

REGIONALIZAÇÃO CLIMÁTICA

Relatório final

PROJETO PLANCLIMAC (MAC2/3.5b/244)

CPr. nº 7/DRAAC-SRAAC/2021



Março 2023



PLANCLIMAC

Interreg
Fondo Europeo de Desarrollo Regional



EUROPEAN UNION



MAC 2014-2020
Cooperación Territorial



Índice

1. Resumo.....	2
2. Enquadramento.....	2
2.1. Caracterização do Risco	2
2.2. Cenários climáticos	3
3. Metodologia	5
3.1. Seleção de Dados de base	8
4. Resultados	12
4.1. Calibração e validação.....	12
4.2. Caracterização do período de referência.....	18
3.2.1. Precipitação e temperatura	18
3.2.2. Vento e radiação solar.....	21
4.3. Projeções de Precipitação e Temperatura	23
3.3.1. Avaliação de extremos	26
3.3.2. Descrição das anomalias entre 2021 e 2050.....	30
3.3.3. Descrição das anomalias entre 2051 e 2080.....	41
3.3.4. Descrição das anomalias entre 2081 e 2100.....	49
4.4. Projeções da subida do nível médio do mar	58
4.5. Projeções do vento e radiação	59
5. Conclusões gerais.....	61
6. Servidor de mapas.....	62
7. Cronograma de tarefas e resultados alcançados	66
8. Cronograma	67
9. Referências	68

1. Resumo

O objetivo do presente estudo foi de dotar a Região Autónoma da Madeira das mais recentes projeções climáticas até ao final do século, atualizando a informação disponível de acordo com o sexto relatório do IPCC (AR6).

Para suportar os objetivos propostos selecionou-se o modelo global Canadian Earth System Model versão 5 (CanESM5), que foi desenvolvido para simular variabilidade climática histórica, para fazer projeções à escala centenária do clima futuro, e para produzir previsões sazonais e decadais. A seleção deste modelo teve por base: (i) a disponibilidade de dados diários; (ii) a caracterização dos mais recentes cenários climáticos SSPs; (iii) a aprovação e validação pelo CMIP6; e a (iv) descrição de um perfil vertical da atmosfera a várias altitudes (1000/850/500 hPa).

Para obter as projeções com maior resolução temporal e espacial na RAM foram implementados os avanços mais recentes de métodos estatísticos para grandes conjuntos de dados com estruturas espaço-temporais, explorando a estatística Bayesiana através do algoritmo integrado de aproximações de Laplace (INLA), em combinação com a utilização de dados ambientais derivados de imagens de satélite.

Foram feitas cerca de 46200 simulações que deram origem a 43800 mapas diários de precipitação e temperatura para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 entre 2021 e 2050, e 2400 mapas mensais entre 2051 e 2100, para os mesmos cenários e variáveis.

Os resultados evidenciam que a precipitação anual na ilha da Madeira demonstra uma tendência de diminuição em todos os horizontes temporais e cenários, onde se espera uma redução entre 24% a 65% até 2100. Em Porto Santo a tendência é semelhante.

As projeções também indicam uma tendência de agravamento dos fenómenos extremos de precipitação em ambos os cenários, esperando-se um aumento médio da sua frequência entre 22% e 49% até meados do século XXI, fazendo com que a conjugação entre a tendência de diminuição da precipitação com o aumento de fenómenos extremos acarrete um conjunto de desafios importantes na gestão dos recursos hídricos.

Relativamente à variação da temperatura média anual as projeções assinalam um aumento médio entre 3.1°C e 4.9°C até ao final do século, de acordo com os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 respetivamente. De salientar, que na generalidade dos casos é nas cotas mais altas que a anomalia da temperatura tende a ser superior. Já em Porto Santo a anomalia mantém-se consistente em ambos os cenários, evidenciando uma diferença de 2°C quando comparado com o período de referência, a partir de meados do século até 2100.

Finalmente foram desenvolvidas ferramentas informáticas de gestão e partilha de dados disponíveis no Observatório CLIMA-Madeira, com o objetivo de facilitar acesso à informação disponível para que a esta possa ser usada em estudos de impacto ou avaliações de riscos.

2. Enquadramento

2.1. Caracterização do Risco

Existem diferenças significativas na abordagem de vulnerabilidade e risco às alterações climáticas entre o quarto relatório do IPCC (AR4) e as recomendações que se seguiram a partir do quinto relatório (AR5). O IPCC assume que os impactos desencadeados por perigos climáticos requerem uma abordagem semelhante à adotada pela comunidade de risco, encorajando a comunidade da adaptação a integrar os conceitos já estabelecidos na gestão e avaliação de risco, reforçando os esforços para determinar as probabilidades de possíveis impactos em diversos horizontes temporais, e desta forma contribuir para uma integração dos dois domínios de investigação.

Nesta abordagem a combinação de perigo, vulnerabilidade e exposição define o risco de potenciais impactos. O perigo está relacionado com o sinal climático que origina os impactos físicos, que por sua vez podem ser caracterizados com diferentes níveis de vulnerabilidade. O conceito de exposição é introduzido como uma expressão da presença e relevância dos elementos expostos na área ou região de perigo, onde a probabilidade ou incerteza deve ser explicitamente abordada, ver Figura 1.

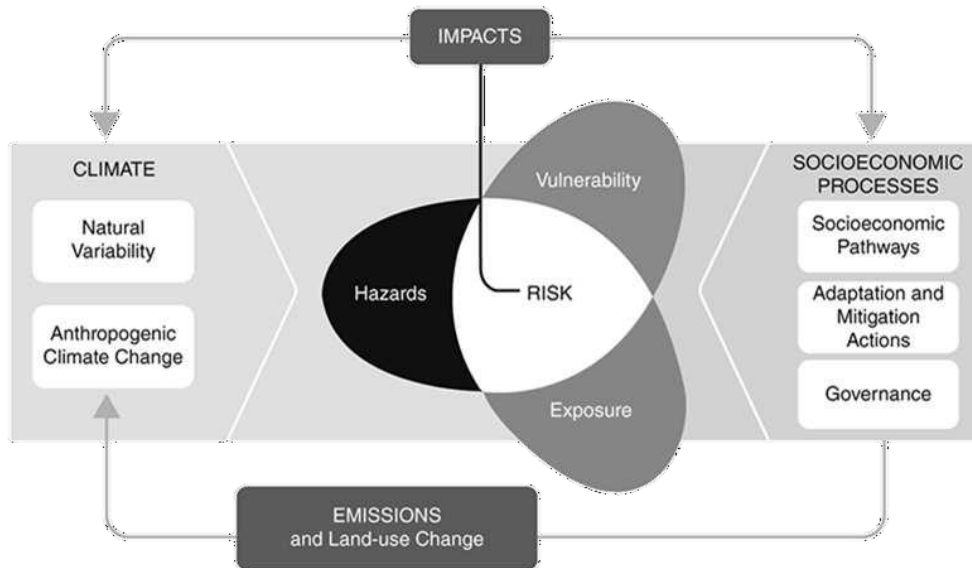


Figura 1 - Caracterização do risco associado aos impactos relacionados com os perigos climáticos. (fonte: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap1_FINAL-1.pdf)

Os cenários climáticos regionalizados e adaptados à Região Autónoma da Madeira (RAM) são essenciais para que esta abordagem de risco possa ser materializada, tirando proveito da evolução dos mais recentes “Earth System Models” (ESMs) e respetivos métodos de regionalização. Ao contrário dos cenários disponíveis na estratégia CLIMA-MADEIRA, que correspondem às séries A2 e B2 do HadCM3, os ESMs representam o estado da arte atual e derivam dos “Atmosphere-Ocean General Circulation Models” (AOGCMs) para incluir uma representação de vários ciclos biogeoquímicos, como aqueles envolvidos no ciclo do carbono, o ciclo do enxofre, ou ozono. Estes modelos fornecem as ferramentas mais abrangentes disponíveis para simular a resposta passada e futura do sistema climático a forças externas, dos quais os feedbacks biogeoquímicos desempenham um papel importante.

2.2. Cenários climáticos

Foi a partir do quinto relatório do IPCC (AR5) que os cenários climáticos foram atualizados para uma nova estrutura baseada no forçamento radiativo (RCPs - Representative Concentration Pathways). Os quatro forçamentos radiativos representam uma faixa de trajetórias de emissão de gases com efeito de estufa medidos em w/m^2 , indicando os valores que podem ser atingidos até ao final do século XXI (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). Os mais recentes resultados do programa CMIP (Couple Model Intrcomparison Project), que avalia e disponibiliza os dados climáticos que suportam os relatórios do IPCC, evoluíram para caracterizar os novos SSPs (Shared socioeconomic pathways) ao incluir nos novos cenários o efeito da diminuição das emissões ou a limitação do aquecimento global abaixo dos 2°C. No entanto, as projeções geradas pelos RCPs e os SSPs são semelhantes no que diz respeito à amplitude das condições de forçamento, embora estes últimos considerem em algumas das suas projeções que o acordo de Paris ainda possa ser alcançado.

Segundo o estudo publicado na revista “Earth System Dynamics” em março de 2021 por 56 autores (Claudia Tebaldi et al, 2021) que compara os cenários climáticos do CMIP 5 com os do CMIP 6, é possível concluir que: (i) alguns dos modelos mais recentes que deram origem aos cenários SSPs tendem a sobrestimar a taxa de aceleração do aquecimento global durante o período de referência/histórico, resultando numa maior amplitude de possíveis consequências na temperatura e precipitação global em 2100; (ii) a correção desse enviesamento demonstrou que a média e a amplitude dos modelos do CMIP 5, que deram origem aos RCPs 2.6, 4.5 e 8.5, e os modelos do CMIP 6, que representam os atuais SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, são semelhantes.

Para suportar as conclusões anteriores a Figura 2 demonstra que a comparação dos três cenários baseados em SSPs, que correspondem à atualização dos três RCPs da era CMIP5: SSP1-2,6, SSP2-4,5 e SSP5-8,5 podem ser comparados com os RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 para a variação da temperatura média global e variação da precipitação média global.

Para melhor interpretação da figura é possível descrever que: (i) os indicadores ao longo do eixo da direita das projeções de temperatura mostram intervalos limitados a 2100; (ii) as faixas de incerteza em todos os valores são calculadas para anomalias em relação à linha de base histórica (1986-2005, neste caso); e (iii) a linha das parcelas de temperatura global, que revela as anomalias em relação aos valores pré-industriais, aplica-se ao conjunto de meios e não às faixas de incerteza.

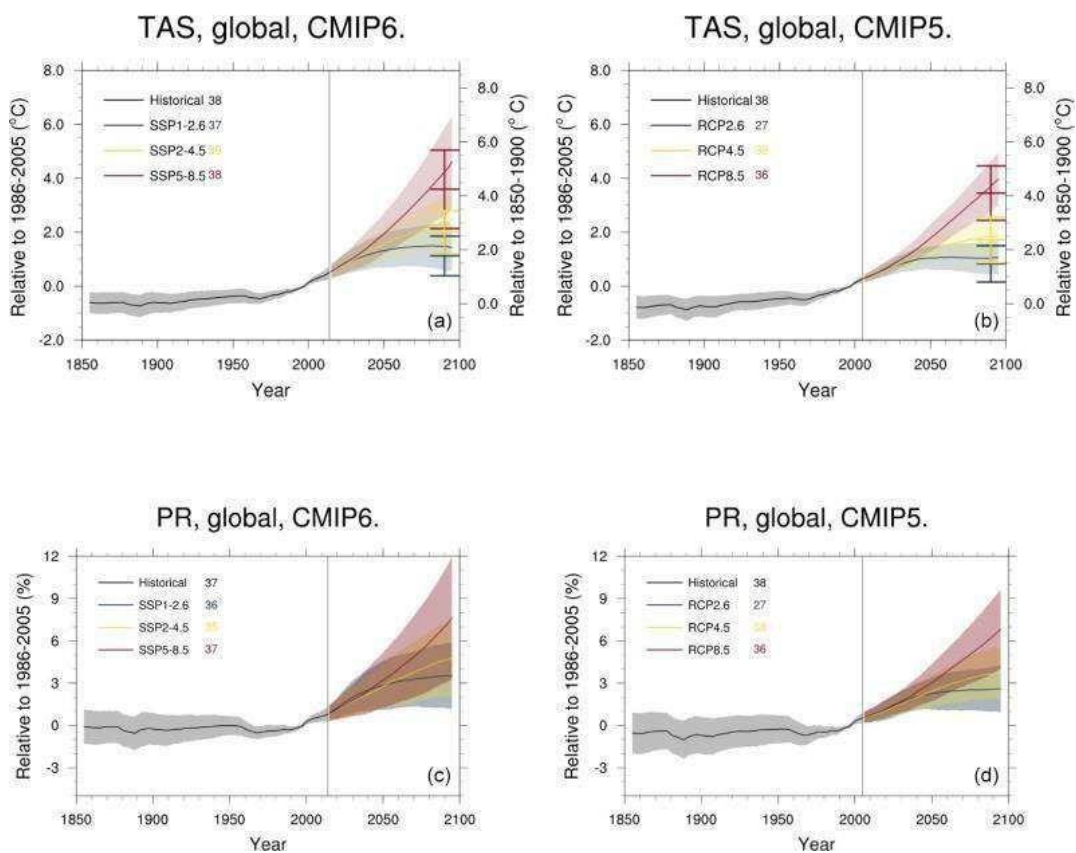


Figura 2 – Evolução comparativa da precipitação e temperatura média global segundo os modelos/cenários do CMIP 5 e CMIP 6 (TAS = temperatura; PR = precipitação) fonte: https://www.researchgate.net/publication/349712242_Climate_model_projections_from_the_Scenario_Model_Intercomparison_Project_ScenarioMIP_of_CMIP6

De notar que o mesmo estudo corrigiu num subgrupo de modelos o enviesamento relativo aos dados históricos, para os cenários SSPs, ajustando o ritmo de aceleração do aquecimento global

para efeitos de comparação, confirmando a ligação e compatibilidade entre os cenários do CMIP 5 e CMIP 6, tal como demonstra a Figura 3.

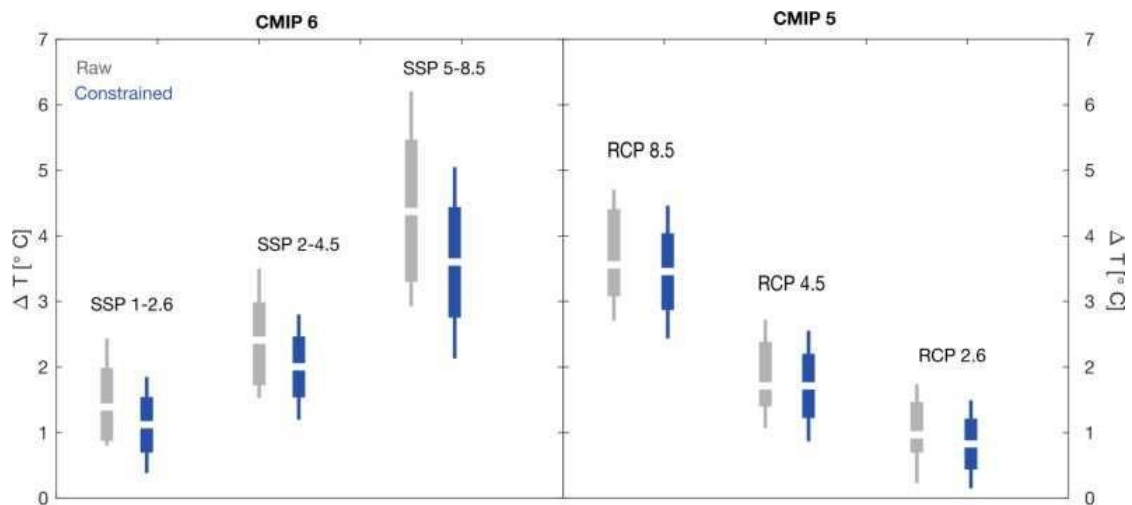


Figura 3 – Comparação da temperatura média global no final do século para os vários cenários do CMIP 5 e CMIP 6, após a correção do enviesamento dos novos SSPs.

Os resultados do CMIP 6 também vêm alertar para o facto de ser muito provável atingirmos um aumento da temperatura média global de 1,5°C já em 2026 e de 2,0°C em 2039 com base na trajetória atual de emissão de gases de efeito de estufa. Mesmo num cenário mais conservador, SSP2-4.5, ambos os limites poderão ser ultrapassados já em 2028 e 2046, respetivamente.

3. Metodologia

A regionalização climática é o processo que permite a representação de informação com maior resolução espacial e temporal, geralmente derivada de Modelos de Circulação Global ou Regional. Este processo pode ser bastante complexo e permanece em grande parte dentro do domínio da investigação. Embora os cenários climáticos sejam em muitos contextos obrigatórios nos estudos de impacto, o acesso às projeções climáticas de alta resolução não estão geralmente disponíveis para sistemas insulares, como é o caso da RAM. Além disso, a representação de extremos, frequentemente responsáveis por cheias e secas de alto impacto, ainda são um desafio reconhecido pelo IPCC, especialmente quando o clima é apenas um dos componentes incluídos numa vasta gama de variáveis dos modelos de impacto.

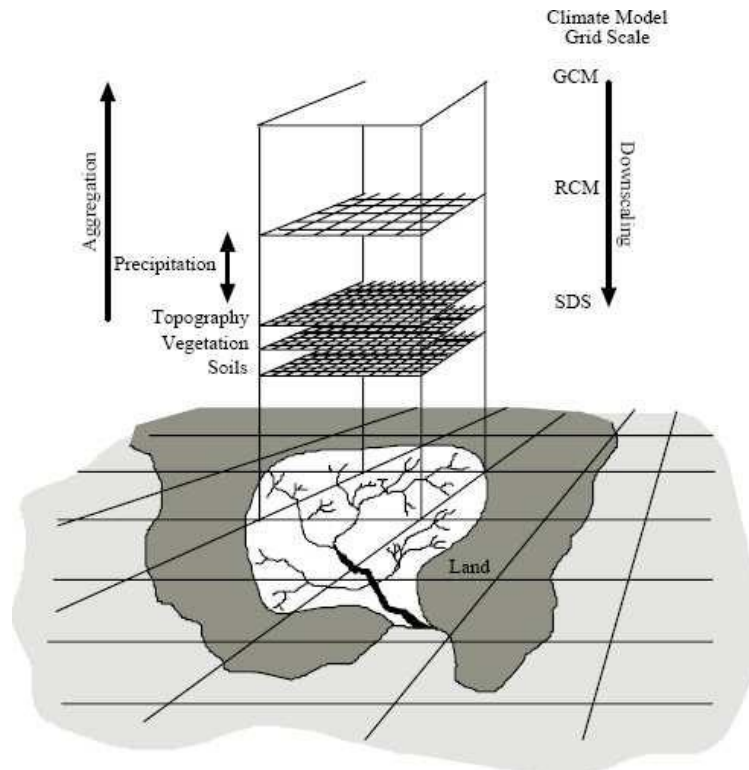


Figura 4 – Representação dos vários processos de regionalização. Modelos de Circulação Global (GCM) -> Modelo Regional (RCM) -> Modelo estatístico (SDS)

Para superar os desafios da modelação espacial utilizando métodos estatísticos, Rue e Tjelmeland propuseram em 2002 a aproximação de um campo gaussiano contínuo utilizando cadeias gaussianas aleatórias de Markov (GMRFs), que é um modelo gráfico probabilístico amplamente utilizado em estatísticas espaciais para simular dependências sobre a sua estrutura (Rue e Tjelmeland, 2002). Embora promissor, este método tinha limitações significativas. Foi apenas em 2011 que Lindgren, Rue e Lindström fizeram o verdadeiro avanço ao propor uma equação diferencial parcial estocástica (SPDE) para representar um processo Gaussiano (GF) com uma função de correlação Matérn. Esta abordagem é computacionalmente menos intensiva podendo representar o domínio espacial através de uma matriz de precisão dispersa (Lindgren et al., 2011). O projeto R-INLA, disponibilizado como uma biblioteca R, compila as ferramentas necessárias para aplicar o método integrado de aproximação de Laplace (INLA) para aproximar a inferência Bayesiana, concentrando-se em modelos que podem ser expressos como processos aleatórios Gaussianos de Markov. Esta abordagem está a tornar-se numa alternativa a outros métodos como a cadeia de Markov Monte Carlo, com claros benefícios na velocidade de cálculo (Rue et al., 2018).

Para materializar os objetivos de obter projeções climáticas com maior resolução temporal e espacial na RAM foram implementados os avanços mais recentes de métodos estatísticos para grandes conjuntos de dados com estruturas espaço-temporais, explorando a estatística Bayesiana através do algoritmo integrado de aproximações de Laplace (INLA), em combinação com a utilização de dados ambientais derivados de imagens de satélite (Garrett, P. et al., 2022). O processo de simulação resulta da combinação de várias camadas de informação espacial e temporal, calculadas para os nós de uma grelha (Figura 5) que será posteriormente usada para estimar as variáveis de temperatura e precipitação numa grelha regular com 1km de resolução (Figura 6) para a ilha da Madeira e Porto Santo.

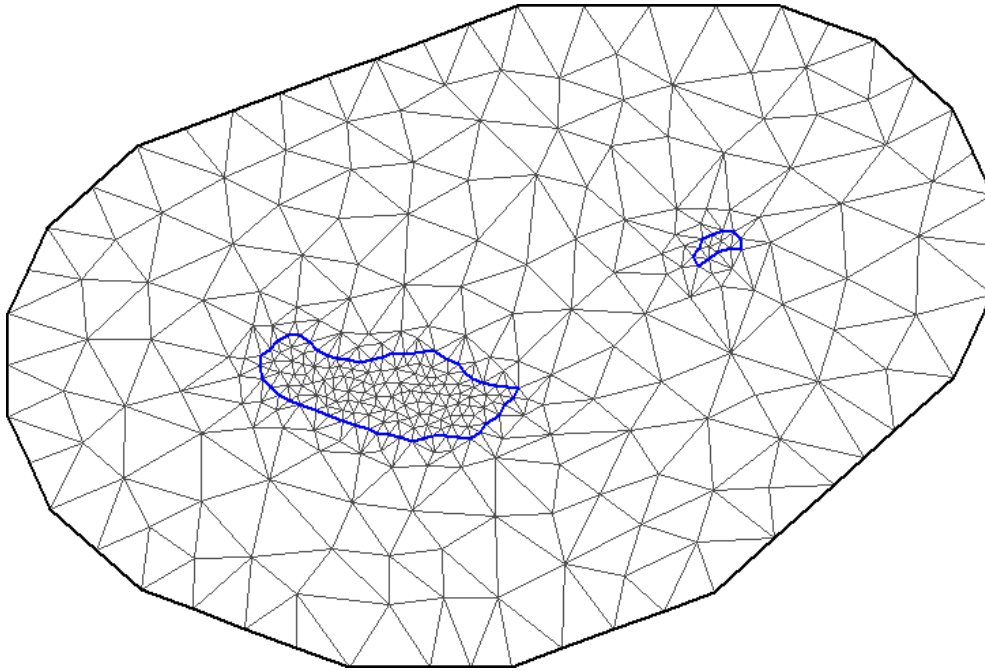


Figura 5 – Rede triangular (Mesh) com a representação do domínio interior e exterior do processo de simulação.

A metodologia de regionalização climática proposta está estruturada em três fases: (i) avaliação e seleção do(s) modelo(s) mais adequado(s) para a caracterização da circulação geral da atmosfera em cenários de alterações climáticas; (ii) calibração e validação do modelo com recurso a: dados das estações meteorológicas; informação sobre a circulação geral da atmosfera usando as reanálises; e integração de efeitos locais como o uso do solo e a orografia; (iii) substituição dos dados das reanálises do modelo pelas variáveis correspondentes às projeções de médio e longo prazo, para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 entre 2021 e 2100.

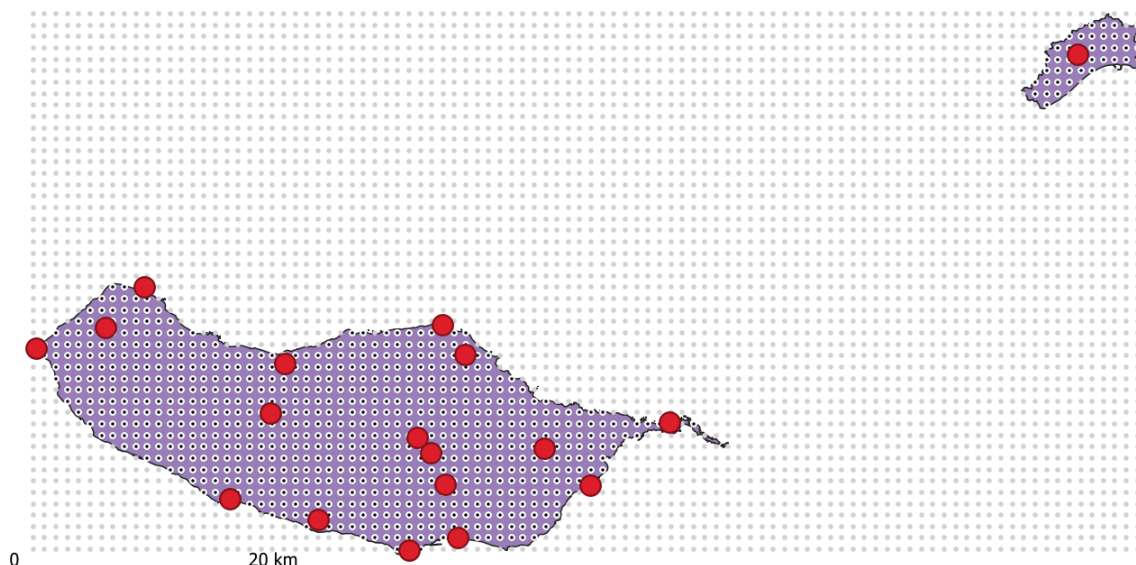


Figura 6 – Grelha regular com 1km de resolução para a estimativa da temperatura e precipitação e respetiva localização das estações meteorológicas do IPMA.

A fase de calibração e validação para o período de referência ou histórico é das mais complicadas e morosas de todo o processo. Por este motivo é importante avaliar os mais recentes produtos de reanálises, como o ECMWF ERA5 (Figura 7), atualizado em 2021, produzido pelo Copernicus Climate Change Service (C3S), ou as mais recentes reanálises NCEP/DOE produzidas pela NOAA. Estes produtos têm uma cobertura global horária desde os anos 50, para variáveis como a temperatura do ar, vento, precipitação, temperatura da superfície do mar, altura geopotencial, entre outras. Estes dados são geralmente utilizados pela avaliação anual da Organização Meteorológica Mundial sobre o Estado do Clima, e apresentados na Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC).

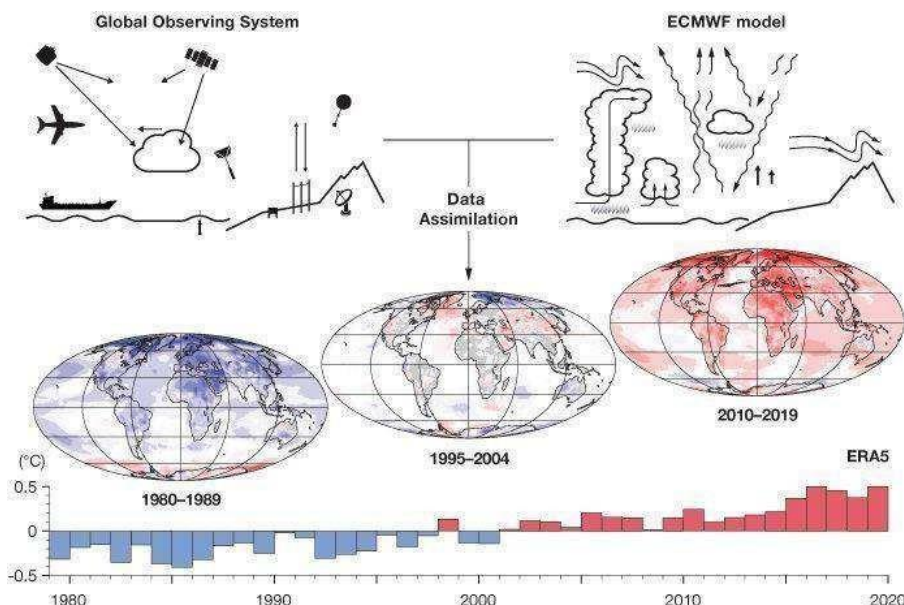


Figura 7 – Estrutura de simulação e recolha de dados da reanálise ERA 5.

3.1. Seleção de Dados de base

O processo de regionalização climática e de construção dos respetivos cenários são determinados por três conjuntos de dados essenciais: observações das estações meteorológicas; a caracterização do estado da atmosfera para o período das observações; e finalmente a caracterização do estado da atmosfera de acordo com as projeções.

Para a caracterização do clima da RAM foram utilizados os dados diários das estações meteorológicas descritos na Tabela 1, referentes ao período entre 2010 e 2014.

Tabela 1 – Descrição das estações meteorológicas

Nº Estação	Nome estação	Latitude	Longitude	Altitude
521	Santa Catarina / Aeroporto	32.69	-16.78	49
522	Funchal / Observatório	32.65	-16.89	58
524	Porto Santo / Aeroporto	33.08	-16.35	78
960	Santana / S. Jorge	32.83	-16.91	257
965	Santana	32.81	-16.89	380
967	São Vicente	32.80	-17.05	97

970	Bica da Cana	32.76	-17.06	1560
971	Funchal / Lido	32.64	-16.94	25
973	Areeiro	32.72	-16.92	1590
975	Santo da Serra	32.73	-16.82	660
978	Caniçal / Ponta de S. Lourenço	32.75	-16.71	133
980	Achadas da Cruz / Lombo da Terça	32.83	-17.20	931
984	Quinta Grande	32.66	-17.01	580
986	Ponta do Sol / Lugar de Baixo	32.68	-17.09	40
990	Calheta / Ponta do Pargo	32.81	-17.26	298

O período escolhido para o processo de calibração e validação do modelo foi o de 2010 a 2014, por ser caracterizado por uma maior consistência na recolha de dados em todas as estações meteorológicas selecionadas.

Para caracterizar o estado da atmosfera entre 2010 e 2014 foram avaliadas as reanálises ERA 5 e NCEP/DOE de acordo com as variáveis descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis analisadas para a caracterização do estado da atmosfera com base nos produtos de reanálises.

Nº.	Identificador	Nome da variável
1	mslp	Mean sea level pressure
2	p1_f	1000 hPa Wind speed
3	p1_u	1000 hPa Zonal wind component
4	p1_v	1000 hPa Meridional wind component
5	p1_z	1000 hPa Relative vorticity of true wind
6	p1th	1000 hPa Wind direction
7	p1zh	1000 hPa Divergence of true wind
8	p5_f	500 hPa Wind speed
9	p5_u	500 hPa Zonal wind component
10	p5_v	500 hPa Meridional wind component
11	p5_z	500 hPa Relative vorticity of true wind
12	p5th	500 hPa Wind direction
13	p5zh	500 hPa Divergence of true wind
14	p8_f	850 hPa Wind Speed
15	p8_u	850 hPa Zonal wind component
16	p8_v	850 hPa Meridional wind component
17	p8_z	850 hPa Relative vorticity of true wind
18	p8th	850 hPa Wind direction

19	p8zh	850 hPa Divergence of true wind
20	p500	500 hPa Geopotential
21	p850	850 hPa Geopotential
22	prcp	Total precipitation
23	s500	500 hPa Specific humidity
24	s850	850 hPa Specific humidity
25	shum	1000 hPa Specific humidity
26	temp	Air temperature at 2 m

Para permitir uma melhor caracterização do período de referência, todas as variáveis foram normalizadas em relação à média entre 1981 e 2010, sendo esta a nossa base comparativa para o cálculo das anomalias das projeções.

Finalmente, para caracterizar as projeções foi selecionado o modelo CanESM5 com base nos seguintes critérios: (i) Disponibilidade de dados diários; (ii) caracterização dos mais recentes cenários climáticos SSPs; (iii) aprovação e validação pelo CMIP6; e (iv) descrição de um perfil vertical da atmosfera a várias altitudes (1000/850/500 hPa).

O Canadian Earth System Model versão 5 (CanESM5) é um modelo global desenvolvido para simular variabilidade climática histórica, para fazer projeções à escala centenária do clima futuro, e para produzir previsões sazonais e decadais.

