



**Ponderadores de Distância para Parâmetros de Complementaridade Espacial entre Recursos Energéticos Renováveis no Estado do Rio Grande do Sul**  
Distance Weighting for Spatial Complementarity Parameters  
Between Renewable Energy Resources in the State of Rio Grande do Sul

Alfonso Risso<sup>1</sup>; Mariana Tosi Corrêa<sup>1</sup>; Alexandre Beluco<sup>2</sup> & Rita de Cássia M. Alves<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia,  
Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Av. Bento Gonçalves, 9500, CP 15029, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil

E-mails: [risso@iph.ufrgs.br](mailto:risso@iph.ufrgs.br); [marianatcor@gmail.com](mailto:marianatcor@gmail.com); [albeluco@iph.ufrgs.br](mailto:albeluco@iph.ufrgs.br); [rita.cma@terra.com.br](mailto:rita.cma@terra.com.br)

Recebido em: 17/07/2019 Aprovado em: 21/10/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_1\\_57\\_70](http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_57_70)

## Resumo

Sistemas híbridos de energia têm custos iniciais mais altos do que os sistemas baseados em apenas um recurso renovável, no entanto, apresentam melhor desempenho e um menor custo para a energia fornecida aos consumidores. A possível complementaridade entre os recursos energéticos utilizados pode contribuir para um melhor aproveitamento da energia disponível. Em larga escala, a complementaridade entre usinas de conversão de energia pode servir como ferramenta para a gestão de recursos energéticos. A complementaridade energética pode se manifestar entre recursos ou usinas em um mesmo local e/ou entre locais diferentes. Este trabalho faz o uso do estabelecimento de rede de células hexagonais e da elaboração de rosas de complementaridade para quantificar a complementaridade espacial no 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 complementaridade espacial no tempo. Entre os resultados, a complementaridade espacial no tempo entre as centrais hidrelétricas situadas na fronteira norte do Estado do Rio Grande do Sul e os parques eólicos que se encontram na costa leste apresentaram máxima complementaridade. Também são avaliados ponderadores capazes de descrever o grau de decaimento da complementaridade em relação à distância, como forma de estimar a área na qual a os efeitos de complementaridade energética podem ser aproveitados de modo mais eficaz.

**Palavras-chave:** Geoprocessamento; Complementaridade; Energia

## Abstract

Hybrid energy systems have higher start-up costs than systems based on just one renewable resource, however, they deliver better performance and a lower cost for energy supplied to consumers. The possible complementarity between the energy resources used can contribute to a better use of the available energy. On a large scale, complementarity between power conversion plants can serve as a tool for the management of energy resources. Energy complementarity can be verified between resources or plants in the same place and - or between different sites. This work makes use of the hexagonal cell network establishment and the elaboration of complementary roses to quantify the spatial complementarity in time, expressing its result through maps. This technique is applied to hydroelectric plants and wind farms in the state of Rio Grande do Sul, southern Brazil, and presents, as a result, its spatial complementarity map in time. Among the results, the spatial complementarity in time between the hydroelectric power plants located on the northern border of the state of Rio Grande do Sul and the wind farms on the east coast showed maximum complementarity. Weights are also evaluated capable of describing the degree of decay of the complementarity with respect to the distance, as a way of estimating the area in which the effects of energy complementarity can be used more effectively.

**Keywords:** Geoprocessing; Complementarity; Energy

## 1 Introdução

Com a crescente demanda por energia 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 de efeito estufa vêm mudando o cenário energético mundial, incentivando 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 para conversão de energia.

Segundo Beluco (2001), “a palavra complementaridade pode ser interpretada como capacidade para servir de complemento. A expressão complementaridade energética refere-se então à capacidade de uma ou mais fontes apresentarem disponibilidades energéticas complementares no tempo, no espaço ou em ambos. A complementaridade no espaço pode existir quando as disponibilidades energéticas de uma ou mais fontes se complementam ao longo de uma região. A complementaridade 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 complementaridade só será completa se abranger os componentes tempo, energia e amplitude. A complementaridade no tempo será completa quando a disponibilidade mínima ocorrer no período de defasagem de seis meses. A complementaridade energética ocorrerá quando os valores médios dos recursos energéticos comparados forem iguais. A complementaridade da amplitude ocorrerá quando as diferenças entre a disponibilidade energética máxima e mínima, para a energia comparada, forem iguais. Além disso, é necessário estabelecer se a complementaridade está sendo avaliada em um mesmo local ou em locais diferentes.

O termo “complementaridade temporal” pode ser usado para se referir a complementaridade energética entre recursos situados em um mesmo local.

A Figura 1 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 complementaridade do tempo avalia a defasagem entre os valores máximos ou mínimos de disponibilidade de energia para os recursos energéticos considerados. A componente de complementaridade 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 complementaridade da amplitude compara as amplitudes de variação de cada recurso energético e, como a componente de complementaridade energética, será obtido um valor máximo de complementaridade se os recursos energéticos comparados têm a mesma variação de amplitude.

A complementaridade entre recursos energéticos situados em locais diferentes pode ser denominada como “complementaridade espacial”, complementando a denominação de “complementaridade temporal” discutida no parágrafo anterior, para a complementaridade entre recursos energéticos situados em um mesmo local. Essa diferenciação foi proposta no artigo de Rizzo *et al.* (2018), um dos primeiros trabalhos dedicados ao estudo da complementaridade espacial. É importante ressaltar, entretanto que tanto a complementaridade temporal quanto a complementaridade espacial ainda terão as três componentes descritas acima: a complementaridade no tempo, a complementaridade de energia e a complementaridade entre amplitudes. Uma abordagem equivalente a essa que divide a complementaridade em três componentes foi proposta por Borba & Brito (2017), que avaliam a complementaridade entre dois ou mais recursos energéticos por meio de uma expressão matemática semelhante a uma convolução entre funções matemáticas.

Este artigo versa sobre a componente de complementaridade 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 complementaridade no tempo, proposto por Beluco *et al.* (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,  $d_e$  é o dia (ou mês) correspondente ao valor mínimo de disponibilidade hídrica,  $D_h$  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.

O estudo da complementaridade, em suas várias formas, visa contribuir para a consolidação de uma nova ferramenta para gestores de recursos renováveis e de recursos energéticos e um modo mais amplo. O Brasil é privilegiado com uma grande disponibilidade de recursos energéticos renováveis e sua matriz energética apresenta uma crescente diversidade de suprimentos de energia, obtidos de diferentes recursos. Entretanto, o cenário persistente de crises políticas e econômicas faz com que a oferta de novos suprimentos de energia não aconteça com a celeridade necessária. O conceito de complementaridade contribui para um melhor planejamento da expansão do sistema elétrico e do aproveitamento dos recursos disponíveis.

