

Modelo harmônico para a estimativa da temperatura do ar média mensal em diferentes locais do Estado do Rio Grande do Sul

Harmonic model for estimating the average monthly air temperature in different locations of Rio Grande do Sul State, Brazil

Alberto Cargnelutti Filho^I Ronaldo Matzenauer^{II} Jaime Ricardo Tavares Maluf^{II} Bernadete Radin^{II}

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi ajustar o modelo harmônico para a estimativa da temperatura do ar média mensal em 37 locais do Estado do Rio Grande do Sul, com os dados do período de 1931 a 2000. Em cada local, os dados de 1931 a 1990 (60 anos) foram utilizados para estimar os coeficientes do modelo harmônico, e os dados de 1991 a 2000 (10 anos), para a validação do modelo. Foram testadas a normalidade e homogeneidade de variâncias, estimadas tendências e incorporadas aos modelos harmônicos construídos com base nas ondas anual e semestral. Coeficientes linear, angular, de correlação linear de Pearson e de determinação, raiz do quadrado médio do erro e índices de WILLMOTT (1981) e de CAMARGO & SENTELHAS (1997) foram utilizados para validação dos modelos. O coeficiente de determinação (R^2) do modelo harmônico foi elevado em todos os locais ($R^2 \geq 0,9867$), conferindo confiabilidade nas previsões futuras. O modelo harmônico gerado, para cada um dos 37 locais do Estado do Rio Grande do Sul, é adequado para estimar a temperatura do ar média mensal.

Palavras-chave: série temporal, modelagem, regressão periódica.

ABSTRACT

The objective of this research was to adjust the harmonic model for the estimation of average monthly air temperature, in 37 locations of Rio Grande do Sul State, Brazil, with data from the period 1931 to 2000. In each locality, data from 1931 to 1990 (60 years) was used to estimate the coefficients of the harmonic model and from 1991 to 2000 (10 years) to validate the model. It was tested the normality and homogeneity of variance among months, estimated trends and incorporated into the models harmonic based in waves annual

and semiannual. The coefficients linear, angular, correlation and determination, the root mean square error and the index of WILLMOTT (1981) and CAMARGO & SENTELHAS (1997) were used to validate the models. The coefficient of determination (R^2) of the harmonic model, was high in all sites ($R^2 \geq 0.9867$), giving reliability for future forecasts. The harmonic model generated for each of the 37 location in the the Rio Grande do Sul State, Brazil, is adequate to estimate the average monthly air temperature.

Key words: time series, modeling, periodic regression.

INTRODUÇÃO

Séries temporais possibilitam estudar possíveis mudanças, ao longo do tempo, em uma determinada variável. Assim, o estudo de séries temporais é um importante instrumento para, por meio do comportamento passado, ajustar um modelo matemático para tendências e previsões futuras, principalmente no momento em que tantas especulações estão sendo feitas sobre mudanças climáticas, especialmente a temperatura do ar. Porém, esses modelos empíricos são limitados para serem realizadas previsões de tendências futuras e são restritos a determinação das disponibilidades climáticas regionais. Modelos físicos que consideram a interação atmosfera-superfície são usados para projeções de climas futuros.

^IDepartamento de Fitotecnia, Centro de Ciências Rurais (CCR), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: cargnelutti@pq.cnpq.br. Autor para correspondência.

^{II}Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), Porto Alegre, RS, Brasil.

Modelos empíricos para estimar a temperatura mínima média decendial (CARGNELUTTI FILHO et al., 2006) e as temperaturas máxima e média decendiais (CARGNELUTTI FILHO et al., 2008b), em função da altitude, latitude e longitude, foram estabelecidos e considerados adequados para qualquer local do Estado do Rio Grande do Sul. No entanto, a modelagem específica por local, por meio da análise harmônica, e a incorporação de possíveis tendências locais podem oferecer maior precisão nas estimativas.

Os procedimentos de Box e Jenkins (modelos ARIMA) consistem em explicar uma variável por meio de valores passados dela mesma. Há modelos autorregressivos (AR), médias móveis (MA) e combinação entre autorregressivos e médias móveis (ARMA e ARIMA) que podem ser aplicados em séries temporais (SARTORIS, 2003; MORETTIN & TOLOI, 2006). Além destes, a análise harmônica, ou análise de Fourier ou análise de regressão periódica, se propõe a isolar as harmônicas (ou ondas), que, atuando em conjunto, reproduzem o comportamento de determinada variável no tempo ou no espaço (ASSIS et al., 1996) e tem sido considerada adequada ao estudo de séries temporais de elementos meteorológicos (SILVA & FERNANDES, 1991; MEZZOMO et al., 2007; JOÃO, 2009). Os fundamentos teóricos e o método de utilização da análise harmônica para o estudo de séries temporais foram apresentados por AMARAL (1968).

No Estado do Rio Grande do Sul, a análise harmônica tem sido utilizada em séries temporais de temperaturas mínimas pentadais e mínimas absolutas pentadais de Pelotas do período de 1900 a 1987 (SILVA & FERNANDES, 1991), de temperaturas mínimas médias trimestrais de 40 estações meteorológicas do período de 1913 a 2002 (MEZZOMO et al., 2007) e de temperaturas máxima e mínima médias mensais de 10 estações meteorológicas do período de 1918 e 2007 (JOÃO, 2009) e, de maneira geral, os modelos revelaram-se adequados. Nesses estudos, parte do período foi utilizada para a estimação dos coeficientes do modelo harmônico e parte para a validação do modelo. Embora os locais e o período desse estudo tenham sido avaliados em MEZZOMO et al. (2007), quanto à temperatura mínima média trimestral, estudos de séries temporais de temperatura do ar média mensal do Estado do Rio Grande do Sul, por meio de análise harmônica, não foram encontrados na literatura. Assim, o estudo da temperatura média, em uma escala mais detalhada (mensal), pode trazer contribuições importantes. Assim, o objetivo deste trabalho foi ajustar o modelo harmônico para a estimativa da temperatura do ar média mensal em 37 locais do Estado do Rio Grande do Sul,

