

## MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LAS TEMPERATURAS PROMEDIO DE LA MÍNIMA, MÁXIMA Y MEDIA DIARIA PARA LA REGIÓN ANDINA DE VENEZUELA

## ESTIMATION MODELS FOR CLIMATIC AVERAGE OF DAILY MINIMUM, MAXIMUM, AND MEDIUM AIR TEMPERATURES FOR THE ANDES REGION IN VENEZUELA

Beatriz Ibet Lozada García\* y Paulo César Sentelhes\*\*

\* Investigadora. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), CIAE-Táchira. Carretera vía Delicias, Bramón, Rubio- Estado Tachira. E- mail: blozada@inia.gob.ve.

\*\* Profesor. Departamento Ciencias Exactas. Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ). USP. Av. Pádua Díaz N° 11. Piracicaba. SP. Brasil.

### RESUMEN

La disponibilidad de datos diarios de temperatura del aire es indispensable para una amplia variedad de estudios agrometeorológicos como: estimación de la evapotranspiración, balance hídrico, zonificación agroclimática y confort animal, y especialmente en la previsión de enfermedades y rendimiento de los cultivos. Debido a la baja densidad de estaciones de la red meteorológica en los estados Táchira, Mérida y Trujillo, de la región Andina de Venezuela, los datos de temperatura del aire no están disponibles con la distribución espacial requerida para estudios de esa naturaleza. Con el interés de disponer de una forma rápida y eficiente de estimar los promedios diarios de las temperaturas mínimas, máximas y medias, El objetivo de este estudio fue generar modelos diarios de estimación de las variables en estudio empleándose la regresión lineal múltiple, considerando como variables independientes las coordenadas geográficas (longitud y latitud) y la altitud. Los datos utilizados en este estudio pertenecen a la red de estaciones meteorológicas del Ministerio del Ambiente de Venezuela, del cual fueron escogidas 22 unidades distribuidas en esos tres estados. Los modelos obtenidos presentaron en promedio, coeficientes de determinación superiores a 0,90 cuando fueron probados con datos independientes, con estimaciones libres de errores significativos: índice de concordancia  $d$  variando de 0,98 a 1,0 y RMSE medio menor que 2 °C.

**Palabras Clave:** Regresión lineal múltiple; coordenadas; altitud.

### SUMMARY

Nowadays, the availability of daily data of air temperature is essential for a wide range of studies in agrometeorology, like evapotranspiration, water balance, crop zoning, animal comfort, and mainly for diseases and crop yield forecasts. Due to the low density of weather stations in Táchira, Trujillo, and Mérida states, in the Andes region of Venezuela, air temperature data are not available in the spatial distribution required for the studies cited above. With the purpose of having a reliable daily air temperature database for the Andes region, the aim of this study was to generate models for estimating climatic average of daily minimum, maximum, and medium air temperature, using multiple linear regression, considering as input the geographical coordinates (longitude and latitude) and altitude. The data used in this study come from the weather stations network of the Ministry of Environment of Venezuela, from which were chosen 22 units spread over the three states. The obtained models showed on average coefficients of determination higher than 0.90, when tested with independent data, and estimated values free of significant errors:  $d$  index between 0.98 and 1.00, and an average RMSE smaller than 2 °C.

**Key Words:** Multiple linear regression; coordinates; altitude.

RECIBIDO: marzo 05, 2007

ACEPTADO: julio 12, 2007

## INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire es el elemento meteorológico y climatológico más importante en el crecimiento y desarrollo vegetal, determinando la distribución espacial de la vegetación natural, y condicionando la aptitud agrícola de los cultivos.

Con el uso de la temperatura se puede interpretar las transformaciones de la masa y estructura vegetal, o sea, la fenología que caracteriza el ciclo biológico del vegetal (Pascale y Damario, 2004). La influencia de la temperatura del aire en los vegetales puede ser indirecta, sobre su crecimiento y desarrollo, producto del efecto cuantitativo en el suplemento de energía aportado por el metabolismo basal y la biosíntesis, afectando procesos o fases de desenvolvimiento como: germinación, formación de flores, frutos y semillas. La influencia directa se da vía procesos reguladores como: inducción térmica, termoperiodismo y termomorfismo. También actúa como factor de estrés de la planta. El calor y el frío, dependiendo de la intensidad y duración, impiden la actividad metabólica, el crecimiento y la viabilidad de las plantas, imponiendo, de esa forma, límites para la distribución geográfica de las especies (Larcher, 2000).