Este artigo então é composto de cinco seções além desta Introdução, que apresentou brevemente os temas a serem tratados ao longo das próximas seções. As próximas duas detalham o conceito de complementaridade espacial e o uso de rosas de complementaridade. A seção seguinte introduz o estudo de caso abordado neste artigo, centrado na complementaridade espacial entre usinas hidrelétricas.

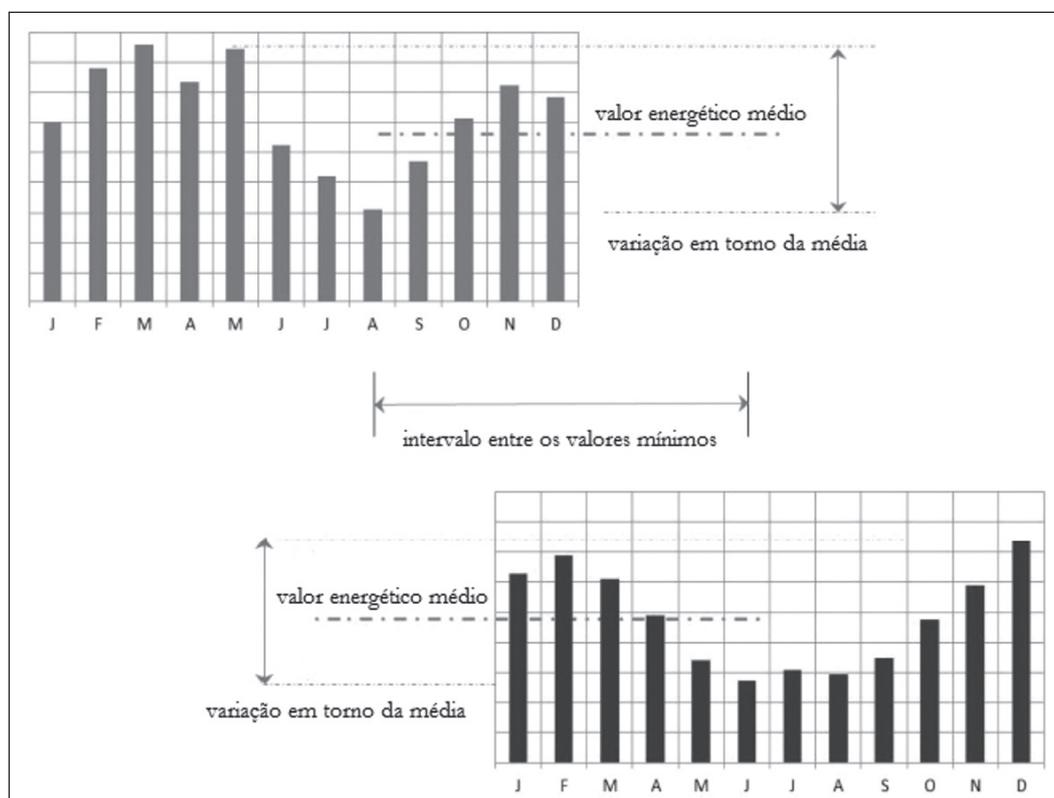


Figura 1 Conjunto de dados para dois recursos renováveis (adaptado de Beluco, 2015).

cas e fazendas eólicas ao longo do território do Estado do Rio Grande do Sul. A quinta seção discute a inserção de ponderadores de distância para uma melhor expressão da complementaridade espacial com rosas de complementaridade. A última seção reúne os resultados do trabalho e conclui o artigo.

## 2 Complementaridade Espacial no Tempo

Como discutido previamente, a complementaridade 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 complementaridade 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 complementaridade espacial no tempo entre recursos energéticos mostrados na Figura 1, eles deveriam estar, necessariamente, localizados em diferentes lugares, com distâncias e orientações distintas. Este artigo, apresentará o estudo da complementaridade no tempo e será efetuada a modelagem de uma dada região através do método da rede de células hexagonais, conforme elucidado por Rizzo & Beluco (2017). O estudo de caso será centrado na complementaridade entre usinas hidrelétricas e fazendas eólicas no Estado do Rio Grande do Sul.

A metodologia apresentada por Rizzo & 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 2 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 complementaridade entre elas. Três parâmetros devem ser estabelecidos: a complementaridade 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 as diferenças entre os valores de máxima e mínima disponibilidade energética que aparecem no denominador serão considerados com o intervalo entre eles for igual a seis meses. Desse modo, a determinação da complementaridade no tempo é simplificada.

Primeiramente, deve-se escolher uma célula que contenha algum recurso e determinar sua complementaridade com outras células que também contenham recursos, levando em consideração suas respectivas distâncias e orientação.

A Figura 3 exibe modelos para determinar as rosas de complementaridade. Nessa figura, à esquerda (A), há um modelo para células contendo apenas um recurso energético. Já na figura à direita (B) 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 complementaridade.

A Figura 4 mostra o mapa elaborado com as rosas de complementaridade determinadas para as células de distribuição hipotética de usinas proposta na Figura 2. Como esperado, as linhas em uma célula sempre encontram linhas idênticas em suas complementares equivalentes. Baseado nisso, é bastante intuitiva a identificação, na Figura 4, das células da rede hexagonal que possuem máxima complementaridade entre si.

Em suma, o método proposto por Rizzo *et al.* (2018), que estabelece a complementaridade espacial no tempo a partir das rosas de complementaridade para uma dada região, pode ser apontado em 5 etapas: [1] Delimitar a região para a qual será deter-

minada a complementaridade 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 complementaridade 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; [4] Determinar

a complementaridade 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 complementaridade de acordo com as distâncias; [5] Por fim, avaliar o resultado final obtido com a superposição das rosas de complementaridade nas respectivas células hexagonais e no mapa e, se necessário, sugerir alguma simplificação na representação, caso as rosas de complementaridade se tornem muito cheias e dificultem a leitura visual das informações ao longo do mapa.

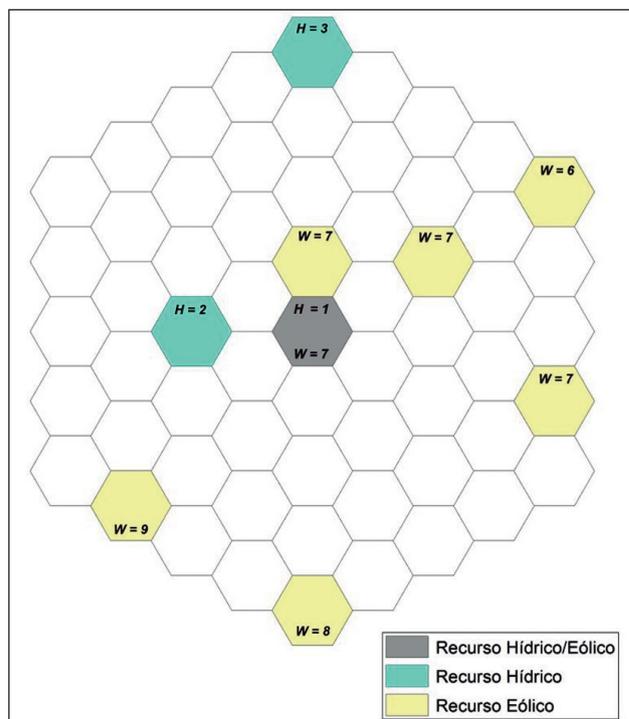


Figura 2 Malha hipotética de células hexagonais com usinas hidrelétricas (H) e parques eólicos (W), com indicação dos meses do ano com menor disponibilidade energética segundo Risso *et al.*(2018).

