

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia – Engenharia Civil

Trabalho de Conclusão de Curso

Mariana Tosi Corrêa

**PONDERADORES DE DISTÂNCIA PARA PARÂMETROS DE  
COMPLEMENTARIEDADE ESPACIAL DE RECURSOS ENERGÉTICOS  
RENOVÁVEIS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Porto Alegre

2018

Mariana Tosi Corrêa

**PONDERADORES DE DISTÂNCIA PARA PARÂMETROS DE  
COMPLEMENTARIEDADE ESPACIAL DE RECURSOS ENERGÉTICOS  
RENOVÁVEIS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. O trabalho está na forma de artigo científico, a ser submetido na Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

Orientador: Alfonso Risso

Co-Orientador: Alexandre Beluco

Porto Alegre

2018

# PONDERADORES DE DISTÂNCIA PARA PARÂMETROS DE COMPLEMENTARIEDADE ESPACIAL DE RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Mariana Tosi Corrêa

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## RESUMO

Sistemas híbridos de energia têm custos iniciais mais altos do que os sistemas baseados em apenas um recurso renovável, no entanto, o atendimento de demandas de cargas de consumo é obtido com menores valores de custo. A possível complementariedade entre os recursos utilizados pode contribuir para um melhor aproveitamento da energia disponível. Em larga escala, a complementariedade entre usinas de energia pode servir como ferramenta para a gestão de recursos energéticos.

Este trabalho faz o uso do método da rede de células hexagonais para quantificar a complementariedade ao longo do tempo, expressando seu resultado através de mapas. Essa técnica é aplicada para usinas hidrelétricas e parques eólicos no estado do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil, e apresenta, como resultado, seu mapa de complementariedade espacial no tempo. Também são avaliados ponderadores capazes de descrever o grau de decaimento da complementariedade em relação à distância, como forma de estimar a complementariedade em pontos desconhecidos.

## INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de energia elétrica em todo o mundo, estimula-se cada vez mais o uso e desenvolvimento de energias que produzam o menor impacto ambiental possível.

Acordos de redução da emissão de gases do efeito estufa vêm mudando o cenário energético mundial, incitando o interesse em encontrar maneiras de assegurar o fornecimento de energia de forma sustentável.

Embora o desempenho técnico de recursos renováveis possa ser equiparado aos meios mais hegemônicos de obtenção de energia, ainda há ressalvas quanto a sua aprovação, dada a necessidade de se levar em consideração uma maior quantidade de variáveis durante os processos de implantação e geração de energia nos mais diversos tipos de aproveitamentos.

Quando duas ou mais fontes de energia apresentam algum tipo de complementariedade, as exigências quanto ao controle são atenuadas, além de haver possível minimização de falhas sem aumento impraticável de custo.

## COMPLEMENTARIEDADE

Segundo Beluco (2001), “a palavra *complementariedade* (ou *complementaridade*) pode ser interpretada como capacidade para servir de complemento. A expressão *complementariedade energética* refere-se então à capacidade de uma ou mais fontes apresentarem disponibilidades energéticas complementares no tempo, no espaço ou em ambos. A complementariedade *no espaço* pode existir quando as disponibilidades energéticas de uma ou mais fontes se complementam ao longo de uma região. A complementariedade *no tempo*

pode existir quando as disponibilidades apresentam períodos que se complementam ao longo do tempo em uma mesma região.”

Para ambos os casos, a complementariedade só será completa se abranger os componentes tempo, energia e amplitude. A complementariedade no tempo será completa quando a disponibilidade mínima ocorrer no período de defasagem de seis meses. A complementariedade energética ocorrerá quando os valores médios dos recursos energéticos comparados forem iguais. A complementariedade da amplitude ocorrerá quando as diferenças entre a disponibilidade energética máxima e mínima, para a energia comparada, forem iguais.

A Figura 1 apresenta duas curvas senoides para exemplificar um caso de complementariedade. Para o período de um ano, as curvas apresentam valores médios iguais a 1, valores mínimos iguais a 0,8 e valores máximos iguais a 1,2. O valor mínimo da primeira curva está situado em 0,75 ano e o valor mínimo da segunda em 0,25 ano. A complementariedade entre essas duas curvas pode ser caracterizada como perfeita, na medida em que os valores mínimos estão defasados entre si a um intervalo igual a 0,5 ano (assim como os valores máximos), a diferença entre os valores máximos e mínimos é igual a 0,4 em ambos os casos, e os respectivos valores médios são iguais entre si.

## COMPLEMENTARIEDADE TEMPORAL NO TEMPO

O termo “complementariedade temporal” pode ser usado para se referir a complementariedade energética entre recursos situados em um mesmo local. A Figura 2 mostra dados reais de disponibilidade de energia. Os dados mais altos, à esquerda, correspondem a dados típicos da disponibilidade da água em uma seção de rio. Os dados mais baixos, à direita, correspondem à radiação solar incidente em uma superfície plana horizontal. A figura caracteriza os valores médios de energia e as amplitudes de variação para os dois recursos energéticos. A componente de complementariedade do tempo avalia a defasagem entre os valores máximos ou mínimos de disponibilidade de energia para os recursos energéticos considerados. A componente de complementariedade energética compara os valores médios de energia, e um máximo valor será obtido se cada recurso contribuir com metade da energia anual total. A componente de complementariedade da amplitude compara as amplitudes de variação de cada recurso energético e, como a componente de complementariedade energética, será obtido um valor máximo de complementariedade se os recursos energéticos comparados têm a mesma variação de amplitude.

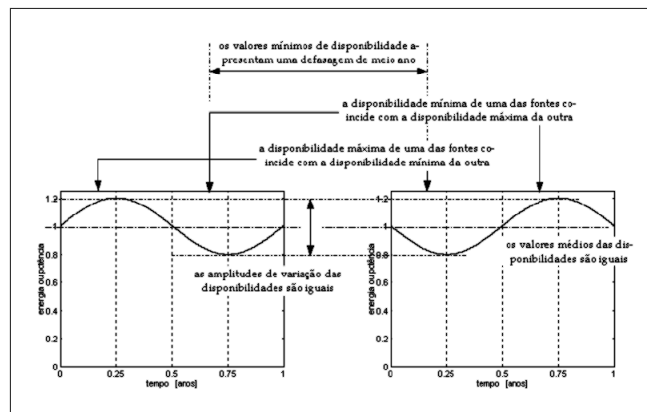


Figura 1. Curvas senoides que caracterizam as disponibilidades energéticas de duas fontes perfeitamente complementares ao longo do ano (Beluco, 2001).