Uno de los principales problemas para la realización de estudios agrometeorológicos, es la inexistencia de datos de temperatura. En ese sentido, Feitoza *et al.* (1980) consideran que la ausencia de estaciones meteorológicas en la localidad de interés, fallas en las series o series históricas muy cortas comprometen el detalle y la precisión de los estudios de zonificación agroclimática.

La temperatura del aire puede ser estimada por las coordenadas geográficas mediante ecuaciones de regresión lineal múltiple, basándose en el hecho que la distribución de calor del globo terrestre es condicionada por la latitud, que determina la disponibilidad de radiación solar incidente en la superficie terrestre; por la altitud, producto de la variación de presión y del enrarecimiento del aire; y algunas veces por la longitud, que expresa el efecto de la proximidad a los océanos y de la continentalidad (Coelho *et al.*, 1973; Garabatos, 1990; Pereira *et al.*, 2002).

Ese método ha sido probado por diversos autores en escala mensual (Coelho *et al.*, 1973; Ferreira *et al.*, 1974; Feitoza *et al.*, 1980; Pedro Junior *et al.*, 1991; Pascale y Damario, 2004) encontrando correlaciones superiores a 0,86 y coeficientes de regresión significativos al 1%.

Estos elevados coeficientes permiten señalar que el uso del modelo de las coordenadas geográficas para estimar las temperaturas medias normales de otro local, es factible desde que sean ajustados los coeficientes de la regresión.

Price *et al.* (2000) consideran que para algunas situaciones es preferible utilizar un método más simple a uno más sofisticado, el cual normalmente requiere considerablemente mayor tiempo para su aplicación. En ese sentido, Lookingbill y Urban (2003) sugieren que el primer paso en estudios agrícolas para regiones montañosas es el desarrollo de modelos geográficos simples de estimación de la temperatura del aire.

En Venezuela, estudios de estimación de las temperaturas son escasos, algunos de ellos fueron elaborados para determinar la temperatura media mensual y anual para regiones con gran variabilidad en la altitud. Esos modelos emplean ecuaciones de regresión lineal múltiple, considerando la altitud como variable independiente, encontrando coeficientes de determinación elevados entre 0,95 y 0,99 (Rondón, 1986; Solórzano y Lacruz, 1994).

En la región de los Andes (estados Táchira, Mérida y Trujillo) la densidad de estaciones meteorológicas que registran la temperatura del aire es muy irregular y escasa, lo que dificulta los estudios agrometeorológicos. Siendo esa región responsable por gran parte de la producción hortícola del país, el conocimiento de sus diferentes regímenes térmicos es de extrema importancia desde el punto de vista agrícola, especialmente para fines de zonificación agroclimática, modelación del crecimiento y rendimiento de los cultivos, evapotranspiración, balance hídrico y pronóstico de enfermedades.

Considerando lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar los coeficientes del modelo de coordenadas geográficas para estimar las medias diarias de las temperaturas mínima, máxima y media, para la región andina de Venezuela.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La región de estudio esta compuesta por los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela (Cuadro 1). Los tres ocupan un área aproximada de 29 200 km<sup>2</sup>. En esa área, se encuentran 22 estaciones meteorológicas pertenecientes al Ministerio del Ambiente (Cuadro 2).

**CUADRO 1.** Coordenadas geográficas de los estados considerados en el estudio.

Estado	Latitud (N)	Longitud (W)
Táchira	7°21'52" a 8°39'0"	71°18'47" a 72°29'15"
Mérida	7°39'53" a 9°19'05"	70°32'23" a 71°54'54"
Trujillo	8°57'17" a 10°02'42"	69°59'50" a 71°04'13"

Los datos de temperatura del aire promedio diaria (mínima, máxima y media) conjuntamente con las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) de cada local fueron utilizados para estimar los coeficientes lineares y angulares de las ecuaciones de regresión lineal múltiple para cada día del año. La ecuación resultante es del tipo:

$$Y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + \epsilon$$

en donde:  $Y$  es la temperatura estimada, en °C,  $x_1$  es la altitud, en metros;  $x_2$  es la longitud y  $x_3$  es la latitud,

expresadas en minutos; es la desviación entre los valores observados y estimados; y  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$  son los coeficientes de la ecuación. Esos coeficientes fueron determinados con los datos de 17 de las 22 estaciones meteorológicas consideradas en el estudio.

La prueba de los modelos fue realizada mediante la comparación de los valores estimados diarios, para cada temperatura, con las observaciones (datos independientes) de las siguientes estaciones meteorológicas: 2 146, 3 134, 3 161, 4 063 y 8 053 (Cuadro 1), las cuales no fueron utilizadas en los procedimientos de generación de los coeficientes de los modelos.