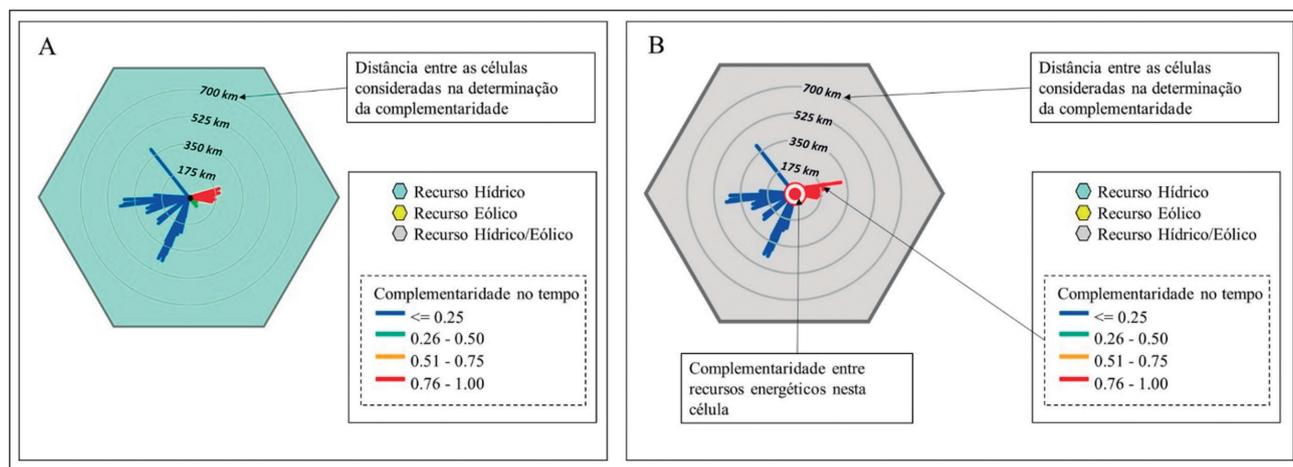


Figura 3 Modelos para as rosas de complementaridade: (A) com apenas um recurso energético por célula e (B) com dois ou mais recursos por célula, segundo Risso *et al.* (2018).

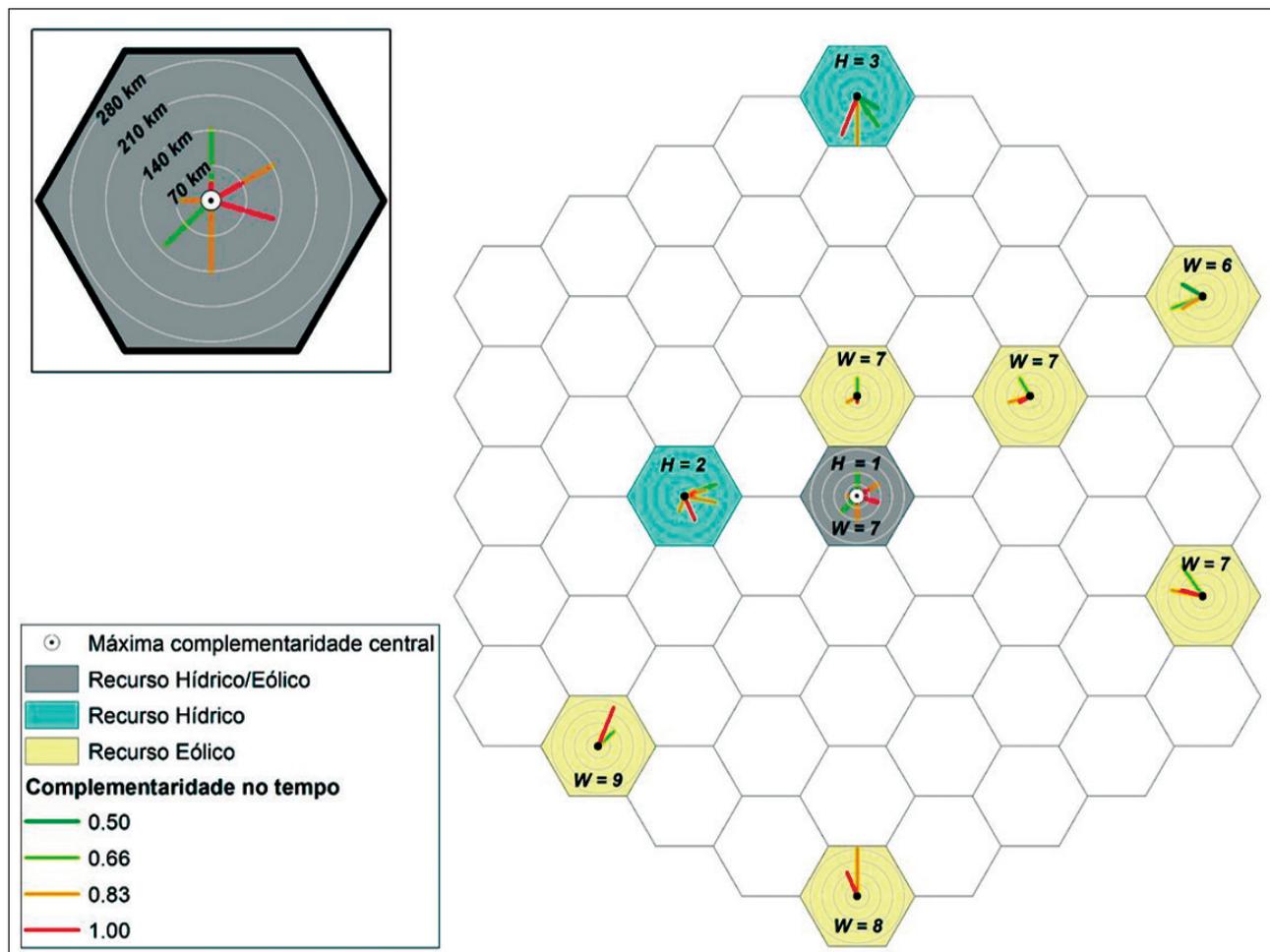


Figura 4 Mapa da complementaridade espacial no tempo para a rede de células hexagonais da Figura 3, segundo Risso *et al.* (2018).