sendo utilizados os dados de 1931 a 1990 para estimação dos coeficientes do modelo harmônico e os de 1991 a 2000 para a validação do modelo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados os dados de temperatura do ar de 37 estações agrometeorológicas, localizadas em 37 locais do Estado do Rio Grande do Sul (RS) (Tabela 1). Os dados foram obtidos do Banco de Dados do Centro de Meteorologia Aplicada, da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária - FEPAGRO/SCT-RS e do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET - Porto Alegre-RS. Foram coletados no período de 1931 a 2000, totalizando 70 anos de observações. Em cada local e ano, a partir dos dados diários de temperatura mínima do ar (T_{min}) e de temperatura máxima do ar (T_{max}), calculou-se a temperatura média do ar por meio da expressão $(T_{min}+T_{max})/2$. Em seguida, com os valores diários de temperatura média do ar, calculou-se a média mensal de temperatura, em °C, de cada um dos 12 meses do ano, (janeiro, fevereiro, ..., dezembro), formando 444 séries temporais (37 locais x 12 meses) de temperatura do ar média mensal. Os dados de 1931 a 1990 (60 anos) foram utilizados para estimar os coeficientes do modelo harmônico, e os de 1991 a 2000 (10 anos), para a validação do modelo.

Em cada uma das 444 séries temporais de temperatura do ar média mensal do período de 1931 a 1990 (60 anos), foi verificada a normalidade dos dados, por meio do teste de *Kolmogorov-Smirnov* (SIEGEL & CASTELLAN JÚNIOR, 2006). Em seguida, aplicou-se o teste de *Bartlett* (STEEL et al., 1997) aos dados temperatura do ar média mensal, para verificar a homogeneidade de variâncias entre os meses do ano (12 variâncias - variabilidade temporal), em cada local (37 testes).

A seguir, em cada local, os dados foram dispostos em ordem cronológica, sendo obtidas 37 séries temporais (37 locais), com 720 observações (60 anos x 12 meses). O método das duplas massas foi aplicado nessas 37 séries temporais e revelou homogeneidade dos dados nos 37 locais, o que confere credibilidade desses dados para análises de séries temporais. Em seguida, em cada uma dessas séries, verificou-se a tendência da temperatura do ar média mensal, ao longo do período de 1931 a 1990 (720 observações), por meio do ajuste de uma regressão linear simples dada por $Y_i=a+bX_i$ em que Y_i é a temperatura do ar média mensal (observada), a é o coeficiente linear, b é o coeficiente angular e X_i é tempo, disposto em ordem cronológica, em que $i=1$ (janeiro de 1931), 2 (fevereiro de 1931), ..., 720 (dezembro de 1990).

Tabela 1 - P-valor do teste de normalidade (*Kolmogorov-Smirnov*) em relação a 444 séries temporais de temperatura do ar média mensal, em °C, do período de 1931 a 1990, em locais do Estado do Rio Grande do Sul.

Local	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Alegrete	0,996	0,811	0,736	0,963	0,627	0,762	1,000	0,782	0,382	0,697	0,718	0,521
Bagé	0,786	0,788	0,804	0,682	0,769	0,798	0,979	0,871	0,452	0,736	0,951	0,732
Bento Gonçalves	0,934	0,689	0,964	0,864	0,786	0,369	0,710	1,000	0,611	0,140	0,776	0,997
Bom Jesus	0,088	0,900	0,907	0,971	0,907	0,600	0,745	0,804	0,951	0,544	0,939	0,526
Caçapava do Sul	0,913	0,939	0,953	0,970	0,795	0,942	0,825	0,366	0,800	0,641	0,361	0,660
Cachoeira do Sul	0,701	0,155	0,646	0,901	0,983	0,977	0,801	0,996	0,905	0,982	0,983	0,577
Caxias do Sul	0,771	0,819	0,929	0,398	0,937	0,371	0,940	0,979	0,622	0,343	0,957	0,986
Cruz Alta	0,973	0,584	0,961	0,891	0,699	0,600	0,892	0,974	0,887	0,726	0,792	0,832
Encruzilhada do Sul	0,844	0,776	0,823	0,897	0,748	0,560	0,976	0,826	0,970	0,967	0,439	0,797
Farroupilha	0,730	0,715	0,949	0,416	0,706	0,479	0,690	0,676	0,562	0,454	0,774	0,462
Guaporé	0,680	0,548	0,849	0,788	0,788	0,628	0,760	0,600	0,767	0,247	0,931	0,952
Ijuí	0,878	0,997	0,774	0,808	0,612	0,661	0,934	0,990	0,835	0,594	0,520	0,815
Iraí	0,825	0,398	0,978	0,586	0,989	0,704	0,727	0,991	0,925	0,391	0,706	0,406
Júlio de Castilhos	0,663	0,978	0,982	0,810	0,955	0,578	0,950	0,952	0,940	0,194	0,645	0,797
Lagoa Vermelha	0,523	0,967	0,976	0,942	0,777	0,885	0,915	0,665	0,838	0,270	0,982	0,585
Osório	0,909	0,891	0,699	0,719	0,982	0,653	0,846	0,534	0,725	0,351	0,998	0,536
Palmeira das Missões	0,559	0,984	0,998	0,184	0,817	0,575	0,600	0,451	0,440	0,804	0,911	0,709
Passo Fundo	0,493	0,746	0,731	0,412	0,697	0,451	0,885	0,839	0,889	0,453	0,136	0,750
Pelotas	0,886	0,707	0,374	0,891	0,976	0,792	0,763	0,991	0,412	0,429	0,321	0,453
Porto Alegre	0,832	0,946	0,338	0,996	0,846	0,448	0,966	0,988	0,977	0,117	0,646	0,758
Rio Grande	0,981	0,896	0,916	0,999	0,894	0,556	0,978	0,973	0,993	0,687	0,755	0,823
Santa Maria	0,975	0,742	0,662	0,893	0,635	0,864	0,840	0,875	0,500	0,999	0,353	0,710
Santana do Livramento	0,939	0,933	0,744	0,762	0,667	0,658	0,994	0,965	0,655	0,538	0,956	0,796
Santa Rosa	0,556	0,978	0,988	0,821	0,571	0,728	0,996	0,998	0,627	0,680	0,868	0,509
Santa Vitória do Palmar	0,961	0,853	0,691	0,730	0,817	0,716	0,888	0,310	0,877	0,709	0,386	0,505
Santiago	0,347	0,984	0,897	0,491	0,541	0,555	0,985	0,916	0,960	0,598	0,848	0,672
Santo Ângelo	0,983	0,869	0,580	0,865	0,703	0,773	0,920	0,930	0,730	0,162	0,910	0,896
São Borja	0,839	0,647	0,839	0,894	0,640	0,903	0,690	0,833	0,627	0,786	0,621	0,589
São Francisco de Paula	0,930	0,933	0,776	0,958	0,558	0,684	0,905	0,877	0,709	0,953	0,961	0,330
São Gabriel	0,798	0,617	0,810	0,907	0,615	0,857	0,804	0,581	0,787	0,596	0,399	0,863
São Luiz Gonzaga	0,818	0,842	0,958	0,970	0,814	0,827	0,984	0,908	0,851	0,971	0,591	0,277
Tapes	0,782	0,839	0,881	0,723	0,936	0,375	0,912	0,668	0,973	0,426	0,883	0,520
Taquari	0,752	0,738	0,751	0,824	0,573	0,916	0,470	0,650	0,953	0,645	0,832	0,771
Torres	0,906	0,860	0,999	0,716	0,825	0,684	0,652	0,884	0,807	0,537	0,978	0,893
Uruguaiana	0,298	0,608	0,880	0,594	0,449	0,940	0,951	0,965	0,417	0,876	0,053	0,347
Vacaria	0,745	0,985	0,925	0,967	0,535	0,671	0,689	0,804	0,231	0,475	0,977	0,486
Veranópolis	0,964	0,971	0,965	0,459	0,945	0,438	0,809	0,998	0,878	0,336	0,984	0,614