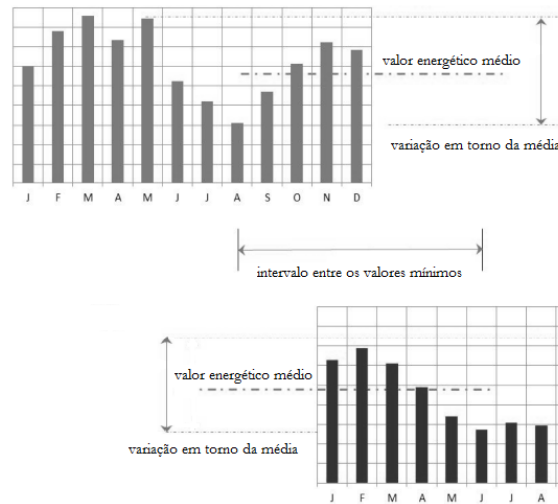


Figura 2. Exemplo de conjunto de dados para dois recursos renováveis (adaptado de Beluco, 2015).

Este artigo versa sobre a componente de complementariedade no tempo, que é diretamente associada ao tempo de defasagem entre os valores máximos e mínimos da disponibilidade de energia de dois recursos renováveis. O índice de complementariedade no tempo  $k_t$ , proposto por Beluco, Souza e Krenzinguer (2008) é definido conforme a Equação (1) e avalia o intervalo de tempo entre os valores mínimos (ou máximos) das disponibilidades de duas fontes de energia. Se esse intervalo corresponde à metade do período, o índice resultará na unidade. Se corresponder à zero, ou seja, se os valores mínimos coincidirem no tempo, o índice resultará nulo. Os valores intermediários guardam uma relação linear entre si.

$$k_t = \frac{|d_h - d_e|}{|D_h - d_h| |D_e - d_e|} \quad (1)$$

Nessa equação,  $D_h$  é o dia (ou mês) correspondente ao valor máximo de disponibilidade hídrica,  $d_h$  é o dia (ou mês) correspondente ao valor mínimo de disponibilidade hídrica,  $D_e$  é o dia (ou mês) correspondente ao valor máximo de disponibilidade eólica,  $d_e$  é o dia (ou mês) correspondente ao valor mínimo de

disponibilidade eólica. O denominador avalia se os recursos energéticos possuem um intervalo de 180 dias (ou seis meses) entre as disponibilidades de energia máxima e a mínima.

## COMPLEMENTARIEDADE ESPACIAL NO TEMPO

Como discutido previamente, a complementariedade espacial é aquela que ocorre quando os recursos energéticos estão localizados em locais diferentes. Quando devidamente quantificado e mapeado, esse conceito pode servir como importante ferramenta para gestão de recursos energéticos. O estudo adequado da complementariedade espacial pode contribuir na minimização de custos de instalação de usinas de energia, otimizar os custos de operação para sistemas interligados, além de tornar o abastecimento energético mais equilibrado e eficiente.

Caso fosse necessário determinar a complementariedade espacial no tempo entre recursos energéticos mostrados na Figura 2, eles deveriam estar, necessariamente, localizados em diferentes lugares, com distâncias e orientações distintas.

Este artigo, apresentará o estudo da complementariedade no tempo. Será feita a modelagem de uma dada região através do método da rede de células hexagonais, conforme elucidado por Risso e Beluco (2017).

## ROSAS DE COMPLEMENTARIEDADE

A metodologia apresentada por Risso e Beluco (2017) consiste na utilização de uma malha de hexágonos para representar uma dada região. A escolha do formato hexagonal foi feita devido ao fato de que a distância do centro de cada hexágono é a mesma para todos hexágonos diretamente vizinhos. A energia de cada célula hexagonal será a soma dos recursos energéticos disponíveis em sua superfície.

A Figura 3 mostra uma rede de células hexagonais estabelecidas em uma distribuição hipotética de usinas hidrelétricas e parques eólicos. As células azuis contêm usinas hidrelétricas, as células amarelas contêm parques eólicos. Células com ambos os tipos de recurso estão sinalizadas em cinza e células sem recursos não possuem cor. A partir da identificação das células que apresentam recursos energéticos, é então necessário determinar a complementariedade entre elas.

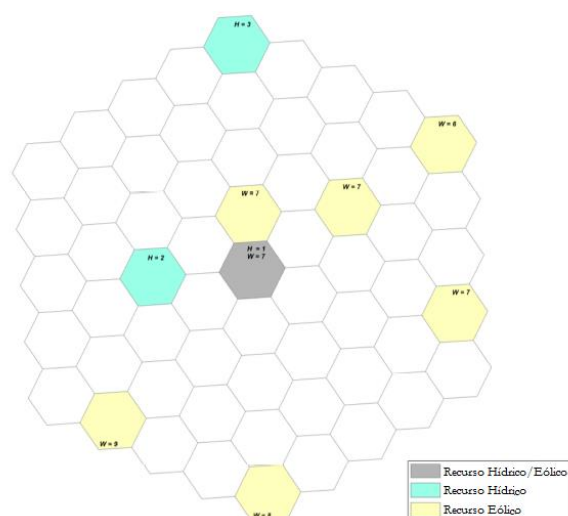


Figura 3. Malha de células hexagonais com distribuição hipotética de usinas hidrelétricas e parques eólicos. H e W indicam, respectivamente, os meses do ano em que há mínima disponibilidade energética para cada um dos recursos (adaptado de Risso, Beluco e Alves, 2018).

Três parâmetros devem ser estabelecidos: a complementariedade no tempo com as outras células da malha hexagonal que possuem centrais elétricas, as respectivas distâncias e as respectivas direções.

Para isso, a Equação (1) deve ser utilizada, sendo que os valores de máxima e mínima disponibilidade energética serão considerados quando o intervalo entre eles for igual a seis meses.

Primeiramente, deve-se escolher uma célula que contenha algum recurso e determinar sua complementariedade com outras células que também contenham recursos, levando em consideração suas respectivas distâncias e orientação. A Figura 4 apresenta a rede de células que é utilizada como exemplo na Figura 2. Ela contém a célula H-29, identificada em azul, que é utilizada como referência para determinação da complementariedade.

Comparando-se a célula H-29 com a célula W-33, obtém-se uma complementariedade de valor 0,83. Por esse motivo, atribui-se a cor amarela a célula W-33, como mostrado na Figura 4. Seguindo o mesmo raciocínio, ao se comparar a célula H-29 às células W-40 e W46, chega-se aos valores de 0,83

e 0,67, respectivamente. Por consequência, essas células são pintadas, na Figura 4, de amarelo e verde, respectivamente. Às demais células também é atribuída uma cor de acordo com seu grau de complementariedade, sendo que o valor máximo é atingido apenas para a célula W-15, de cor vermelha.