O CanESM5 é composto por: um modelo de atmosfera tridimensional com 2,8° de resolução; modelos de circulação geral oceânica; um modelo de gelo marinho; um esquema de superfície terrestre; e modelos explícitos do ciclo do carbono terrestre e oceânico. O CanESM5 apresenta uma resolução relativamente grosseira e um elevado rendimento, o que facilita a produção de grandes conjuntos de dados à escala global, passíveis de serem regionalizados para domínios mais restritos como é o caso da RAM.

À semelhança do pré-processamento feito com os dados das reanálises, as variáveis do modelo CanESM5 foram normalizadas de acordo com a média do período de referência, ou seja, entre 1981 e 2010. Ambos os modelos têm as mesmas variáveis com a mesma resolução espacial, garantindo a compatibilidade entre o processo de calibração e a simulação dos cenários climáticos. A Figura 8 representa para a temperatura (tas (K)), precipitação (pr (mm/dia)), e pressão atmosférica à superfície (psl (hpa)) os resultados globais e as respetivas anomalias criados a partir de dados observados.

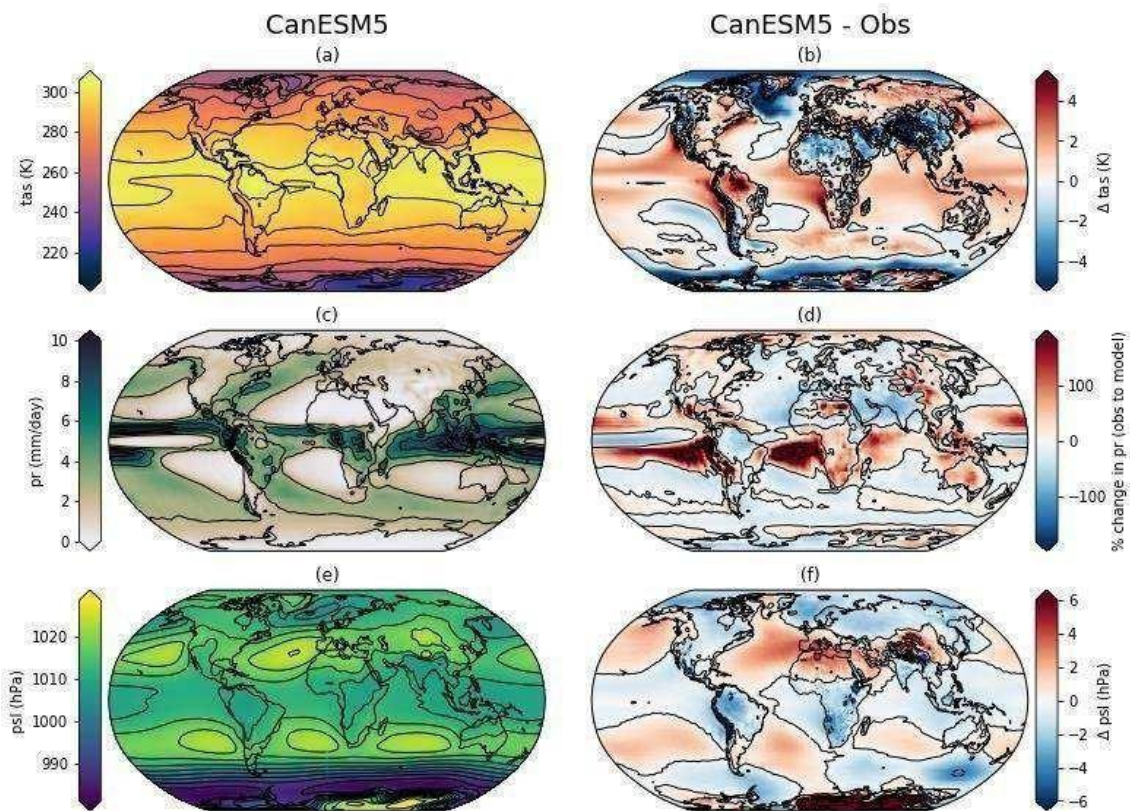


Figura 8 – Comparação entre a temperatura (tas (K)), precipitação (pr (mm/dia)), e pressão atmosférica à superfície (psl (hpa)) do modelo CanESM5 (a), e a respectiva anomalia (b) com as simulações globais com base em dados observados. Fonte: Swart, Neil C., et al. 2019.

Para além das variáveis meteorológicas foram igualmente testadas as características físicas da região apresentadas na Tabela 3, espacializadas para a grelha regular apresentada na Figura 6.

Tabela 3 – Variáveis físicas da RAM analisadas no processo de regionalização climática.

Nº.	Variável
27	Altitude
28	Áreas Urbanas
29	Área florestal
30	Parques naturais
31	Face norte
32	Latitude e Longitude

4. Resultados

4.1. Calibração e validação

A precipitação e temperatura têm uma abordagem diferenciada dada a tipologia dos dados que caracteriza cada uma das variáveis. A temperatura é normalmente descrita com uma função *gaussiana*, enquanto a precipitação pode ser caracterizada por dois processos distintos: (i) o primeiro caracteriza a probabilidade de chover através de uma função denominada por *zero-inflated-binomial*, e (ii) o segundo processo caracteriza a quantidade de precipitação através de uma função densidade probabilidade do tipo *Gamma*, com o objetivo de acomodar um maior conjunto de dados com valores relativamente baixos, ao mesmo tempo que caracteriza situações mais extremas, mas menos frequentes.

Desta forma a probabilidade de chover $P(x_{it})$ e a quantidade de precipitação $logit(x_{it})$ numa determinada localização x_i é descrita pelas seguintes estruturas:

$$P(x_{it}) \sim \text{ZeroinflatedBinomial}(N_{it}, P(x_{it})),$$

$$P(x_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times var_1 + \dots + \beta_n \times var_n + \omega(x_{it})$$

$$x_{it} \sim \text{Gamma}(N_{it}, x_{it}),$$

$$logit(x_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \times var_1 + \dots + \beta_n \times var_n + \omega(x_{it})$$

onde os valores de β e var_i correspondem à componente fixa do modelo descrita pelas variáveis escolhidas, e $\omega(x_{it})$ representa a componente espaço-temporal num campo aleatório com média zero num processo Gaussiano através da seguinte equação de Matern:

$$cov(\omega(x_i), \omega(x_j)) = \frac{\sigma^2}{2^{v-1}\Gamma(v)} (k ||x_i - x_j ||)^v k_v(k ||x_i - x_j ||)$$

A escolha das variáveis foi feita através do método de “*deviance information criterion (DIC)*” que representa uma generalização dos processos de modelação hierárquica do critério de informação de Akaike. Este método é particularmente útil na seleção de modelos Bayesianos como é o caso da abordagem escolhida para este estudo.

Para o modelo de precipitação as variáveis seleccionadas tendo em conta a Tabela 2 e Tabela 3 foram: (i) *Mean sea level pressure (mslp)*; (ii) *500 hPa Geopotential (p500)*; (iii) *Total precipitation (prcp)*; (iv) *500, 850, 1000 hPa Specific humidity (s500, s850 e shum)*; e (v) *Altitude*.

No caso do modelo de temperatura as variáveis seleccionadas foram: (i) *Temperature (temp)*; (ii) *850 hPa Geopotential (p850)*; (iii) *Mean sea level pressure (mslp)*; e (iv) *Altitude*.

No processo de validação foram simuladas a temperatura e precipitação diária entre 2010 e 2014 com base nos dados das estações meteorológicas deste mesmo período, mas apenas para os meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro. Os dados observados dos restantes meses foram posteriormente usados para efeitos de validação que compara as simulações e as observações, onde os dados diários simulados foram extraídos para cada uma das estações meteorológicas e agregados à escala mensal. A Figura 9 e Figura 10 apresentam os resultados da comparação de ambos os modelos (temperatura e precipitação) com os dados observados nas estações meteorológicas descritas na Figura 6, agregados à escala mensal.

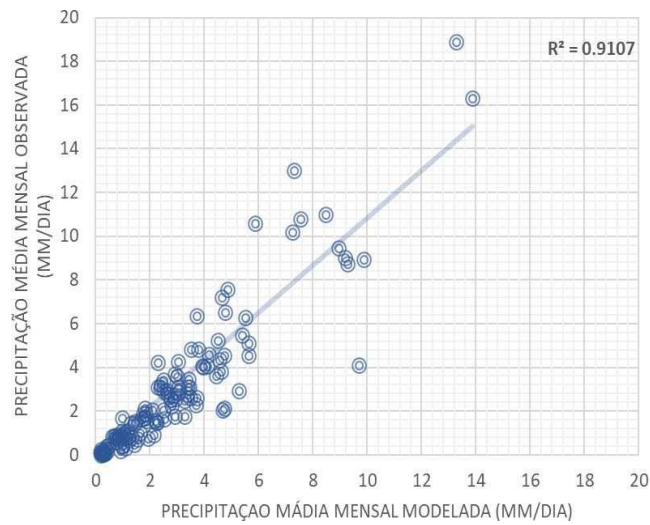


Figura 9 – Comparação entre a precipitação média mensal observada e modelada para o período entre 2010 e 2014.

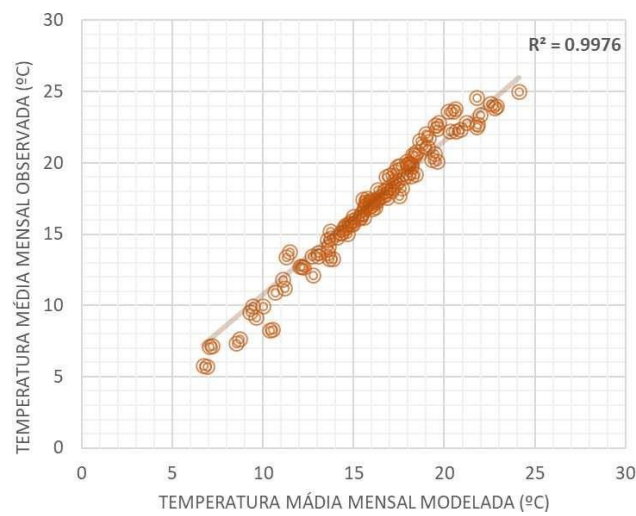
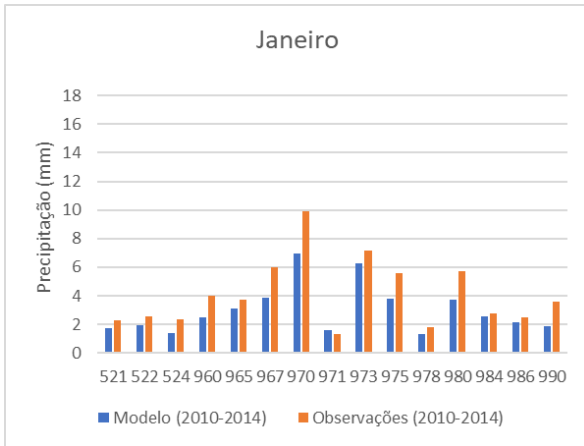


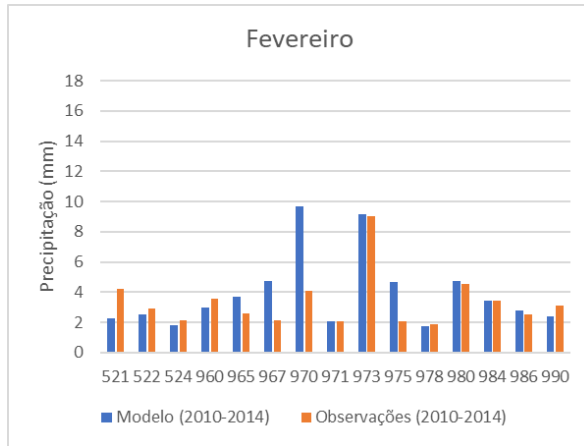
Figura 10 - Comparação entre a temperatura média mensal observada e modelada para o período entre 2010 e 2014.

As figuras seguintes descrevem com maior detalhe a agregação dos dados simulados e observados de precipitação média diária por mês, para cada uma das estações meteorológicas identificadas na Tabela 1.

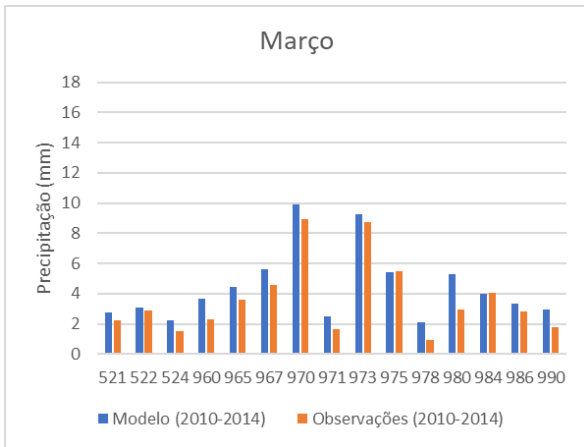
(a)



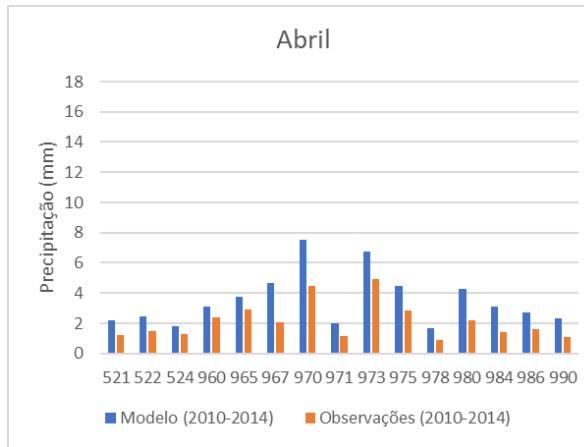
(b)



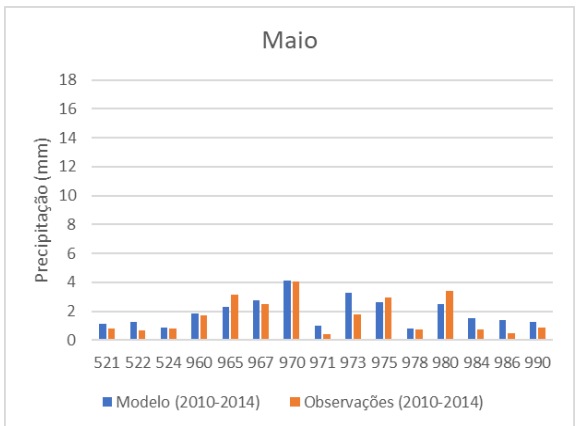
(c)



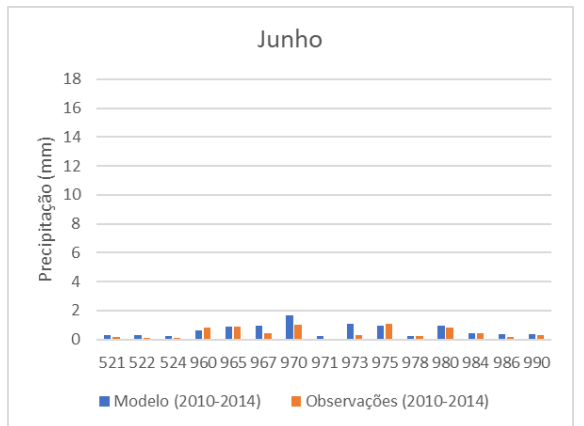
(d)



(e)



(f)



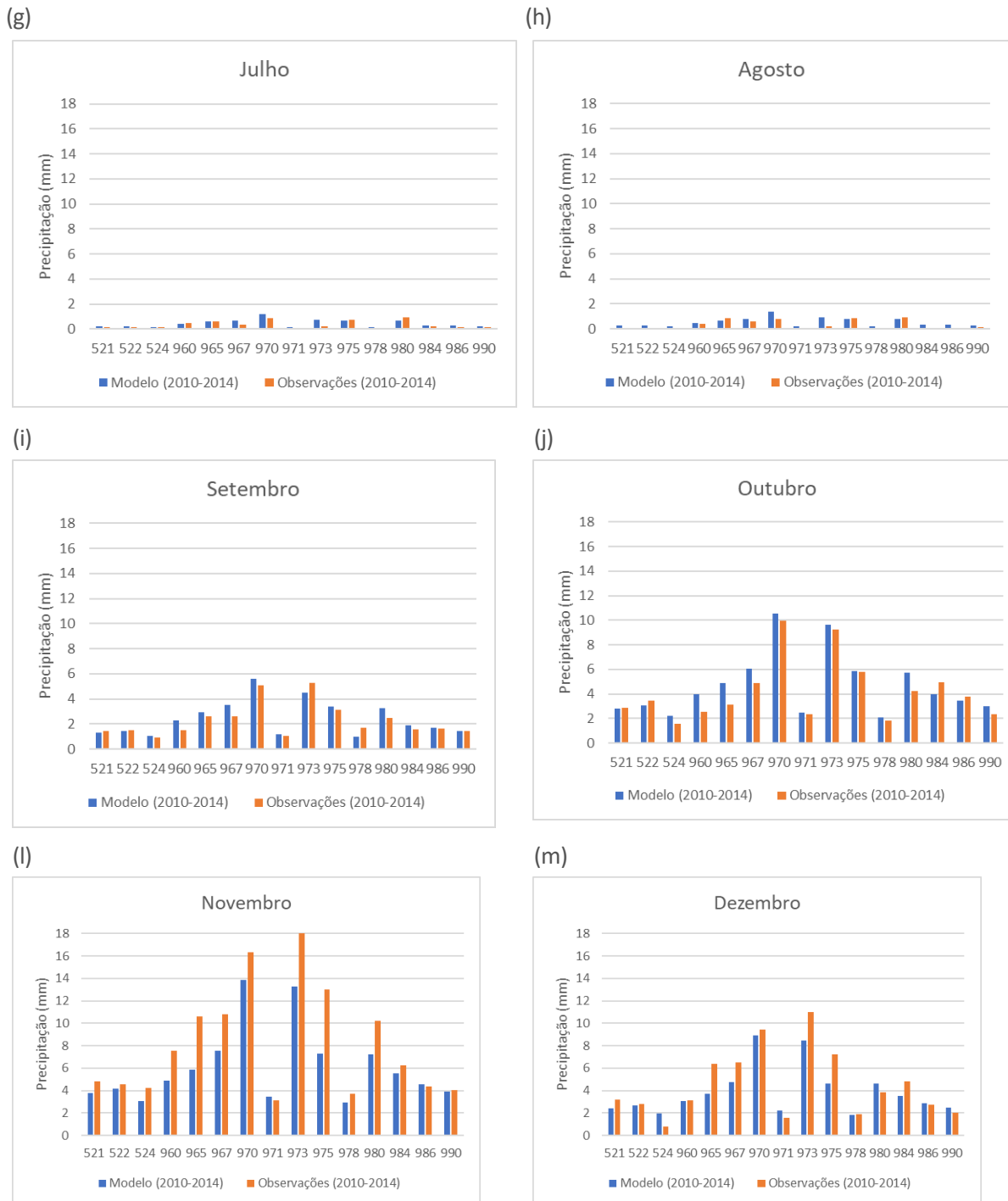
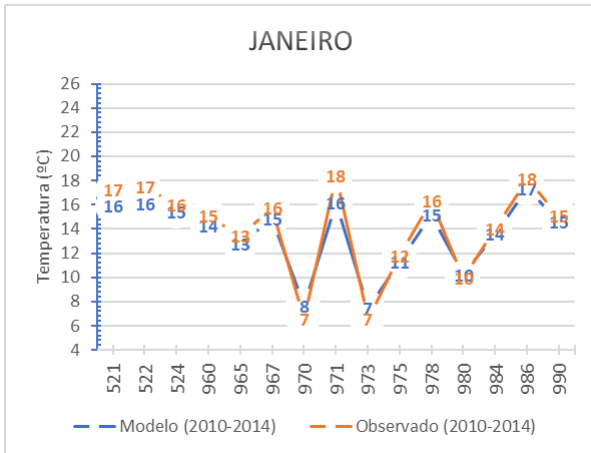


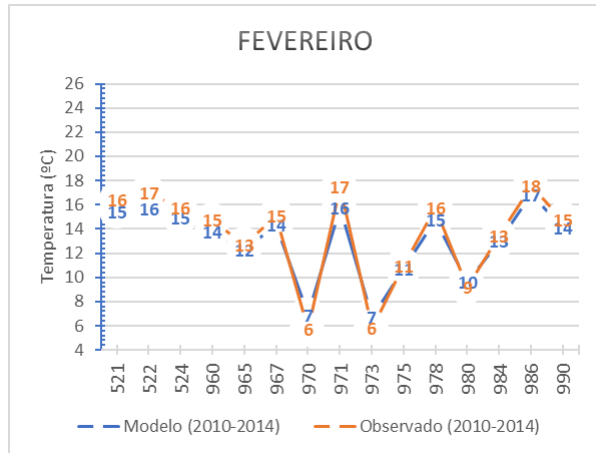
Figura 11 – Comparação entre a precipitação média diária simuladas e observadas por mês (de (a) a (m)) no período de 2010 a 2014 para cada uma das estações meteorológicas.

O mesmo exercício é apresentado para a temperatura nas figuras seguintes.

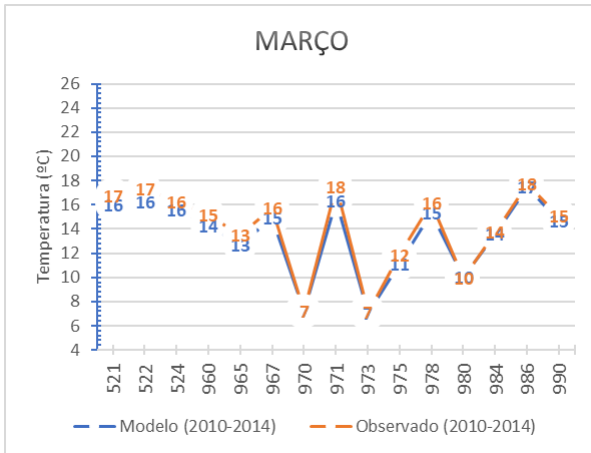
(a)



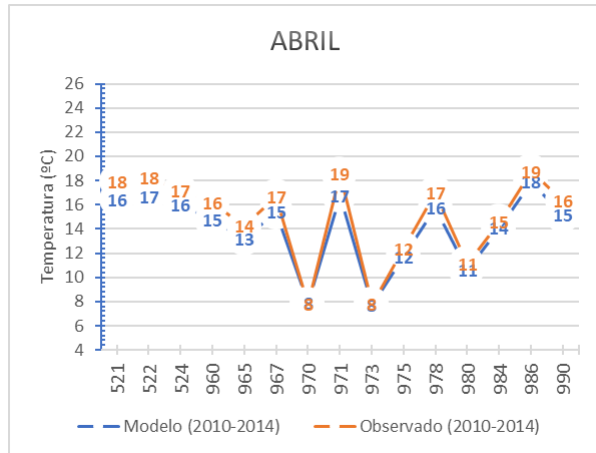
(b)



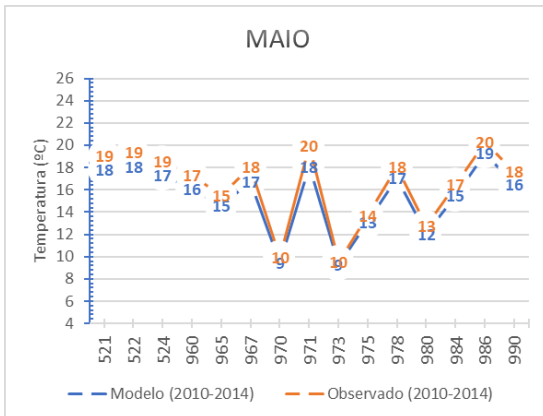
(c)



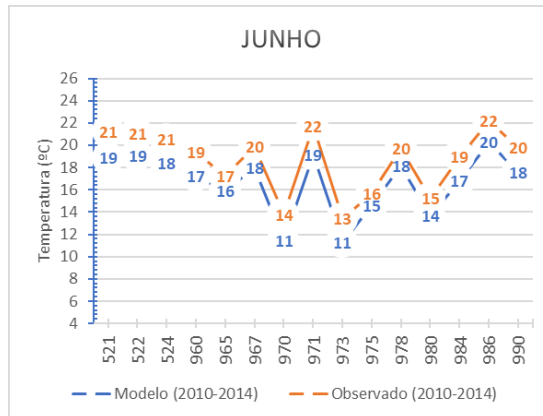
(d)



(e)



(f)



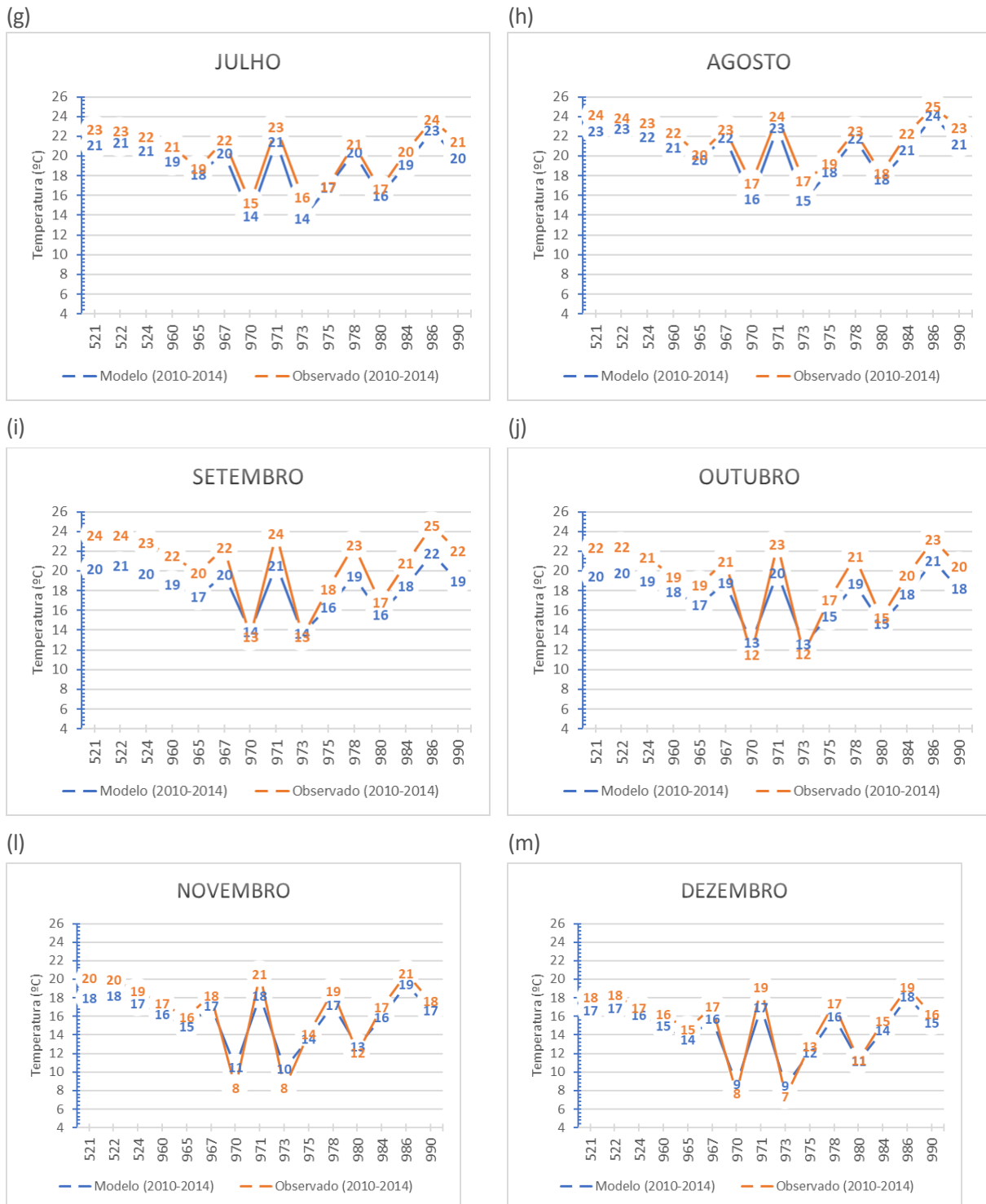


Figura 12 – Comparação da temperatura média diária simuladas e observadas por mês (de (a) a (m)) para o período entre 2010 e 2014.

Os resultados evidenciam um elevado grau de concordância entre as observações e as simulações pelo que se procedeu à caracterização do período de referência e das respetivas projeções climáticas.

4.2. Caracterização do período de referência

3.2.1. Precipitação e temperatura

O período de referência é a nossa base comparativa que resulta da simulação da normal climatológica mensal para o período entre 1981 e 2010 das variáveis temperatura e precipitação.

Os resultados evidenciam o efeito do relevo na distribuição espacial e sazonal de ambas as variáveis com um destaque para a média da precipitação total variar entre os 60 mm e os 500 mm nas cotas mais elevadas entre o verão e o inverno, com uma temperatura média entre os 24 °C e os 18°C nas cotas mais baixas da ilha da Madeira, referentes às mesmas estações do ano.

Porto Santo apresenta uma sazonalidade menos expressiva onde a temperatura média de inverno ronda os 18°C e a do verão os 22°C. A precipitação total média varia entre os 100mm e os 20mm entre o inverno e o verão evidenciando uma distribuição mais uniforme resultado da dimensão e relevo da ilha de Porto Santo.

As figuras seguintes descrevem a variação espacial da temperatura e precipitação para as diferentes estações do ano, resultantes das simulações da normal climatológica para o período entre 1981 e 2010.

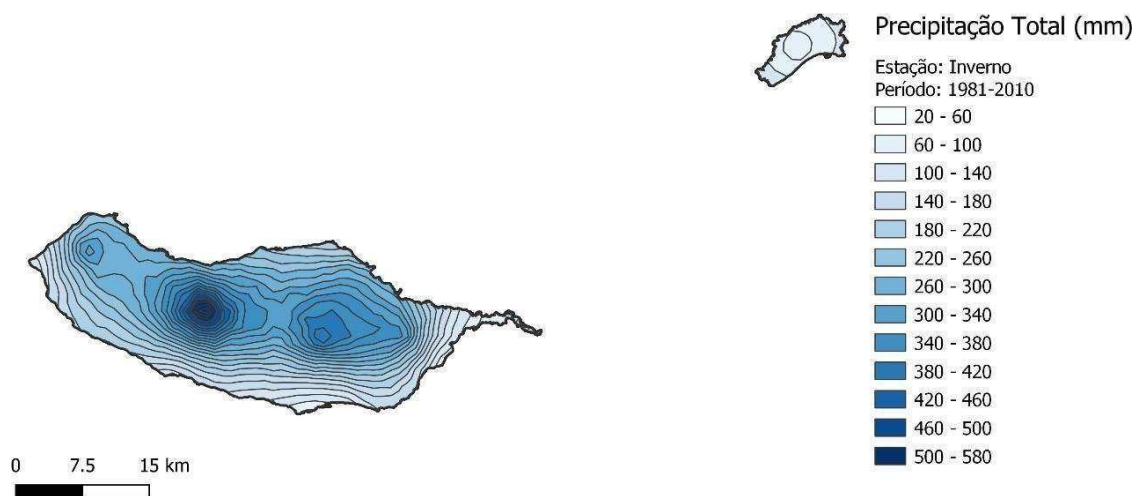


Figura 13 – Simulação da precipitação total média de inverno referente ao período entre 1981 e 2010.



Figura 14 - Simulação da temperatura média de inverno referente ao período entre 1981 e 2010.