Nesse estudo, em particular, independentemente da significância do teste *t* de *Student* para testar as hipóteses $H_0: b=0$ versus $H_1: b \neq 0$, foi assumido que a estimativa do coeficiente angular (*b*) da regressão linear representa a tendência de acréscimo (se positivo) ou de decréscimo (se negativo) da temperatura do ar média mensal, em °C, por mês. Depois disso, a fim de serem obtidas séries temporais adequadas para a análise harmônica, em cada uma das 37 séries temporais, foi calculada a temperatura do ar média mensal livre de tendência (Y_{ci}), por meio da equação $Y_{ci} = Y_i - bX_i$.

A seguir, para cada uma das 37 séries temporais de Y_{ci} , calculou-se a média de temperatura do ar média mensal de cada um dos 12 meses do ano, referente ao período de 1931 a 1990. Essas 12 médias, obtidas a partir de 60 anos de observações, foram utilizadas para análise harmônica conforme procedimentos descritos em AMARAL (1968) e ASSIS et al. (1996), considerando o mês como unidade de tempo. Assim, foi considerado o período igual a 12 e foram computadas seis ondas harmônicas, com seis termos em co-senos e cinco em senos. Nos 37 locais,

foi selecionado o modelo com base na primeira (onda anual) e na segunda harmônica (onda semestral) pelo fato de as duas ondas explicarem aproximadamente 100% ($R^2 \geq 0,9867$) da variação total da série de dados analisados.

Em cada um dos 37 locais, foram estimados (previstos) os valores de temperatura do ar média mensal (\hat{Y}_i), para o período de 1991 a 2000 (120 observações), com base no seguinte modelo: $\hat{Y} = P_0 + P_1 \cos(30^\circ t) + Q_1 \sin(30^\circ t) + P_2 \cos(60^\circ t) + Q_2 \sin(60^\circ t) + b(720+i)$, em que P_0 é a média dos 12 valores da série (12 meses), P_1 e Q_1 são os coeficientes da primeira harmônica, P_2 e Q_2 são os coeficientes da segunda harmônica, b é a estimativa da tendência, $t=0$ (janeiro), 1 (fevereiro), ..., 11 (dezembro), 720 é o número de observações (60 anos x 12 meses) que foram utilizadas para a estimativa de b (tendência) e o índice i é o número de meses à frente do modelo, ou seja, $i=1$ (janeiro de 1991), 2 (fevereiro de 1991), ..., 120 (dezembro de 2000).

