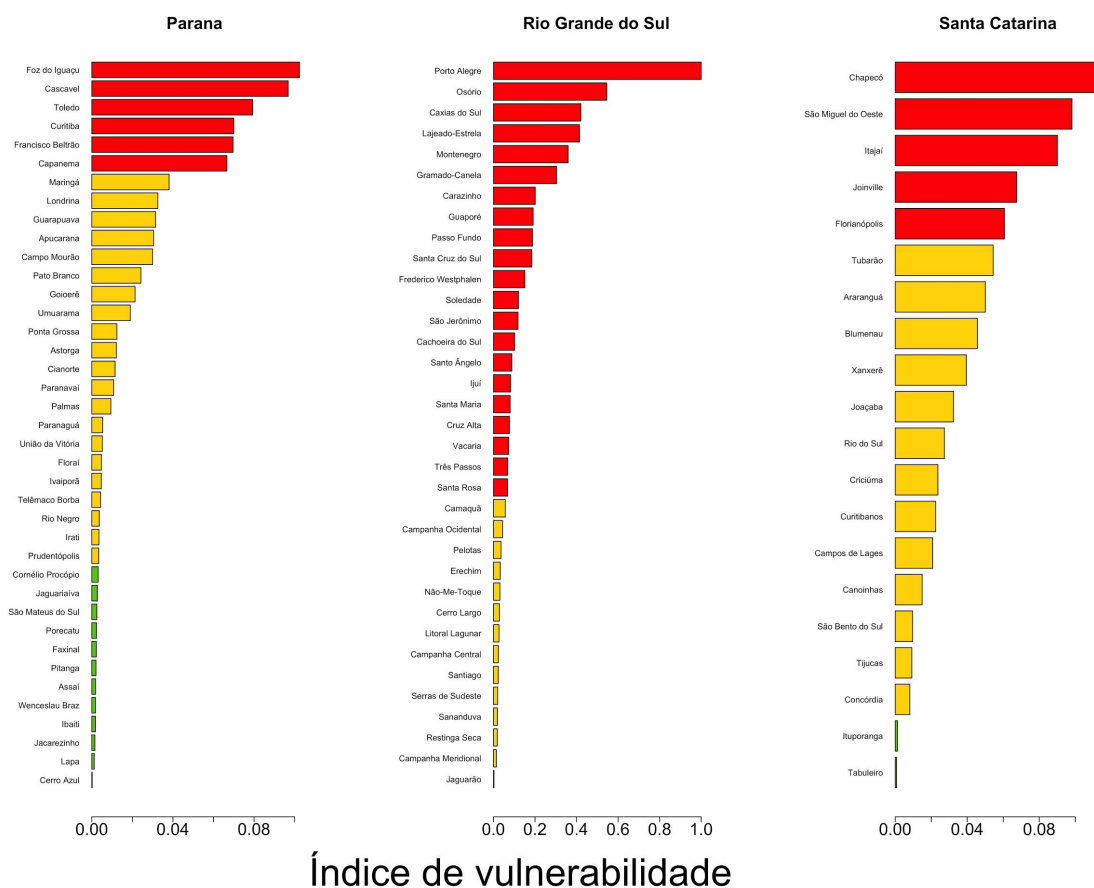


Figura 5. Categorização das microrregiões do Sul do Brasil divididas por Estado quanto à vulnerabilidade perante a pandemia de SARS-CoV-2 em 17/04/2020. As barras mostram o valor do índice de vulnerabilidade de cada microrregião. Dado o grande número de microrregiões, os rótulos das barras não são legíveis - dados para cada região podem ser obtidos no Anexo 1 .

A categorização dos grupos em graus de vulnerabilidade foi definida de forma heurística com objetivo de facilitar a tomada de decisões. **O Estado do Rio Grande do Sul concentra as 10 microrregiões mais vulneráveis à pandemia**, sendo que estas também são potenciais emissoras de SARS-CoV-2, pois já possuem registros de casos infectados em 17/04/2020 (Cota, 2020). Ainda no Rio Grande do Sul, quatro microrregiões são altamente vulneráveis à pandemia, mas ainda não possuem casos confirmados: **Frederico Westphalen, Soledade, Santo Ângelo e Três Passos** (Figura 4, Tabela 1). Em Santa Catarina, as cinco microrregiões com alta vulnerabilidade também são emissoras de SARS-CoV-2: **Chapecó, São Miguel do Oeste, Itajaí, Joinville e Florianópolis**. Já no Paraná, apenas uma das microrregiões altamente vulneráveis não é propagadora da pandemia (**Capanema**), sendo que as demais já possuem casos confirmados e são potenciais pontos de dispersão de SARS-CoV-2: **Foz do Iguaçu, Cascavel, Toledo, Curitiba e Francisco Beltrão** (Figura 4 e 5, Tabela 1). Importante notar o papel das microrregiões do interior da região Sul como importantes dispersoras de SARS-CoV-2 e que, portanto, merecem especial atenção nas tomadas de decisões de contenção da pandemia.