### 3 Dados Espaciais

Nesse artigo, três bases de dados georreferenciados contendo informações de infraestrutura, recursos hídricos e eólicos foram utilizados para implementação das ferramentas para estimativa da complementaridade espacial no tempo.

Quanto à infraestrutura nacional de geração de energia elétrica, foram utilizadas 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.

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. As cores e valores (1 a 12) representados na legenda associada a base de células hexagonais na Figura 5 indicam os meses de máxima e mínima disponibilidade hídrica, para posterior estimativa da complementaridade temporal.

**Ponderadores de Distância para Parâmetros de Complementaridade  
Espacial entre Recursos Energéticos Renováveis no Estado do Rio Grande do Sul**  
*Alfonso Rizzo; Mariana Tosi Corrêa; Alexandre Beluco & Rita de Cássia M. Alves*

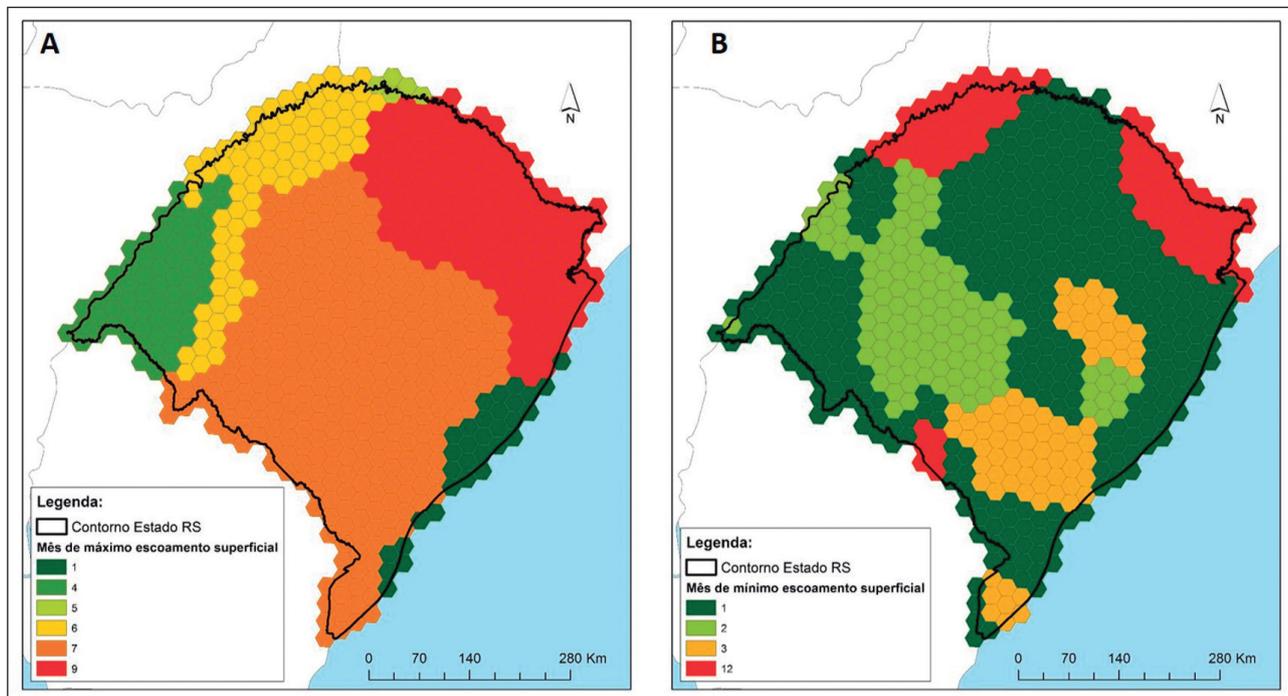


Figura 5 Meses de máxima (A) e mínima (B) disponibilidade hídrica.

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. Da mesma forma que na Figura 5 (disponibilidade hídrica), a Figura 6 apresenta os meses de máxima e mínima disponibilidade eólica, integrados à base de células hexagonais.

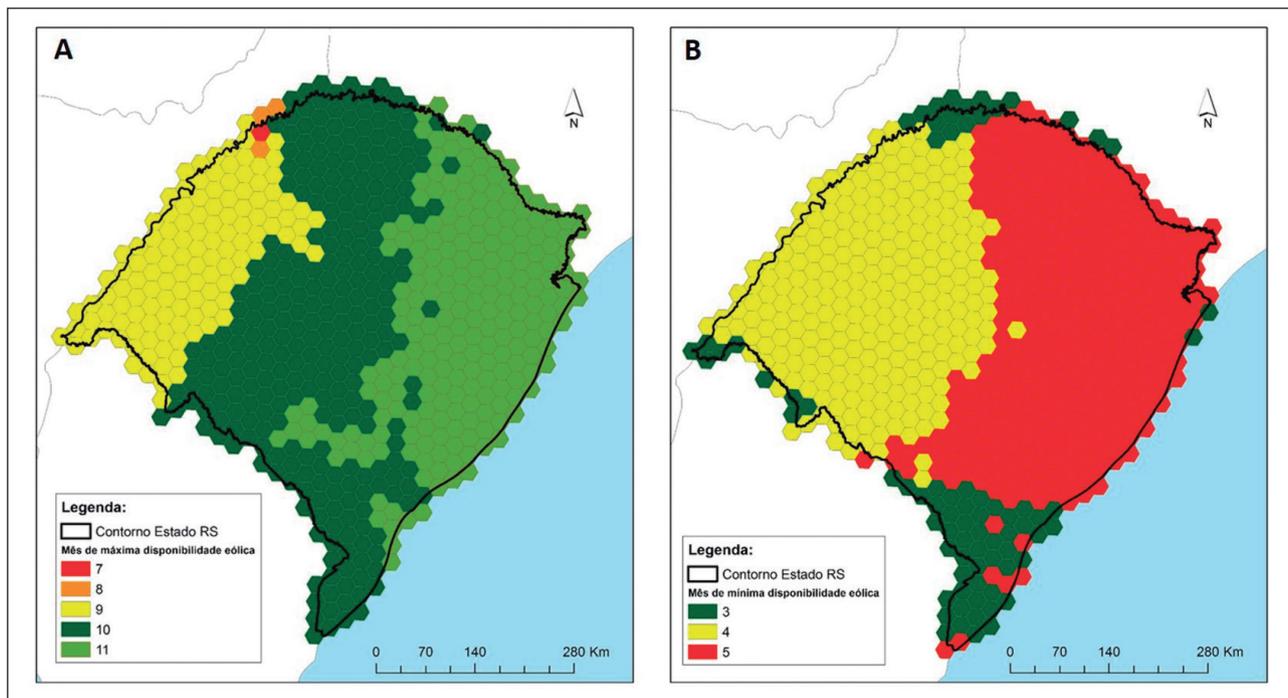


Figura 6 Meses de máxima (A) e mínima (B) disponibilidade eólica.