O segundo passo consiste na replicação deste processo para todas as células que contêm recursos eólicos. Como é necessário representar os resultados em apenas um mapa, a solução proposta por Risso et. al. (2018) traz a ideia da utilização do diagrama de rosetas. Desta maneira, é possível representar em cada célula seu grau de complementariedade com todas as outras células.

A Figura 5a mostra a rosa para a célula H-29, com linhas amarelas apontando para as células W-33 e W-40, uma linha verde em direção à célula H-46 e uma linha vermelha em direção à célula W-15. Essas linhas caracterizam suas respectivas distâncias e orientações. As Figuras 5b-d, apresentam, respectivamente, as rosas de

complementariedade para as células H-33, H-40 e H-46. A rosa de complementariedade mostrada na Figura 5b é diferente das outras rosas, já que corresponde a uma célula que contém usinas hidrelétricas e parques eólicos. A indicação da complementariedade entre os recursos energéticos se dá com a aplicação de um círculo central, preenchido com a cor correspondente à complementariedade. Nesse caso, trata-se de uma complementariedade total, portanto, o círculo é pintado com a cor vermelha.

A Figura 6 exibe modelos para determinar as rosas de complementariedade. Na Figura 6a, há um modelo para células contendo apenas um recurso energético. Já na Figura 6b, há um modelo para células contendo dois ou mais recursos energéticos. As direções das linhas correspondem às posições relativas das células comparadas e seus comprimentos estão relacionados com as distâncias entre as células. A escala de cores, estabelecida pela legenda, indica os diferentes valores de complementariedade.

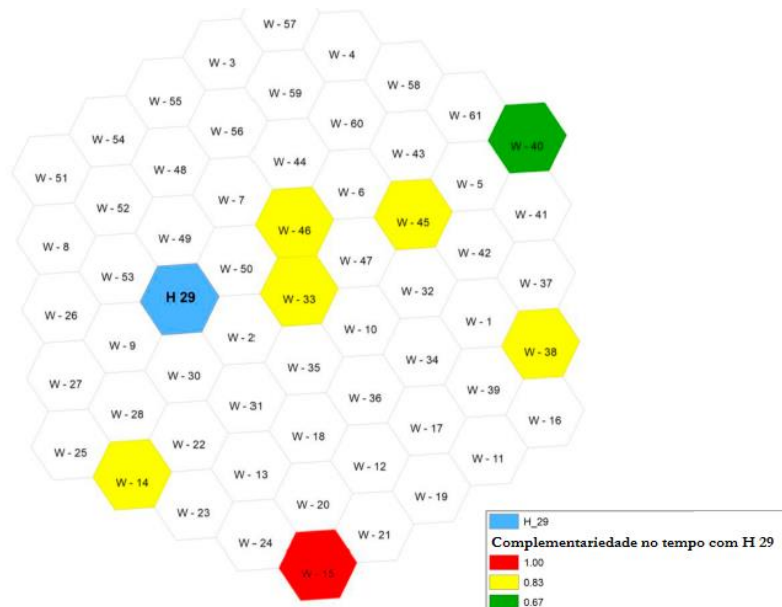


Figura 4. Complementariedade no tempo entre a célula H-29, que contém recursos hídricos, e as outras células da malha hexagonal, que aparecem na Figura 3. H e W são definidos para cada célula e seguidos por números, como forma de identificação (adaptado de Risso, Beluco e Alves, 2018).

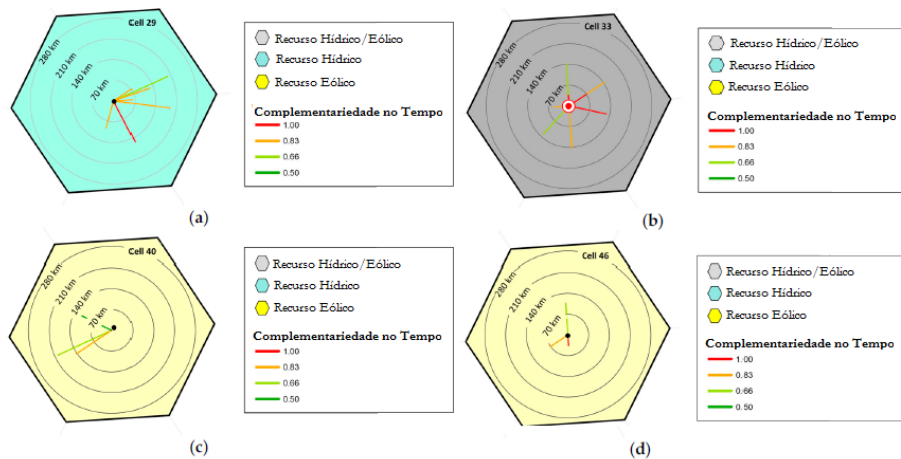


Figura 5. Rosas de complementariedade para as células (a) H-29; (b) W-33; (c) W-40; e, (d) W-46, que aparecem na Figura 3 (adaptado de Risso, Beluco e Alves, 2018).

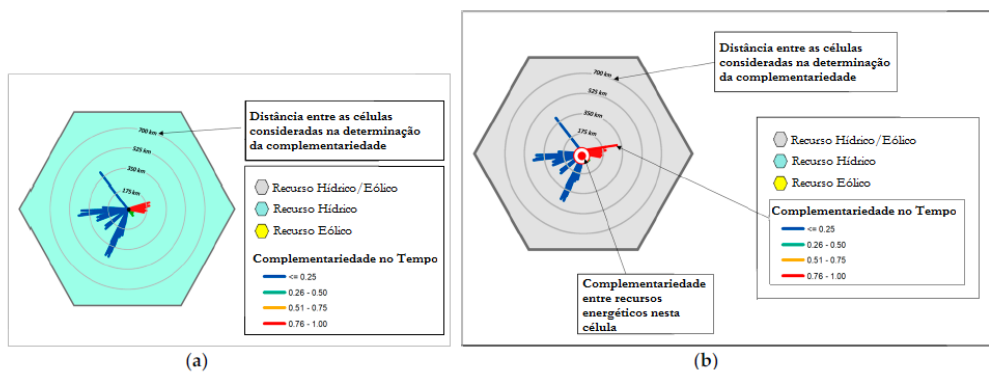


Figura 6. Modelos para determinação das rosas de complementariedade: (a) com apenas um recurso energético por célula e (b) com dois ou mais recursos energéticos por célula (adaptado de Risso, Beluco e Alves, 2018).

A Figura 7 mostra o mapa elaborado com as rosas de complementariedade determinadas para as células de distribuição hipotética de usinas proposta na Figura 3. Como esperado, as linhas em uma célula sempre encontram linhas idênticas em suas complementares equivalentes. Baseado nisso, é bastante intuitiva a identificação, na Figura 7, das células da rede hexagonal que possuem máxima complementariedade entre si.