4. Ressalvas e direções para refinamento das análises

4.1. Escopo da análise.

A indicação de maior vulnerabilidade e recomendações específicas para o Rio Grande do Sul **não devem** ser interpretadas como indicativo de menor atenção às demais áreas, particularmente considerando-se o crescimento do número de casos em diferentes capitais e suas regiões metropolitanas densamente povoadas que não foram aqui mencionadas. Ressalva-se que as análises e recomendações apresentadas neste relatório estão focadas em prover, com base na análise da rede de fluxos rodoviários, previsões empiricamente fundamentadas sobre microrregiões com possível papel-chave na disseminação geográfica da pandemia, bem como indicar microrregiões ainda sem casos confirmados de COVID-19 cuja centralidade topológica implicam alta vulnerabilidade à chegada de pessoas infectadas.

Dessa forma, o propósito das análises é prover aos tomadores de decisão informações estratégicas para mitigar a expansão geográfica da pandemia no Sul brasileiro, sem qualquer prejuízo às ações locais atualmente em curso em diferentes Estados. De fato, epidemias possuem dois níveis de propagação distintos, apesar de correlacionados: a propagação local e a propagação geográfica. O escopo de nossas análises se refere à propagação geográfica. As dinâmicas de propagação local das infecções estão relacionadas à rede de contatos entre pessoas. A propagação geográfica depende de como essa rede de contatos estende-se em escalas espaciais mais amplas, conectando diferentes microrregiões. 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. Um próximo passo importante para refinar nossas análises envolve a obtenção de estimativas locais para o crescimento de número de casos e suas implicações para os padrões geográficos de propagação da epidemia — em outras palavras, devemos relacionar como as dinâmicas de contágio dentro das microrregiões influenciam a propagação da epidemia entre microrregiões.

4.2. Dados sobre casos confirmados de COVID-19: Uma limitação para o refinamento das análises e modelagem da dinâmica epidemiológica em escala geográfica é a ausência de dados disponibilizados rapidamente, por município, sobre o número de casos confirmados de COVID-19. Por exemplo, pretendemos aplicar ferramentas de *machine learning* — algoritmos computacionais que fazem uso de dados anteriores para gerar previsões uma vez que novos dados são obtidos — para, diária e automaticamente, verificarmos e refinarmos indicadores estratégicos. Porém, sem a atualização dos dados sobre os pacientes por município, tal abordagem é inviável. Ainda, há outras fontes de erro nos dados, principalmente subnotificações, demora no aparecimento dos sintomas e ausência de testes diagnósticos em larga escala.

4.3. Dados do fluxo rodoviário. Usamos dados do transporte rodoviário intermunicipal e interestadual dos Estados do Sul brasileiro obtidos pelo IBGE³. Esses dados são fruto de uma pesquisa feita com o uso de questionários deixados nos guichês dos terminais rodoviários e em pontos do lado de fora dos terminais. Desta forma, essa amostragem do fluxo rodoviário e nossos resultados podem ser influenciados por problemas de amostragem, particularmente a sub-amostragem. 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 aeroviário de pessoas, o que provavelmente subestima o papel das microrregiões nas quais situam-se os aeroportos.

4.4. Acurácia. Apesar das fontes de erro listadas acima, ao usar uma abordagem similar para prever a propagação da epidemia de SARS-CoV-2 entre estados por meio da rede aérea, a nossa abordagem explicou > 56% da variação das datas do primeiro registro de COVID-19 entre os estados brasileiros (<https://guimaraeslabbr.weebly.com/voos.html>).

³ [Ligações Rodoviárias e Hidroviárias - IBGE | 2016](#)

5. Agradecimentos

Nossos especiais agradecimentos a Marcelo Gomes (Fiocruz), a Roberto Kraenkel (IFT-UNESP) e Paulo Inácio Prado (IB-USP). Também agradecemos à FAPESP, CAPES e CNPq por financiar nossos grupos de pesquisa.

6. 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.; Hoefer, M.; Nikoloski, Z.; Wagner, D. (2008). On Modularity Clustering. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 20 (2): 172–188.
- Cota, W. (2020). Número de casos confirmados de COVID-19 no Brasil. Disponível em <https://labs.wesleycota.com/sarscov2/br/#main>. Acessado em 02 de Abril de 2020.
- Guimarães, P. R.; Pires, M. M.; Jordano, P; Bascompte, J; Thompson, J. N. (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_amostra/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.

Anexo 1. Índice de vulnerabilidade à propagação da epidemia de SARS-CoV-2 das microrregiões dos Estados da região Sul do Brasil. Quanto maior o índice de vulnerabilidade de uma microrregião, maior o potencial de recebimento de pessoas com SARS-CoV-2. Para microrregiões com casos confirmados até 17/04/2020, a interpretação é quanto maior o índice de vulnerabilidade, maior o potencial de servir como núcleo de propagação (emissão) de infectados para outras microrregiões. Os valores foram padronizados pelo máximo para variar entre 0 e 1. Por simplicidade, índices de vulnerabilidade menores que 0.001 foram arredondados para zero.