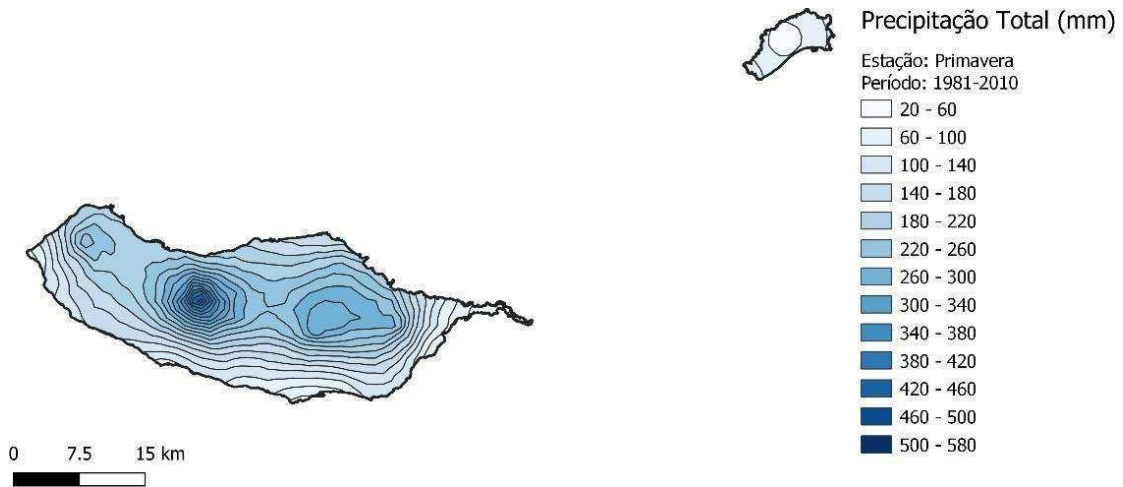


Figura 15 - Simulação da precipitação total média de primavera referente ao período entre 1981 e 2010.



Figura 16 - Simulação da temperatura média de primavera referente ao período entre 1981 e 2010.

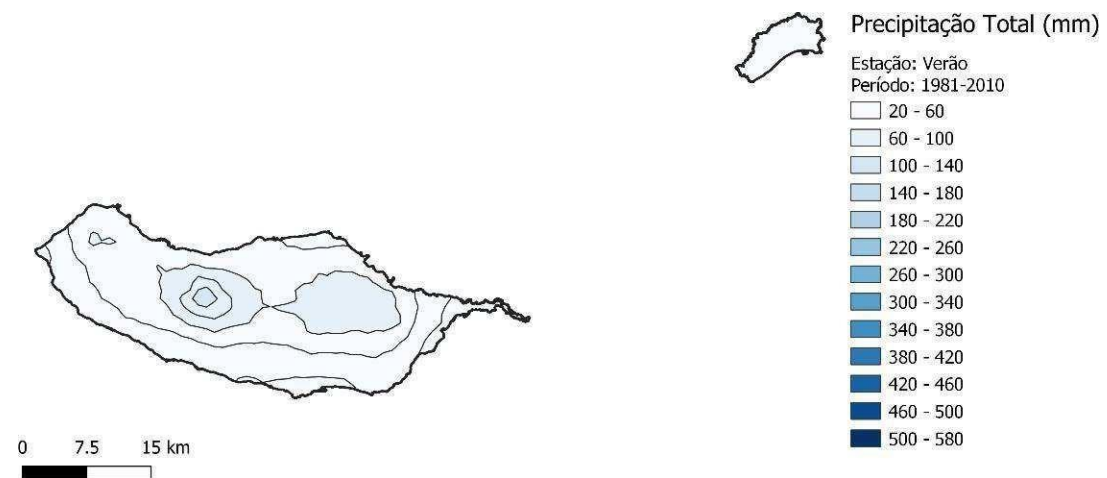


Figura 17 - Simulação da precipitação total média de verão referente ao período entre 1981 e 2010.



Figura 18 - Simulação da temperatura média de verão referente ao período entre 1981 e 2010.

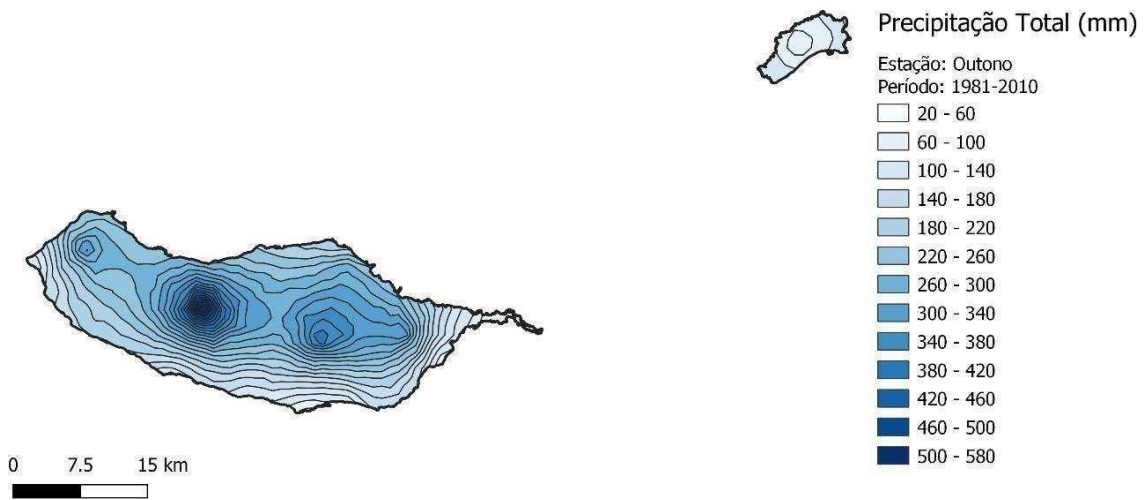


Figura 19 - Simulação da precipitação total média de outono referente ao período entre 1981 e 2010.

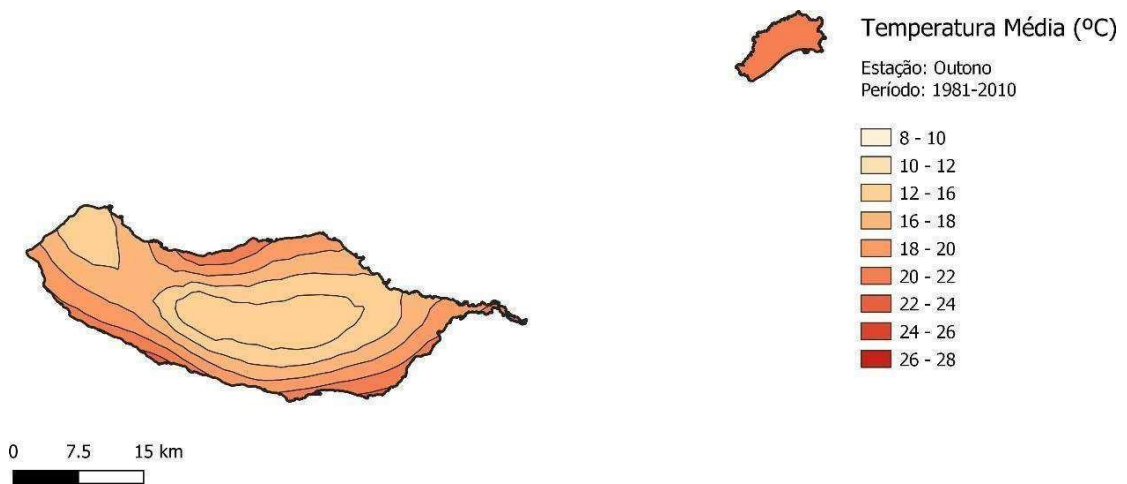


Figura 20 - Simulação da temperatura média de outono referente ao período entre 1981 e 2010.

3.2.2. Vento e radiação solar

Para além da temperatura e precipitação são igualmente caracterizados os padrões do vento e de irradiação solar recorrendo aos atlas interativos de radiação solar e vento, disponíveis em <https://globalsolaratlas.info/> e <https://globalwindatlas.info/>, respetivamente.

Estas duas plataformas contêm informações vitais para o potencial de produção de energia elétrica de fontes renováveis pelo que a sua consulta é recomendada para obter mais detalhes.

A título sumário, a Figura 21 e Figura 22 caracteriza a velocidade do vento médio anual na RAM bem como o seu potencial de produção de energia eólica.

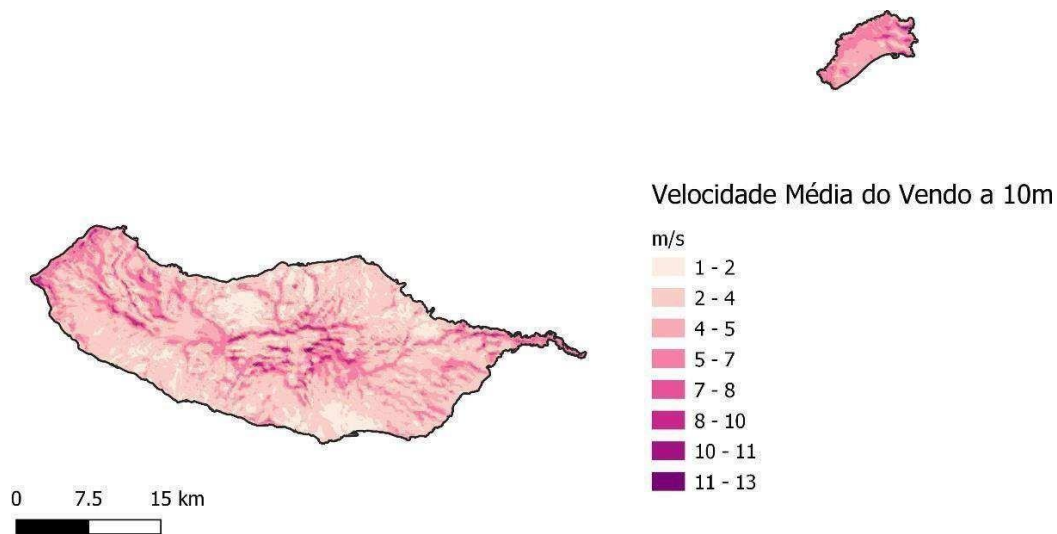


Figura 21 – Velocidade média do vento anual a 10 metros.

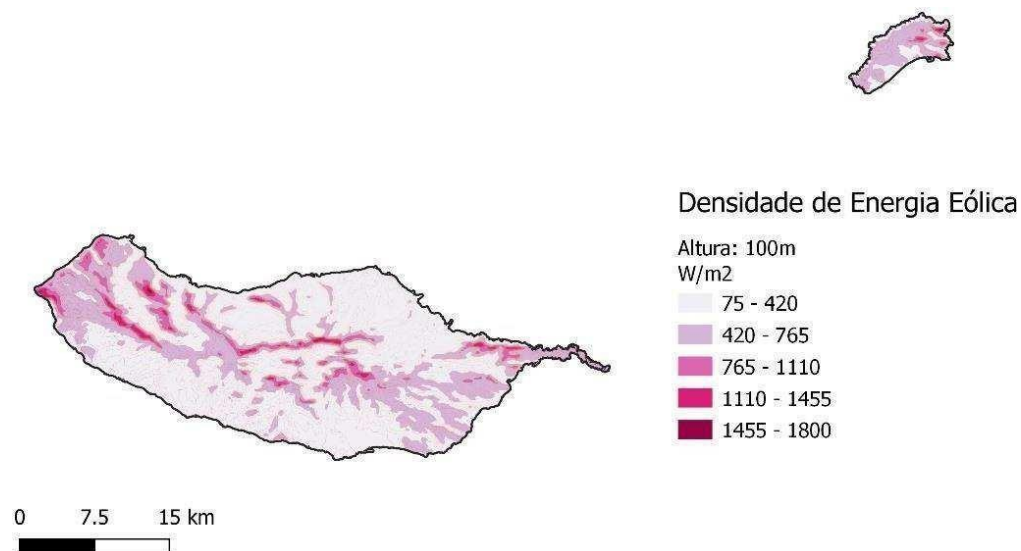


Figura 22 – Densidade de energia eólica a 100 metros.

Os dados evidenciam que na ilha da Madeira são nas zonas este e oeste, bem como nas cotas mais elevadas onde o potencial de produção de energia eólica é maior, ao contrário da ilha de Porto Santo que apresenta uma distribuição mais uniforme.

Relativamente à caracterização da radiação solar e do respetivo potencial de produção de energia, os dados do Atlas Global Solar indicam um potencial de produção de 1,3 MWh/ano referentes a sistemas fotovoltaicos aplicados ao setor residencial de pequena dimensão, de 130

MW/ano para o setor comercial de média dimensão, de 1,3 GWh/ano em instalações no solo de grande escala, e de 1,2 GWh/ano em sistemas flutuantes de grandes dimensões.

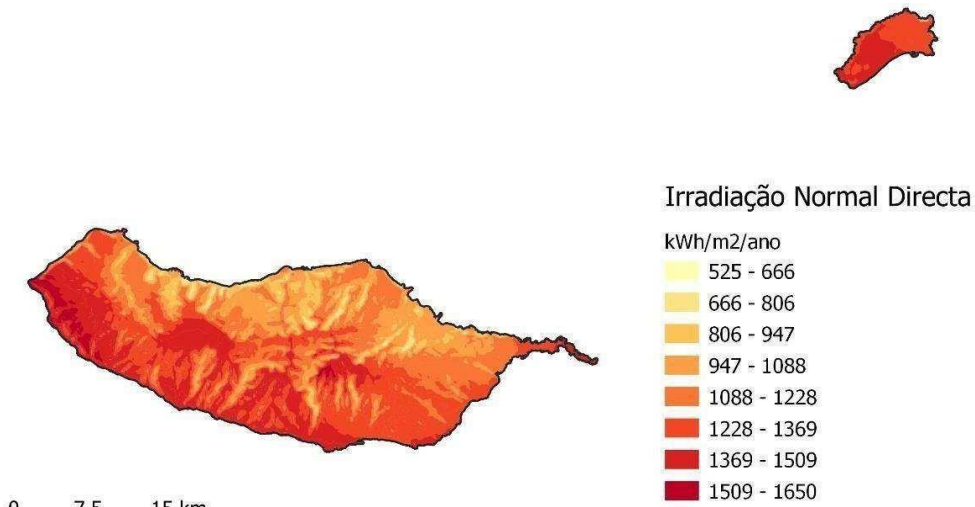


Figura 23 – Média anual da irradiação normal direta.

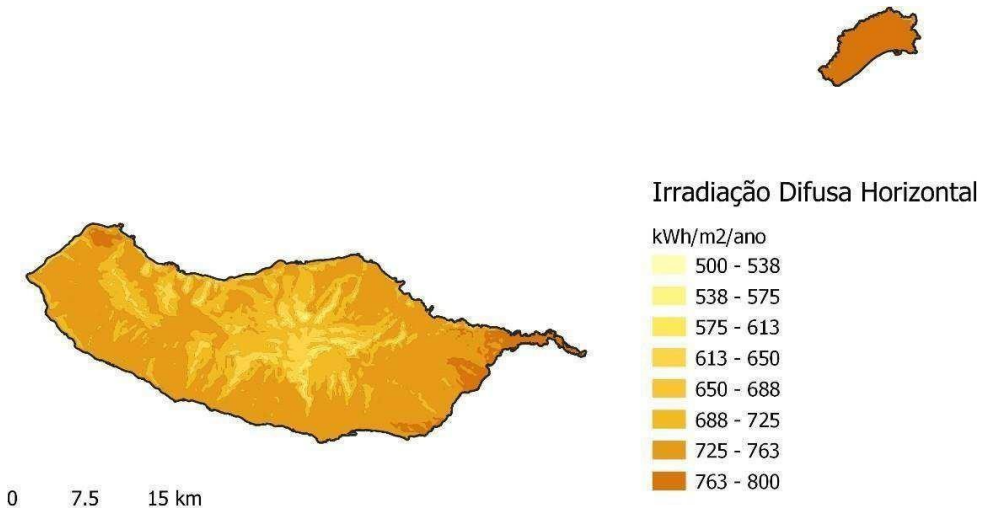


Figura 24 – Média anual da irradiação difusa horizontal.

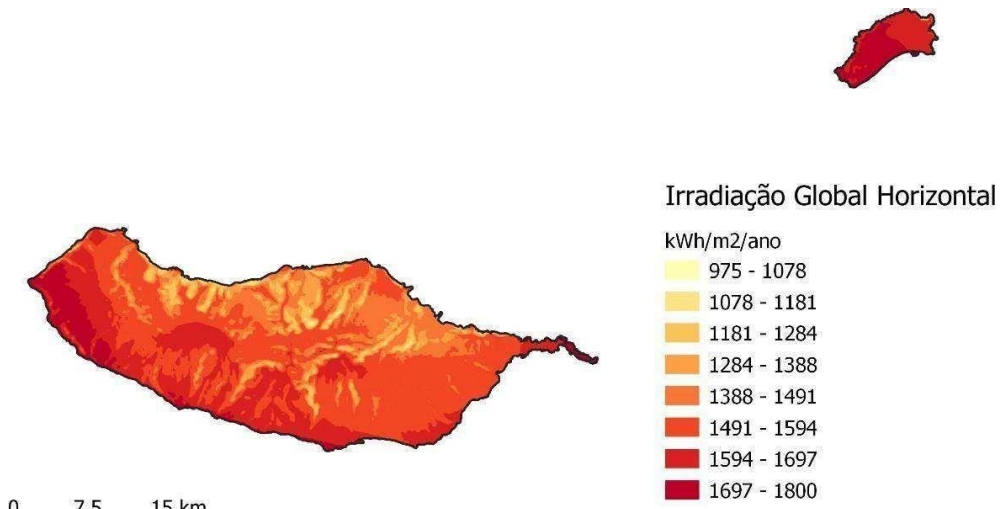


Figura 25 – Média anual da irradiação global horizontal.

4.3. Projeções de Precipitação e Temperatura

Depois do processo de validação e calibração dos modelos de temperatura e precipitação foram caracterizados três horizontes temporais, o primeiro entre 2021 e 2050 com simulações diárias, o segundo entre 2051 e 2080 com simulações mensais e finalmente entre 2081 e 2100 com 20 anos de simulações mensais. Para todos os horizontes temporais foram caracterizados dois cenários, o SSP2-4.5 e o cenário SSP5-8.5 para avaliar a incerteza associada aos caminhos sociais futuros.

Para que seja possível fazer uma análise comparativa entre os cenários e os dados históricos foram calculadas as anomalias entre a normal climatológica dos cenários e o período de referência entre 1981 e 2010. Para cada um dos três horizontes temporais foram calculadas a média mensal dos dados diários, para o caso do período entre 2021 e 2050, ou a média mensal dos dados mensais para os restantes períodos das projeções. A normal climatológica do período de referência foi obtida através das simulações das condições médias mensais do estado da atmosfera, obtidas através da média dos dados diários da reanálise NCEP.

A Tabela 4 e Tabela 5 resumam os resultados das anomalias para a ilha da Madeira em ambos os cenários e os três horizontes temporais, para cada estação do ano.

Tabela 4 – Tabela resumo das anomalias da precipitação tendo como referência a normal climatológica mensal do período entre 1981 e 2010, para a ilha da Madeira.

	Anomalia da precipitação na Madeira (%)					
	SSP2			SSP5		
	2021-2050	2051-2080	2081-2100	2021-2050	2051-2080	2081-2100
Inverno	-19 [-49 mm]	7 [18 mm]	-13 [-35 mm]	-43 [-112 mm]	-17 [-45 mm]	-68 [-119 mm]
Primavera	3 [6 mm]	1 [3 mm]	-18 [-34 mm]	-37 [-72 mm]	-22 [-43 mm]	-60 [-118 mm]
Verão	-65 [-31 mm]	-25 [-12 mm]	-45 [-21 mm]	-48 [-22 mm]	-48 [-23 mm]	-61 [-28 mm]
Outono	-26 [-63 mm]	-18 [-45 mm]	-35 [-87 mm]	-52 [-128 mm]	-52 [-129 mm]	-66 [-164 mm]
Total anual	-18% -137 mm	-5% -36 mm	-24% -178 mm	-45% -335 mm	-32% -239 mm	-65% -489 mm

Tabela 5 – Tabela resumo das anomalias da temperatura tendo como referência a normal climatológica mensal do período entre 1981 e 2010, para a ilha da Madeira.

	Anomalia da temperatura na Madeira (°C)					
	SSP2			SSP5		
	2021-2050	2051-2080	2081-2100	2021-2050	2051-2080	2081-2100
Inverno	0.9	2.7	3.2	0.8	3.5	4.9
Primavera	0.4	2.4	2.7	0.4	3.0	4.4
Verão	2.8	2.8	3.2	3.2	3.7	5.3
Outono	1.3	2.9	3.3	1.3	3.6	5.1
Média anual	1.4 °C	2.7 °C	3.1 °C	1.4 °C	3.5 °C	4.9 °C

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados das tabelas anteriores a mesma informação é descrita nas figuras seguintes.

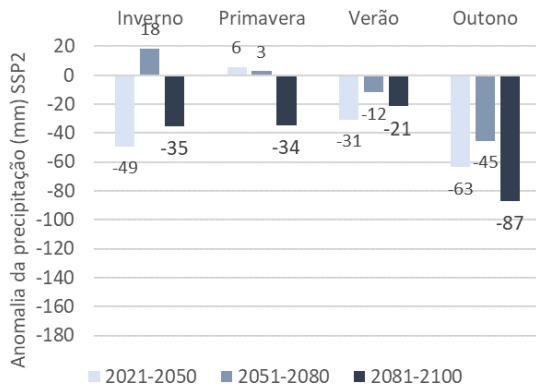


Figura 26 – Anomalia da precipitação em mm no cenário SSP2 para três horizontes temporais por estação do ano.

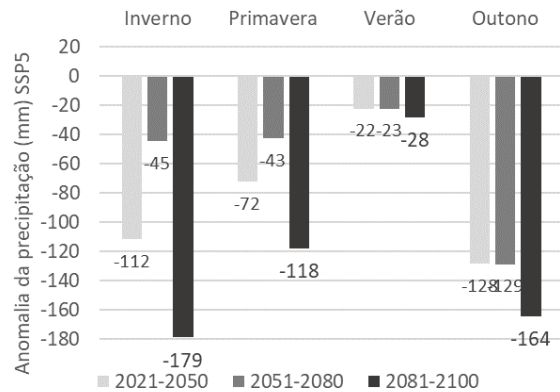


Figura 27 - Anomalia da precipitação em mm no cenário SSP5 para três horizontes temporais por estação do ano.

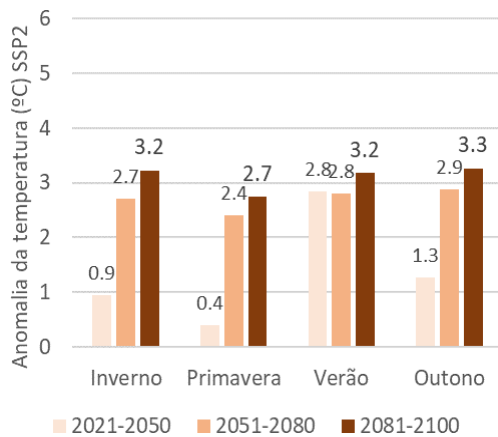


Figura 28 - Anomalia da temperatura em °C no cenário SSP2 para três horizontes temporais por estação do ano.

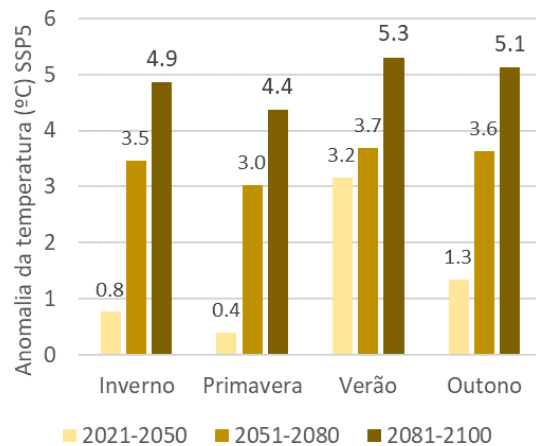


Figura 29 - Anomalia da temperatura em °C no cenário SSP5 para três horizontes temporais por estação do ano.

Os resultados das anomalias médias na ilha da Madeira confirmam a tendência generalizada de diminuição da precipitação anual em todos os cenários e horizontes temporais, ao mesmo tempo que acompanha o aumento progressivo da temperatura média até ao final do século.

Como este trabalho tem como objetivo a revisão dos cenários climáticos de acordo com os últimos modelos e cenários, é importante referir que estes novos resultados indicam uma tendência de aumento da temperatura média na ilha da Madeira que é praticamente o dobro (3.1°C a 4.9°C) dos cenários A2 e B2 anteriores (Figura 30), mesmo tendo como base um período de referência mais recente (1981-2010), quando comparado com a referência de 1970 a 1990 do estudo anterior. No que diz respeito às projeções das anomalias da precipitação a média das projeções para os horizontes temporais de curto, médio e longo prazo apresentam tendências semelhantes, tal como demonstrado na Figura 31.

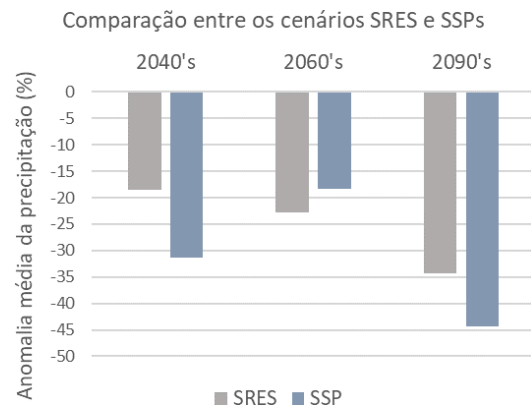
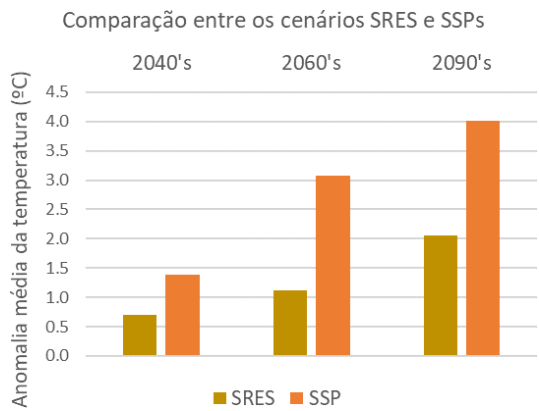


Figura 30 - Comparação das médias das anomalias de temperatura dos cenários SRES – A2 e B2 (estudo anterior) e as novas projeções com base nos cenários SSP's.

Figura 31 - Comparação das médias das anomalias de precipitação dos cenários SRES – A2 e B2 (estudo anterior) e as novas projeções com base nos cenários SSP's.

A análise das novas projeções de temperatura entre 2021 e 2100 em ambos os cenários, representados pela média móvel a 12 meses (Figura 32), evidenciam que a partir de meados do século XXI o cenário SSP5 demonstra uma taxa de crescimento médio da temperatura superior ao cenário SSP2, com uma clara diferenciação de evolução futura. Na mesma figura podemos observar uma tendência de estabilização da temperatura no cenário SSP2 até 2100, em contraste com o crescimento contínuo da temperatura projetada no cenário SSP5.

A análise das projeções de precipitação é mais complexa. Os resultados da Figura 33 indicam um aumento claro de eventos pouco frequentes e mais intensos à escala mensal, principalmente a partir de meados do século XXI, em simultâneo com uma tendência da diminuição da precipitação anual até 2100, que é mais significativa no cenário SSP5. Dada a importância destas tendências os resultados são explorados com mais detalhe no subcapítulo seguinte.

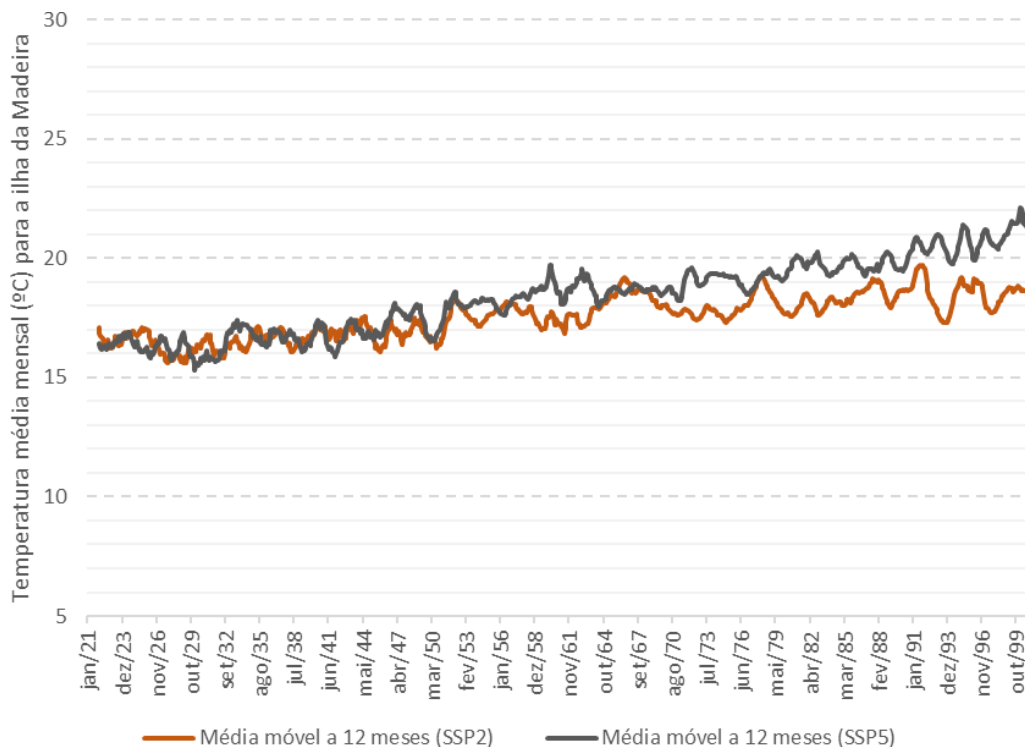


Figura 32 – Média móvel a 12 meses da temperatura média na ilha da Madeira entre 2021 e 2100.

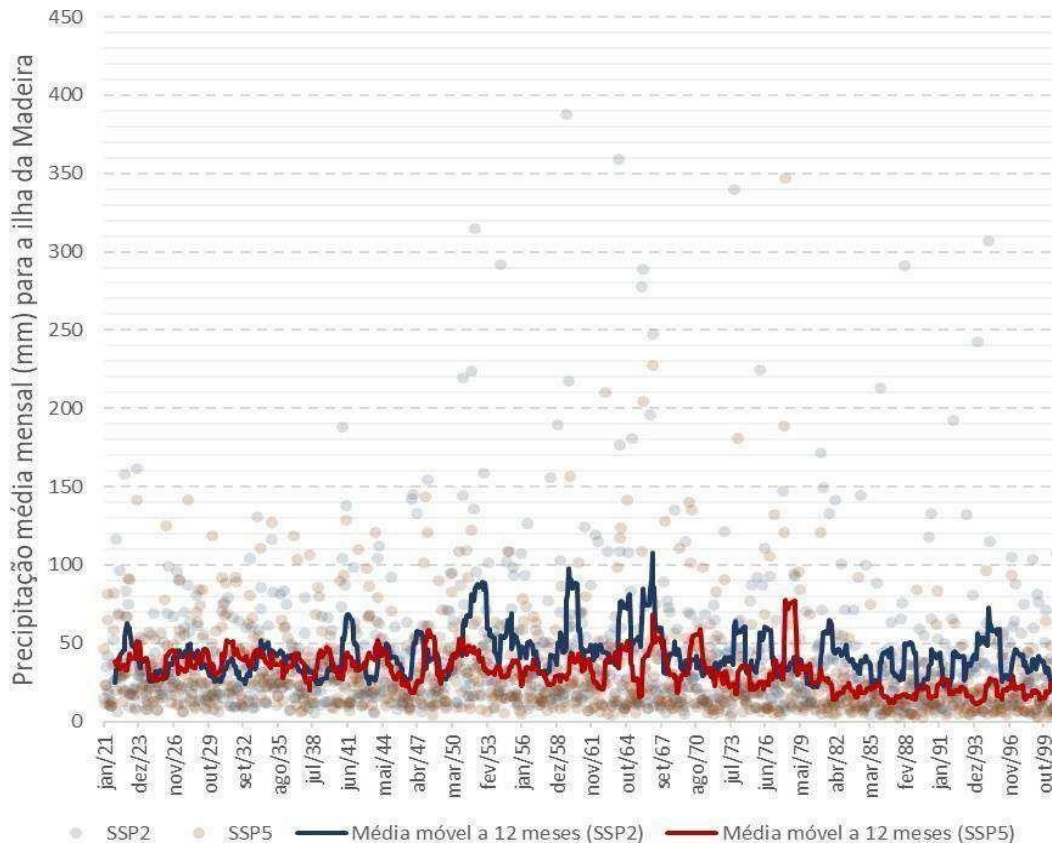


Figura 33 – Projeções da precipitação média mensal para a ilha da Madeira nos cenários SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2100.