Los siguientes índices estadísticos fueron utilizados con el interés de evaluar el grado de ajuste entre los datos de temperatura observados y estimados por los modelos:

· Raíz del Error Cuadrado Medio (RMSE) según Zacharias *et al.* (1996):

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

**CUADRO 2.** Relación de estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio, con sus respectivas coordenadas geográficas.

Código	Estado	Estación	Altitud	Latitud	Longitud
2100	Trujillo	La Ceiba	2	9°28'21"	-71°03'58"
2132	Trujillo	Agua Viva	110	9°33'35"	-70°37'31"
2146	Trujillo	G. Monay	272	9°38'07"	-70°25'00"
3035	Mérida	El Vigía	130	8°36'27"	-71°37'47"
3040	Mérida	La Cuchilla	2280	8°38'00"	-71°21'10"
3061	Táchira	La Fría	95	8°14'26"	-72°15'55"
3072	Mérida	Mucubaji	3560	8°48'10"	-71°44'27"
3114	Mérida	Santo Domingo	2155	8°52'27"	-70°40'27"
3134	Mérida	Canagua	1560	8°08'08"	-71°26'25"
3141	Mérida	Tovar	952	8°20'30"	-71°44'40"
3161	Mérida	Los Plantíos	3878	8°49'11"	-70°47'05"
3170	Mérida	S. J. de Lagunillas	1050	8°30'40"	-71°21'14"
4030	Mérida	Punta Piedras	198	7°36'47"	-71°30'24"
4038	Mérida	San Cristóbal	800	7°48'00"	-72°13'47"
4041	Táchira	Bramón-Esc	1105	7°39'22"	-72°23'40"
4063	Táchira	Las Adjuntas	560	7°46'20"	-72°25'25"
4072	Táchira	P. Zumbador	2570	7°46'20"	-72°25'25"
4083	Táchira	Puente Salón	475	7°35'08"	-72°10'35"
4086	Mérida	Las Bocas de Cuparo	220	7°41'00"	-72°26'00"
8052	Táchira	Caño Negro	151	8°29'58"	-71°50'50"
8053	Táchira	La Palmita	600	8°33'03"	-71°36'02"
9060	Táchira	El Paradero	1120	7°45'13"	-71°54'17"

Error cuadrado medio sistemático ( $MSE_s$ ) analizado por Willmott. (1981).

$$MSE_s = MSE_a + MSE_p + MSE_i \quad (2)$$

$$MSE_a = a^2 \quad (3)$$

$$MSE_p = (b-1)^2 \left[ \frac{\sum_{i=1}^N O_i^2}{N} \right] \quad (4)$$

$$MSE_i = 2a(b-1)^2 \quad (5)$$

en donde:  $MSE_a$  es el componente aditivo,  $MSE_p$  es el componente proporcional y  $MSE_i$  es el componente independiente del error sistemático,  $a$  es el intercepto,  $b$  el coeficiente angular de la recta,  $O_i$  es el valor observado,  $N$  es el número total de  $O$  y  $P_i$  es el valor estimado.

Error cuadrado medio aleatorio ( $MSE_u$ ) descrito por Willmott. (1981).

$$MSE_u = MSE - MSE_s \quad (6)$$

en que  $MSE$  es el error cuadrado medio (Willmott, 1981).

Índice de concordancia ( $d$ ) según Willmott. (1981).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

$$\bar{O} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i \quad (8)$$

en que:  $O_i$  y  $P_i$  representan los valores observados y estimados,  $n$  representa el número de pares de valores  $O_i$  y  $P_i$  y  $\bar{O}$  es la media de los valores observados.

El RMSE fue utilizado ya que permite conocer el tamaño del error producido por el modelo, y su descomposición en los errores sistemático y aleatorio auxilia en la explicación de la capacidad de predicción del modelo. Por su parte el índice de concordancia ( $d$ ) es una medida

del grado en que los datos estimados por el modelo están libres de error. Este índice varía de 0 a 1, siendo que  $d = 1$  indica una perfecta concordancia entre los valores observados y los estimados, y  $d = 0$  significa total discordancia (Willmott, 1981).

La selección del modelo para cada día y temperatura (mínima, máxima y media) se basó en los valores y en la significancia de los coeficientes de determinación ajustados ( $R^2$ ), evaluados por la prueba de F, considerándose un nivel de 0,05 de significancia.