Microrregião	UF	Casos	Índice de vulnerabilidade	Categoria
Porto Alegre	RS	484	1	alto
Osório	RS	24	0.5454	alto
Caxias do Sul	RS	64	0.4204	alto
Lajeado-Estrela	RS	37	0.4139	alto
Montenegro	RS	9	0.3594	alto
Gramado-Canela	RS	8	0.3037	alto
Carazinho	RS	2	0.2012	alto
Guaporé	RS	11	0.1907	alto
Passo Fundo	RS	46	0.1878	alto
Santa Cruz do Sul	RS	3	0.1843	alto
Frederico Westphalen	RS	0	0.1508	alto
Soledade	RS	0	0.1203	alto
São Jerônimo	RS	6	0.118	alto
Chapecó	SC	10	0.1153	alto
Foz do Iguaçu	PR	40	0.1024	alto
Cachoeira do Sul	RS	3	0.1018	alto
São Miguel do Oeste	SC	1	0.0982	alto
Cascavel	PR	75	0.0968	alto
Itajaí	SC	178	0.0901	alto
Santo Ângelo	RS	0	0.0883	alto
Ijuí	RS	1	0.0824	alto

Santa Maria	RS	13	0.0804	alto
Toledo	PR	15	0.0793	alto
Cruz Alta	RS	1	0.0766	alto
Vacaria	RS	2	0.0732	alto
Curitiba	PR	406	0.07	alto
Francisco Beltrão	PR	3	0.0697	alto
Três Passos	RS	0	0.0681	alto
Joinville	SC	87	0.0675	alto
Santa Rosa	RS	5	0.0673	alto
Capanema	PR	0	0.0666	alto
Florianópolis	SC	254	0.0607	alto
Camaquã	RS	1	0.0568	intermediário
Tubarão	SC	109	0.0544	intermediário
Araranguá	SC	19	0.05	intermediário
Blumenau	SC	106	0.0457	intermediário
Campanha Ocidental	RS	4	0.0438	intermediário
Xanxerê	SC	3	0.0395	intermediário
Maringá	PR	34	0.0381	intermediário
Pelotas	RS	15	0.0364	intermediário
Londrina	PR	80	0.0326	intermediário
Erechim	RS	4	0.0324	intermediário
Joaçaba	SC	8	0.0324	intermediário
Guarapuava	PR	2	0.0314	intermediário
Não-Me-Toque	RS	1	0.0312	intermediário
Apucarana	PR	20	0.0305	intermediário
Campo Mourão	PR	34	0.03	intermediário
Cerro Largo	RS	0	0.0285	intermediário
Rio do Sul	SC	4	0.0273	intermediário
Litoral Lagunar	RS	4	0.0268	intermediário

Pato Branco	PR	11	0.0242	intermediário
Criciúma	SC	67	0.0237	intermediário
Campanha Central	RS	8	0.0232	intermediário
Santiago	RS	1	0.0228	intermediário
Curitibanos	SC	1	0.0225	intermediário
Goioerê	PR	4	0.0214	intermediário
Campos de Lages	SC	13	0.0208	intermediário
Serras de Sudeste	RS	3	0.0203	intermediário
Umuarama	PR	2	0.019	intermediário
Sananduva	RS	2	0.0189	intermediário
Restinga Seca	RS	1	0.0181	intermediário
Canoinhas	SC	3	0.015	intermediário
Campanha Meridional	RS	29	0.0138	intermediário
Ponta Grossa	PR	10	0.0124	intermediário
Astorga	PR	7	0.0121	intermediário
Cianorte	PR	16	0.0115	intermediário
Plraí	PR	18	0.0108	intermediário
São Bento do Sul	SC	2	0.0097	intermediário
Palmas	PR	1	0.0094	intermediário
Tijucas	SC	6	0.0092	intermediário
Concórdia	SC	8	0.0081	intermediário
Paranaguá	PR	12	0.0054	intermediário
União da Vitória	PR	3	0.0052	intermediário
Floraí	PR	0	0.0047	intermediário
Ivaiporã	PR	9	0.0047	intermediário
Telêmaco Borba	PR	6	0.0043	intermediário
Rio Negro	PR	4	0.0037	intermediário
Irati	PR	0	0.0035	intermediário
Prudentópolis	PR	0	0.0034	intermediário

Cornélio Procopio	PR	6	0.0031	baixo
Jaguariaíva	PR	0	0.0027	baixo
São Mateus do Sul	PR	0	0.0025	baixo
Porecatu	PR	2	0.0023	baixo
Jaguarão	RS	0	0.0023	baixo
Faxinal	PR	3	0.0022	baixo
Pitanga	PR	0	0.0021	baixo
Assaí	PR	3	0.0019	baixo
Wenceslau Braz	PR	3	0.0019	baixo
Ibaiti	PR	1	0.0018	baixo
Jacarezinho	PR	0	0.0015	baixo
Ituporanga	SC	1	0.0014	baixo
Lapa	PR	2	0.0012	baixo
Tabuleiro	SC	3	0	baixo
Cerro Azul	PR	0	0	baixo