3.3.1. Avaliação de extremos

Conhecer a intensidade, frequência ou período de retorno de um determinado evento meteorológico pode ser determinante quando adaptamos a nossa resposta aos desafios e impactos provocados por eventos meteorológicos extremos, especialmente no contexto de alterações climáticas. As cheias, inundações e deslizamentos de massa em vertente são desencadeados por eventos de precipitação intensa, que podem ser prolongados no tempo ou de curta duração e muito localizados.

Se considerarmos a série histórica da estação meteorológica de Bica da Cana, com a referência 970 e altitude de 1560 m, como representativa dos regimes de precipitação mais intensos na ilha da Madeira, podemos acompanhar a frequência e evolução expectável dos fenómenos extremos através da aplicação do método de Valor Extremo Tipo I de Gumbel, normalmente designado por EV I (Gumbel, E.J. 1954).

A função de densidade cumulativa do método de Gumbel é um exponencial duplo como é demonstrado na Eq. 1:

$$\text{Eq. 1} \quad F(x) = e^{-e^{-y}}$$

onde $F(x)$ é a probabilidade de não-excedência. Assim, a probabilidade de excedência é o inverso de $F(x)$:

$$\text{Eq. 2} \quad G(x) = 1 - F(x)$$

O período de retorno T é o recíproco da probabilidade de excedência, e assim,

Eq. 3
$$\frac{1}{T} = 1 - e^{-e^{-y}}$$

da Eq. 3 temos:

Eq. 4
$$y = -\ln h \frac{T}{T-1}$$

No método de Gumbel o valor de precipitação é obtido através do cálculo da frequência através da fórmula da Eq. 5:

Eq. 5
$$x = \bar{x} + Ks$$

onde s é o desvio padrão e \bar{x} a média da população. O fator de frequência K é descrito usando a seguinte equação:

Eq. 6
$$y = \bar{y}_n + K\sigma_n$$

onde σ_n é o desvio padrão e \bar{y}_n é a média da distribuição de Gumbel. Estes valores são uma função do tamanho da amostra n . Pela Eq. 5 e Eq. 6, temos:

Eq. 7
$$x = \bar{x} + \frac{\sigma_n}{y - \bar{y}_n} S$$

finalmente, com a Eq. 4 obtemos a precipitação para um dado período de retorno.

Eq. 8
$$x = \bar{x} - \frac{\ln \ln \frac{T}{T-1} + \bar{y}}{\sigma_n \cdot n \cdot S}$$

A Figura 34 e Figura 35 representam o processo de validação da função E.V. Tipo I de Gumbel aos dados observados da estação meteorológica Bica da Cana para o período entre 1981 e 2010 e o cálculo do período de retorno dos cenários SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2050, após a extrair os valores de precipitação diários para a estação Bica da Cana das projeções climáticas.

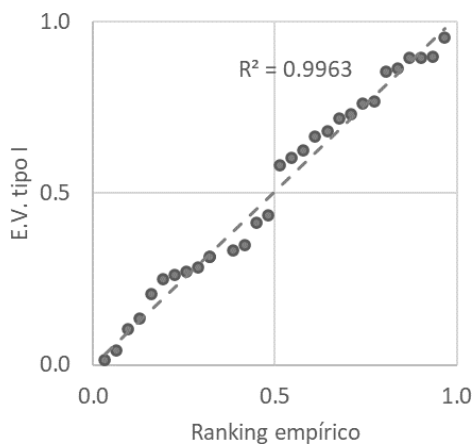


Figura 34 - Encaixe linear entre a função de densidade de Valor Extremo Tipo I de Gumbel e a classificação da precipitação.

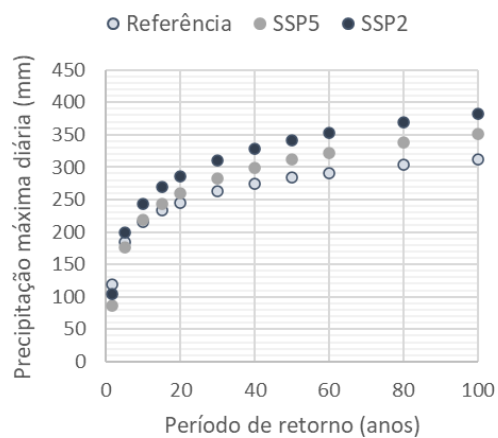


Figura 35 - Cálculo do período de retorno da precipitação entre 1981-2010, e as projeções SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2050, para a estação Bica da Cana.

Os resultados evidenciam uma tendência de agravamento dos fenômenos extremos de precipitação em ambos os cenários entre 2021 e 2050, em relação ao período de referência, fazendo com que a conjugação entre a tendência de diminuição da precipitação com o aumento de fenômenos extremos acarrete um conjunto de desafios importantes na gestão dos recursos hídricos, e do território.

Para complementar a abordagem sobre a análise de extremos, mas com foco nas secas, foi calculado o índice SPI (Standardized Precipitation Index), desenvolvido por McKee et al. (1993). Este índice baseia-se na precipitação padronizada, que corresponde ao desvio de precipitação em relação à média para um período de tempo específico, dividido pelo desvio padrão do período a que diz respeito essa média.

Matematicamente, o SPI corresponde à probabilidade cumulativa de um determinado acontecimento de precipitação ocorrer. O resultado computacional da precipitação estandardizada é linearmente proporcional ao déficit de precipitação e permite especificar a probabilidade, a percentagem da média e o déficit de precipitação acumulada. Este índice foi calculado para o período entre 1981 e 2010 e para os cenários SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2050, em intervalos de tempo de 3 e 12 meses, de forma a compreender a variabilidade natural das secas, apresentados da Figura 36 à Figura 41.

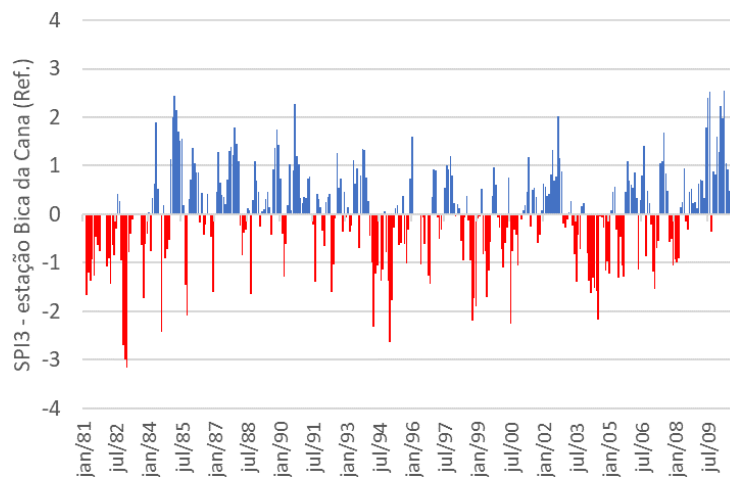


Figura 36 – Índice SPI a 3 meses da estação meteorológica Bica da Cana entre 1981 e 2010.

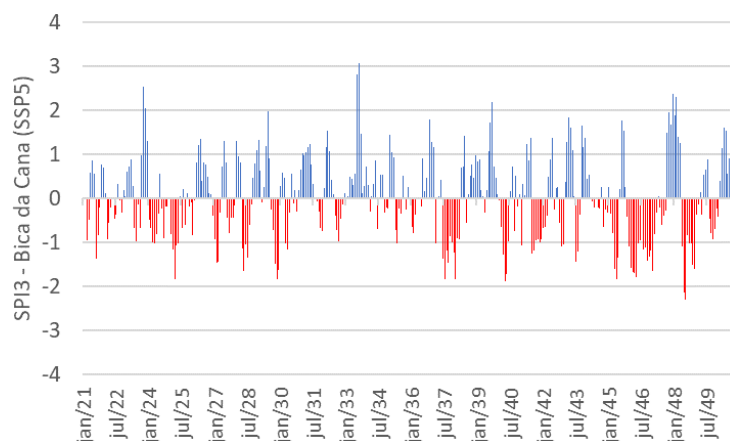


Figura 37 - Índice SPI a 3 meses, representativa da estação meteorológica Bica da Cana entre 2021 e 2050 para o cenário SSP5.

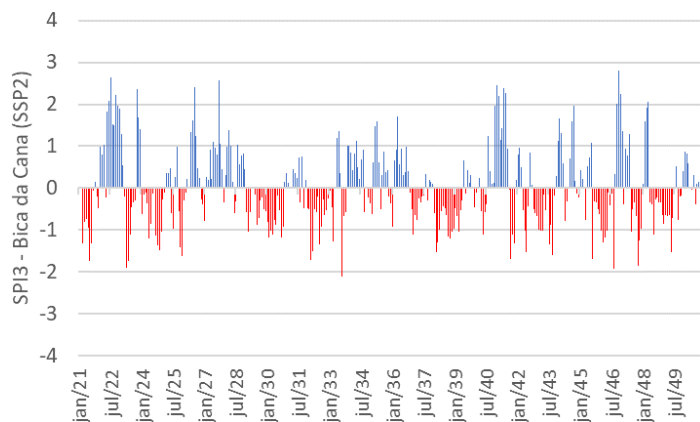


Figura 38 - Índice SPI a 3 meses, representativa da estação meteorológica Bica da Cana entre 2021 e 2050 para o cenário SSP2.

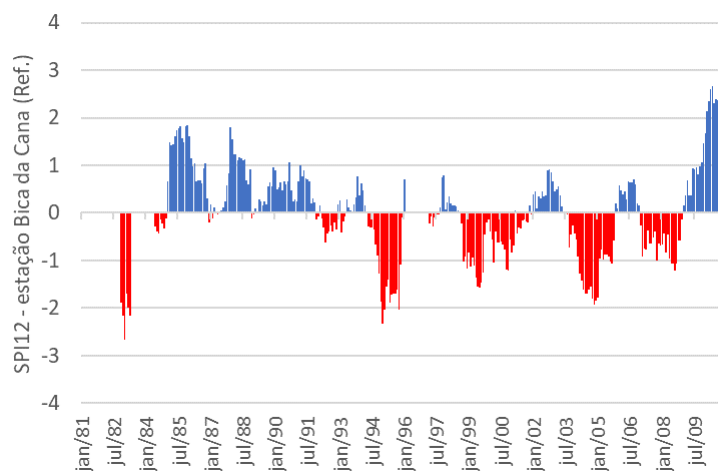


Figura 39 - Índice SPI a 12 meses da estação meteorológica Bica da Cana entre 1981 e 2010.

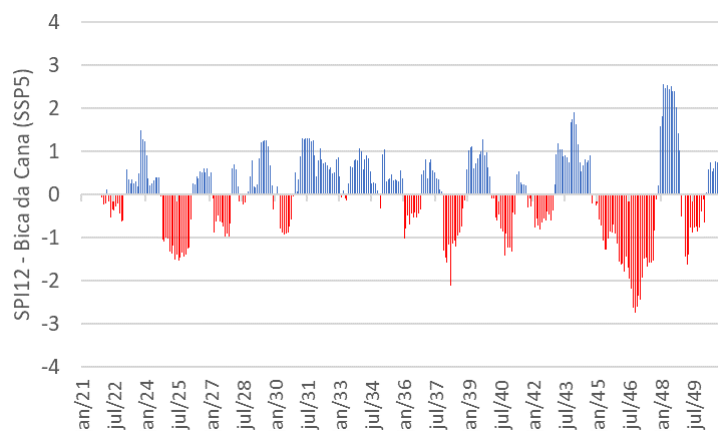


Figura 40 - Índice SPI a 12 meses, representativa da estação meteorológica Bica da Cana entre 2021 e 2050 para o cenário SSP5.

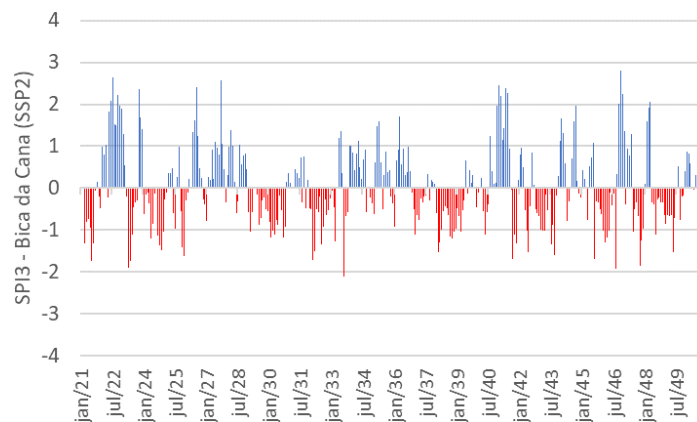


Figura 41 - Índice SPI a 12 meses, representativa da estação meteorológica Bica da Cana entre 2021 e 2050 para o cenário SSP2.

Os resultados evidenciam uma tendência de aumento da frequência dos períodos de seca em ambos os cenários para o período de 2021 a 2050, que se tornam mais evidentes depois da análise das figuras com o cálculo do índice SPI a 12 meses.

A Tabela 6 descreve os resultados das figuras anteriores através do cálculo da frequência de cada uma das classes do índice SPI de 3 e 12 meses.

Tabela 6 - Classificação do índice SPI para períodos secos e chuvosos representativas da estação de Bica da Cana entre o período de referência (1981-2010) e 2021 a 2050.

		SPI3			SPI12		
		Ref.	SSP5	SSP2	Ref.	SSP5	SSP2
≥2.00	chuva extrema	3%	2%	4%	3%	2%	3%
1.50 a 1.99	chuva severa	3%	4%	4%	4%	2%	4%
1.00 a 1.49	chuva moderada	9%	9%	7%	5%	9%	7%
0.99 a 0.50	chuva fraca	15%	15%	12%	16%	21%	17%
0.49 a -0.49	normal	41%	39%	41%	43%	34%	36%
-0.50 a -0.99	seca fraca	14%	14%	18%	12%	16%	13%
-1.00 a -1.49	seca moderada	9%	11%	10%	7%	10%	18%
-1.50 a -1.99	seca severa	4%	5%	4%	7%	4%	2%
≤ -2.00	seca extrema	3%	1%	0%	2%	2%	0%

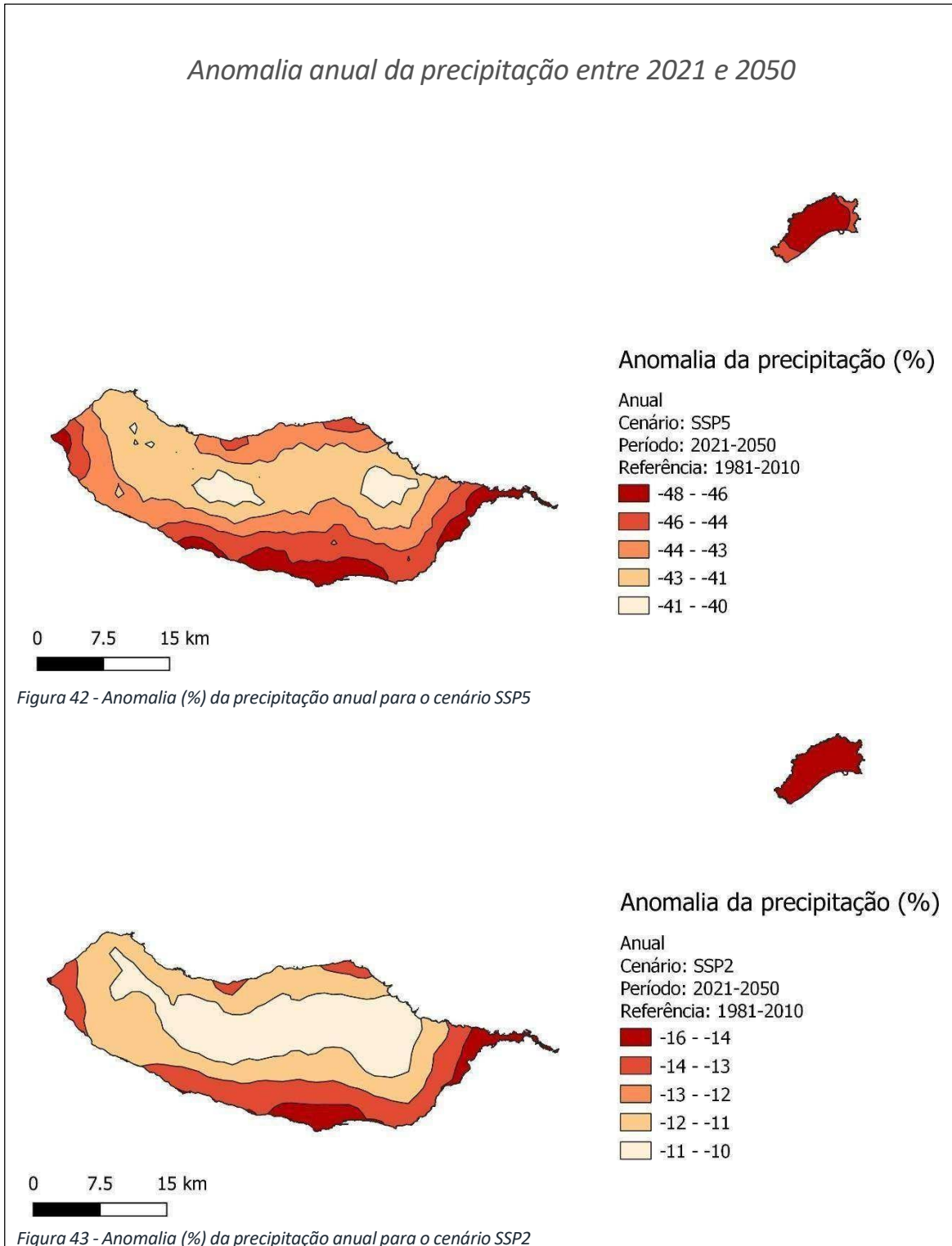
3.3.2. Descrição das anomalias entre 2021 e 2050

Como referido anteriormente, entre 2021 e 2050 as simulações têm uma resolução temporal diária com o objetivo de melhor apoiar os estudos de impacto e respetivas avaliações de risco na RAM. Um dos pressupostos por esta escolha prende-se com a menor incerteza associada a períodos temporais mais próximos quando comparado com as estimativas de longo prazo cuja incerteza tem tendência a aumentar dada a sua dependência do rumo e impacto da ação humana.

Os resultados evidenciam uma distribuição espacial diferenciada consoante a estação do ano e respetivo cenário que podem ser analisados a partir da Figura 46 à Figura 53. Neste caso a anomalia caracteriza espacialmente e temporalmente as grandes tendências esperadas em ambos os cenários até meados do século XXI.

As figuras seguintes representam a agregação dos dados climáticos para cada estação do ano através do cálculo da anomalia em %, no caso da precipitação, e em °C para a temperatura, entre

o período de referência (1981-2010) e os respectivos cenários SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2050. De notar que, apesar da paleta de cores aplicada aos mapas de precipitação ser quase sempre a mesma, a escala numérica varia para acomodar a sua elevada amplitude, pelo que a sua interpretação comparativa nem sempre as cores correspondem aos mesmos valores numéricos.



Anomalia anual da temperatura entre 2021 e 2050

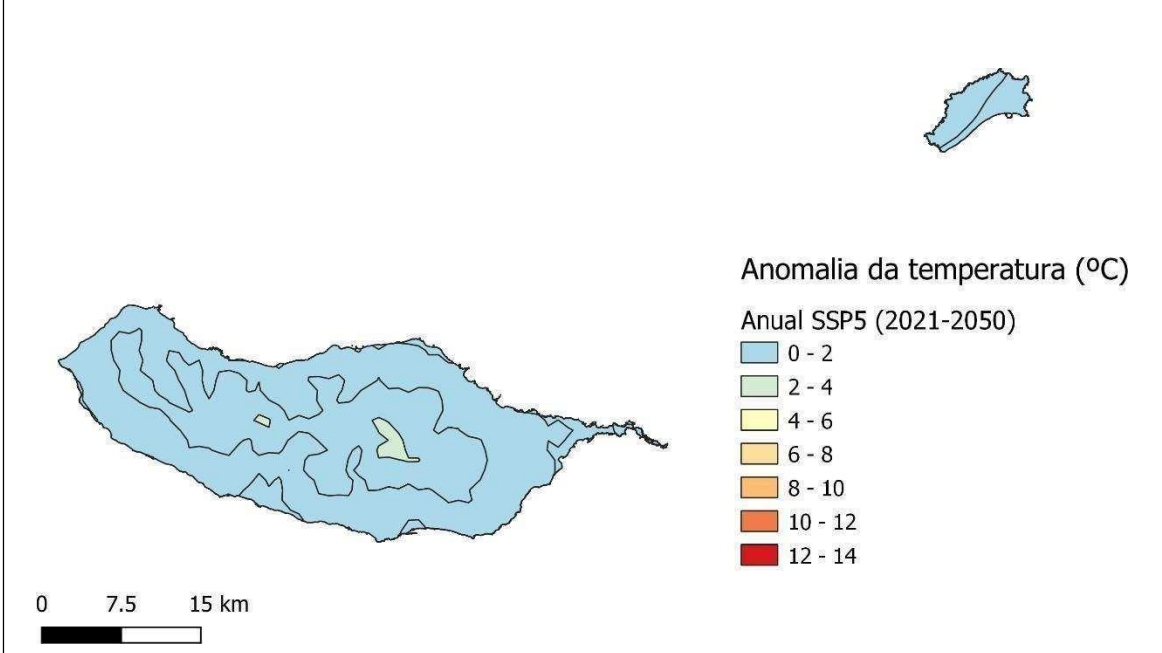


Figura 44 - Projeções da anomalia da temperatura anual entre 2021 e 2050, no cenário SSP5

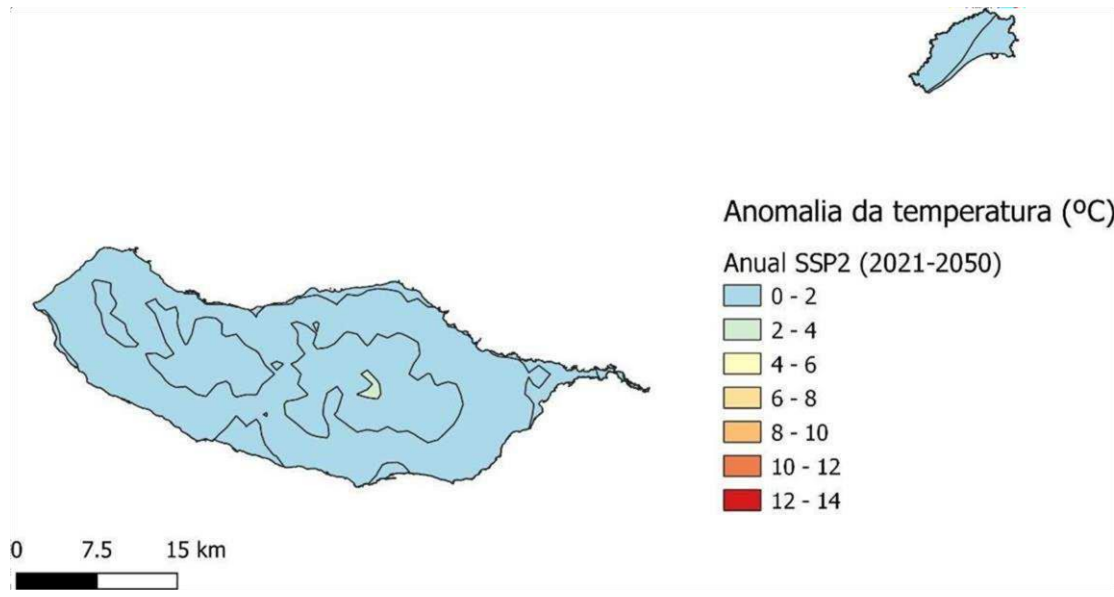


Figura 45 - Projeções da anomalia da temperatura anual entre 2021 e 2050, no cenário SSP2

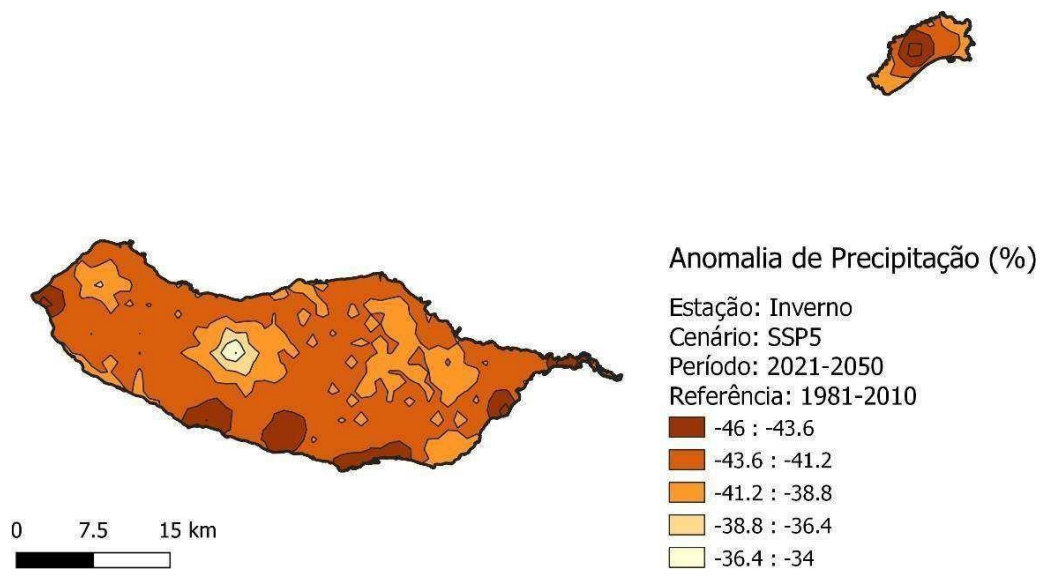


Figura 46 - Anomalia (%) da precipitação de inverno para o cenário SSP5

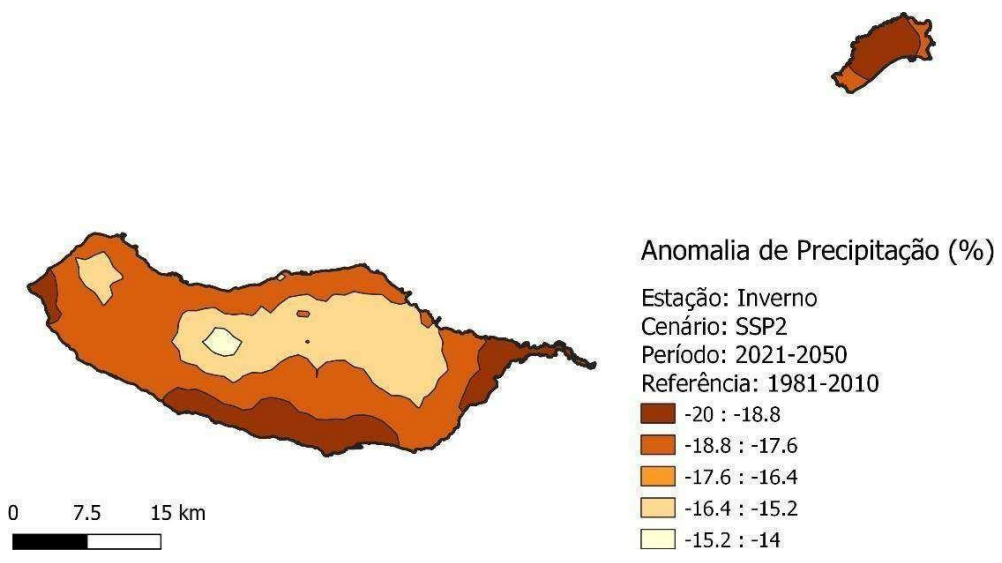
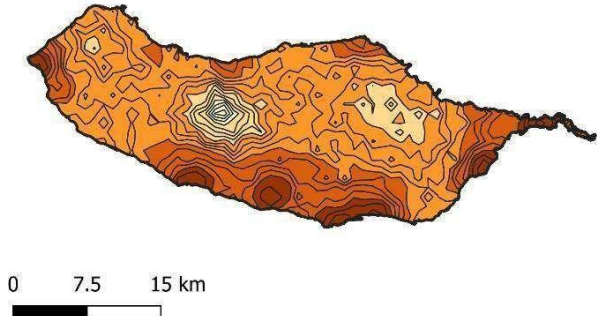


Figura 47 - Anomalia da precipitação de Inverno para o cenário SSP2.

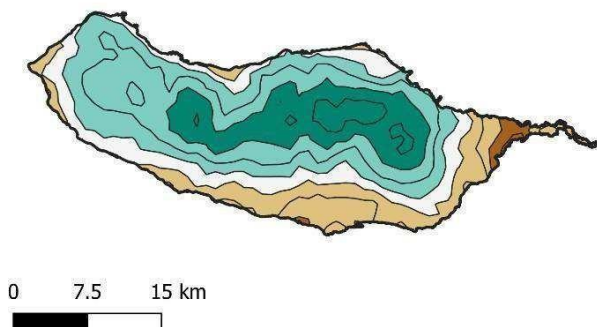


Anomalia de Precipitação (%)

Estação: Primavera
 Cenário: SSP5
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

- 41 : -39.1
- 39.1 : -37.2
- 37.2 : -35.3
- 35.3 : -33.4
- 33.4 : -31.5

Figura 48 - Anomalia da precipitação de Primavera para o cenário SSP5.

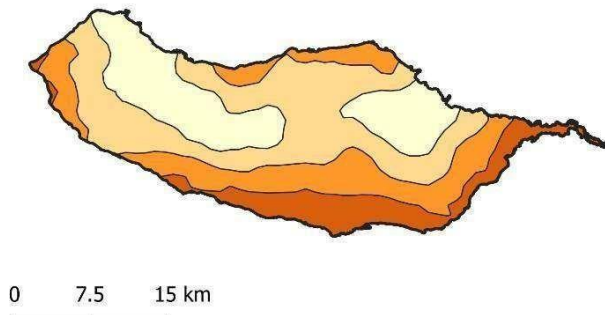


Anomalia de Precipitação (%)

Estação: Primavera
 Cenário: SSP2
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

- 6 : -2.8
- 2.8 : 0.4
- 0.4 : 3.6
- 3.6 : 6.8
- 6.8 : 10

Figura 49 - Anomalia da precipitação de Primavera para o cenário SSP2.

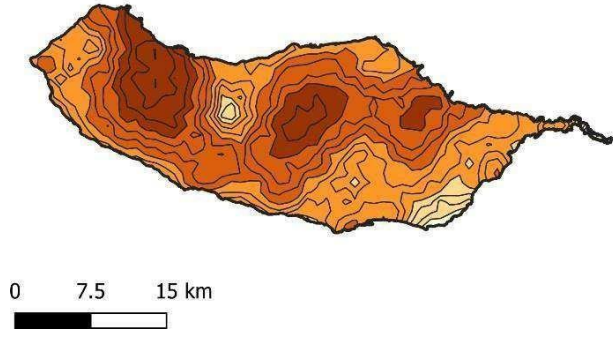


Anomalia de Precipitação (%)

Estação: Verão
 Cenário: SSP5
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

- 52.0 : -50.4
- 50.4 : -48.8
- 48.8 : -47.2
- 47.2 : -45.6
- 45.6 : -44

Figura 50 - Anomalia da precipitação de Verão para o cenário SSP5.

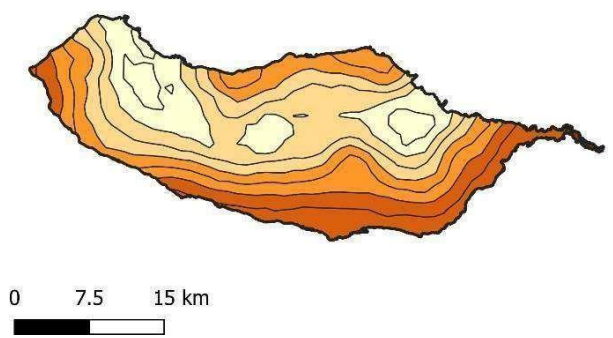


Anomalia de Precipitação (%)

Estação: Verão
 Cenário: SSP2
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

Dark Brown	-76 : -70
Orange	-70 : -64
Light Orange	-64 : -58
Yellow-Orange	-58 : -52
Light Yellow	-52 : -46

Figura 51 - Anomalia da precipitação de Verão para o cenário SSP2.