Em suma, o método de Risso, Beluco e Alves (2018), que estabelece a complementariedade espacial no tempo a partir das rosas de complementariedade para uma dada região, pode ser apontado em 5 etapas:

- 1) Delimitar a região para a qual será determinada a complementariedade espacial, identificando as usinas em operação e/ou os locais com potencial energético;
- 2) Obter dados de energia (para usinas em operação) ou disponibilidade de energia (para potencial energético) que será considerado na determinação da complementariedade no tempo, considerando lugares diferentes;
- 3) Estabelecer uma rede de células hexagonais sobre a região escolhida para a análise, identificando as células que contêm usinas em operação e/ou locais com potencial energético e registrar as distâncias entre elas;



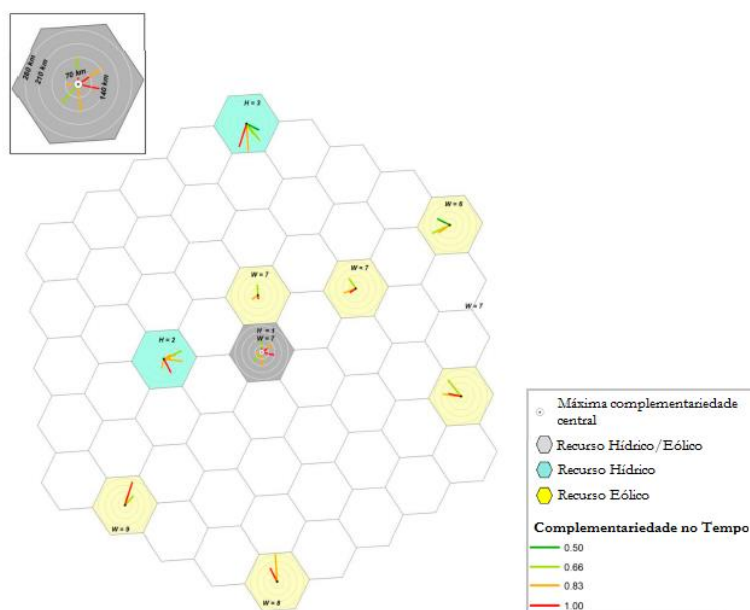


Figura 7. Mapa da complementariedade espacial no tempo para a rede de células hexagonais da Figura 3 (adaptado de Risso, Beluco e Alves, 2018).

- 4) Determinar a complementariedade no tempo de cada célula que contém algum recurso existente ou potencial e, ao compará-lo com as outras células que contêm algum recurso energético, observar a variação no grau de complementariedade de acordo com as distâncias;
- 5) Por fim, avaliar o resultado final obtido com a superposição das rosas de complementariedade nas respectivas células hexagonais e no mapa e, se necessário, sugerir alguma simplificação na representação, caso as rosas de complementariedade se tornem muito cheias e dificultem a leitura visual das informações ao longo do mapa.

#### DADOS ESPACIAIS

Nesse artigo, três bases de dados georreferenciados contendo informações de infraestrutura, recursos hídricos e eólicos foram utilizadas para implementação das ferramentas para estimativa da complementariedade espacial no tempo. São elas:

#### *Infraestrutura Nacional de Geração de Energia Elétrica*

Camadas Shapefile (ESRI) disponibilizadas pelo Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL – ANEEL). Os planos de informações são referentes a Aproveitamentos Hidrelétricos e Aerogeradores.

#### *Recursos Hídricos*

A disponibilidade de recursos hídricos superficiais para geração de energia foi identificada através de dados da base georreferenciada do International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP II) – University of New Hampshire. Os planos de informação utilizados são pertencentes ao módulo Hidrologia e Solos ISLSCP II UNH/GRDC Composite Monthly Runoff. Esses dados de escoamento composto combinam estimativas médias mensais de escoamento de um modelo de balanço hídrico simulado, derivado de dados climáticos com descarga fluvial monitorada. Os dados possuem resolução espacial de 0,5 grau em latitude e longitude. A extensão temporal vai de 1986 a 1995.

A Figura 8 apresenta os meses de máxima e mínima disponibilidade hídrica, integrados à base de células hexagonais.

#### Recursos Eólicos

A disponibilidade de energia eólica foi identificada através da base de dados georreferenciados do Climatic Research Unit -

University of East Anglia, apresentados na forma de grades regulares de alta resolução. Os dados possuem resolução espacial de 10 minutos de latitude de longitude. A extensão temporal vai de 1961 a 1990.

A Figura 9 apresenta os meses de máxima e mínima disponibilidade eólica, integrados à base de células hexagonais.

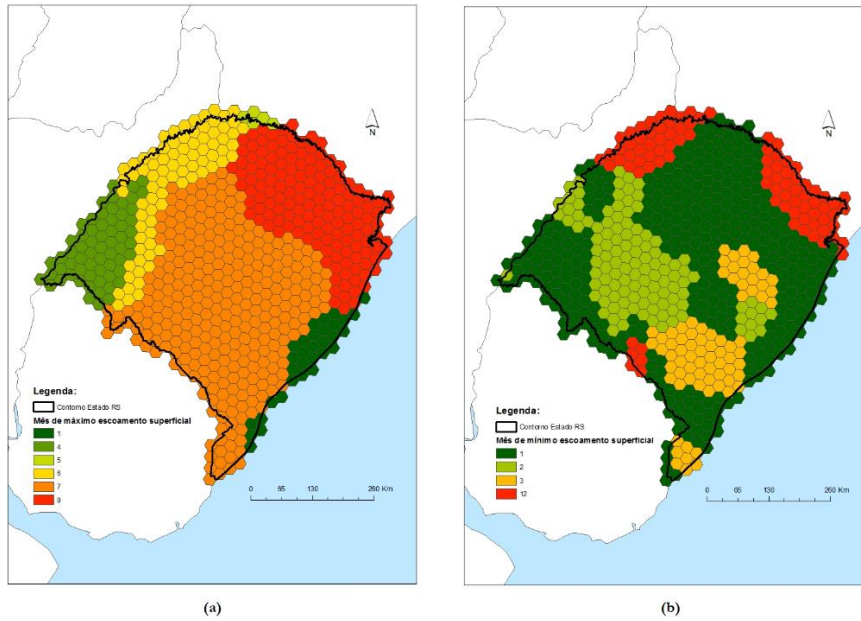


Figura 8. Meses de (a) máxima e (b) mínima disponibilidade hídrica (elaborado pela autora).