A validação do modelo de estimativa de temperatura do ar média mensal, em cada um dos 37 locais, foi realizada com base nos 120 valores estimados pelo modelo (\hat{Y}_i) e os 120 valores observados (Y_i). Inicialmente, foi ajustada uma regressão linear simples ($\hat{Y}_i = a + bY_i$) e, por meio do teste t de *Student*, a 5% de probabilidade de erro, foram testadas as hipóteses $H_0: a=0$ versus $H_1: a \neq 0$ e $H_0: b=1$ versus $H_1: b \neq 1$. Foram calculados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) e de determinação (R^2) entre \hat{Y}_i e Y_i . A raiz do quadrado médio do erro (RQME) e o índice d de Willmott (WILLMOTT, 1981) foram calculados, respectivamente, por

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad \text{e} \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2},$$

em que \hat{Y}_i são os valores estimados, Y_i são os valores observados, \bar{Y} é a média dos valores observados e n é o número de observações ($n=120$). Em seguida, foi calculado o índice CS de CAMARGO & SENTELHAS (1997) pelo produto entre r e d ($CS=r * d$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas 444 séries temporais (37 locais x 12 meses) de temperatura do ar média mensal, o p -valor do teste *Kolmogorov-Smirnov* oscilou entre 0,053 (mês de novembro em Uruguaiana) e 1,000 (mês de julho em Alegrete e mês de agosto em Bento Gonçalves), e a média dos 444 p -valores foi 0,748 (Tabela 1). Esses resultados evidenciam boa aderência dos dados de temperatura do ar média mensal à distribuição normal, pois quanto mais próximo de um for o p -valor, maior é a evidência de que a série seja normal. Assim, em cada

mês e local, pode-se inferir que, em 50% dos anos, os valores são inferiores à média e em 50% dos anos são superiores. Portanto, a média é uma medida de tendência central adequada para representar a temperatura do ar média mensal. Esse fato caracteriza esse conjunto de dados como adequado para geração de modelos por meio da análise harmônica. Estudo prévio constatou boa aderência dos dados de temperatura máxima do ar média decenal de 23 municípios do Rio Grande do Sul à distribuição normal (CARGNELUTTI FILHO et al., 2008a).

O teste de *Bartlett* (STEEL et al., 1997) aplicado entre as variâncias dos 12 meses, em cada local, constatou que estas foram heterogêneas ($P \leq 0,05$) em todos os locais (Tabela 2). De maneira geral, nos 37 locais, menores variâncias de temperatura do ar média mensal ocorreram nos meses inicial (janeiro) e final (dezembro), com aumento gradativo em direção aos meses centrais do ano (maio, junho e julho). Esses resultados sugerem que os valores estimados por meio dos modelos harmônicos sejam mais precisos nos meses com menor variância (meses iniciais e finais do ano) e menos precisos nos meses com maior variância (meses centrais do ano). Modelos empíricos para a estimativa de temperaturas do ar mínima decenal (CARGNELUTTI FILHO et al., 2006) e média decenal (CARGNELUTTI FILHO et al., 2008b), no Estado do Rio Grande do Sul, em função de coordenadas geográficas, também, apresentaram os maiores valores de R^2 (melhores ajustes do modelo) nos primeiros e nos últimos meses do ano, com diminuição gradativa em direção aos meses centrais do ano. Portanto, a presença de heterogeneidade de variâncias sugere maior precisão nas estimativas, nos meses iniciais e finais do ano, com diminuição gradativa para os meses centrais. Transformações de dados podem ser utilizadas a fim de homogeneizar as variâncias. No entanto, nesse estudo em particular, a boa aderência dos dados à distribuição normal oferece credibilidade aos modelos gerados a partir da análise harmônica.

O valor do coeficiente angular da regressão linear das 37 séries de temperatura do ar média mensal oscilou entre -0,00103415, em Santo Ângelo, e 0,00187262, em São Francisco de Paula, e a média das 37 estimativas foi de 0,00031137 (Tabela 3). Isso significa decréscimo de 0,00103415°C por mês, em Santo Ângelo, e acréscimo de 0,00187262°C por mês, em São Francisco de Paula. Houve tendência decrescente em 12 locais (32,43%) e crescente em 25 locais (67,57%). É importante estudar mais detalhadamente a tendência, pois, neste estudo, em particular, o foco foi apenas estimar o b (tendência) para incorporá-lo no modelo harmônico, a fim de serem obtidas melhores estimativas.

Tabela 2 - Estimativa da variância da temperatura do ar média mensal com os dados do período de 1931 a 1990 e valor calculado do teste de *Bartlett* das variâncias entre os meses em cada local (χ^2_{calc}) do Estado do Rio Grande do Sul.