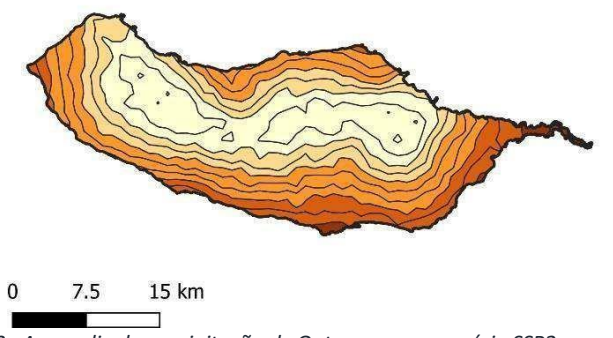
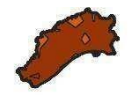


Anomalia de Precipitação (%)

Estação: Outono
 Cenário: SSP5
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

Dark Brown	-62.0 : -58.4
Orange	-58.4 : -54.8
Light Orange	-54.8 : -51.2
Yellow-Orange	-51.2 : -47.6
Light Yellow	-47.6 : -44

Figura 52 - Anomalia da precipitação de Outono para o cenário SSP5.



Anomalia de Precipitação (%)

Estação: Outono
 Cenário: SSP2
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

Dark Brown	-40.0 : -35.2
Orange	-35.2 : -30.4
Light Orange	-30.4 : -25.6
Yellow-Orange	-25.6 : -20.8
Light Yellow	-20.8 : -16

Figura 53 - Anomalia da precipitação de Outono para o cenário SSP2.

Os resultados indicam que existe uma tendência generalizada de redução da precipitação nas cotas mais baixas, sendo mais expressivas na região sul da ilha da Madeira e em Porto Santo. No cenário SSP2 durante a primavera estima-se que a precipitação a norte da ilha da Madeira e nas cotas mais elevadas possa aumentar até 10% com a ressalva de que este fenómeno possa ser causado pelo aumento da frequência de eventos extremos, tal como demonstrado no subcapítulo sobre a análise dos extremos.

A Figura 54 representa o histograma da média da precipitação diária da ilha da Madeira em ambos os cenários entre o período de 2021 e 2050 possibilitando explorar a tendência do comportamento dos extremos. Se considerarmos que a média de 65 mm obtida por todas as estações meteorológicas no dia 20 de fevereiro de 2010, que causaram cheias de grande impacto, é indicativa ou próxima da média da precipitação na ilha da Madeira, então o histograma indica que este tipo de fenómenos podem continuar a acontecer com uma frequência estimada entre 1 a 3 vezes por década até 2051, de acordo com os cenários SSP5 e SSP2 respetivamente.

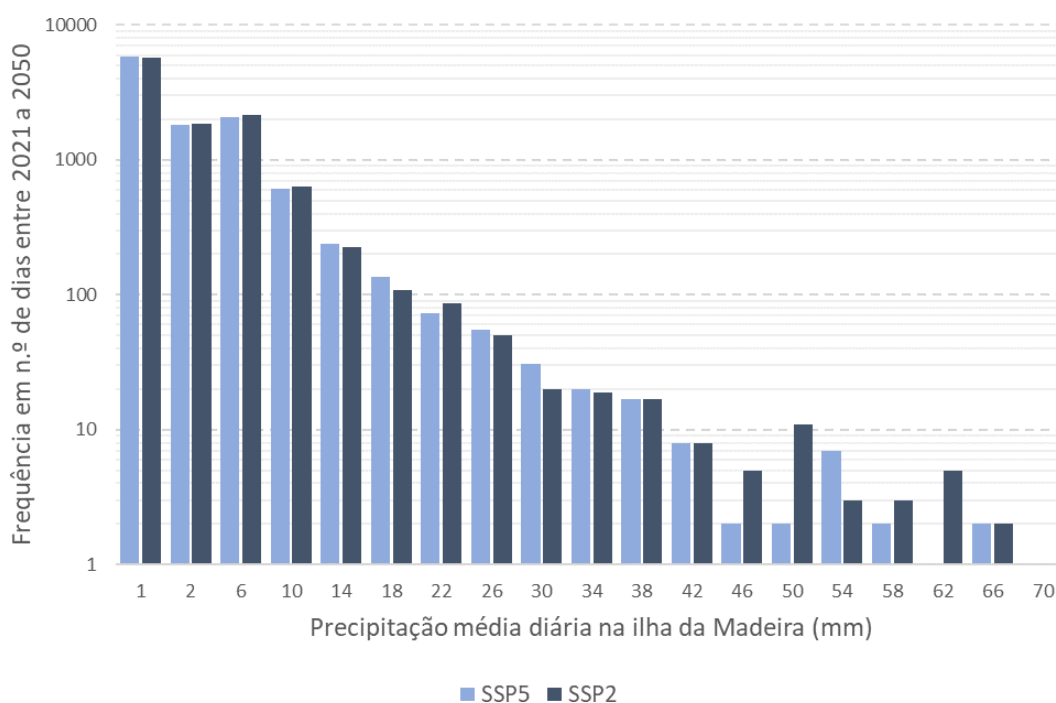


Figura 54 – Histograma da precipitação média diária na ilha da Madeira para o período entre 2021 e 2050, nos cenários SSP2 e SSP5. Nota: O eixo da frequência está em escala logarítmica para evidenciar os valores menos frequentes e mais intensos de precipitação.

A Figura 55 tem como objetivo compreender melhor as tendências de precipitação até meados do século XXI, onde os dados diários da ilha da Madeira foram agregados para a escala mensal e introduzida uma média móvel de 12 meses. Os resultados evidenciam uma alternância entre períodos mais húmidos com outros mais secos, mas também alguns episódios de precipitação bem acima da média, indicativo da possível ocorrência de fenómenos mais extremos.

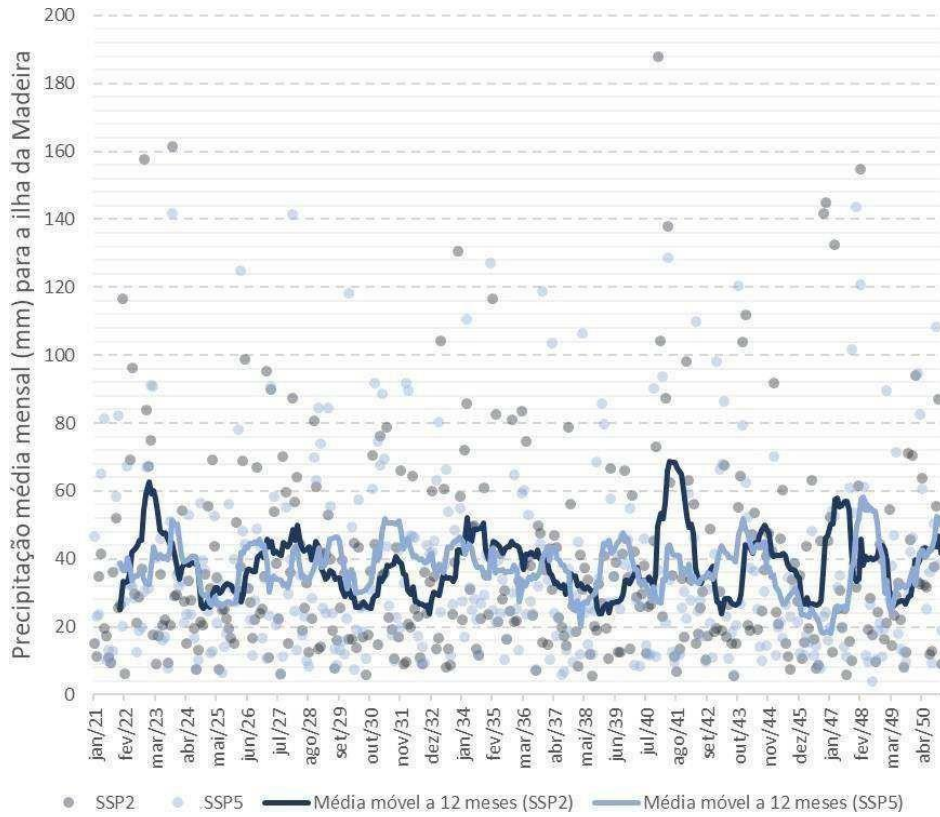


Figura 55 – Precipitação média mensal para a ilha da Madeira e respetiva média móvel a 12 meses, para os cenários SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2050.

O mesmo exercício de demonstração de resultados que foi feito para a precipitação foram replicados para a temperatura e estão apresentados nas figuras entre a Figura 56 e Figura 63.

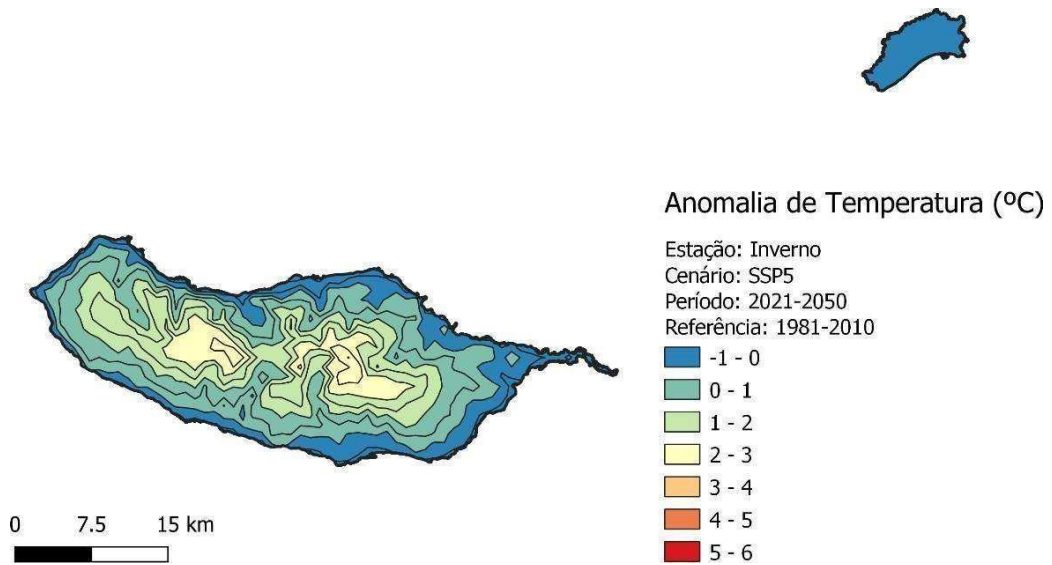


Figura 56 - Anomalia (°C) da temperatura de inverno para o cenário SSP5.

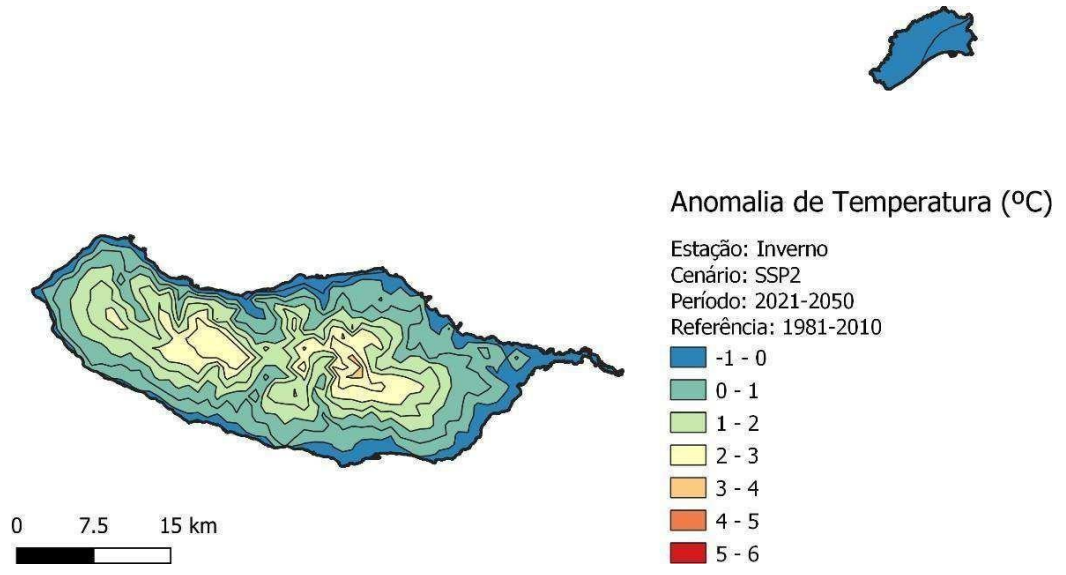


Figura 57 - Anomalia (°C) da temperatura de inverno para o cenário SSP2.

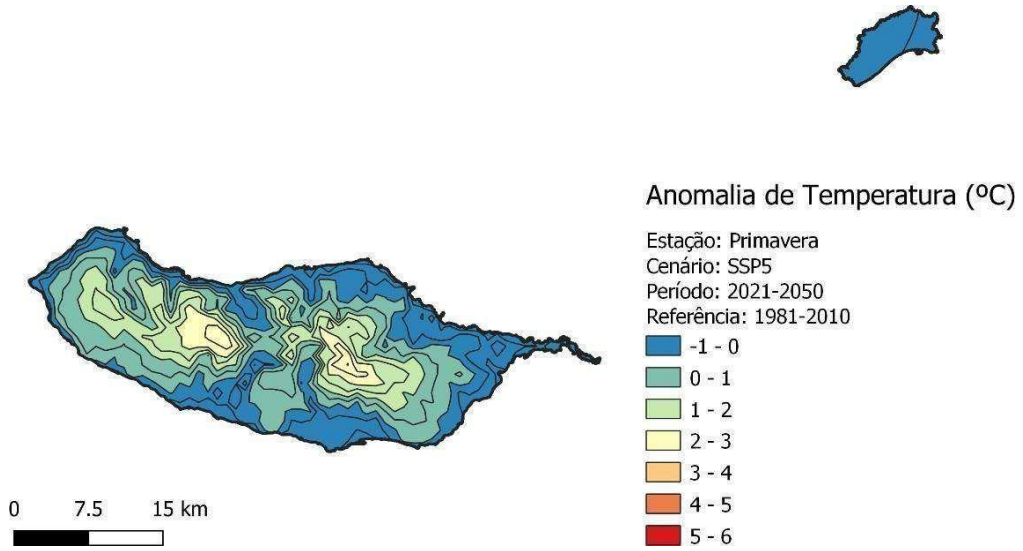


Figura 58 - Anomalia (°C) da temperatura de primavera para o cenário SSP5.

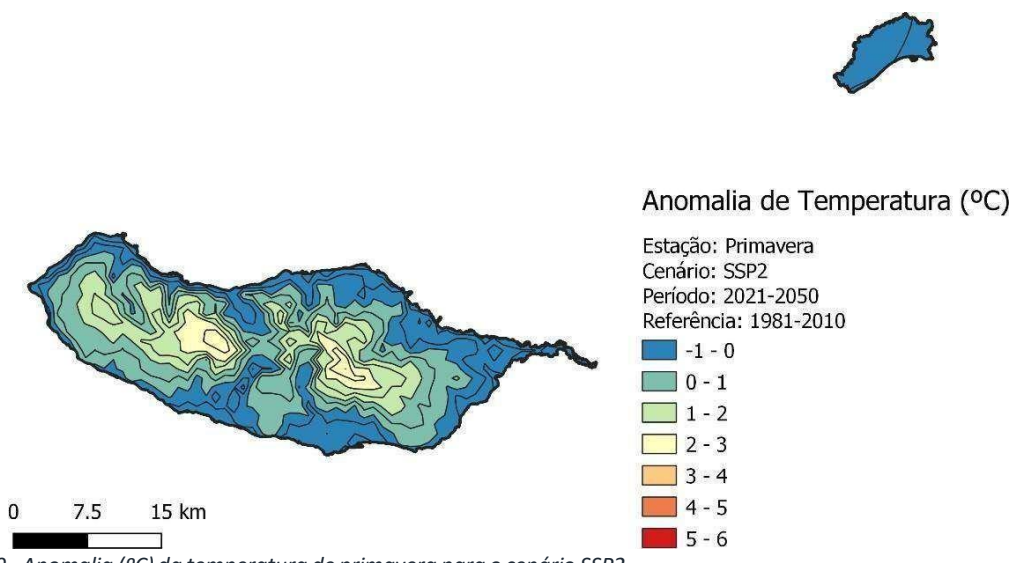
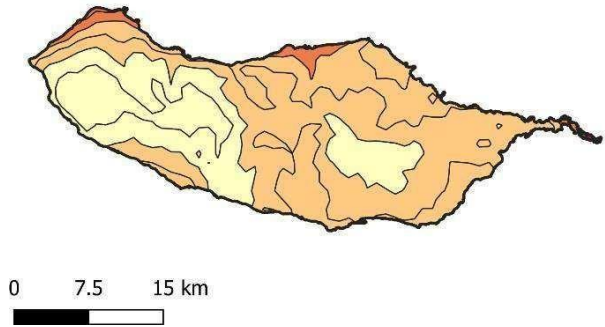
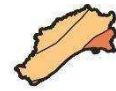


Figura 59 - Anomalia (°C) da temperatura de primavera para o cenário SSP2.

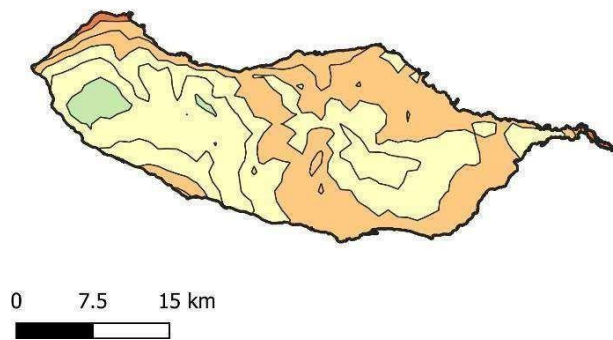
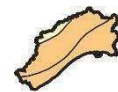


Anomalia de Temperatura (°C)

Estação: Verão
 Cenário: SSP5
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

- 1 - 0
- 0 - 1
- 1 - 2
- 2 - 3
- 3 - 4
- 4 - 5
- 5 - 6

Figura 60 - Anomalia (°C) da temperatura de verão para o cenário SSP5.

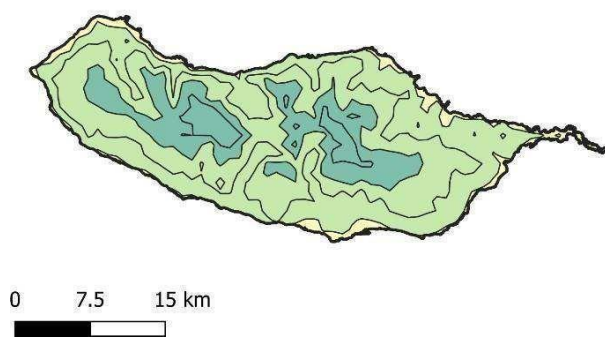


Anomalia de Temperatura (°C)

Estação: Verão
 Cenário: SSP2
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

- 1 - 0
- 0 - 1
- 1 - 2
- 2 - 3
- 3 - 4
- 4 - 5
- 5 - 6

Figura 61 - Anomalia (°C) da temperatura de verão para o cenário SSP2.



Anomalia de Temperatura (°C)

Estação: Outono
 Cenário: SSP5
 Período: 2021-2050
 Referência: 1981-2010

- 1 - 0
- 0 - 1
- 1 - 2
- 2 - 3
- 3 - 4
- 4 - 5
- 5 - 6

Figura 62 - Anomalia (°C) da temperatura de outono para o cenário SSP5.

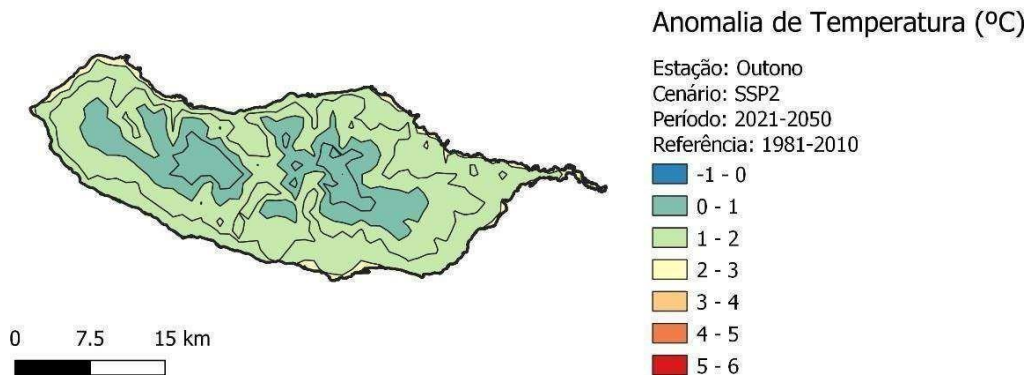
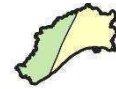


Figura 63 - Anomalia (°C) da temperatura de outono para o cenário SSP2.

Os resultados evidenciam que durante o inverno e primavera é nas cotas mais elevadas que a anomalia da temperatura é maior, podendo chegar a uma diferença de mais 2°C a 3°C quando comparado com o período entre 1981 e 2010. Por outro lado, durante as mesmas estações do ano os resultados indicam poucas alterações na anomalia de temperatura nas cotas mais baixas da ilha da Madeira e de Porto Santo.

No verão e outono a situação inverte-se e são nas cotas mais baixas que a temperatura média tem maior tendência em aumentar, podendo chegar a diferenças de 4°C a 5°C no litoral norte durante o período do verão quando comparado com o período de referência entre 1981 e 2010.

A Figura 64 e Figura 65 pretendem descrever a distribuição e as tendências da temperatura média na ilha da Madeira em ambos os cenários climáticos.

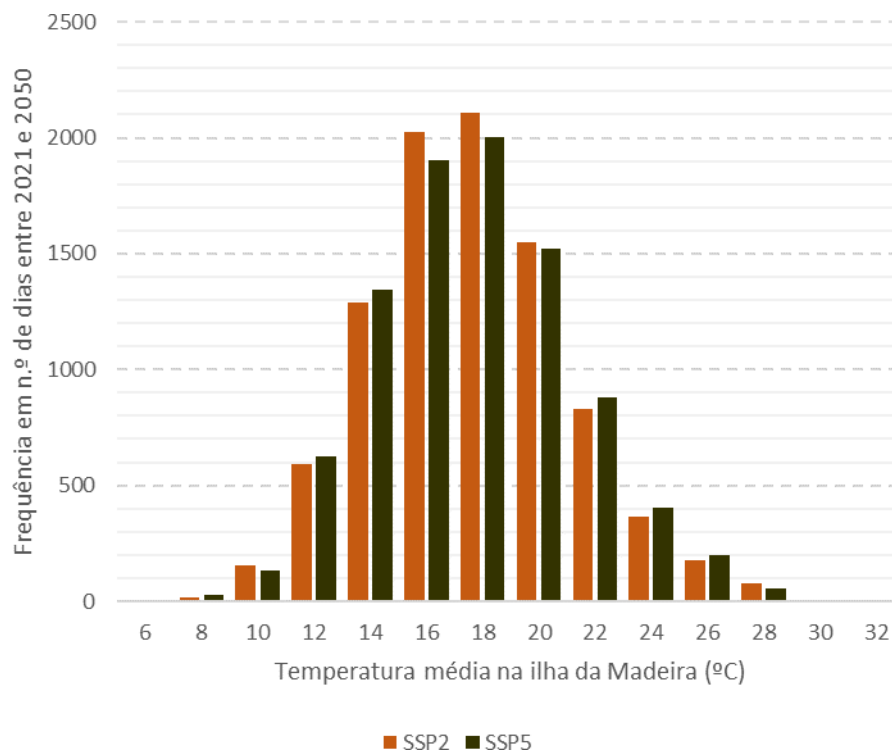


Figura 64 – Histograma da temperatura média diária na Ilha da Madeira para os cenários SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2050.

Os resultados evidenciam que o número de dias entre os 8°C e os 20°C é maior no cenário SSP2 enquanto no cenário SSP5 apresenta uma frequência maior nas temperaturas mais altas. Do ponto de vista mais macro os resultados evidenciam uma ligeira tendência de aumento da temperatura média anual, descrita na média móvel a 12 meses da Figura 65, mas com poucas diferenças entre ambos os cenários.

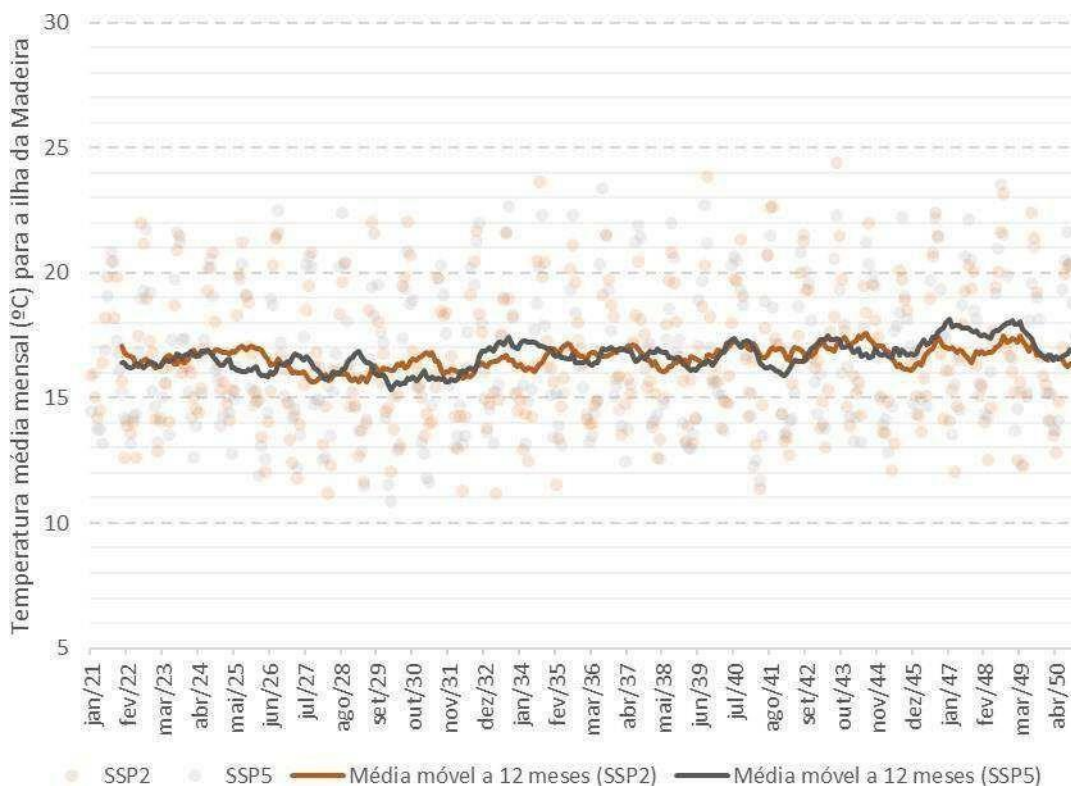


Figura 65 – Projeções da temperatura média mensal na ilha da Madeira para os cenários SSP2 e SSP5 entre 2021 e 2050.

3.3.3. Descrição das anomalias entre 2051 e 2080

O mesmo exercício que foi feito para o período entre 2021 e 2050 foi replicado para caracterizar a segunda metade do século XXI, mas recorrendo às simulações mensais em detrimento das simulações diárias que estiveram na base da caracterização do período anterior.

Os resultados da Figura 70 à Figura 77 demonstram em ambos os cenários e para todas as estações do ano um aumento de até 2°C da temperatura média em Porto Santo. No que diz respeito à ilha da Madeira é nas cotas mais elevadas que a temperatura média tem maior tendência em subir, podendo chegar a uma anomalia de mais 8°C quando comparado com o período de referência de 1981 a 2010.

Nas cotas mais baixas da ilha da Madeira, principalmente junto à linha de costa, as projeções das anomalias rondam um aumento de 2°C para todos os cenários e estações do ano.