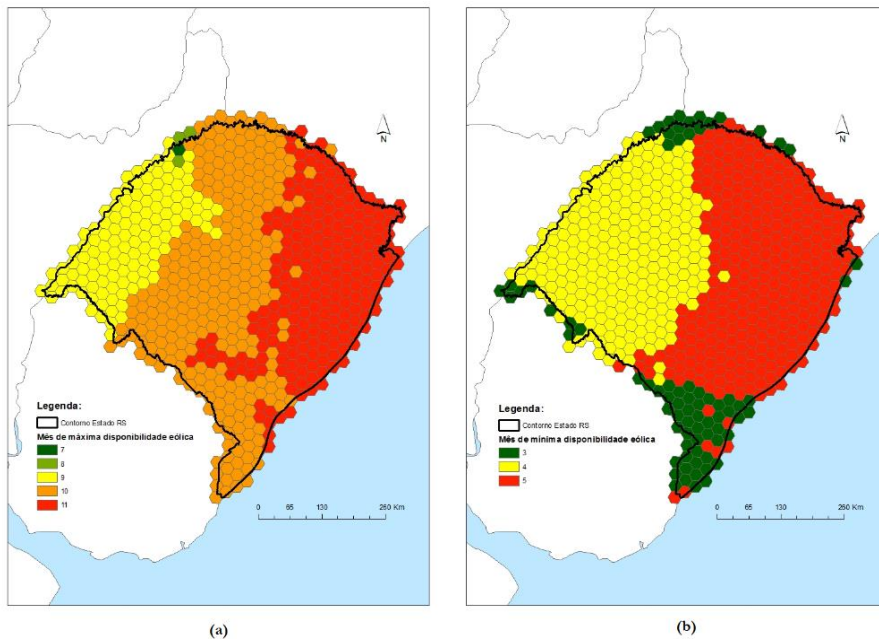


Figura 9. Meses de (a) máxima e (b) mínima disponibilidade eólica (elaborado pela autora).

## COMPLEMENTARIEDADE ESPACIAL DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E PARQUES EÓLICOS AO LONGO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

O Rio Grande do Sul é o estado mais meridional do Brasil, possui uma área de 281.737,888 km<sup>2</sup> (IBGE, 2018) e população de 11.329.605 habitantes (IBGE, 2017). A capacidade instalada é de 9.101,0 MW (ANEEL, 2018), sendo uma combinação de usinas hidrelétricas, termelétricas e parques eólicos.

Inicialmente, esse trabalho tinha por objetivo auferir a complementariedade de todas as células que compreendem o estado, independentemente de possuírem recurso energético ou não. Os valores do índice de complementariedade, calculados conforme a Equação (1), distância e direção de cada célula podem ser visualizados na Figura 11.

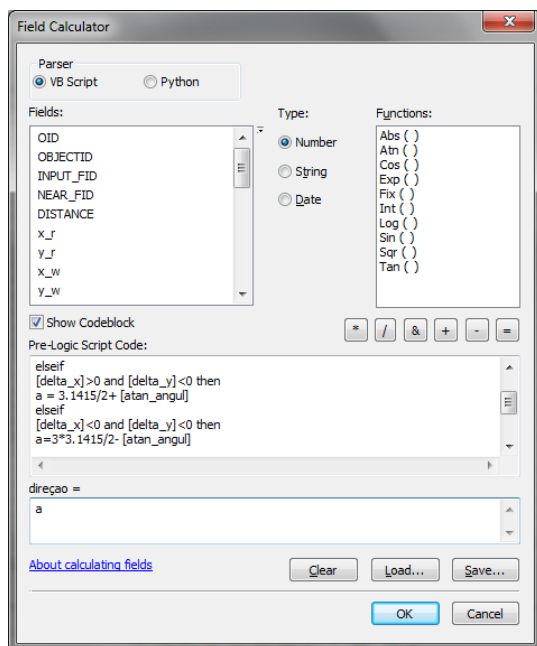


Figura 10. Operação condicional programada no *field calculator*, para o cálculo da direção da complementariedade.

A Figura 10 mostra o cálculo da direção da complementariedade, obtido através do azimute

do alinhamento. O elevado número de atributos, próximo a 400.000, tornou as operações bastante penosas de serem feitas, demandando considerável tempo. Em vista disso, foi necessário diminuir o número de células que seriam empregadas no cálculo da complementariedade. Optou-se, assim, por utilizar apenas as células que contêm recursos energéticos, tanto hídricos como eólicos.

A Figura 12 mostra o estado do Rio Grande do Sul e a rede de 632 células hexagonais que foi estabelecida para este estudo. Cada célula hexagonal possui 500 km<sup>2</sup>. Foram identificados 399 aproveitamentos hidrelétricos, marcados em pontos azuis, inseridos em 136 células representadas pela cor azul. Os pontos vermelhos representam os 186 parques eólicos encontrados, inseridos em 41 células de cor amarela.

O norte do estado apresenta maior desnível topográfico, além de possuir uma rede de drenagem mais densa e poderosa, o que justifica o elevado número de hidrelétricas nessa área. A região mais ao sul do estado possui maior potencial eólico e, portanto, concentram-se ali a maior parte de parques eólicos.

O mapa do Rio Grande do Sul com as rosas de complementariedade, indicando as complementariedades máxima e mínima no tempo, são mostrados na Figura 13. No canto superior esquerdo do mapa de complementariedade mínima, em detalhe, tem-se uma rosa de complementariedade que contém usinas hidrelétricas. Apenas as células da costa leste e poucas células ao sul, que contêm parques eólicos, apresentam linhas vermelhas, cujas células hídricas complementares encontram-se distribuídas ao longo da divisa norte do estado. As linhas vermelhas indicam valor máximo de complementariedade, sendo este, então, um importante resultado do estudo proposto.