#### 4 Complementaridade entre Usinas Hidrelétricas e Parques Eólicos ao Longo do RS

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 visava auferir a complementaridade de todas as células que compreendem o estado, independentemente de possuírem recurso energético ou não. Os valores do índice de complementaridade, calculados conforme a Equação (1), distância e direção de cada célula podem ser visualizados na Figura 7.

A Figura 8 mostra o cálculo da direção da complementaridade, 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 complementaridade. Optou-se, assim, por utilizar apenas as células que contêm recursos energéticos, tanto hídricos como eólicos. A Figura 9 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 identifica-

dos 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 caudalosa, 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. Os mapas indicando as complementaridades máximas e mínimas no tempo, são mostrados nas Figuras 10 e 11. Ao analisar a complementaridade máxima para as células de recursos hídricos, as linhas vermelhas - indicativas de complementaridade máxima - estão presentes próximas à divisa norte do estado. Suas células complementares correspondentes, ou seja, células que contêm parques eólicos, situam-se na costa leste, além de poucas células ao sul do estado. A complementaridade mínima é verificada nas mesmas localidades da complementaridade máxima, sendo incluídas algumas células contendo recursos hídricos ao norte do Rio Grande do Sul e células contendo recursos eólicos ao sudeste do estado.

Como já era esperado, as células nas extremidades da região estudada exibem linhas de complementaridade, chamadas de pétalas, de comprimentos

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 angl	direção
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	0.28099
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	6.16809
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	0.26691
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 7 Tabela de atributos com os índices de complementaridade da malha que compreende o Estado do Rio Grande do Sul.

**Ponderadores de Distância para Parâmetros de Complementaridade  
Espacial entre Recursos Energéticos Renováveis no Estado do Rio Grande do Sul**  
Alfonso Rizzo; Mariana Tosi Corrêa; Alexandre Beluco & Rita de Cássia M. Alves

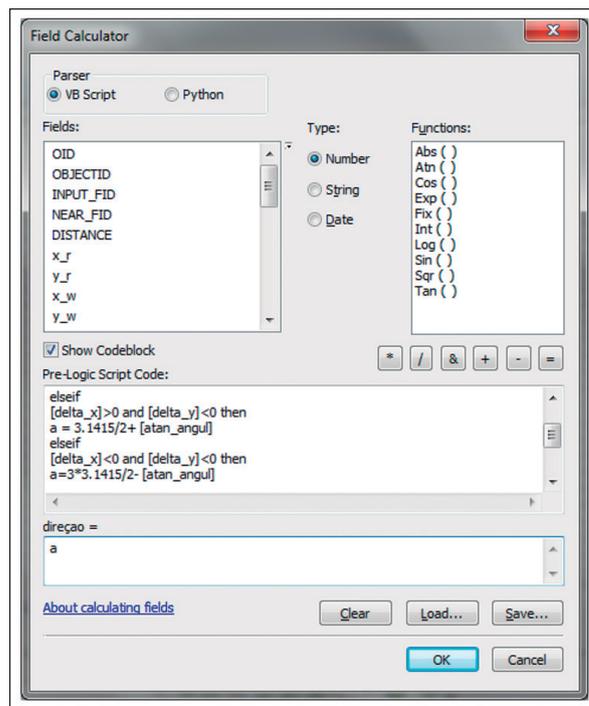


Figura 8 Operação condicional para o cálculo da direção da complementaridade.

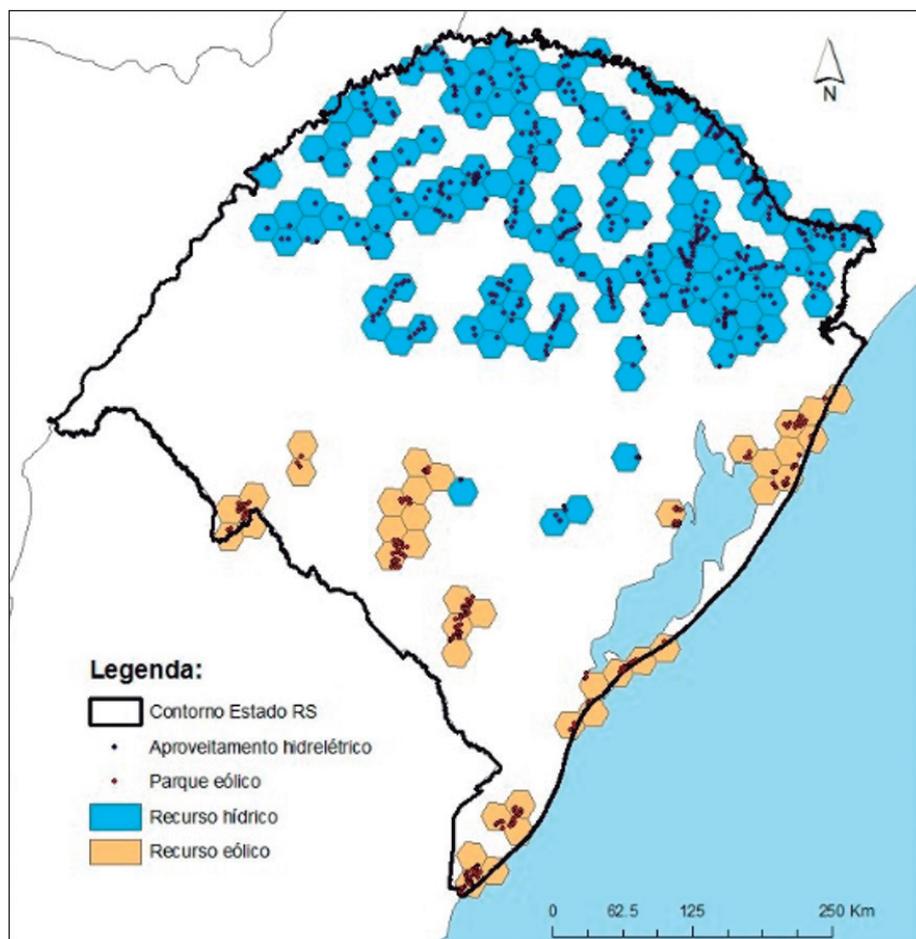


Figura 9 Rede de células hexagonais, indicando aproveitamentos hidrelétricos e parques eólicos no Estado do Rio Grande do Sul.

mais longos. Da mesma forma, as células centrais apresentam pétalas de comprimento intermediário. Ademais, grandes variações na intensidade da complementaridade são justificadas pelo fato de que os recursos analisados tendem a apresentar regimes intermitentes.