Anomalia anual da precipitação entre 2051 e 2080

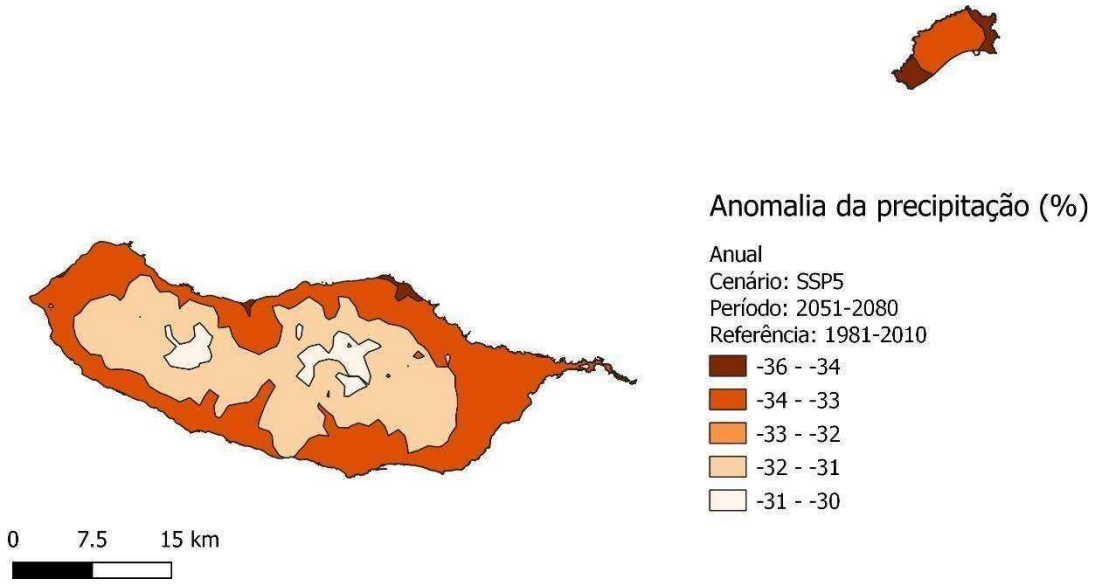


Figura 66 - Anomalia (%) da precipitação anual para o cenário SSP5 (2051-2080)

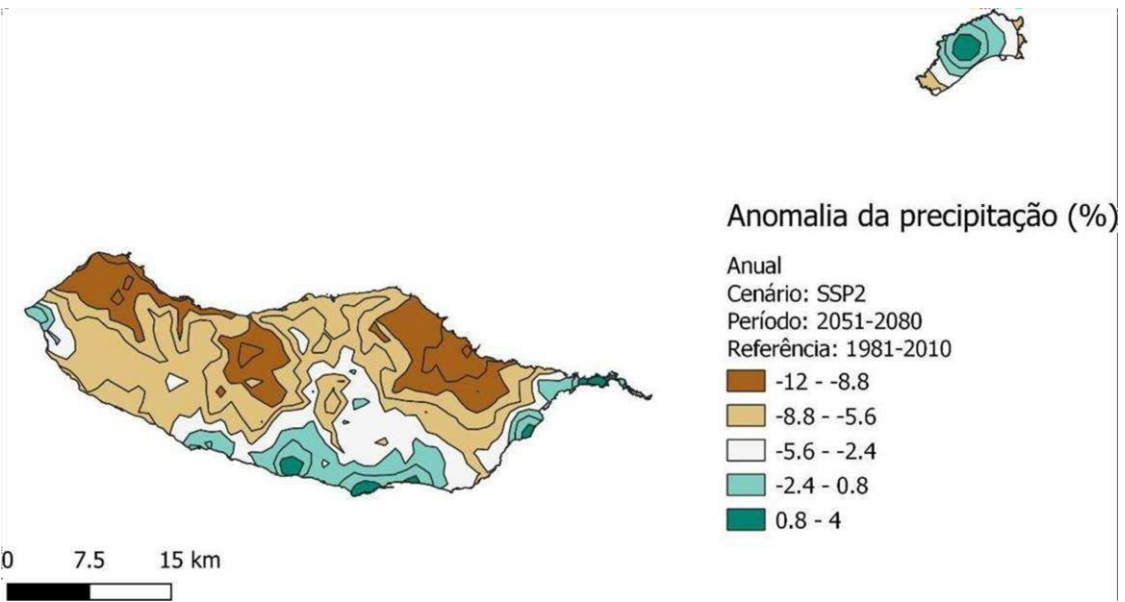


Figura 67 - Anomalia (%) da precipitação anual para o cenário SSP2 (2051-2080)

Anomalia anual da temperatura entre 2051 e 2080

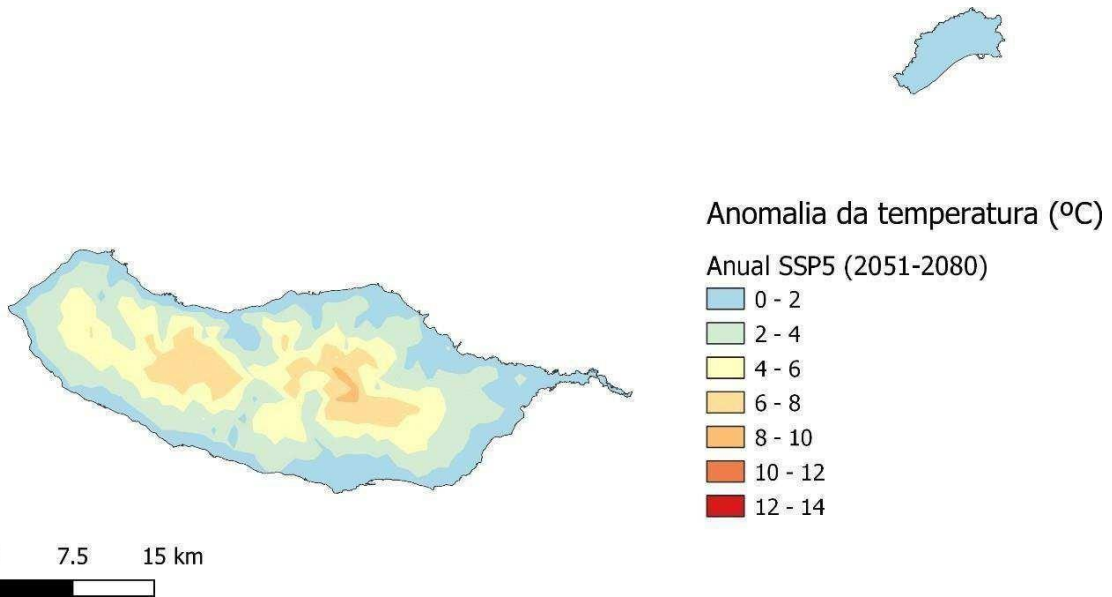


Figura 68 - Projeções da anomalia da temperatura anual entre 2051 e 2080, no cenário SSP5

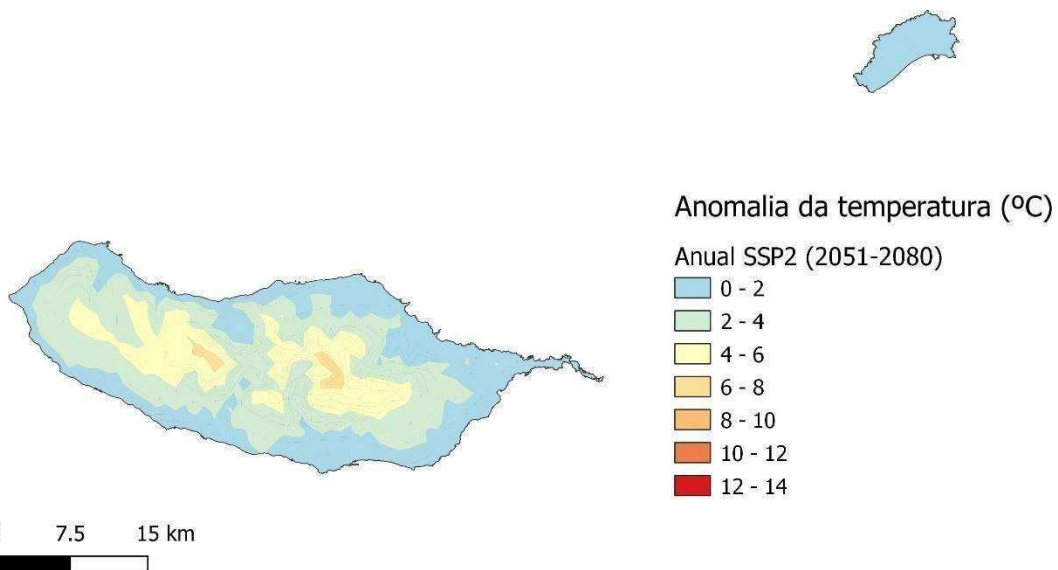


Figura 69 - Projeções da anomalia da temperatura anual entre 2051 e 2080, no cenário SSP2

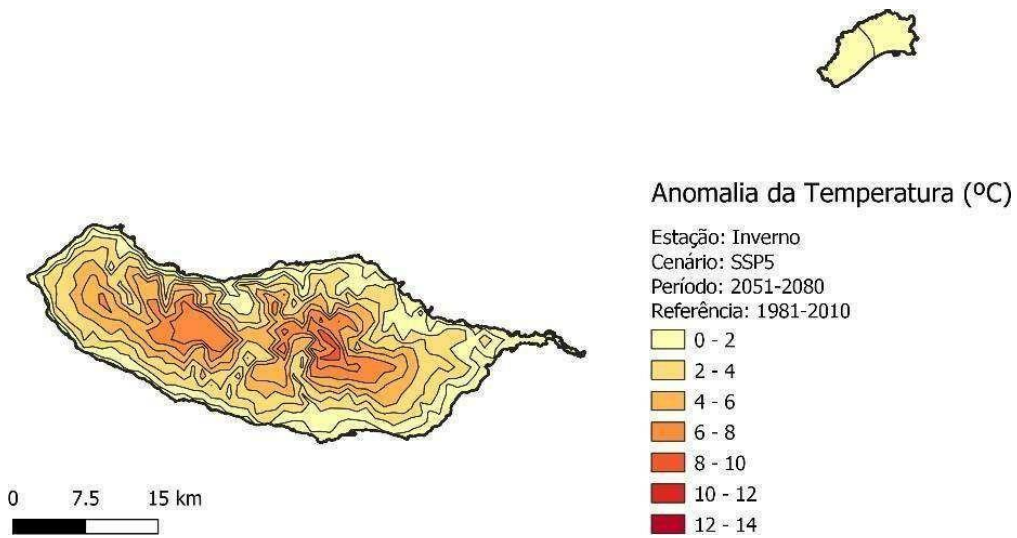


Figura 70 – Projeções da anomalia da temperatura de inverno para o cenário SSP5, entre 2051 e 2080.

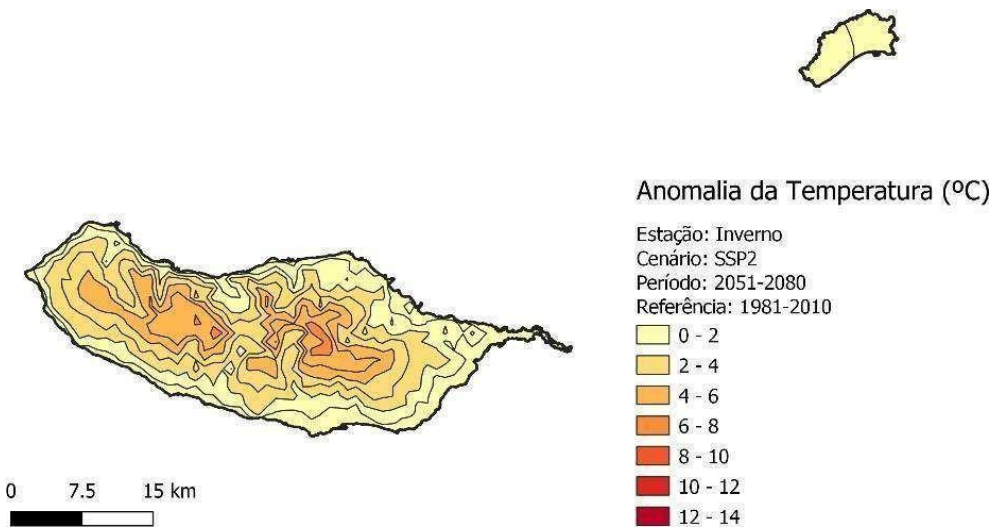


Figura 71 - Projeções da anomalia da temperatura de inverno para o cenário SSP2, entre 2051 e 2080.

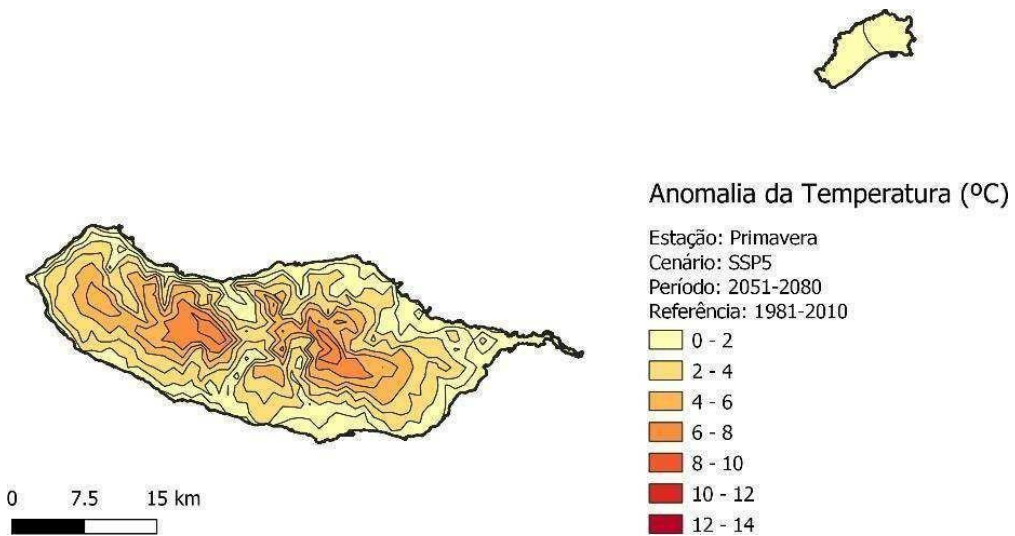


Figura 72 - Projeções da anomalia da temperatura de primavera para o cenário SSP5, entre 2051 e 2080.

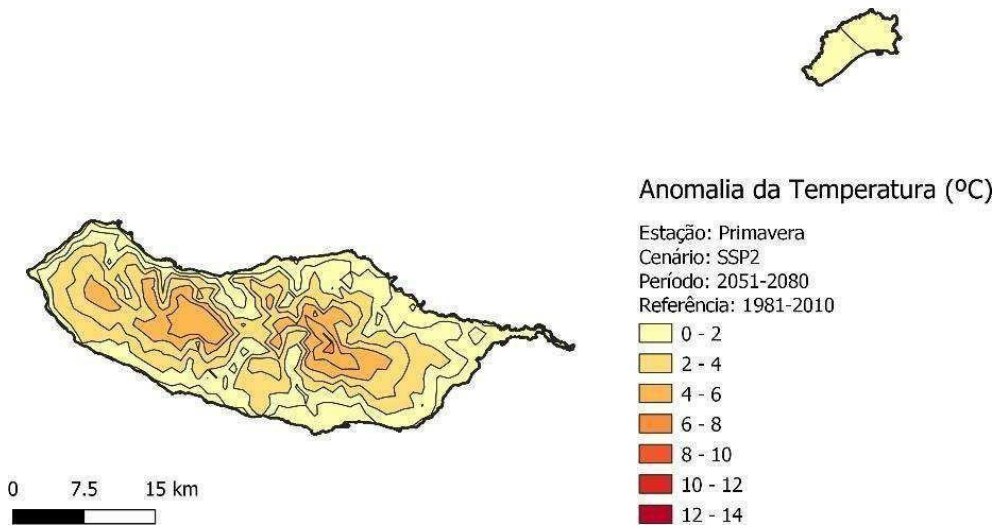


Figura 73 - Projeções da anomalia da temperatura de primavera para o cenário SSP2, entre 2051 e 2080.

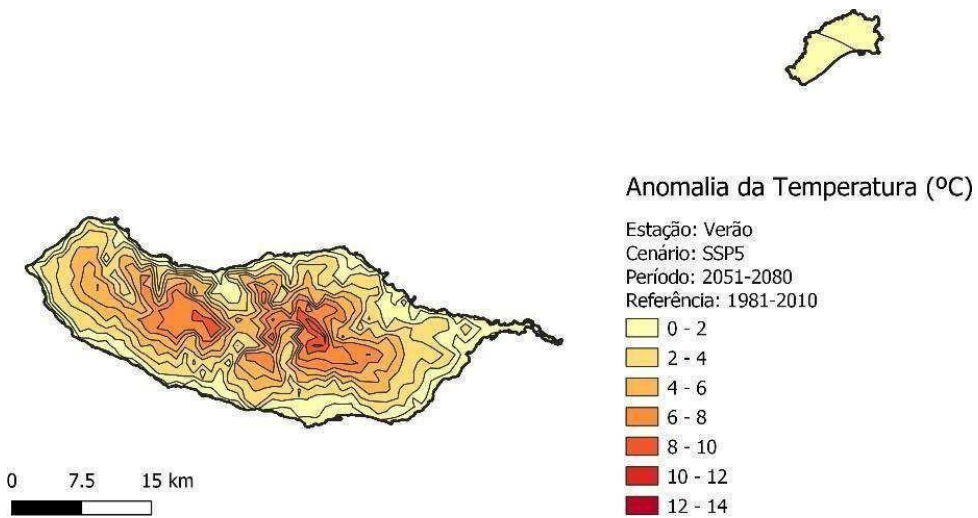


Figura 74 - Projeções da anomalia da temperatura de verão para o cenário SSP5, entre 2051 e 2080.

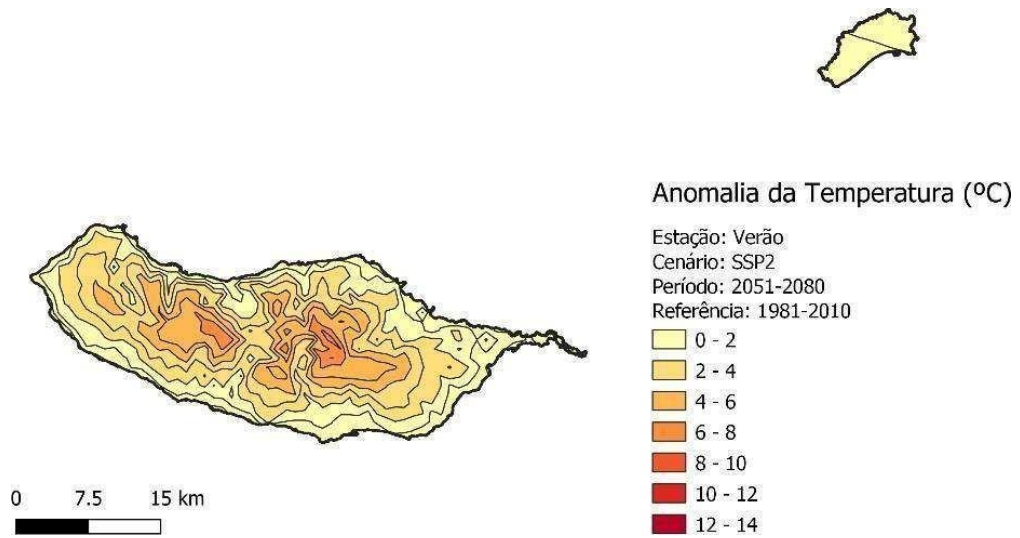


Figura 75 - Projeções da anomalia da temperatura de verão para o cenário SSP2, entre 2051 e 2080.

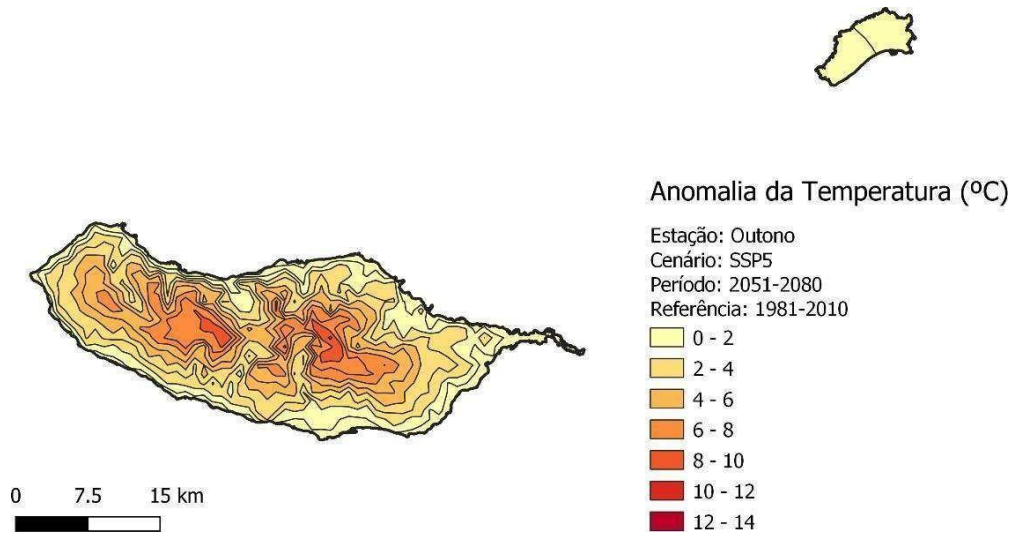


Figura 76 - Projeções da anomalia da temperatura de outono para o cenário SSP5, entre 2051 e 2080.

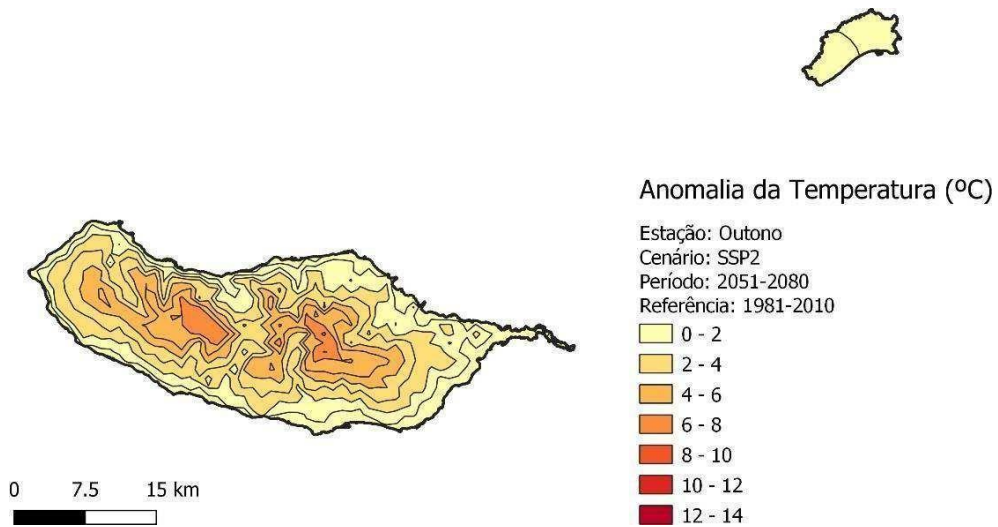


Figura 77 - Projeções da anomalia da temperatura de outono para o cenário SSP2, entre 2051 e 2080.

As figuras entre a Figura 78 e Figura 85 caracterizam a anomalia da precipitação em relação ao período de referência onde se destaca uma tendência de aumento da precipitação a sul da ilha da Madeira durante o inverno e primavera no cenário SSP2. De acordo com os dados da Figura 33 e a análise feita na Figura 35 para o período de 2021 a 2050 é de esperar que este aumento na média da precipitação possa estar a ser influenciada pelo aumento dos eventos extremos.

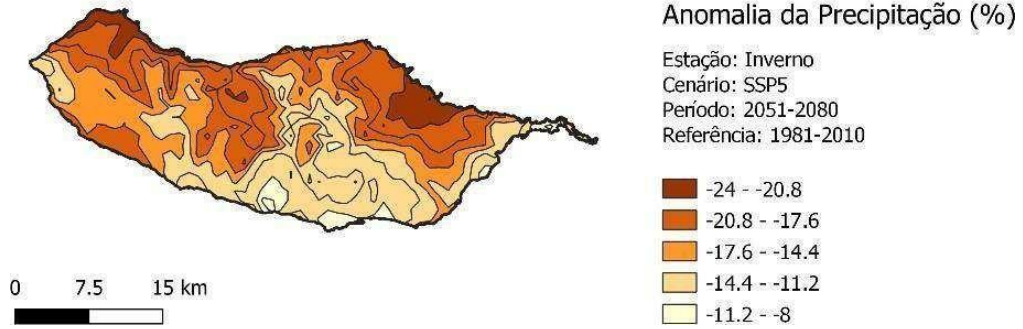


Figura 78 – Projeções da anomalia da precipitação de inverno entre 2051 e 2080 para o cenário SSP5.

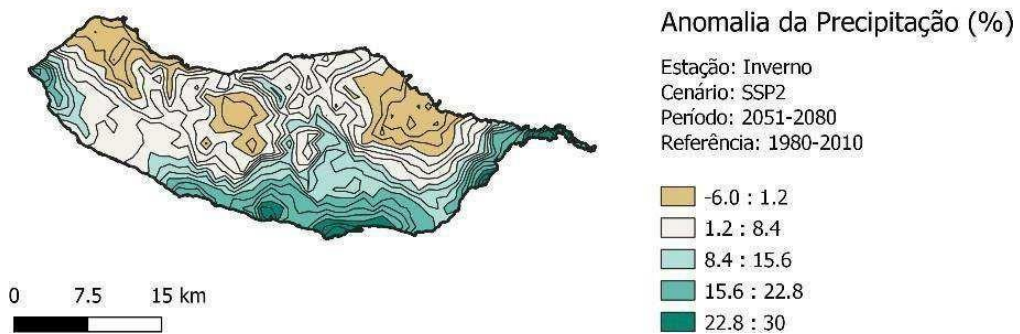


Figura 79 - Projeções da anomalia da precipitação de inverno entre 2051 e 2080 para o cenário SSP2.

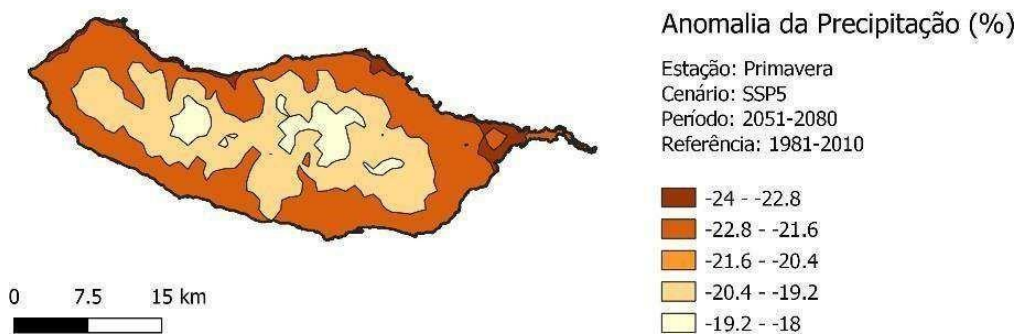


Figura 80 - Projeções da anomalia da precipitação de primavera entre 2051 e 2080 para o cenário SSP5.

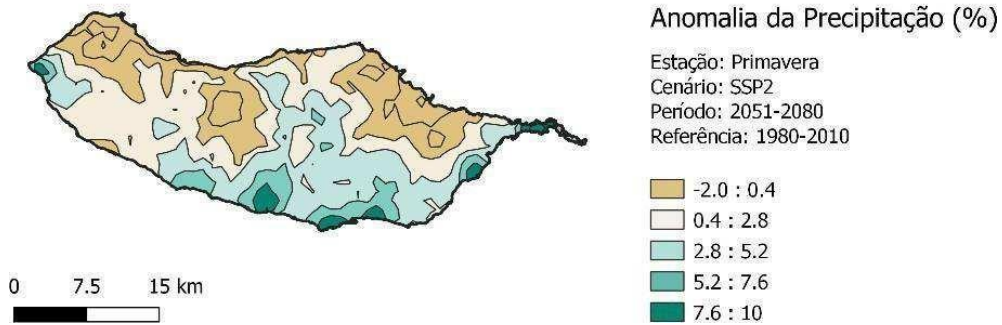


Figura 81 - Projeções da anomalia da precipitação de primavera entre 2051 e 2080 para o cenário SSP2.

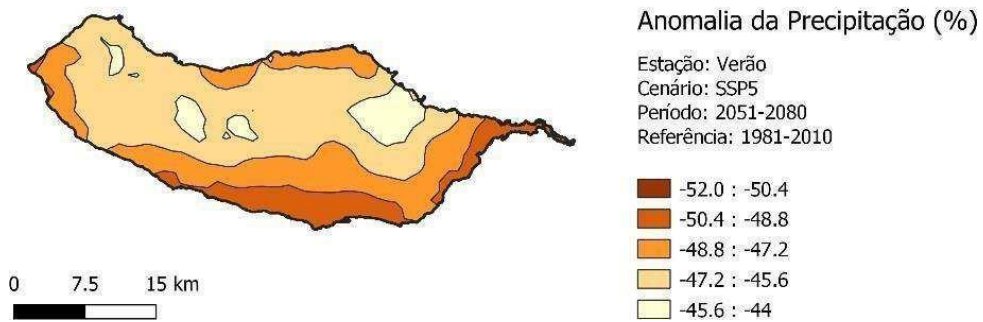


Figura 82 - Projeções da anomalia da precipitação de verão entre 2051 e 2080 para o cenário SSP5.

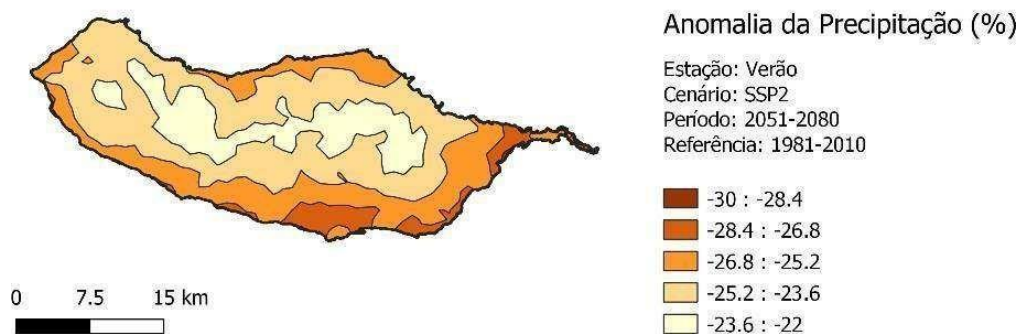


Figura 83 - Projeções da anomalia da precipitação de verão entre 2051 e 2080 para o cenário SSP2.

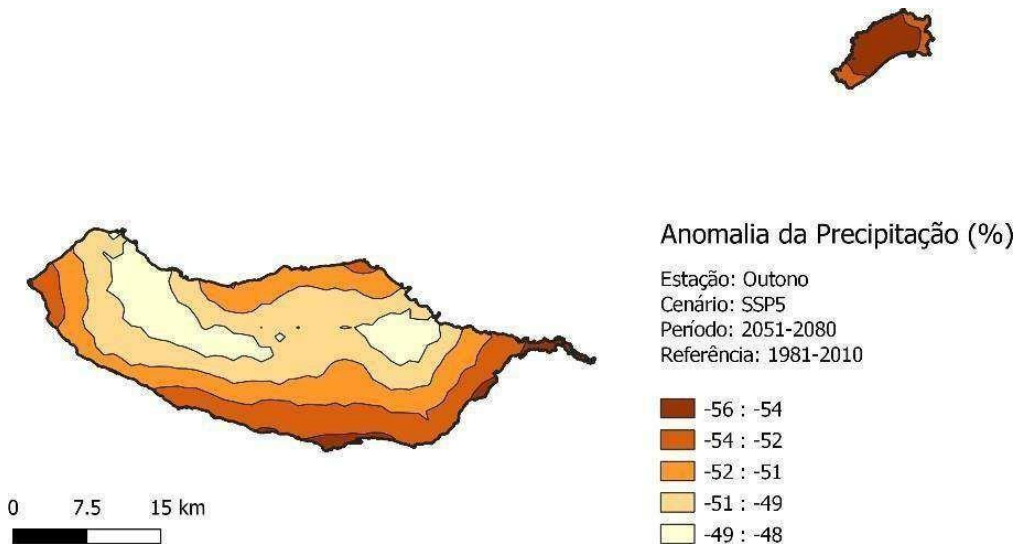


Figura 84 - Projeções da anomalia da precipitação de outono entre 2051 e 2080 para o cenário SSP5.

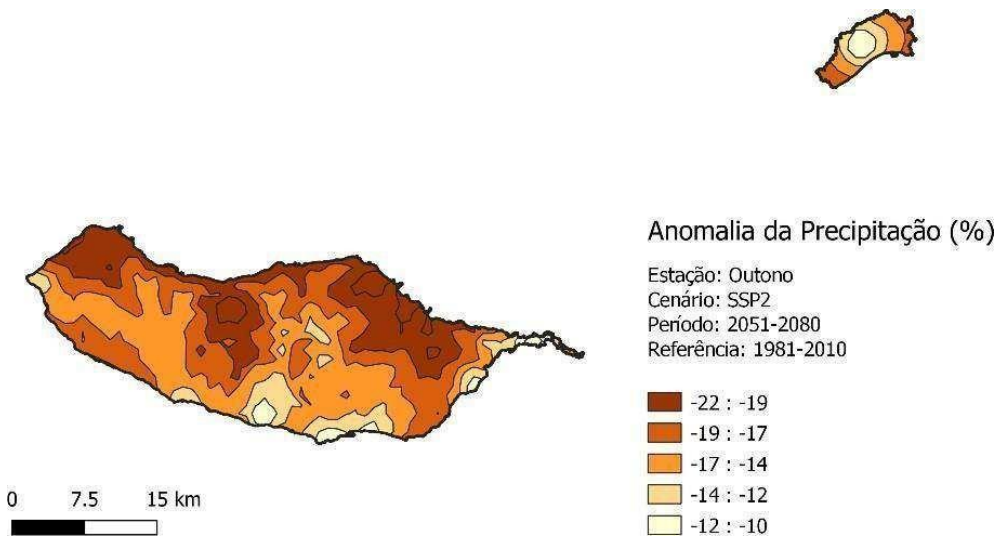


Figura 85 - Projeções da anomalia da precipitação de outono entre 2051 e 2080 para o cenário SSP2.

3.3.4. Descrição das anomalias entre 2081 e 2100

Para os últimos 20 anos do século XXI as anomalias da temperatura continuam a evidenciar um padrão de aumento médio de 2°C em Porto Santo e junto á linha de costa no perímetro da ilha da Madeira, à semelhança das projeções do período anterior. No entanto, é importante evidenciar que no cenário SSP5 as anomalias são muito significativas a partir dos 300 metros de altitude, podendo chegar, em termos médios, a valores superiores a 10°C nas cotas mais elevadas.