x r	y r	x w	y w	r min	r max	w min	w max	Kt min	Kt max	delta x	delta y	atan angul	direcao
39779	-202651	60588	-46468.300781	1	7	3	10	0.333333	0.5	20809	156183	1.43834	0.13241
39779	-202651	81396.898438	-34454.300781	1	7	3	10	0.333333	0.5	41617.9	168197	1.32823	0.24252
39779	-202651	102206	-46468.300781	1	7	3	10	0.333333	0.5	62427	156183	1.19054	0.38021
39779	-202651	81396.898438	-58482.398438	1	7	3	10	0.333333	0.5	41617.9	144169	1.28976	0.23099
39779	-202651	123015	-34454.300781	1	7	3	11	0.333333	0.666667	83236	168197	1.11126	0.45949
39779	-202651	143824	-46468.300781	1	7	5	11	0.666667	0.666667	104045	156183	0.983135	0.587615
39779	-202651	123015	-58482.398438	1	7	3	10	0.333333	0.5	83236	144169	1.0472	0.52355
39779	-202651	164633	-34454.300781	1	7	3	11	0.333333	0.666667	124854	168197	0.932236	0.638514
39779	-202651	39779	-10426.200195	1	7	3	10	0.333333	0.5	0	192225	-9999	0
39779	-202651	18970.099609	1587.880005	1	7	3	10	0.333333	0.5	-20808.9	204239	-1.46926	6.18151
39779	-202651	18970.099609	-22440.199219	1	7	3	10	0.333333	0.5	-20808.9	180211	-1.45584	6.18809
39779	-202651	60588	1587.880005	1	7	3	10	0.333333	0.5	20809	204239	1.46926	0.10149
39779	-202651	60588	-22440.199219	1	7	3	10	0.333333	0.5	20809	180211	1.45584	0.11491
39779	-202651	102206	1587.880005	1	7	3	10	0.333333	0.5	62427	204239	1.27416	0.29659
39779	-202651	81396.898438	-10426.200195	1	7	3	10	0.333333	0.5	41617.9	192225	1.35758	0.21317
39779	-202651	102206	-22440.199219	1	7	5	10	0.666667	0.5	62427	180211	1.23732	0.33343
39779	-202651	143824	1587.880005	1	7	3	10	0.333333	0.5	104045	204239	1.09964	0.47111
39779	-202651	123015	-10426.200195	1	7	3	11	0.333333	0.666667	83236	192225	1.16216	0.40859
39779	-202651	143824	-22440.199219	1	7	3	11	0.333333	0.666667	104045	180211	1.0472	0.52355
39779	-202651	164633	-10426.200195	1	7	3	10	0.333333	0.5	124854	192225	0.994759	0.575991
39779	-202651	185442	1587.880005	1	7	3	10	0.333333	0.5	145663	204239	0.951266	0.619484
39779	-202651	185442	-22440.199219	1	7	3	11	0.333333	0.666667	145663	180211	0.891021	0.679729
39779	-202651	-22647.900391	25616	1	7	3	10	0.333333	0.5	-62426.9	228267	-1.30384	6.01609
39779	-202651	-1838.900024	13601.900391	1	7	3	10	0.333333	0.5	-41617.9	216253	-1.38067	6.09292
39779	-202651	39779	13601.900391	1	7	3	10	0.333333	0.5	0	216253	-9999	0
39779	-202651	18970.099609	25616	1	7	3	10	0.333333	0.5	-20808.9	228267	-1.47989	6.19214
39779	-202651	60588	25616	1	7	3	10	0.333333	0.5	20809	228267	1.47989	0.09086
39779	-202651	102206	25616	1	7	5	10	0.666667	0.5	62427	228267	1.30384	0.26891
39779	-202651	81396.898438	13601.900391	1	7	3	10	0.333333	0.5	41617.9	216253	1.38067	0.19008
39779	-202651	143824	25616	1	7	5	10	0.666667	0.5	104045	228267	1.14313	0.42762

Figura 11. Tabela de atributos com os índices de complementariedade de toda malha que compreende o estado do Rio Grande do Sul.

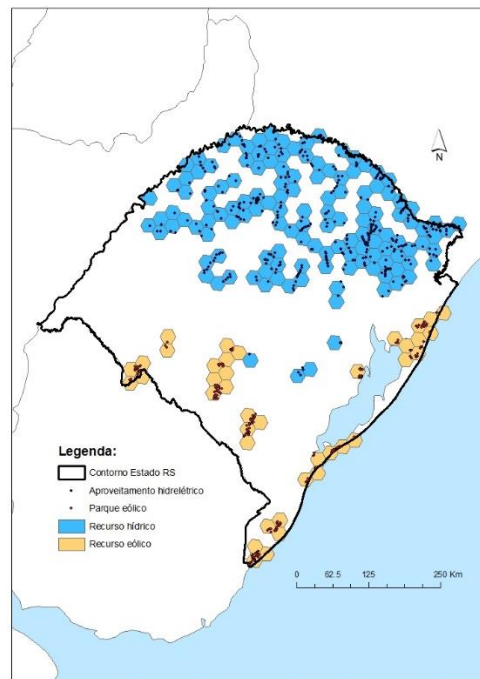
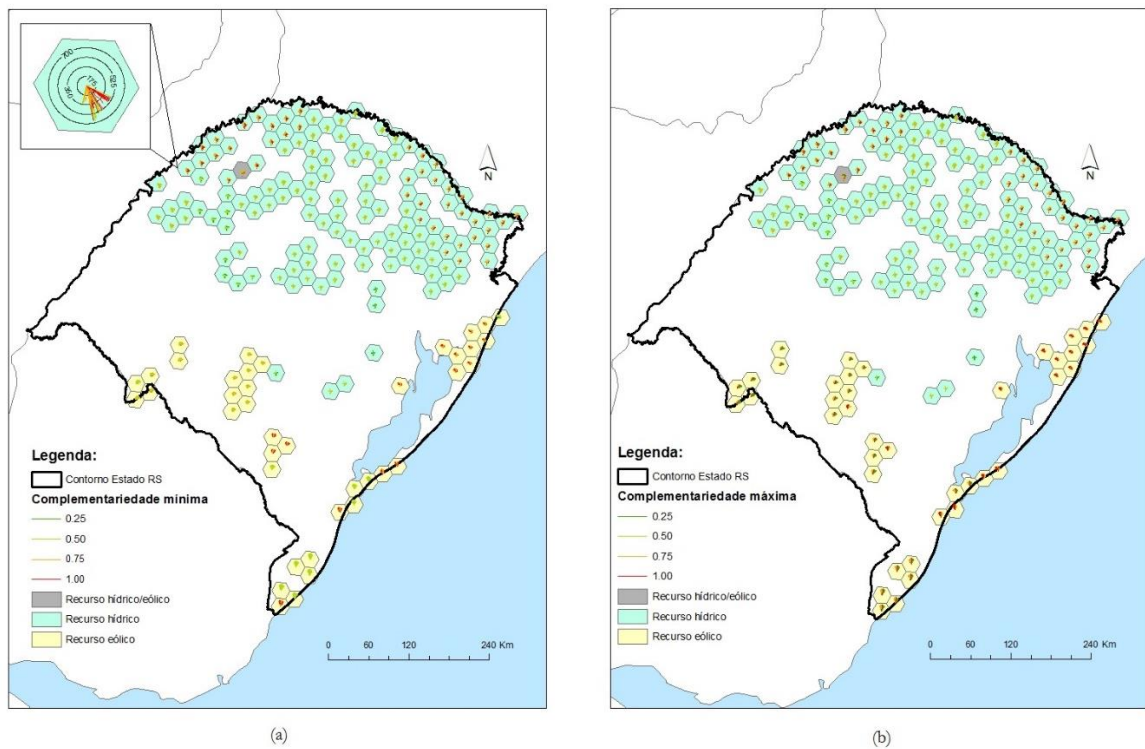


Figura 12. Rede com 632 células hexagonais de 500 km<sup>2</sup> cada, indicando aproveitamentos hidrelétricos e parques eólicos que foram considerados na análise da complementariedade espacial no tempo ao longo do estado do Rio Grande do Sul (elaborado pela autora).