Local	Mês												χ^2_{calc}
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Alegrete	0,692	1,167	1,224	1,780	3,316	2,661	3,051	2,117	1,627	1,892	1,721	1,276	60,83*
Bagé	0,773	1,300	1,116	1,586	2,923	2,327	2,880	2,059	1,567	1,765	1,462	1,176	49,58*
Bento Gonçalves	0,462	0,974	0,995	1,913	2,952	2,108	2,969	2,116	1,884	1,830	1,013	0,959	88,81*
Bom Jesus	1,013	0,931	0,935	1,762	2,853	2,163	2,843	2,002	1,573	1,824	1,176	0,719	65,68*
Caçapava do Sul	0,708	1,102	1,202	1,876	2,623	1,914	2,873	2,042	1,492	2,173	1,446	1,522	46,16*
Cachoeira do Sul	0,744	1,170	1,024	2,202	3,718	2,649	2,876	1,899	2,007	1,958	1,421	0,978	74,08*
Caxias do Sul	0,615	1,066	1,141	1,783	2,617	2,022	2,958	2,360	1,666	1,853	1,127	0,776	72,11*
Cruz Alta	0,681	0,895	1,176	1,599	2,742	2,296	3,094	2,237	1,867	1,695	1,140	1,054	68,38*
Encruzilhada do Sul	0,632	1,175	1,369	1,568	2,571	1,957	2,458	1,874	1,682	1,731	1,173	1,106	44,64*
Farroupilha	0,551	1,243	1,128	1,887	2,788	2,023	2,635	2,073	1,613	1,720	0,948	0,732	74,36*
Guaporé	0,521	0,735	1,007	1,912	2,553	2,388	3,083	2,154	1,549	1,643	0,962	0,949	91,44*
Ijuí	0,801	0,868	1,276	1,724	2,897	2,628	3,536	2,120	1,823	1,712	1,039	1,090	74,72*
Iraí	0,837	1,005	0,945	2,160	2,629	2,057	3,372	2,243	1,623	2,032	1,477	1,031	63,47*
Júlio de Castilhos	0,789	0,794	1,103	1,766	2,357	2,058	2,811	2,278	1,542	1,736	1,127	1,276	54,37*
Lagoa Vermelha	0,572	0,756	0,975	1,771	2,458	1,928	2,832	2,300	1,593	1,326	0,952	0,921	80,04*
Osório	0,829	1,175	1,030	1,658	2,652	2,303	2,849	2,068	1,671	1,796	0,877	0,921	61,51*
Palmeira das Missões	0,769	0,812	1,337	1,603	2,480	2,023	2,579	1,781	1,258	1,705	1,015	1,147	50,22*
Passo Fundo	0,606	0,782	0,983	1,810	2,557	2,002	2,648	2,240	1,663	1,589	0,835	0,811	81,34*
Pelotas	0,844	0,864	1,278	1,511	2,843	2,105	1,997	1,451	1,298	1,666	1,050	0,924	47,82*
Porto Alegre	0,597	0,872	1,075	1,458	2,688	2,156	2,534	1,510	1,407	1,390	0,804	0,856	72,13*
Rio Grande	0,576	0,718	0,934	1,159	2,458	2,159	1,971	0,932	1,040	1,251	0,737	0,667	77,90*
Santa Maria	0,694	0,924	1,099	1,649	3,381	3,090	3,177	2,151	1,742	0,912	1,269	0,893	99,59*
Santana do Livramento	1,191	0,959	1,534	1,788	2,880	2,394	2,354	1,942	1,517	1,694	1,572	0,969	37,54*
Santa Rosa	0,919	0,966	1,151	1,783	2,908	2,324	3,102	2,287	1,906	1,629	1,218	0,923	62,26*
Santa Vitória do Palmar	0,712	1,153	1,014	1,142	2,320	1,750	1,859	0,981	1,043	1,202	0,945	0,969	38,72*
Santiago	1,156	1,333	1,356	1,836	2,982	2,261	3,134	2,374	1,574	2,162	1,009	1,170	47,56*
Santo Ângelo	0,633	0,967	1,418	1,891	2,825	2,729	3,390	2,887	2,182	1,612	1,341	1,211	75,68*
São Borja	1,077	1,103	1,595	1,520	3,304	3,189	3,164	2,569	1,781	2,011	1,625	1,590	49,62*
São Francisco de Paula	0,710	1,233	1,223	2,077	2,601	1,824	2,407	1,996	1,715	2,056	1,276	1,158	42,10*
São Gabriel	0,723	1,196	1,607	1,754	3,225	2,780	2,726	1,977	1,479	1,732	1,382	0,999	59,24*
São Luiz Gonzaga	0,823	0,926	1,454	1,716	2,648	2,402	2,898	2,319	1,560	1,891	1,423	1,237	49,21*
Tapes	0,701	0,877	1,024	1,130	2,756	2,377	2,525	1,411	1,243	1,438	1,114	1,109	62,47*
Taquari	0,648	0,950	0,938	1,553	2,997	2,402	2,652	1,863	1,470	1,586	0,970	0,842	77,76*
Torres	0,600	0,715	0,709	1,000	1,807	1,799	1,855	1,279	1,150	0,925	0,652	0,758	57,38*
Uruguaiana	0,941	1,248	1,200	1,280	2,857	2,858	3,243	1,920	1,380	1,640	1,275	1,240	56,79*
Vacaria	0,659	0,934	1,226	1,712	2,594	2,113	2,951	2,102	1,572	1,602	0,863	1,001	68,07*
Veranópolis	0,542	1,109	1,127	1,885	2,701	2,044	2,986	2,139	1,731	1,865	1,040	0,725	80,32*

* Significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de *Bartlett* (variâncias heterogêneas).

O coeficiente de determinação (R^2) do modelo harmônico, com base na primeira (onda anual) e na segunda harmônica (onda semestral), foi elevado em todos os locais ($R^2=0,9867$), sugerindo confiabilidade nas previsões futuras (Tabela 3). No entanto, em 28 locais, o coeficiente linear (a) da regressão linear de \hat{Y}_i em função de Y_i diferiu de zero ($P \leq 0,05$) e em 29 locais o coeficiente angular (b) diferiu

de um ($P \leq 0,05$) (Tabela 4), podendo isso, provavelmente, ser atribuído à maior variabilidade dos dados de temperatura do ar média mensal, nos meses centrais do ano (Tabela 2). Assim, quando os valores observados são baixos, os modelos estimam valores um pouco maiores e vice-versa. Esse comportamento foi evidenciado em praticamente todos esses locais e é

Tabela 3 - Estimativa dos coeficientes P_0 , P_1 , Q_1 , P_2 e Q_2 obtidos a partir da análise harmônica da temperatura do ar média mensal, com os dados do período de 1931 a 1990. Estimativa da tendência linear (b) e do coeficiente de determinação (R^2) do modelo ⁽¹⁾ envolvendo duas harmônicas (anual e semestral), em locais do Estado do Rio Grande do Sul.