Anomalia anual da precipitação entre 2081 e 2100

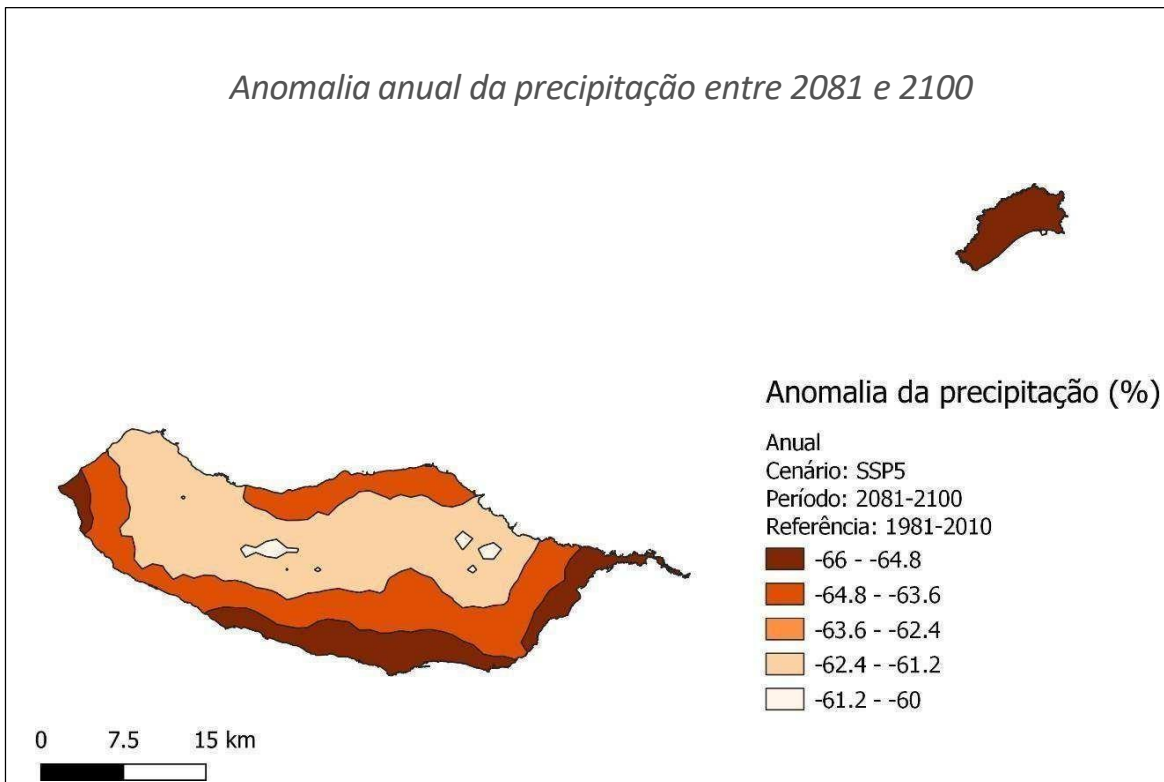


Figura 86 - Anomalia (%) da precipitação anual para o cenário SSP5 (2081-2100)

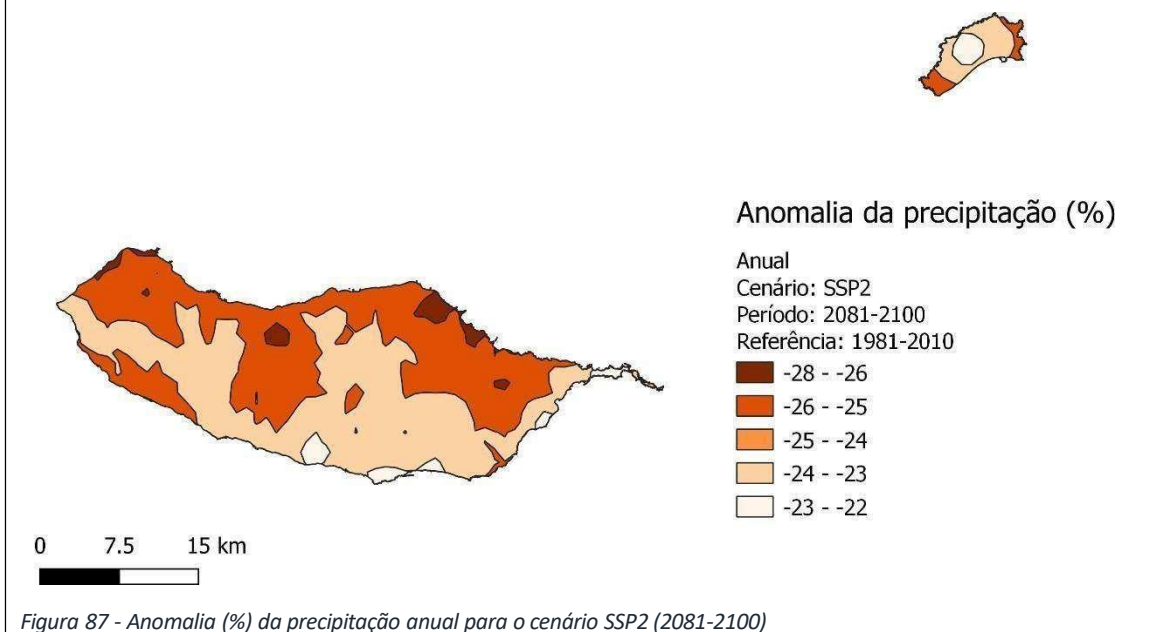


Figura 87 - Anomalia (%) da precipitação anual para o cenário SSP2 (2081-2100)

Anomalia anual da temperatura entre 2081 e 2100

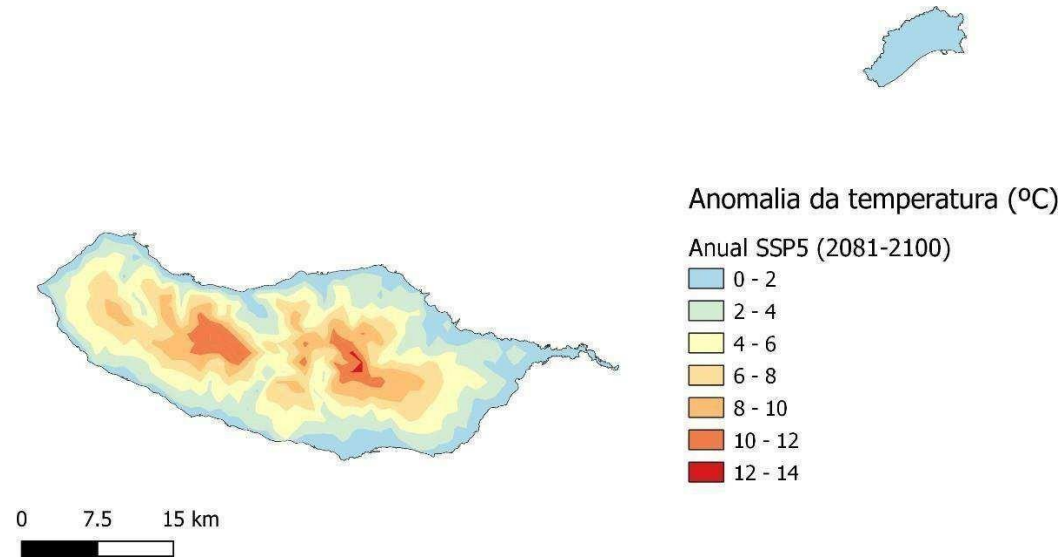


Figura 88 - Projeções da anomalia da temperatura anual entre 2081 e 2100, no cenário SSP5

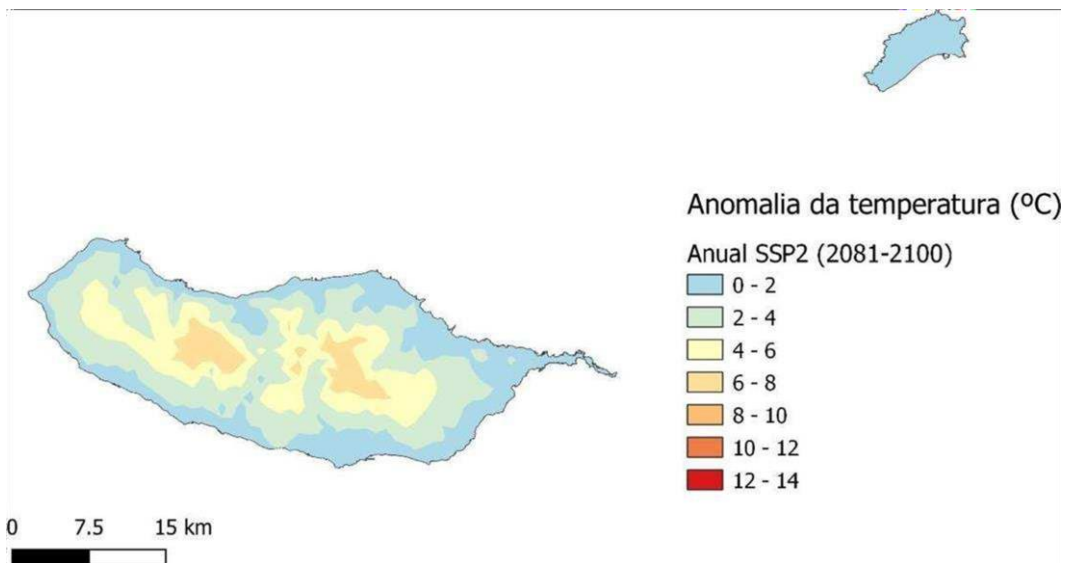


Figura 89 - Projeções da anomalia da temperatura anual entre 2081 e 2100, no cenário SSP2

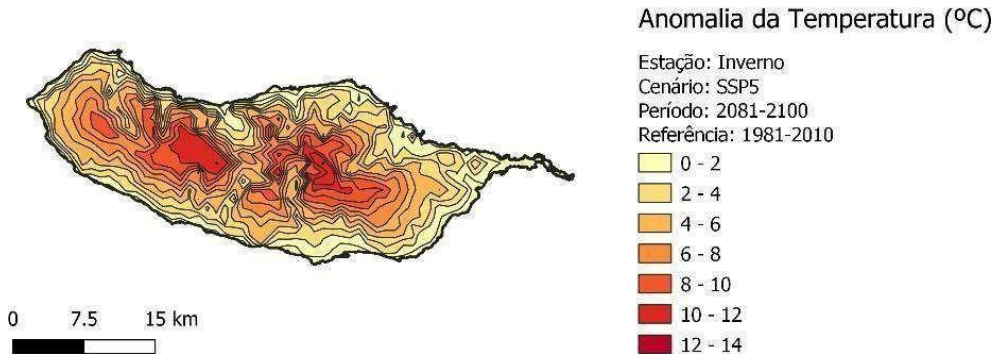
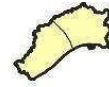


Figura 90 – Projeções da anomalia da temperatura de inverno entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

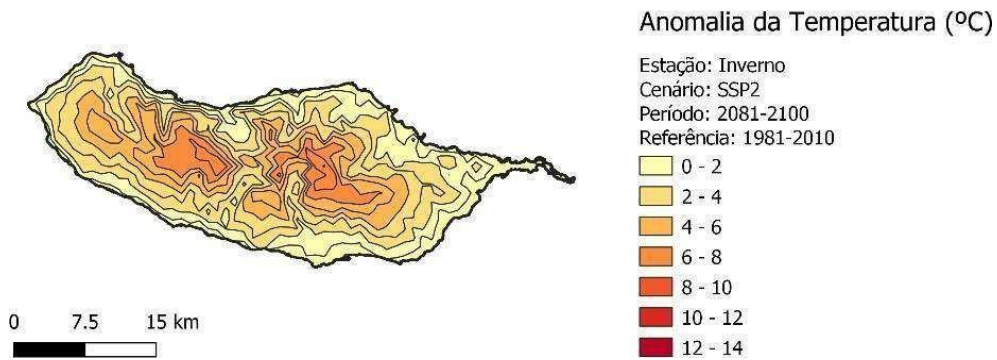
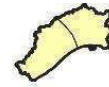


Figura 91 - Projeções da anomalia da temperatura de inverno entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

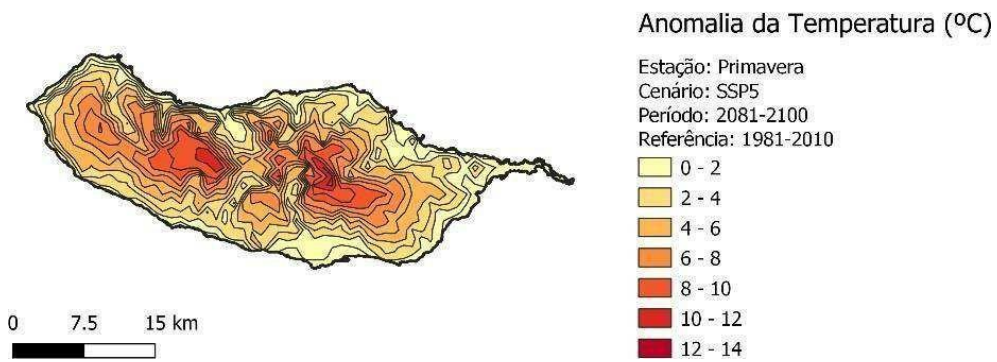
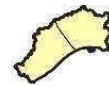


Figura 92 - Projeções da anomalia da temperatura de primavera entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

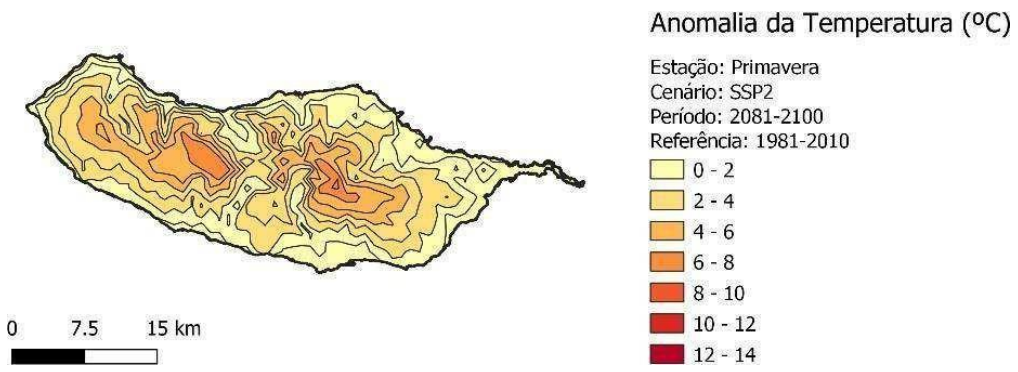


Figura 93 - Projeções da anomalia da temperatura de primavera entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

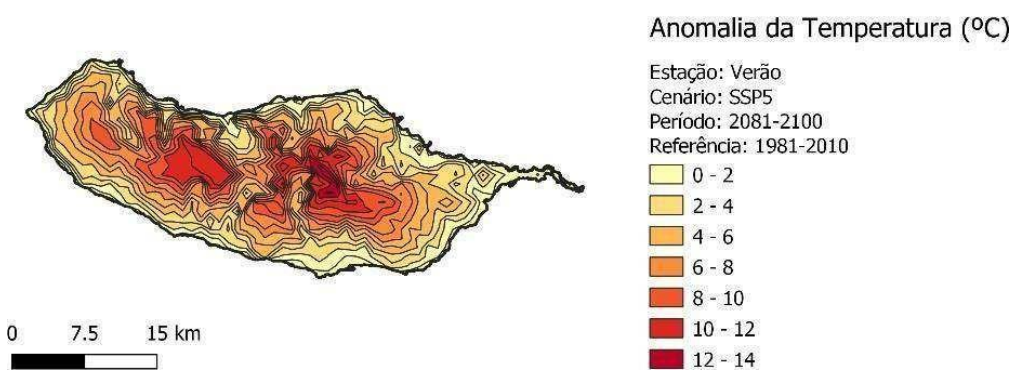
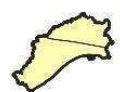


Figura 94 - Projeções da anomalia da temperatura de verão entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

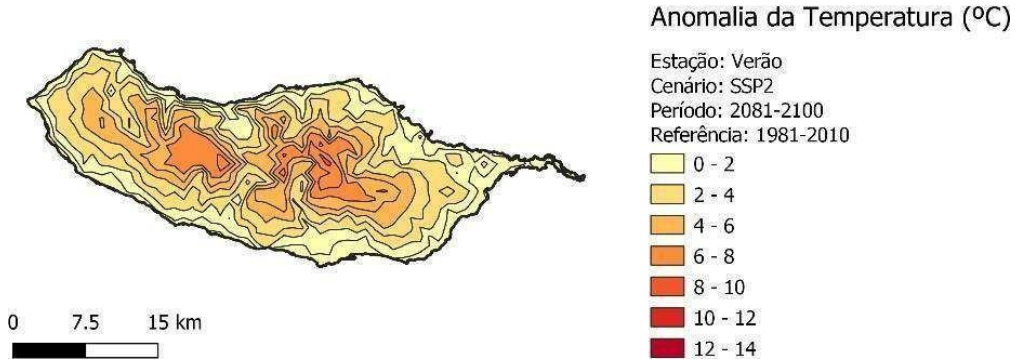
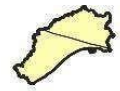


Figura 95 - Projeções da anomalia da temperatura de verão entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

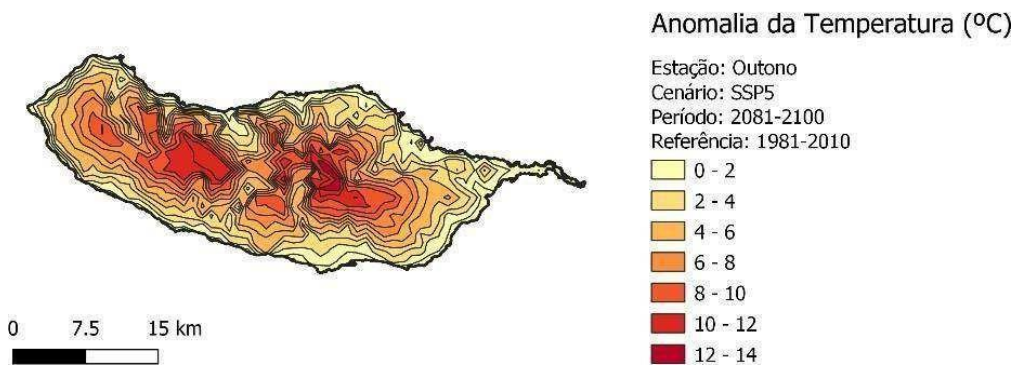


Figura 96 - Projeções da anomalia da temperatura de outono entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

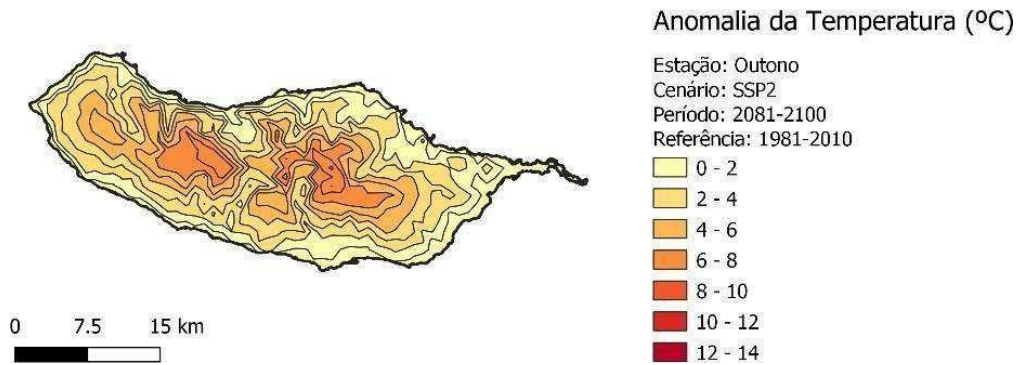


Figura 97 - Projeções da anomalia da temperatura de outono entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

Relativamente às projeções da precipitação, da Figura 98 à Figura 105, o cenário SSP5 mantém a tendência muito significativa de diminuição da precipitação em todas as estações do ano, com um impacto potencial maior em Porto Santo e na região sul da ilha da Madeira. De notar que durante este período a diminuição da precipitação poderá também indicar uma diminuição dos extremos quando comparado com o período anterior para o cenário SSP5, mas com a exceção do cenário SSP2 durante a primavera. De uma forma geral as projeções indicam que é no cenário menos gravoso em termos de emissões globais (SSP2) que irá ser desencadeado um aumento da frequência de fenómenos de precipitação extremas, principalmente durante o período de inverno e primavera.

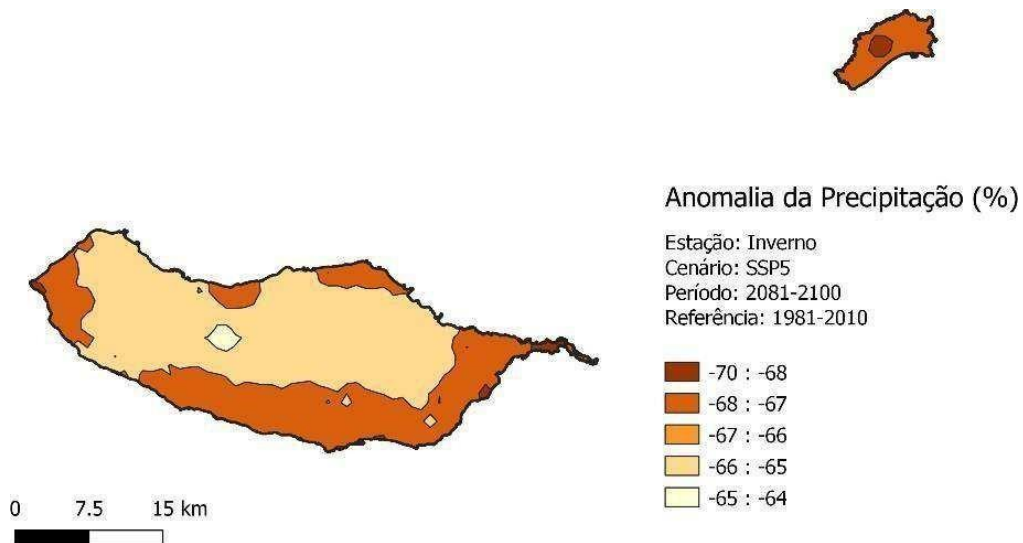


Figura 98 - Projeções da anomalia da precipitação de inverno entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

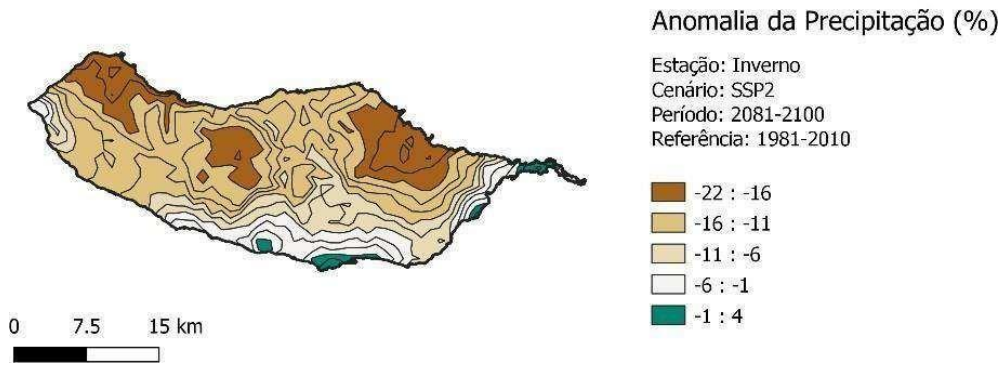


Figura 99 - Projeções da anomalia da precipitação de inverno entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

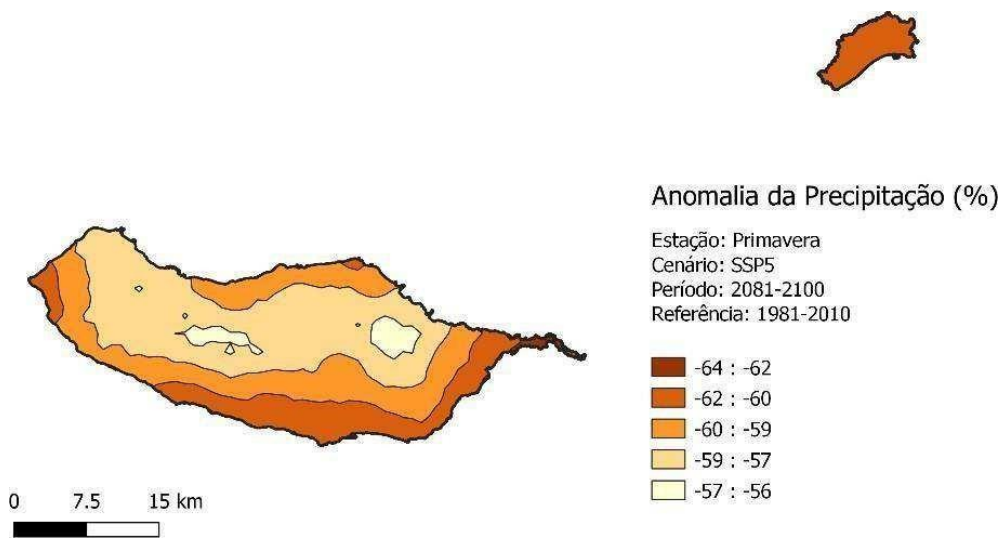


Figura 100 - Projeções da anomalia da precipitação de primavera entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

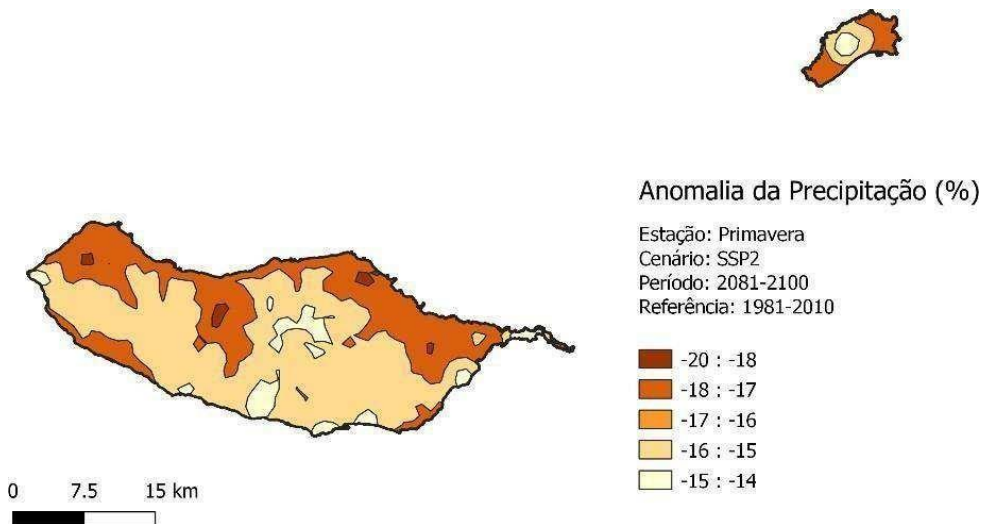


Figura 101 - Projeções da anomalia da precipitação de primavera entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

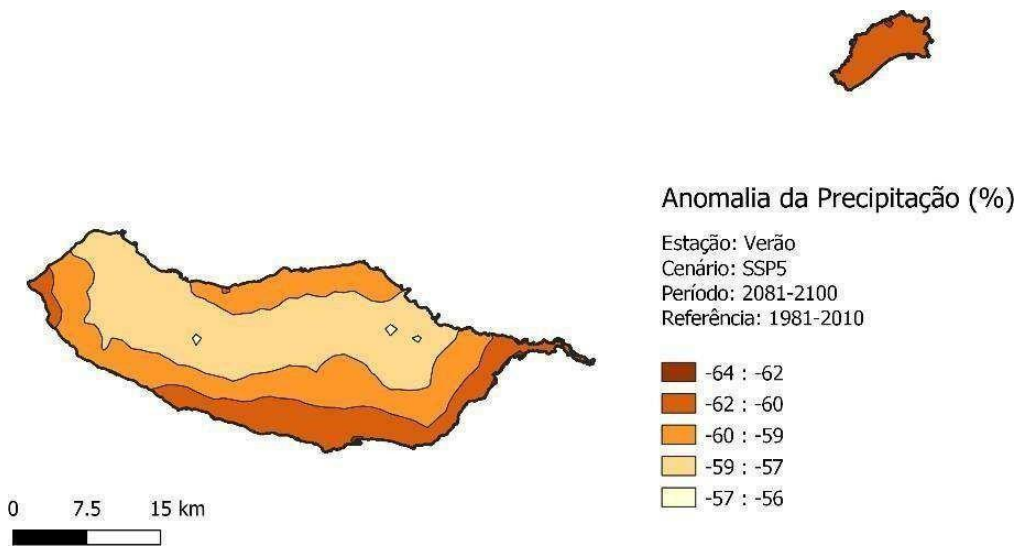


Figura 102 - Projeções da anomalia da precipitação de verão entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

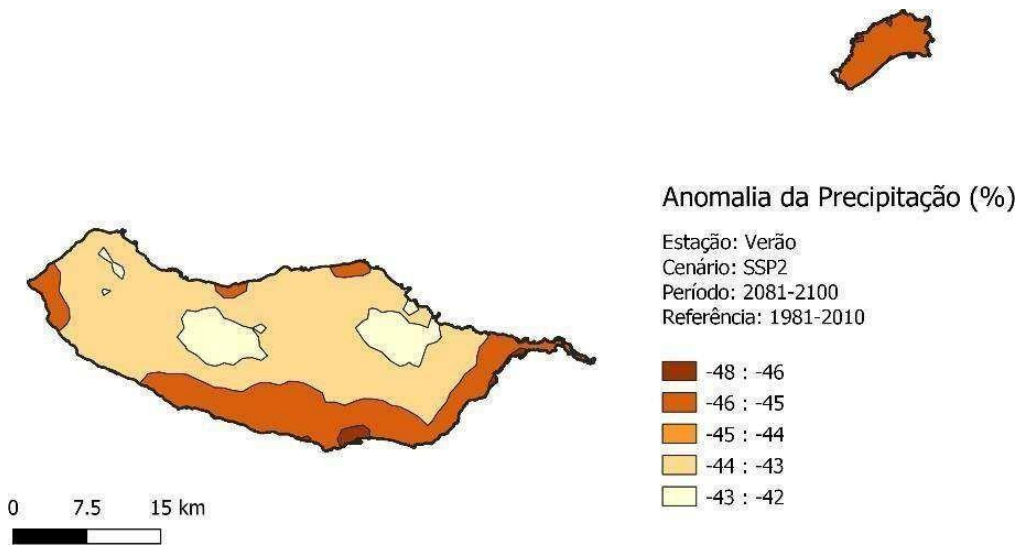


Figura 103 - Projeções da anomalia da precipitação de verão entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

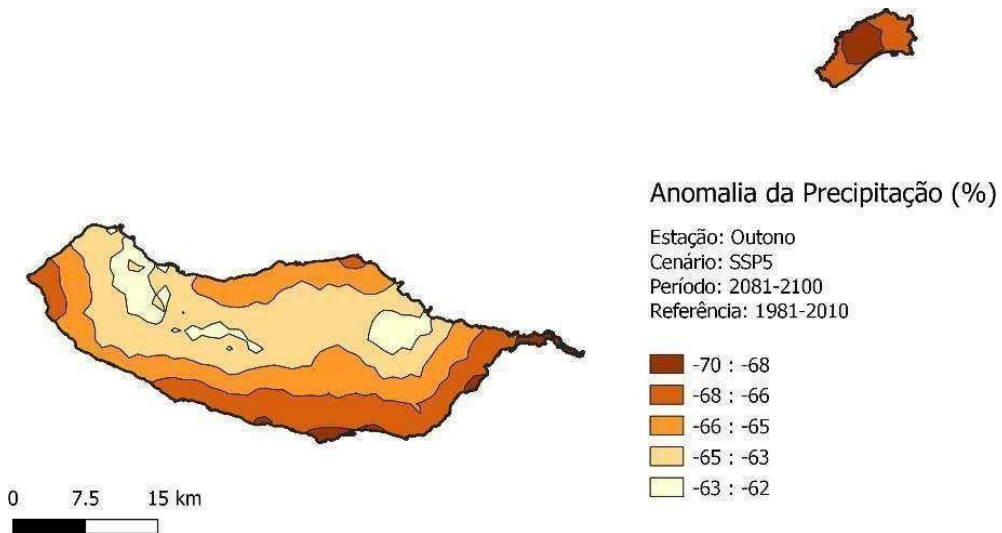


Figura 104 - Projeções da anomalia da precipitação de outono entre 2081 e 2100, no cenário SSP5.

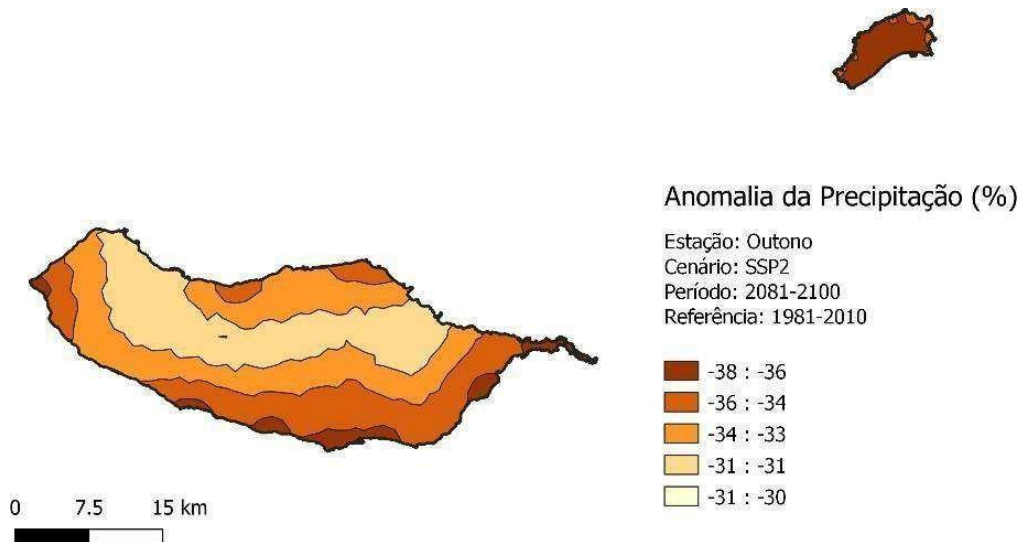


Figura 105 - Projeções da anomalia da precipitação de outono entre 2081 e 2100, no cenário SSP2.