Como já era esperado, as células nas extremidades da região estudada exibem linhas de complementariedade, chamadas de pétalas, de comprimentos mais longos. Da mesma forma, as

células centrais apresentam pétalas de comprimento intermediário. Ademais, grandes variações na intensidade da complementariedade



**Figura 13. Mapas do estado do Rio Grande do Sul com as rosas de complementariedade (a) mínima e (b) máxima, indicando a complementariedade espacial no tempo para os recursos energéticos evidenciados na Figura 12 (elaborado pela autora).**

são justificadas pelo fato de que os recursos analisados tendem a apresentar regimes intermitentes.

A Figura 14 mostra em detalhe a parte central do mapa da Figura 13. Por possuir uma escala maior, permite uma melhor observação das rosas de complementariedade. A célula que aparece em detalhe no canto superior direito, contendo recursos hídricos, apresenta pétalas de máxima complementariedade com distâncias na ordem de 600 km. Sua complementariedade correspondente está nas células eólicas localizadas no sudoeste do estado. Complementariedades intermediárias com parques eólicos ao oeste completam as pétalas dessa rosa de complementariedade.

Os mapas de complementariedade energética também podem ser elaborados a partir de dados indicadores de potencial, permitindo a

elaboração de estratégias para escolher os melhores locais para instalação de novas usinas no sistema energético de uma região. Além disso, mapas baseados em potenciais energéticos são capazes de revelar a melhor combinação de usinas geradoras de energia renovável, considerando sua inserção no local em estudo.

As aplicações de mapas de complementariedade, tanto para a elaboração de estratégias operacionais quanto para o planejamento da expansão de sistemas de energia, podem ser muito importantes para uma melhor inserção de usinas de recursos renováveis nos sistemas energéticos existentes. É possível também prognosticar regras com intuito de otimizar o funcionamento para melhor aproveitamento dos recursos renováveis.

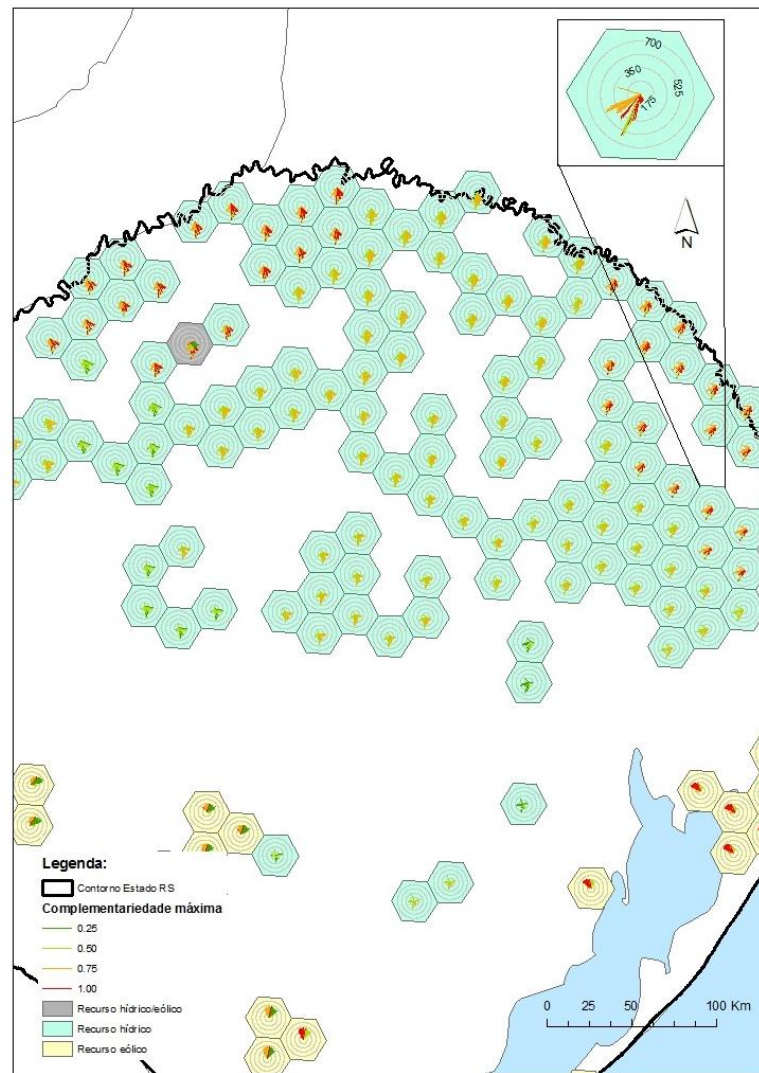


Figura 14. Detalhe da região central do mapa mostrado na Figura 13b (elaborado pela autora).

## PONDERADORES DE DISTÂNCIA

Através da interpolação, é possível estimar valores de pontos desconhecidos através de valores de pontos conhecidos. De posse das distâncias máxima e mínima referentes ao cálculo da complementariedade, é aproximada uma função que seja capaz de descrever o comportamento das variáveis analisadas. O coeficiente de ponderação, obtido através da função de aproximação, controla como o efeito da complementariedade será atenuado a medida que a distância a partir do ponto conhecido aumenta.

As Figuras 15 e 16 apresentam funções linear e polinomial, respectivamente, que melhor descrevem o grau de decaimento da complementariedade em relação à distância.

As Figuras 17a e 17b mostram as rosas de complementariedade aplicadas para as funções linear e polinomial, respectivamente. Como era esperado, o grau de complementariedade máxima diminui para ambos os casos, quando relacionados com a distância, já que se trata de funções de decaimento.

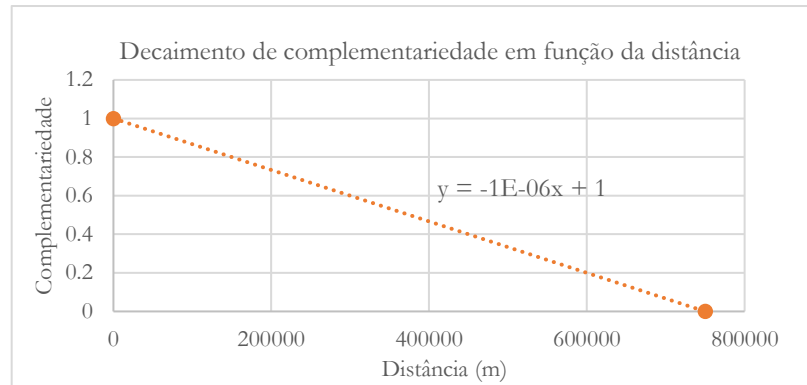


Figura 15– Função linear que descreve o decaimento da complementariedade.