Local	P_0	P_1	Q_1	P_2	Q_2	b	R^2
Alegrete	19,135828	5,606824	0,285129	0,150536	0,522108	0,00086263	0,9983
Bagé	18,408003	5,629698	0,432119	0,167033	0,488014	0,00043569	0,9985
Bento Gonçalves	17,448298	4,663921	0,232079	0,104410	0,610008	0,00059782	0,9981
Bom Jesus	15,952353	4,326262	0,350543	0,101316	0,561564	-0,00067699	0,9990
Caçapava do Sul	17,314090	5,297740	0,506865	0,047996	0,535461	0,00114844	0,9957
Cachoeira do Sul	19,695684	5,582269	0,133312	0,190099	0,407997	-0,00093604	0,9988
Caxias do Sul	16,752470	4,460306	0,340953	0,169975	0,515555	0,00094730	0,9983
Cruz Alta	18,950001	4,905885	0,174467	0,092045	0,426956	0,00015615	0,9979
Encruzilhada do Sul	17,114790	5,081794	0,587990	0,070371	0,481023	0,00130204	0,9977
Farrroupilha	16,667272	4,649794	0,140081	0,112866	0,498454	0,00035227	0,9979
Guaporé	18,271820	5,026737	0,100332	0,104921	0,498766	0,00026136	0,9996
Ijuí	19,923024	5,107903	0,031894	0,145718	0,403127	0,00028041	0,9981
Iraí	19,699777	5,283411	-0,007988	-0,005456	0,639564	0,00175940	0,9978
Júlio de Castilhos	17,847402	5,054403	0,304376	0,070897	0,461245	0,00102909	0,9984
Lagoa Vermelha	17,548174	4,691778	0,142013	-0,007081	0,546273	-0,00019938	0,9981
Osório	19,046083	4,240583	0,575387	-0,019768	0,542678	0,00055118	0,9984
Palmeira das Missões	18,931941	4,830634	0,054728	0,012889	0,484012	0,00004882	0,9967
Passo Fundo	18,180198	4,717410	0,038584	0,053681	0,456397	0,00035486	0,9978
Pelotas	17,738696	5,256055	0,799985	0,078882	0,557420	0,00072235	0,9990
Porto Alegre	20,067135	5,215925	0,551960	0,008486	0,554328	0,00016666	0,9991
Rio Grande	18,524568	5,220091	0,988395	-0,096177	0,485293	0,00015650	0,9992
Santa Maria	19,710516	5,231628	0,339663	0,134196	0,518223	-0,00017865	0,9981
Santana do Livramento	18,361588	5,712143	0,300550	0,206594	0,467744	-0,00039229	0,9991
Santa Rosa	20,326132	5,307978	-0,124824	0,095260	0,554008	-0,00019880	0,9976
Santa Vitória do Palmar	17,370874	5,368330	0,984156	0,094423	0,483855	-0,00012561	0,9990
Santiago	18,574923	5,306724	0,247346	0,167058	0,547910	0,00091960	0,9983
Santo Ângelo	20,454840	5,238382	-0,021074	0,070730	0,533653	-0,00103415	0,9985
São Borja	20,699289	5,479690	0,231733	0,146388	0,515163	-0,00027211	0,9985
São Francisco de Paula	14,880880	4,266514	0,397027	0,130609	0,512563	0,00187262	0,9984
São Gabriel	19,135379	5,804268	0,309308	0,121869	0,547990	0,00021574	0,9988
São Luiz Gonzaga	20,299088	5,285652	0,062468	0,111217	0,486120	0,00069620	0,9973
Tapes	19,027489	5,312349	0,819001	0,001268	0,567085	0,00023986	0,9991
Taquari	20,166268	5,337757	0,275499	0,129188	0,419217	-0,00084001	0,9991
Torres	18,128064	4,072320	1,101903	-0,084880	0,418739	0,00144671	0,9990
Uruguaiana	20,232317	5,948922	0,270392	0,160016	0,459863	-0,00014383	0,9984
Vacaria	16,496622	4,693199	0,116398	0,064170	0,584212	-0,00102465	0,9978
Veranópolis	16,818736	4,554380	0,191810	0,125277	0,505588	0,00101957	0,9983

⁽¹⁾ $Y_i = P_0 + P_1 \cos(30^\circ t) + Q_1 \sin(30^\circ t) + P_2 \cos(60^\circ t) + Q_2 \sin(60^\circ t) + b(720 + i)$, em que Y_i é a estimativa da temperatura do ar média mensal, P_0 é a média dos 12 valores da série (12 meses), P_1 e Q_1 são os coeficientes da primeira harmônica, P_2 e Q_2 são os coeficientes da segunda harmônica, b é a estimativa da tendência, $t=0$ (janeiro), 1 (fevereiro), ..., 11 (dezembro), 720 é o número de observações (60 anos x 12 meses) que foram utilizadas para a estimativa de b (tendência) e o índice i é o número de meses a frente do modelo, ou seja, $i=1$ (janeiro de 1991), 2 (fevereiro de 1991), ..., 120 (dezembro de 2000).

exemplificado com os dados de Alegrete (Figura 1). Então, num primeiro momento, para esses locais, poder-se-ia, com base somente nesses coeficientes, desqualificar esses modelos. No entanto, isso deve ser visto com cautela, pois o modelo é válido dentro do intervalo de valores utilizados para a sua construção, e ainda extrapolações para temperaturas zero, que do

ponto de vista prático dificilmente ocorrerão, não são adequadas. Além disso, os demais indicadores (Tabela 4) confirmam a adequabilidade dos modelos nesses locais. Nos demais locais, todos os indicadores foram favoráveis, ou seja, coeficiente linear (a) não diferente de zero, coeficiente angular (b) não diferente de um, coeficientes de correlação linear de Pearson (r) e de

Tabela 4 - Coeficientes linear (a), angular (b), de correlação linear de Pearson (r) e de determinação (R^2) obtidos na regressão linear ajustada entre a temperatura do ar média mensal estimada (variável dependente) e a observada (variável independente). Raiz do quadrado médio do erro (RQME), índice d de Willmott (WILLMOTT, 1981) e índice CS de CAMARGO & SENTELHAS (1997) calculados com base na temperatura do ar média mensal estimada e observada no período de janeiro de 1991 a dezembro de 2000, em locais do Estado do Rio Grande do Sul.