4.4. Projeções da subida do nível médio do mar

A maior parte da subida do nível do mar observada provém da expansão térmica, ou da expansão da água do oceano à medida que aquece, sendo que o degelo terrestre e dos glaciares têm cada vez mais contribuído para o aumento do volume do oceano, nomeadamente devido às perdas das camadas de gelo da Gronelândia e da Antártida.

O IPCC, em colaboração com a NASA, desenvolveram uma ferramenta (disponível em: <https://sealevel.nasa.gov/>) que permite aos utilizadores visualizar e descarregar os dados das projeções do nível do mar de acordo com o 6º Relatório de Avaliação do IPCC (AR6).

Tendo como referência o Funchal como representativo do impacto da subida do nível médio do mar na RAM, os dados evidenciam que até 2100 as estimativas variam entre os 0,62m e os 0,87m em termos médios, para os cenários SSP2 e SSP5 respetivamente. Por outro lado, é importante salientar que este processo é irreversível durante os próximos séculos pelo que as estimativas até 2150 em ambos os cenários é de uma subida do nível médio do mar superior a 1m quando comparado com os dados entre 1995 a 2014.

Na Figura 106 os intervalos a sombreado mostram o percentil 17 e 83, tendo como referência a base de 1995-2014.

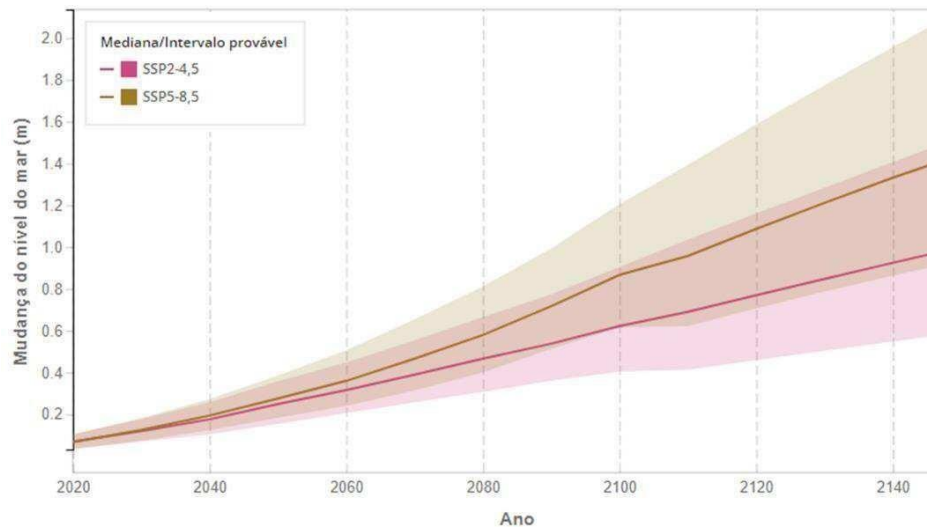


Figura 106 – Projeções da subida do nível médio do mar para os cenários SSP2 e SSP5 até 2150. Fonte: [Sea Level Projection Tool – NASA Sea Level Change Portal](https://sealevelprojectiontool.jpl.nasa.gov/)

4.5. Projeções do vento e radiação

As projeções do vento para os cenários SSP2 e SSP5 foram obtidos através do Atlas Interativo do IPCC, disponível em: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>.

Os resultados representam as projeções de 31 modelos anuais, avaliados pelo CMIP6, para diferentes horizontes temporais no atlântico norte. A análise da Figura 107 e Figura 108 indicam que em ambos os cenários existem uma tendência clara de diminuição da velocidade média do vento à superfície, que poderá variar em cerca de -2% no cenário SSP2 e quase -4% no cenário SSP5 até ao final do século.

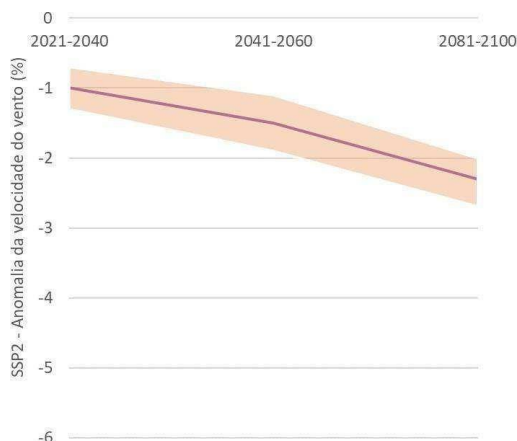


Figura 107 – Projeções da anomalia da velocidade do vento à superfície no cenário SSP2.

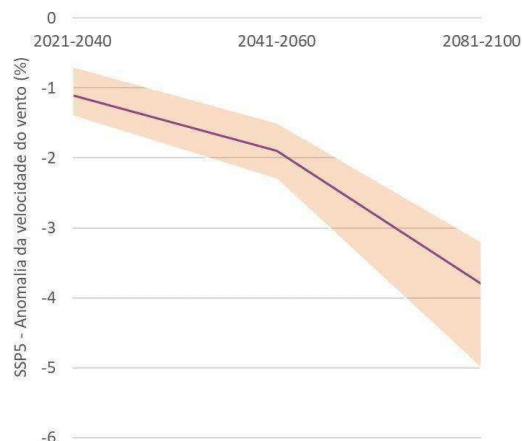


Figura 108 - Projeções da anomalia da velocidade do vento à superfície no cenário SSP5.

A Radiação Solar de Onda Curta Incidente à Superfície (Surface Downwelling Shortwave Radiation, SDSR) refere-se à quantidade de radiação solar de onda curta (com comprimentos de onda entre 0,3 e 3,0 micrómetros) que atinge a superfície da Terra e é absorvida por ela. É uma medida da radiação solar incidente disponível para processos como a fotossíntese, evaporação e aquecimento da superfície da Terra.

A SDSR é geralmente medida em unidades de watts por metro quadrado (W/m^2) e é influenciada por vários fatores, como o ângulo do sol, a hora do dia, a latitude, a estação do ano, a presença de nuvens e aerossóis atmosféricos. A Figura 109 representa a média móvel a 10 anos da SDSR,

para o período de referência entre 1981 e 2010 e os cenários SSP2 e SSP5, do modelo CanESM5 para a mesma latitude e longitude da Madeira.

Os resultados evidenciam uma tendência de aumento médio generalizado dos valores de SDR em cerca de 3 W/m² entre 2021 e 2050 quando comparado com o período de referência, e de 5 a 7 W/m² para a segunda metade do século XXI.

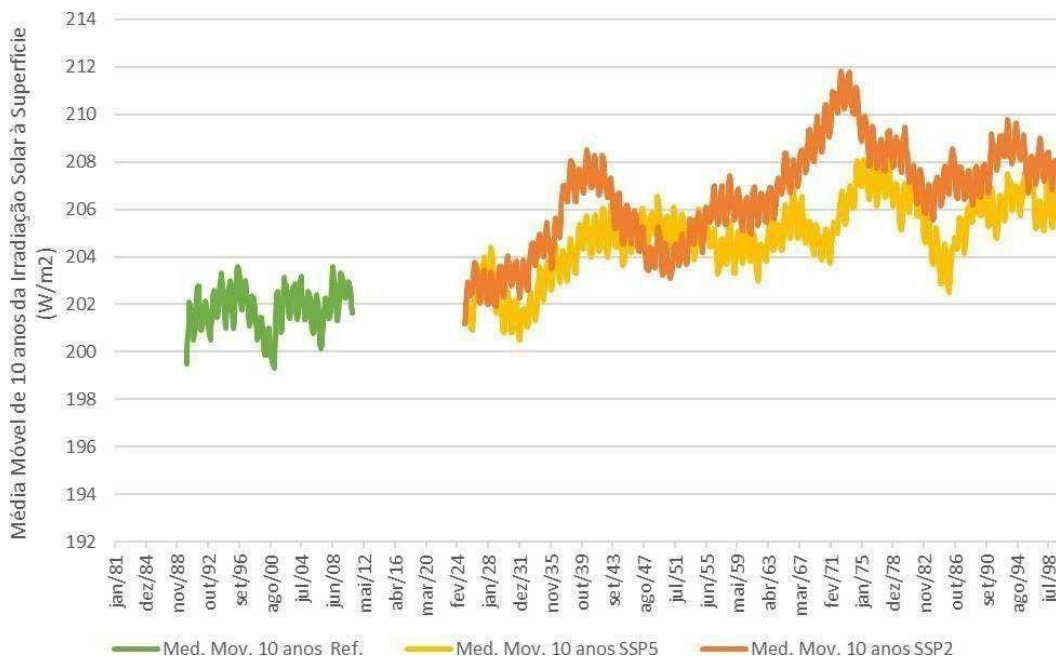


Figura 109 – Média móvel a 10 anos da irradiação solar à superfície para o período de referência 1981-2010 e entre 2015 e 2100 para os cenários SSP2 e SSP5.

5. Conclusões gerais

Neste trabalho foram realizadas 49.850 simulações, para caracterizar: (i) a precipitação e temperatura diária entre 2021 - 2050; e (ii) a precipitação e temperatura médias mensais entre 2051 e 2100. Foram usados os mais recentes cenários do sexto relatório do IPCC, os chamados SSP's divulgados em meados de 2022, que representam os avanços científicos mais recentes sobre a caracterização do sistema climático, substituindo a análise anterior feita para a RAM com base nos cenários SRES publicados em 2000. Uma diferença na revisão dos cenários da RAM é que o período de referência, ou de comparação, passou a ser de 1981 a 2010, em vez da referência entre 1970 e 1990 usada no estudo anterior. De notar, que em termos comparativos as anomalias das novas projeções sobre o aumento da temperatura praticamente duplicaram em todos os cenários e horizontes temporais (Figura 30), enquanto a tendência de aumento dos extremos de precipitação foi finalmente comprovada (Figura 35).

O processo de validação e calibração dos modelos são morosos e desafiantes. Os resultados alcançados indicam um ajuste significativo entre as simulações e as observações, tal como evidenciado pela Figura 9 e Figura 10. É necessário também notar que os coeficientes de determinação (R^2) de dados agregados tende a ser superior quando comparados com os dados desagregados, mas não deixa de ser uma importante referência sobre a performance das simulações.

Os resultados também evidenciam padrões e ordens de grandeza muito semelhantes entre as simulações e as observações, mas destaca-se uma generalizada sobrestimação da precipitação simulada no mês de janeiro e abril, bem como uma ligeira subestimação da precipitação simulada no mês de novembro. É igualmente importante referir a capacidade de o modelo conseguir simular de forma muito satisfatória a precipitação de verão, que é normalmente considerada de muito difícil representação do ponto de vista dos métodos analíticos, dada os valores muito baixos durante este período.

Em relação à temperatura verifica-se uma concordância muito elevada entre as simulações e as observações, mas com uma tendência generalizada de subestimação que é mais pronunciada nos meses de junho, setembro e outubro (Figura 12).

Finalmente, os resultados que comparam as projeções de precipitação e temperatura com o período de referência (1981 a 2010) através do cálculo da anomalia, sugerem uma concordância generalizada das tendências, em linha com estudos anteriores nomeadamente a tese de doutoramento de Ricardo Tomé (2013) e os cenários do Observatório Clima Madeira (2015).

É importante referir que, através da análise dos resultados da Tabela 4, a precipitação anual na ilha da Madeira demonstra uma tendência de diminuição em todos os horizontes temporais e cenários, onde se espera uma redução entre 24% a 65% até 2100, de acordo com os cenários SSP2 e SSP5 respetivamente. Em Porto Santo a tendência é semelhante com uma diminuição entre 24% a 65% até 2100 da precipitação total anual.

No que respeita a eventos de precipitação extrema, a análise efetuada para a estação Bica da Cana, evidenciada na Figura 35, revela que em ambos os cenários até meados do século existe uma tendência de aumento da frequência e intensidade dos regimes de precipitação mais intensos. Por outro lado, os mesmos dados também indicam através do índice de precipitação SPI a 12 meses, da Tabela 6, que a frequência de períodos de seca moderada também demonstra uma tendência de aumento, pelo que podemos concluir que ambos os extremos de seca e de precipitação intensa poderão vir a ser mais intensos e frequentes. De referir que esta análise só foi possível recorrendo às simulações diárias entre 2021 e 2050, e representam uma diferença significativa, quando comparado com as análises feitas nos estudos anteriores sobre regionalização climática na RAM.

Relativamente à variação da temperatura média anual as projeções indicam um aumento médio entre 3.1°C e 4.9°C até ao final do século, de acordo com os cenários SSP2 e SSP5

respetivamente. De salientar, que na generalidade dos casos é nas cotas mais altas que a anomalia da temperatura tende a ser superior. Já em Porto Santo a anomalia mantém-se consistente em ambos os cenários, evidenciando uma diferença de 2°C quando comparado com o período de referência, a partir de meados do século e até 2100.

No que diz respeito à subida do nível médio do mar é expectável um aumento superior a 1 metro até 2150, sendo que este processo é irreversível nos próximos séculos dado a inércia do sistema.

Os resultados também evidenciam uma tendência de diminuição anual da velocidade do vento à superfície que poderá chegar até -4% no pior cenário até ao final do século, ao mesmo tempo que se verifica uma tendência de aumento da irradiação solar de 5 a 7 W/m².

6. Servidor de mapas

O desenvolvimento de um servidor de mapas teve como objetivo reunir e disponibilizar toda a cartografia produzida na estratégia CLIMA-MADEIRA, bem como os resultados das novas projeções climáticas.

A Figura 110 mostra uma fotografia no browser, com destaque para o menu do lado direito, a amarelo, para as diferentes funcionalidades da ferramenta. As principais funcionalidades são: (i) acesso à lista cartográfica; (ii) descarregamento da cartografia; (iii) e descarregamento das projeções à escala do município ou bacia hidrográfica.



Figura 110 – Servidor de Mapas.

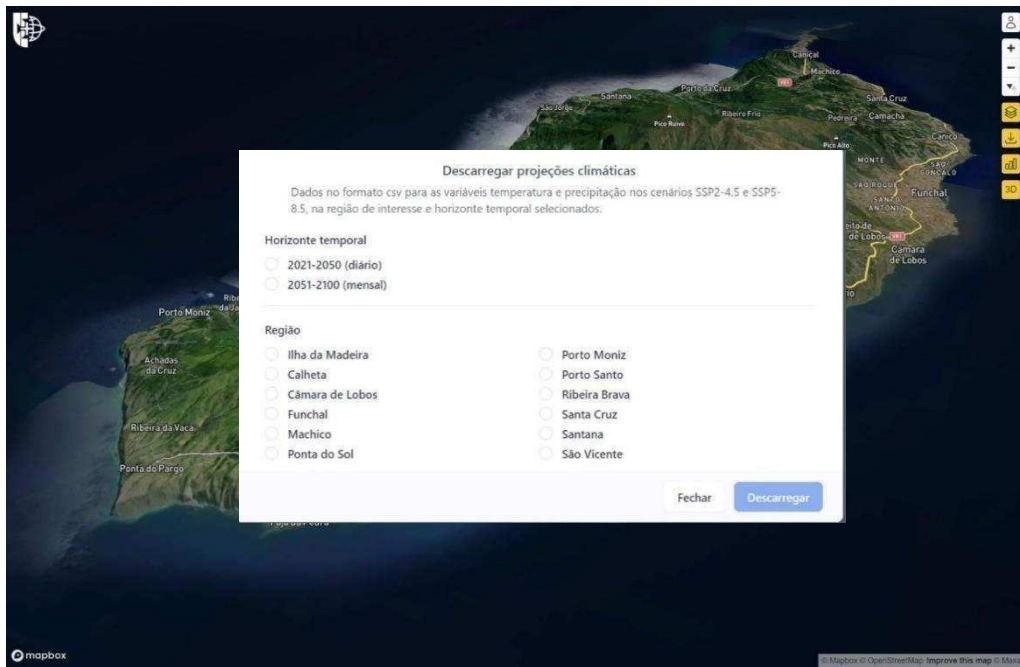


Figura 111 – Modo de descarregamento das projeções climáticas.

A área de gestão é constituída por três secções principais: (i) área de upload da cartografia em formato vetorial (Figura 112); (ii) área de edição de mapas (Figura 113); e (iii) área de edição do menu que representa os grupos temáticos da cartografia (Figura 114).

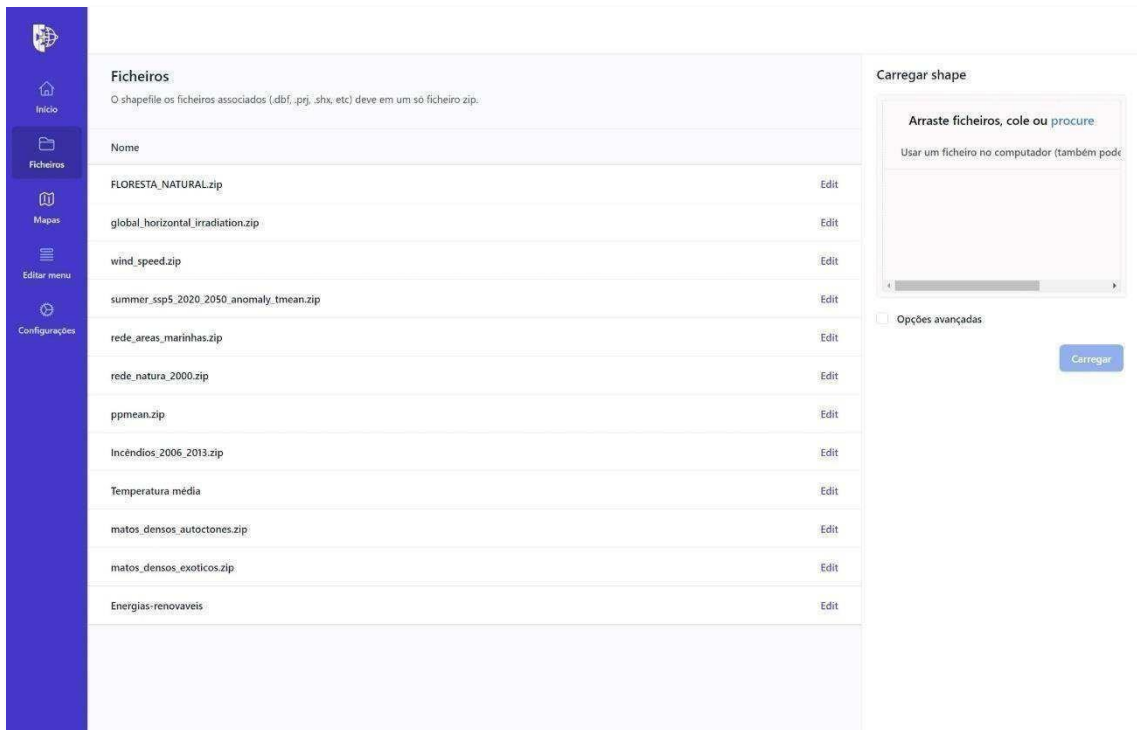


Figura 112 – Área de gestão do servidor de mapas.

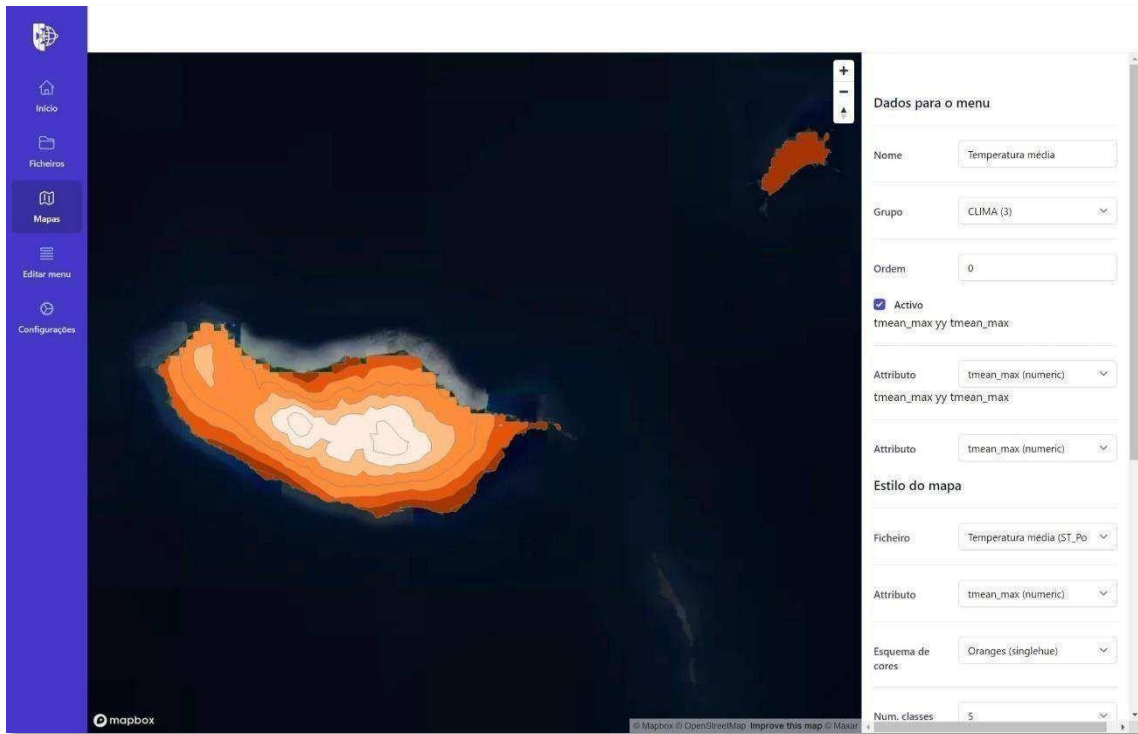


Figura 113 – Menu de edição de mapas.

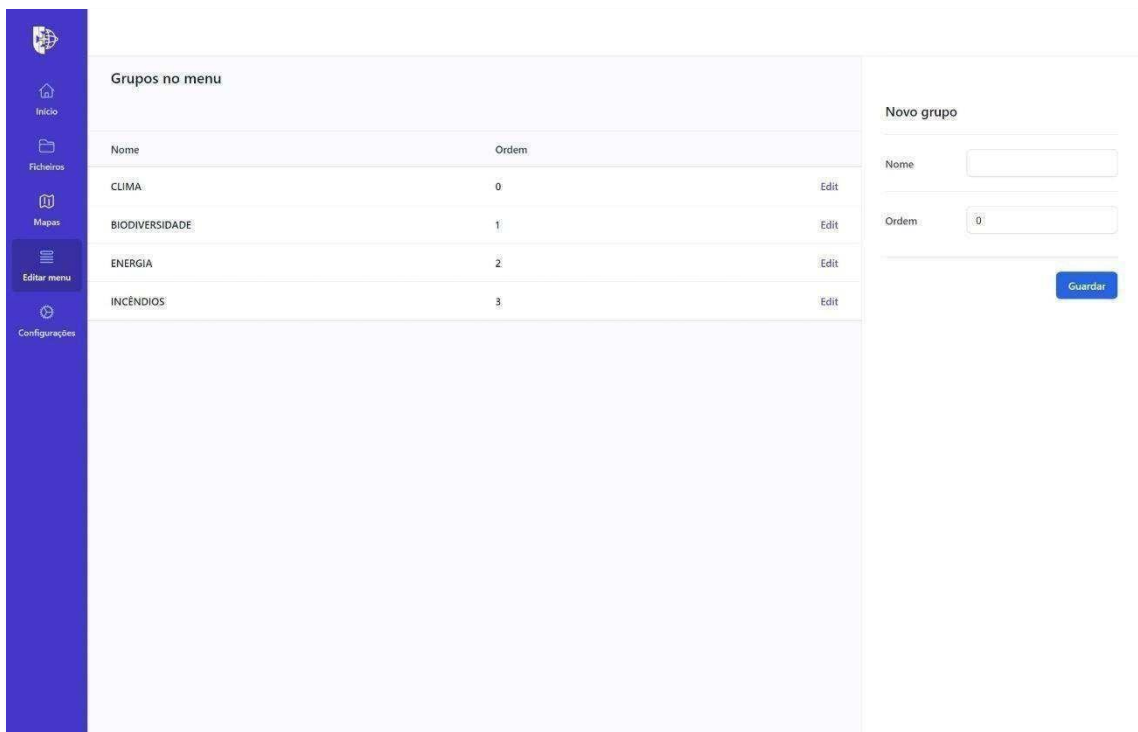


Figura 114 – Menu de edição dos grupos do menu.

Adicionalmente existe na área de gestão algumas configurações gerais de acesso e gestão dos conteúdos.

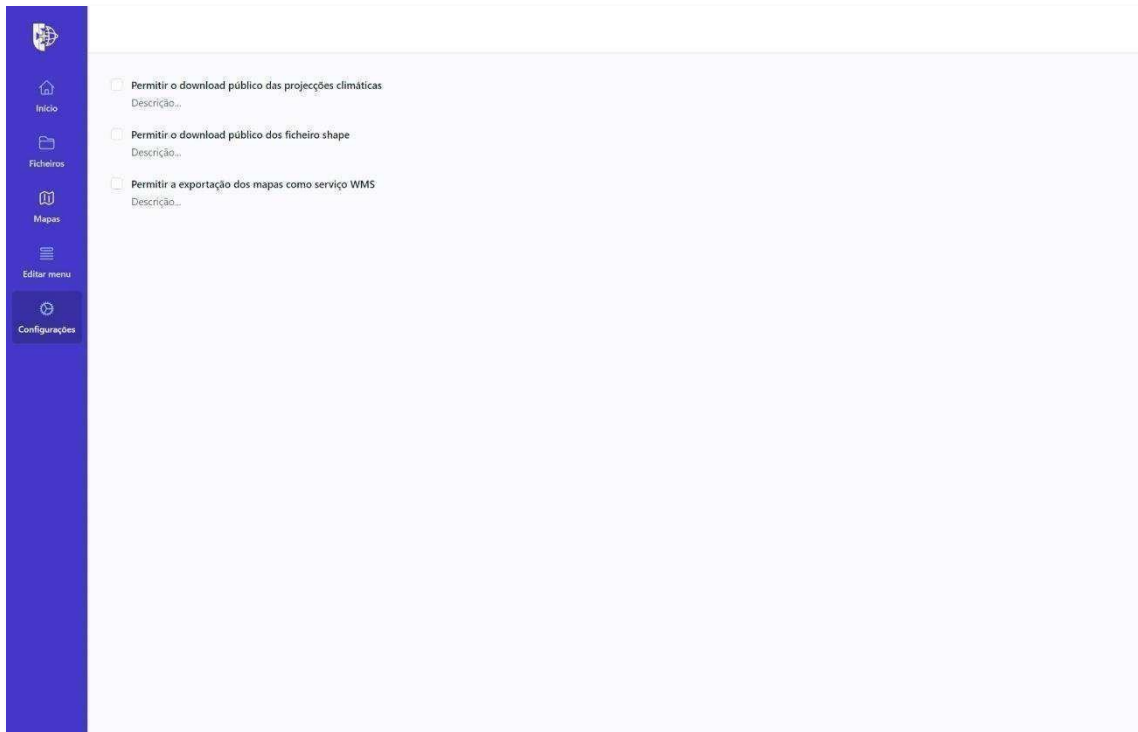


Figura 115 – Configurações adicionais

7. Cronograma de tarefas e resultados alcançados

WP 1		Cenários climáticos para a RAM	
		Mês	Estado
1.1	Seleção do(s) modelo(s) mais adequado para caracterizar as projeções da RAM	1	✓
1.2	Preparação dos dados	2	✓
1.3	Validação e calibração do modelo relativo ao período de referência	6	✓
1.4	Modelação dos cenários climáticos	9	✓
1.5	Análise dos resultados e interpretação de extremos	10	✓

Resultados esperados		
R 1.1 – Relatório Intercalar sobre a validação e calibração do modelo		✓
R 1.2 – Regionalização climática diária para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 até 2050 para as variáveis precipitação e temperatura		✓
R 1.3 – Regionalização climática mensal para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para as variáveis temperatura e precipitação entre 2050 e 2100		✓
R 1.4 – Relatório		✓

WP 2		Caracterização climática de variáveis complementares	
		Mês	Estado
2.1	Caracterização da evolução do vento e radiação	8	✓
2.2	Caracterização da subida do nível médio do mar	9	✓

Resultados esperados		
R 2.1 – Relatório sobre a caracterização da evolução do vento, radiação e subida do nível médio do mar		✓

WP 3	Atualização do Observatório CLIMA MADEIRA
------	---

Mês Estado

1	3. Alteração de tecnologia do servidor de mapas	8	✓
3.2	Implementação de um sistema de gestão de mapas privado	9	✓
3.3	Atualização da cartografia com os novos cenários climáticos	10	✓
3.4	Desenvolvimento de uma ferramenta interativa de acesso aos dados climáticos com a possibilidade de agregação a várias tipologias espaciais (ex. concelho)	10	✓

Resultados esperados	
R 3.1 – Atualização do servidor de mapas do Observatório CLIMA MADEIRA	✓

8. Cronograma

meses	Jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar
WP 1 - Cenários climáticos para a RAM										
1.1 – Seleção do(s) GCM	□									
1.2 - Preparação dos dados	□	□								
1.3 – Validação/Calibração			□	□	□	R1.1				
1.4 -Cenários Climáticos						□	□	□	□	
1.5 - Extremos										R1.4
WP 2 - Caracterização climática de variáveis complementares										
2.1 – Vento e radiação				□	□	□	□	□		
2.2 – Nível médio do mar				□	□	□	□	□	R2.1	
WP 3 - Atualização do Observatório CLIMA MADEIRA										
3.1 – Servidor de mapas				□	□	□	□	□		
3.2 – Área privada				□	□	□	□	□	□	
3.3 - Cartografia									□	□
3.4 – Acesso aos dados				□	□	□	□	□	□	□

9. Referências

- Garrett P., Santos F. D., Perdigão, R., 2022. High resolution spatial-temporal downscaling model for historical daily precipitation using INLA. *Inderscience, International Journal of Global Warming*.
- Gomes, A., Avelar, D., Santos, F.D., Costa, H., Garrett P. *Estratégia de Adaptação às Alterações Climáticas da Região Autónoma da Madeira*. Publisher: Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais, 2015
- Hersbach, Hans, et al. "The ERA5 global reanalysis." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730: 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803, 2020.
- Lavell, A., M. Oppenheimer, C. Diop, J. Hess, R. Lempert, J. Li, R. Muir-Wood, and S. Myeong, 2012: Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 25-64
- Lindgren, F., Rue, H. and Lindstrom, J.: An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: The SPDE approach (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 73 (4):423–498, doi:10.1111/j.1467-9868.2011.00777.x, 2011.
- Rue, H., and H. Tjelmeland.: Fitting Gaussian Markov Random Fields to Gaussian Fields. *Scandinavian Journal of Statistics* 29 (1): 31–49, doi:10.1111/1467-9469.00058, 2002.
- Rue, Havard, Finn Lindgren, Daniel Simpson, Sara Martino, Elias Teixeira Krainski, Haakon Bakka, Andrea Riebler, and Geir-Arne Fuglstad.: *INLA: Full Bayesian Analysis of Latent Gaussian Models Using Integrated Nested Laplace Approximations*. 2018.
- Swart, Neil C., et al. "The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3)." *Geoscientific Model Development* 12.11 (2019): 4823-4873.
- Tebaldi, Claudia, et al. "Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6." *Earth System Dynamics* 12.1 (2021): 253-293. doi:10.5194/esd-12-253-2021, 2021.
- Tomé, Ricardo Filipe Domingos. *Mudanças climáticas nas regiões insulares*. Diss. Universidade dos Acores (Portugal), 2013.