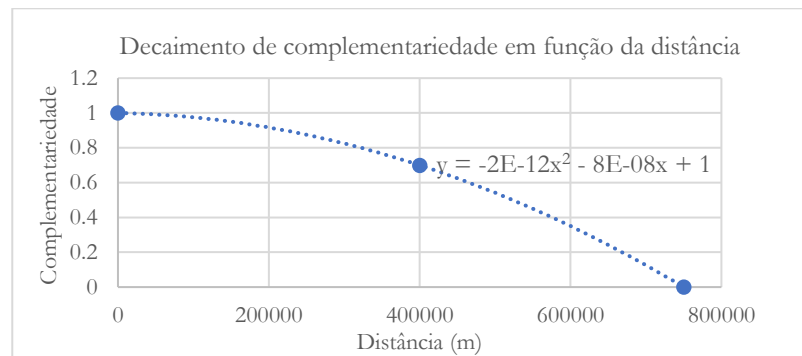


Figura 16. Função polinomial que descreve o decaimento da complementariedade.

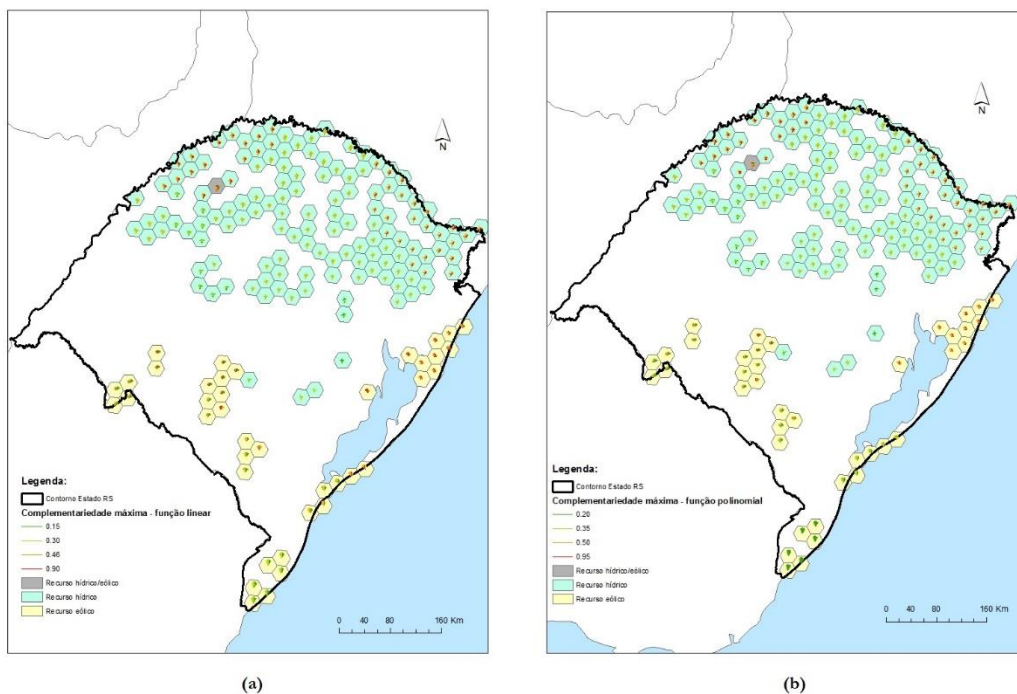


Figura 17. Ponderadores de distância (a) linear e (b) polinomial, aplicados ao cálculo da complementariedade máxima de recursos energéticos evidenciados na Figura 12 (elaborado pela autora).

## CONCLUSÕES

O presente artigo discutiu o conceito de complementaridade e contribuiu para o melhor entendimento de complementaridade espacial, utilizando um método que expressa a complementariedade espacial no tempo através de mapas. O método proposto baseia-se na determinação de rosas de complementariedade, cujas pétalas tem comprimento determinado pela distância com a célula complementar, orientação de acordo com a direção da complementariedade e cor indicando o grau de complementaridade entre as células.

A região escolhida para exemplificação do método foi o estado do Rio Grande do Sul, no Brasil. Após a coleta de dados de centrais hidrelétricas e parques eólicos, foi possível estimar a complementariedade espacial no tempo entre recursos hídricos e eólicos.

A possibilidade de expressar a complementaridade espacial no tempo através de mapas abre caminho para uma melhor utilização do conceito de complementaridade como ferramenta para a gestão das energias renováveis e para critérios de escolha na priorização de projetos de geração de energia. Um maior conhecimento da utilidade do método proposto virá com a sua aplicação a outros estudos de caso que abranjam a determinação das demais componentes da complementaridade, além da complementaridade no tempo.

A viabilidade de aplicação de ponderadores de distância na análise permite escolher funções matemáticas que melhor representem o grau de decaimento da complementariedade em função da distância.

## REFERÊNCIAS

BELUCO, A.; SOUZA, P.K.; KRENZINGER, A. A complementariedade no tempo entre as energias hidrelétricas e fotovoltaica. *RBRH: revista*

brasileira de recursos hídricos, v. 8, n. 1, p. 99-109, jan/mar 2003.

BELUCO, A. A concept of boundary of performance for analysis of hybrid systems based on complementary energy resources, *Energy Science and Technology*, v. 12, p. 459–483, sep/2014.

BELUCO, A.; SOUZA, P.K.; KRENZINGER, A. A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies, *Renewable Energy*, vol. 33, p. 2157–2165, oct/2008.

RISSO, A.; BELUCO, A. Bases for a methodology assessing spatial complementarity in time. *Energy and Power Engineering*, vol 9, p. 527–540, aug/2017.

RISSO, A.; BELUCO, A., ALVES, R. Complementarity roses evaluating spatial complementarity in time between energy resources, *Energies*, vol. 11, 1918, p. 1-14, jul/2018.

SIGEL – ANEEL, Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico da Agência Nacional de Energia Elétrica, disponível em <https://sigel.aneel.gov.br/Down/>. Acesso em: 18. set. 2018.

ISLSCP II - International Satellite Land Surface Climatology Project, da Universidade de New Hampshire, disponível em [https://daac.ornl.gov/ISLSCP\\_II/guides/comp\\_runoff\\_monthly\\_xdeg.html](https://daac.ornl.gov/ISLSCP_II/guides/comp_runoff_monthly_xdeg.html). Acesso em: 18. set. 2018.

CRU – Climatic Research Unit, da Universidade de East Anglia, disponível em <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>. Acesso em: 18. set. 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>. Acesso em: 10 nov. 2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/ResumoEstadual.cfm>. Acesso em: 10. nov. 2018.