Local	a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	r ⁽³⁾	R ²	RQME	d	CS
Alegrete	2,460 *	0,884 *	0,954 *	0,911	1,302	0,974	0,930
Bagé	1,053 *	0,960 ns	0,960 *	0,923	1,167	0,978	0,940
Bento Gonçalves	1,749 *	0,898 *	0,949 *	0,902	1,102	0,973	0,924
Bom Jesus	1,429 *	0,894 *	0,946 *	0,896	1,080	0,970	0,918
Caçapava do Sul	0,879 ns	0,944 ns	0,957 *	0,917	1,114	0,978	0,936
Cachoeira do Sul	-0,132 ns	0,977 ns	0,961 *	0,924	1,233	0,975	0,937
Caxias do Sul	2,013 *	0,884 *	0,941 *	0,885	1,144	0,968	0,911
Cruz Alta	1,963 *	0,886 *	0,952 *	0,906	1,167	0,973	0,926
Encruzilhada do Sul	2,050 *	0,896 *	0,955 *	0,912	1,162	0,975	0,931
Farroupilha	1,575 *	0,893 *	0,955 *	0,912	1,077	0,974	0,931
Guaporé	0,876 ns	0,948 ns	0,957 *	0,916	1,052	0,978	0,936
Ijuí	2,440 *	0,882 *	0,935 *	0,874	1,362	0,965	0,903
Iraí	1,419 *	0,936 *	0,956 *	0,915	1,125	0,977	0,935
Júlio de Castilhos	2,116 *	0,887 *	0,951 *	0,905	1,188	0,973	0,926
Lagoa Vermelha	0,934 ns	0,946 ns	0,940 *	0,885	1,146	0,969	0,912
Osório	3,217 *	0,859 *	0,951 *	0,905	1,185	0,965	0,918
Palmeira das Missões	1,888 *	0,877 *	0,948 *	0,899	1,273	0,967	0,917
Passo Fundo	1,702 *	0,905 *	0,951 *	0,905	1,083	0,974	0,927
Pelotas	1,845 *	0,897 *	0,942 *	0,888	1,329	0,969	0,913
Porto Alegre	1,451 *	0,920 *	0,962 *	0,927	1,065	0,980	0,943
Rio Grande	1,614 *	0,919 *	0,945 *	0,894	1,268	0,971	0,919
Santa Maria	2,013 *	0,884 *	0,954 *	0,911	1,230	0,974	0,930
Santana do Livramento	-0,146 ns	0,970 ns	0,959 *	0,920	1,341	0,972	0,932
Santa Rosa	0,937 ns	0,932 *	0,947 *	0,897	1,323	0,969	0,917
Santa Vitória do Palmar	1,310 *	0,920 *	0,971 *	0,943	0,975	0,984	0,956
Santiago	1,544 *	0,920 *	0,960 *	0,922	1,099	0,979	0,940
Santo Ângelo	1,221 ns	0,932 ns	0,938 *	0,881	1,312	0,968	0,909
São Borja	0,049 ns	0,971 ns	0,952 *	0,908	1,310	0,970	0,925
São Francisco de Paula	1,944 *	0,885 *	0,948 *	0,899	1,041	0,972	0,921
São Gabriel	1,514 *	0,908 *	0,954 *	0,911	1,321	0,975	0,930
São Luiz Gonzaga	0,685 ns	0,938 *	0,953 *	0,908	1,319	0,969	0,923
Tapes	1,186 *	0,949 *	0,969 *	0,939	0,985	0,983	0,953
Taquari	2,061 *	0,906 *	0,952 *	0,907	1,239	0,974	0,928
Torres	2,266 *	0,865 *	0,961 *	0,923	1,016	0,973	0,935
Uruguaiana	1,945 *	0,929 *	0,953 *	0,910	1,424	0,971	0,927
Vacaria	1,034 *	0,891 *	0,947 *	0,897	1,364	0,960	0,909
Veranópolis	2,269 *	0,884 *	0,945 *	0,893	1,163	0,969	0,916

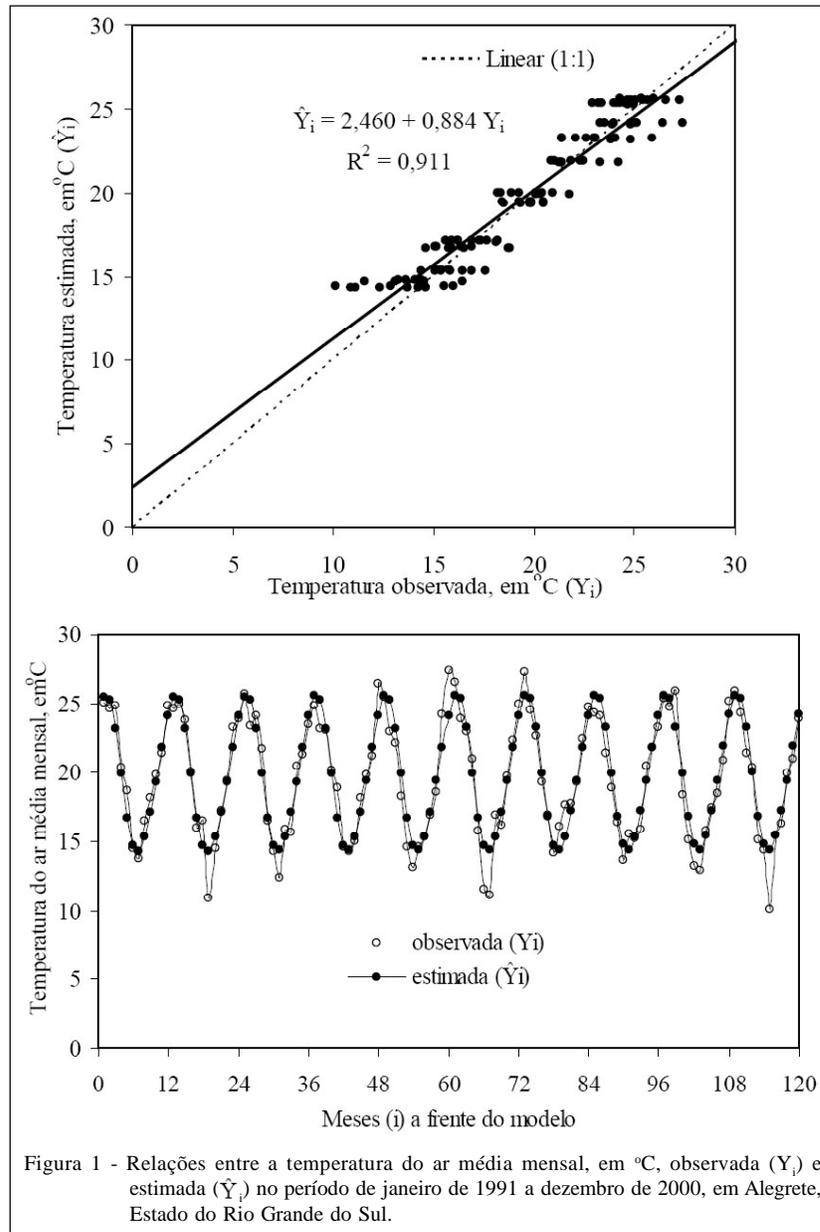
⁽¹⁾ * Coeficiente linear difere de zero pelo teste t, com nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo.