A Figura 12 mostra em detalhe a parte central do mapa de complementaridade mínima (Figura 10). Por possuir uma escala maior, permite uma melhor

observação das rosas de complementaridade. A célula que aparece em detalhe no canto superior direito, contendo recursos hídricos, apresenta pétalas de máxima complementaridade com distâncias na ordem de 400 a 700 km. Suas complementaridades correspondentes estão nas células eólicas localizadas na costa leste e no extremo sul do estado. Complementaridades intermediárias com parques eólicos ao sul e sudoeste completam as pétalas dessa rosa de complementaridade.

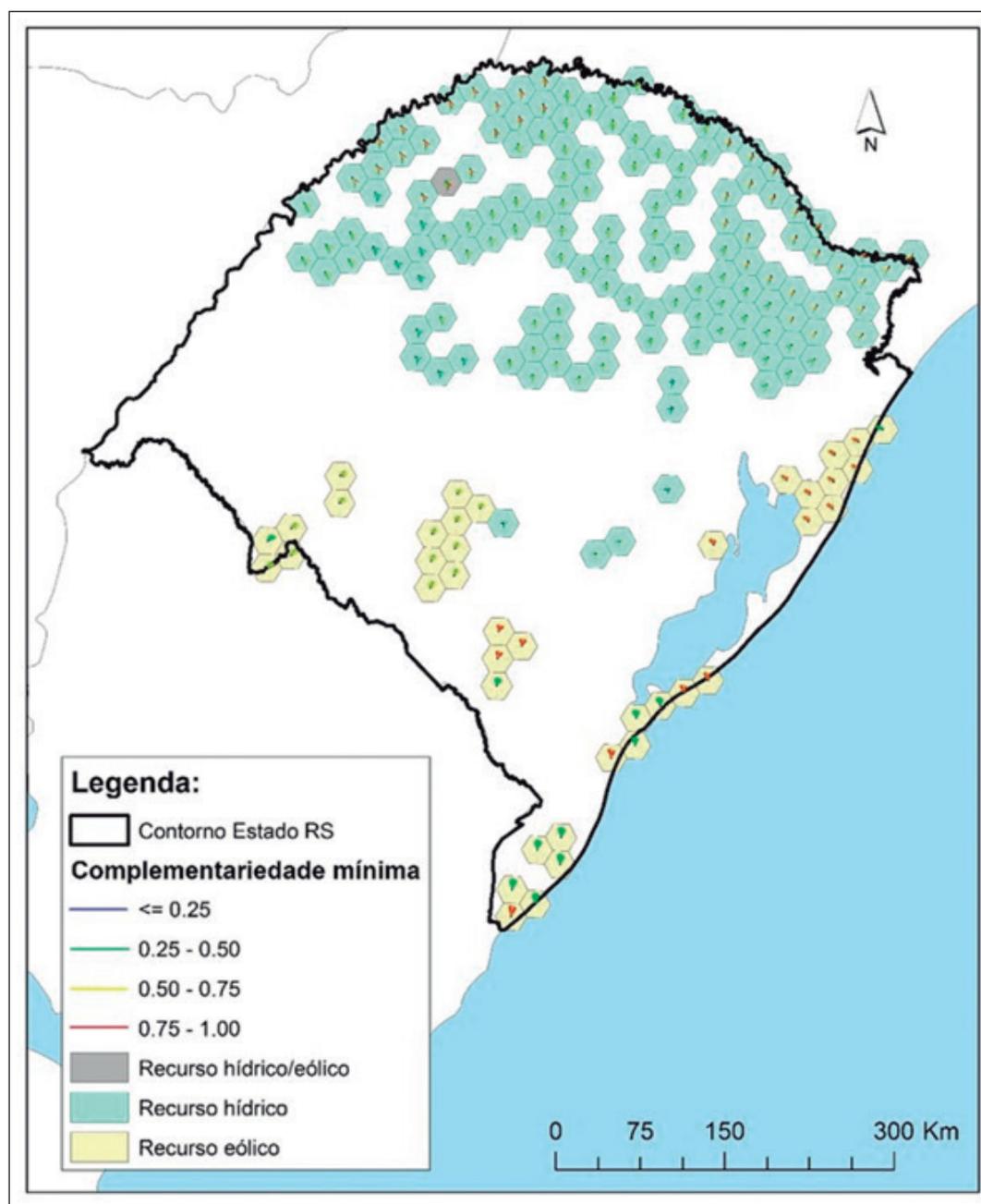


Figura 10 Mapa com as rosas de complementaridade mínima.

## 5 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 complementaridade, 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 complementaridade será atenuado a medida que a distância a partir do ponto conhecido aumenta.

As Figuras 13 e 14 apresentam funções linear e polinomial, respectivamente, que melhor descrevem o grau de decaimento da complementaridade em relação à distância. A figura 15 mostra as rosas de complementaridade aplicadas para as funções linear

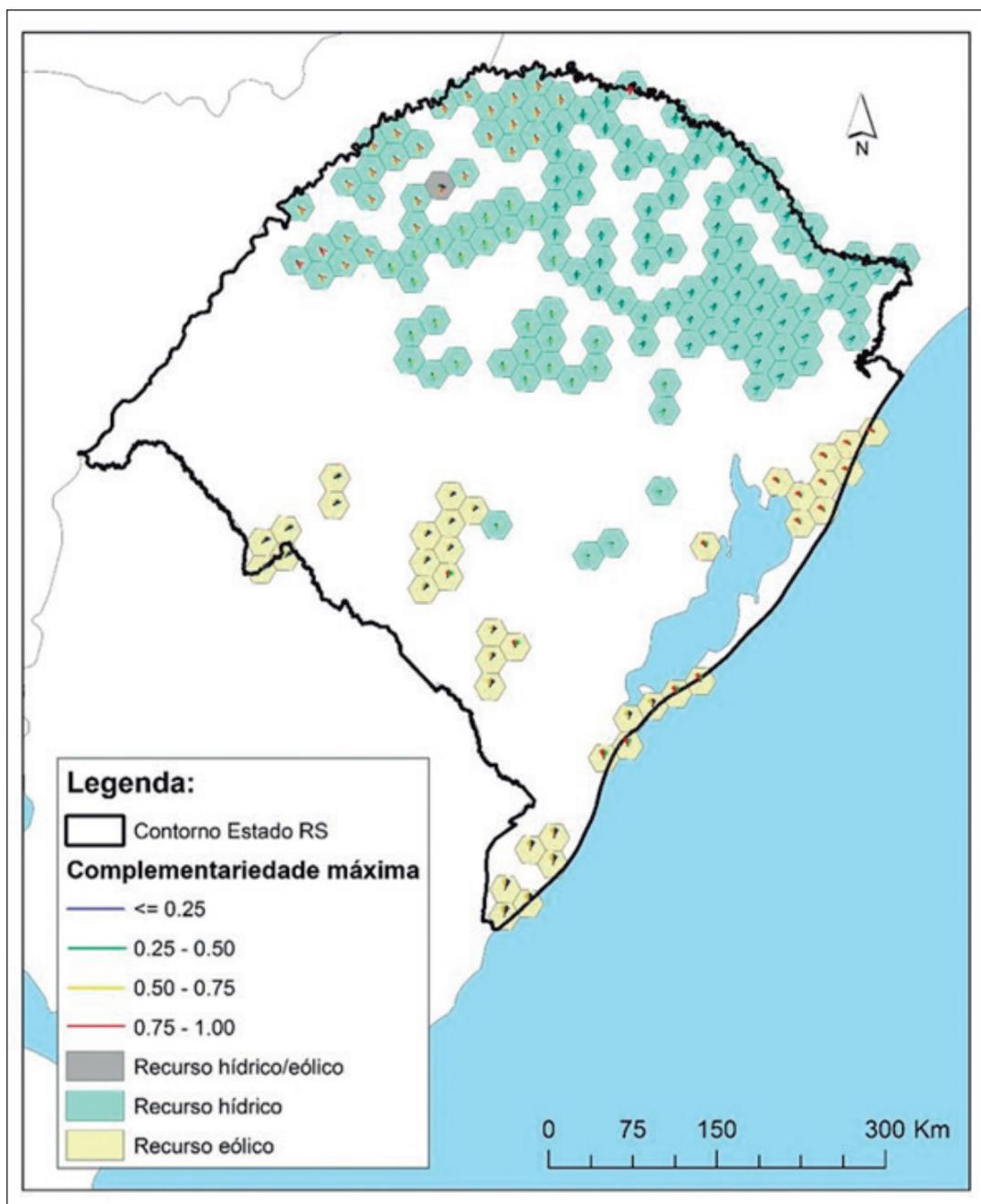


Figura 11 Mapa com as rosas de complementaridade máxima.

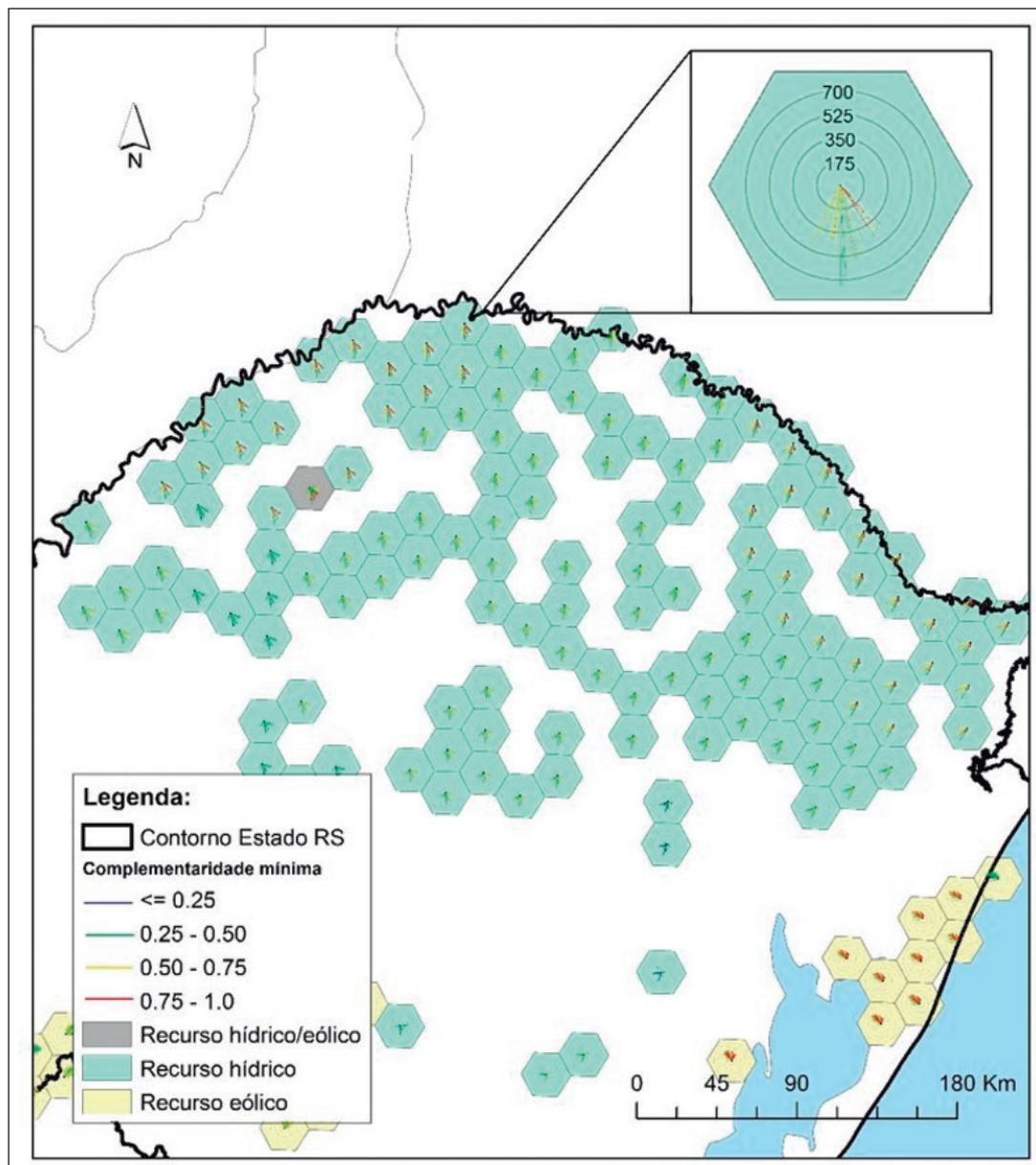


Figura 12 Detalhe da região central do mapa mostrado na Figura 10.

e polinomial, respectivamente. Como era esperado, o grau de complementaridade máxima diminuiu para ambos os casos, quando relacionados com a distância, já que se trata de funções de decaimento.

Seu estudo faz-se importante quando avaliado juntamente com outro componente da complementaridade espacial, a saber, a complementaridade de energia. A partir de funções ponderadoras, dados de carga energética envolvida e fatores de dimensionamento de redes elétricas, torna-se possível o mapeamento dos locais com maior potencial energético em uma dada região.