⁽²⁾ * Coeficiente angular difere de um pelo teste t, com nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo.

⁽³⁾ * Coeficiente de correlação difere de zero pelo teste t, com nível de 5% de probabilidade. ns = Não significativo.

determinação (R^2) próximos de um, raiz do quadrado médio do erro (RQME) próxima de zero e índices d de Willmott (WILLMOTT, 1981) e CS de CAMARGO & SENTELHAS (1997) próximos de um. Portanto, de maneira geral, pode-se inferir que esses modelos podem ser utilizados para estimar a temperatura do ar média mensal nesses locais do Estado do Rio Grande do Sul.

Assim, em Alegrete, por exemplo, a estimativa da temperatura do ar média mensal (\hat{Y}_i) para o mês de janeiro de 1991 é 25,5151°C e é obtida por meio da equação $\hat{Y}_i = P_0 + P_1 \cos(30^\circ t) + Q_1 \sin(30^\circ t) + P_2 \cos(60^\circ t) + Q_2 \sin(60^\circ t) + b(720 + i)$ (Tabela 3), ou seja, $\hat{Y}_i = 19,135828 + 5,606824 \cos(30^\circ * 0) + 0,285129 \sin(30^\circ * 0) + 0,150536 \cos(60^\circ * 0) + 0,522108 \sin(60^\circ * 0)$



0)+0,00086263 (720+1)=25,5151 °C. Ainda, para o mês de dezembro de 2000, em Alegrete, $\hat{Y}_{120}=19,135828+5,606824 \cos (30^\circ * 11)+0,285129 \sin (30^\circ * 11)+0,150536 \cos (60^\circ * 11)+0,522108 \sin (60^\circ * 11)+0,00086263 (720+120)=24,1966^\circ\text{C}$. Do ponto de vista prático, no futuro, a partir de novos dados observados, é importante que as estimativas dos parâmetros do modelo (Tabela 3) sejam ajustadas para incorporar possíveis mudanças de tendências nas séries temporais. Além da previsão de valores futuros, esses modelos são adequados para estimar falha de dados.

CONCLUSÃO

O modelo harmônico gerado, para cada um dos 37 locais do Estado do Rio Grande do Sul, é adequado para estimar a temperatura do ar média mensal.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores, aos técnicos, aos observadores meteorológicos, aos estagiários e às demais pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa para Alberto Cargnelutti Filho.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, E. Análise harmônica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.7-43, 1968.
- ASSIS, F.N. de et al. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: UFPEL, 1996. 161p.
- CAMARGO, A.P.de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à temperatura máxima do ar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.14, p.87-93, 2008a.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decenal do ar no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.893-901, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2006000600001&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 12 fev. 2010. doi: 10.1590/S0100-204X2006000600001.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Coordenadas geográficas na estimativa das temperaturas máxima e média decenais do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.38, p.2448-2456, 2008b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000900006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 12 fev. 2010. doi: 10.1590/S0103-84782008000900006.
- JOÃO, M.M.L. **Análise do comportamento das temperaturas máxima e mínima médias mensais para o Estado do Rio Grande do Sul**. 2009. 137f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas. Disponível em: <http://www.ufpel.tche.br/meteorologia/pos-graduacao/dissertacoes/dissertacoes_completas/dissertacao_milena_joao.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2010.
- MEZZOMO, D. et al. Análise espectral da temperatura mínima média em dois trimestres numa região homogênea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, p.121-132, 2007. Disponível em: <<http://www.sbagro.org.br/rbagro/ojs/index.php/rbagro/article/viewFile/57/1>>. Acesso em: 12 fev. 2010.
- MORETTIN, P.A.; TOLOI, C.M.C. **Análise de séries temporais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 564p.
- SIEGEL, S.; CASTELLAN JÚNIOR, N.J. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. 2.ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 448p.
- SILVA, J.B. da; FERNANDES, A. M. Análise harmônica das temperaturas mínimas em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.6, p.455-470, 1991.
- SARTORIS, A. **Estatística e introdução à econometria**. São Paulo: Saraiva, 2003. 426p.
- STEEL, R.G.D. et al. **Principles and procedures of statistics a biometrical approach**. 3.ed. Nova York: McGraw-Hill, 1997. 666p.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.