## 6 Conclusões

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

**Ponderadores de Distância para Parâmetros de Complementaridade Espacial entre Recursos Energéticos Renováveis no Estado do Rio Grande do Sul**  
 Alfonso Risso; Mariana Tosi Corrêa; Alexandre Beluco & Rita de Cássia M. Alves

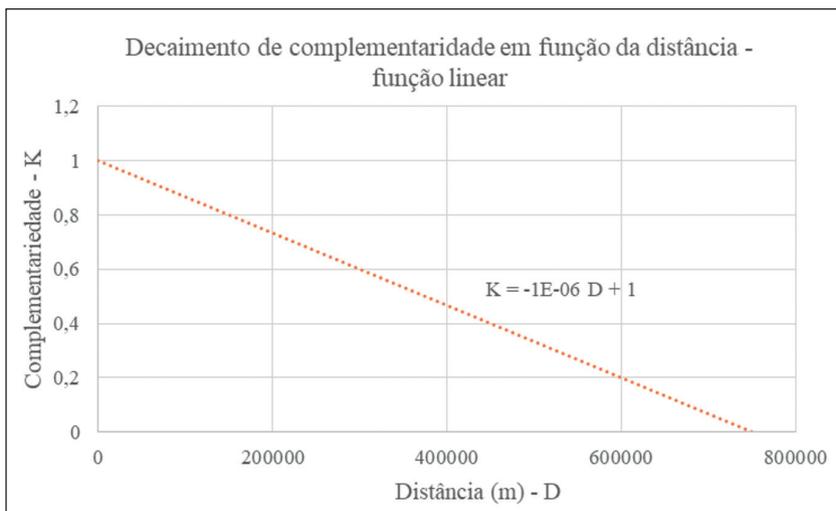


Figura 13 Função linear que descreve o decaimento da complementaridade.

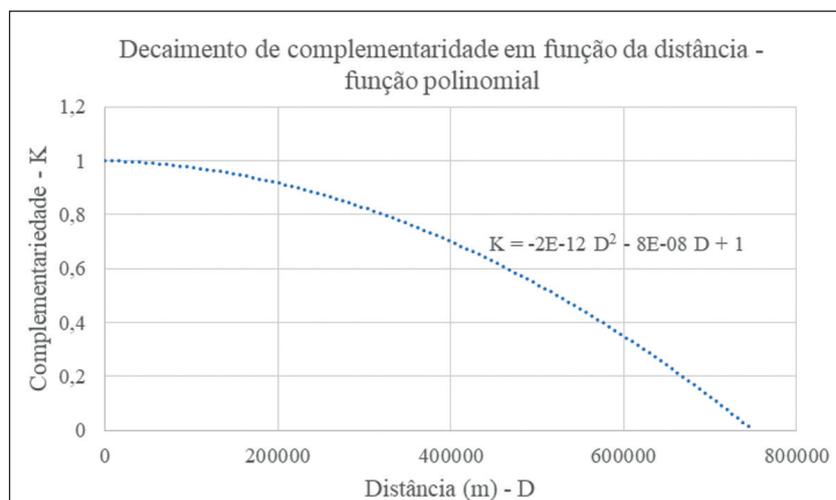


Figura 14 Função polinomial que descreve o decaimento da complementaridade.

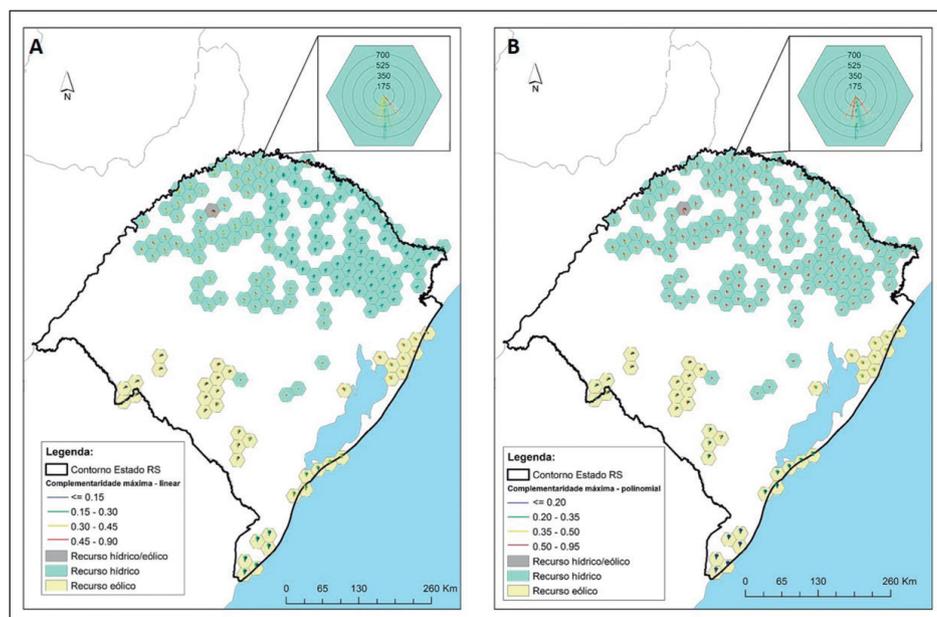


Figura 15 Ponderadores de distância linear (A), e polinomial (B).

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 complementaridade espacial no tempo entre recursos hídricos e eólicos. Como resultado principal, verificou-se que a complementaridade espacial no tempo atinge valor máximo entre as centrais hidrelétricas situadas na fronteira norte do estado e os parques eólicos que se encontram na costa leste.

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 complementaridade em função da distância. Sua utilidade, quando atrelada a complementaridade de energia, permite a avaliação e identificação de locais que possuam melhor desempenho energético a ponto de serem capazes de atenuar os impactos ambientais causados por tais empreendimentos.

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio de suas respectivas instituições ao trabalho de pesquisa desenvolvido na párea de energias renováveis e de geoprocessamento e que culminou entre outras coisas, na elaboração deste artigo. O terceiro autor agradece o apoio do CNPq ao seu trabalho como pesquisador (processo n. 312941/2017-0).

## 8 Referências

- ANEEL, 2018. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/ResumoEstadual.cfm>>. Acesso em: 10. nov. 2018.
- Beluco, A.; Souza, P.K. & Krenzinger, A. 2003. A complementaridade no tempo entre as energias hidrelétricas e fotovoltaica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(1): 99-109.
- Beluco, A. 2015. A concept of boundary of performance for analysis of hybrid systems based on complementary energy resources. In: Prasad, R.; Shivakumar, B.G. & Sharma, U.C. (org.). *Energy Science and Technology Series, vol.12: Energy Management*, Studium Press, p.459-483.
- Beluco, A.; Souza, P.K. & Krenzinger, A. 2008. A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies. *Renewable Energy*, 33: 2157-2165.
- Borba, E.M. & Brito, R.M. 2017. An index assessing the energetic complementarity in time between more than two energy resources. *Energy and Power Engineering*, 9(9): 505-514.
- CRU, 2018. Climatic Research Unit, da Universidade de East Anglia. Disponível em: <<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>>. Acesso em: 18. set. 2018.
- IBGE, 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- ISLSCP II, 2018. 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.
- Risso, A. & Beluco, A. 2017. Bases for a methodology assessing spatial complementarity in time. *Energy and Power Engineering*, 9: 527-540.
- Risso, A.; Beluco, A. & Alves, R.C.M. 2018. Complementarity roses evaluating spatial complementarity in time between energy resources. *Energies*, 11(7): 1918.
- SIGEL-ANNEEL, 2018. 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.