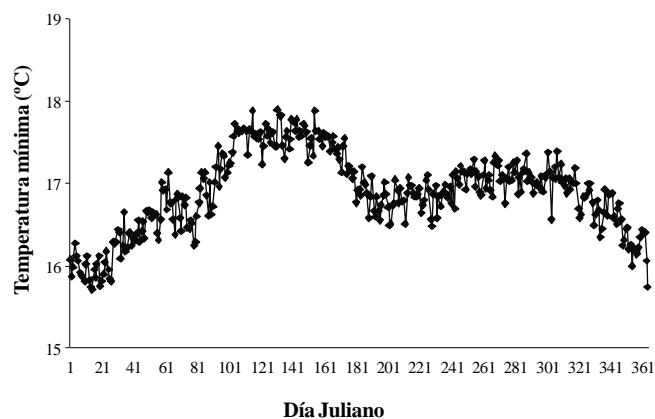
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Coefficientes de regresión lineal múltiple para estimar las temperaturas

Los coeficientes de los modelos seleccionados para estimar las temperaturas variaron de acuerdo con la época del año. A continuación se presenta una descripción detallada para cada una de las temperaturas.

#### Temperatura mínima

La media de la temperatura mínima de la región presenta los menores valores entre enero y diciembre ( $\approx 16,0^\circ\text{C}$ ), en febrero se inicia el aumento de las temperaturas hasta alcanzar los valores máximos del año entre abril y mayo (de  $17,5^\circ\text{C}$  a  $18,0^\circ\text{C}$ ), y disminuye a partir de junio, manteniéndose entre  $16,5^\circ\text{C}$  y  $17,0^\circ\text{C}$  durante los meses de julio y agosto, aumentando ligeramente en los meses de septiembre y octubre (Figura 1).



**FIGURA 1.** Promedio diario de temperatura mínima considerando todas las estaciones de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.

Esos valores muestran claramente la característica bimodal de la temperatura, la cual está relacionada con el movimiento aparente del sol. En el solsticio de invierno (21 de diciembre) el sol se encuentra en el punto más distante del hemisferio norte (HN invierno astronómico), como consecuencia de eso las temperaturas mínimas y medias alcanzan sus valores más bajos en los meses de diciembre, enero y febrero. Los vientos alisios del nordeste comunes en esa época también contribuyen a la disminución de la temperatura.

A pesar de esa variación bimodal, la amplitud anual de las mínimas en la región de estudio es del orden de  $\pm 2$  °C, siendo menor a la observada en el resto del país.

El coeficiente lineal  $a$  del modelo de estimación de la temperatura mínima presentó la mayor amplitud de variación, con valores oscilando entre  $-133,45$  y  $123,18$ , y la mayoría de los valores fue del orden de 20. Se observó que en los meses de marzo y de junio a noviembre el valor de  $a$  es predominantemente negativo, variando entre  $-30$  y  $-133$ . Los coeficientes  $c$  (longitud) y  $d$  (latitud) forman parte de los modelos a lo largo de todo el año, con valores predominantemente negativos y positivos, respectivamente, variando entre  $0,023695$  y  $-0,03349$  para la longitud y entre  $0,042444$  y  $-0,00901$  para la latitud. El coeficiente de la altitud ( $b$ ) presentó valores negativos y con poca variación, entre  $-0,00514$  y  $-0,00615$  (Figura 2).

### Temperatura máxima

La media de la temperatura máxima no presenta exactamente la misma estacionalidad observada para la temperatura mínima, en este caso el máximo principal ocurre entre agosto y octubre y el secundario en abril. Se observó que los valores más elevados ocurren entre agosto y septiembre ( $> 27,0$  °C), y los menores valores (entre  $24,5$  °C y  $25,5$  °C) entre mayo y junio (Figura 3).

Los valores del coeficiente  $a$  se mantuvieron próximos a 200 durante los meses de enero a mayo. A partir de julio hasta agosto los valores variaron entre 10 y 270, siendo esa la mayor oscilación, y de septiembre a diciembre los valores oscilaron entre 30 y 180. Considerándose todo el año, el valor máximo de  $a$  es de 368,56 y el mínimo de 7,73. Los coeficientes relativos a la longitud y latitud presentaron magnitudes semejantes entre ellos, con valores entre  $0,073567$  y  $-0,009974$  para la latitud y entre  $0,048037$  y  $-0,039864$  para la longitud, en el caso de la latitud tuvo influencia apenas en los meses de mayo a agosto. El coeficiente de la altitud presentó valores negativos en el orden de  $-0,005549$  a  $-0,006940$  (Figura 4).

### Temperatura media

La variación bimodal presente en las medias diarias de las temperaturas mínima y máxima se refleja en la temperatura media, observándose dos máximos asociados a la variación anual de las temperaturas máxima (Figura 5).

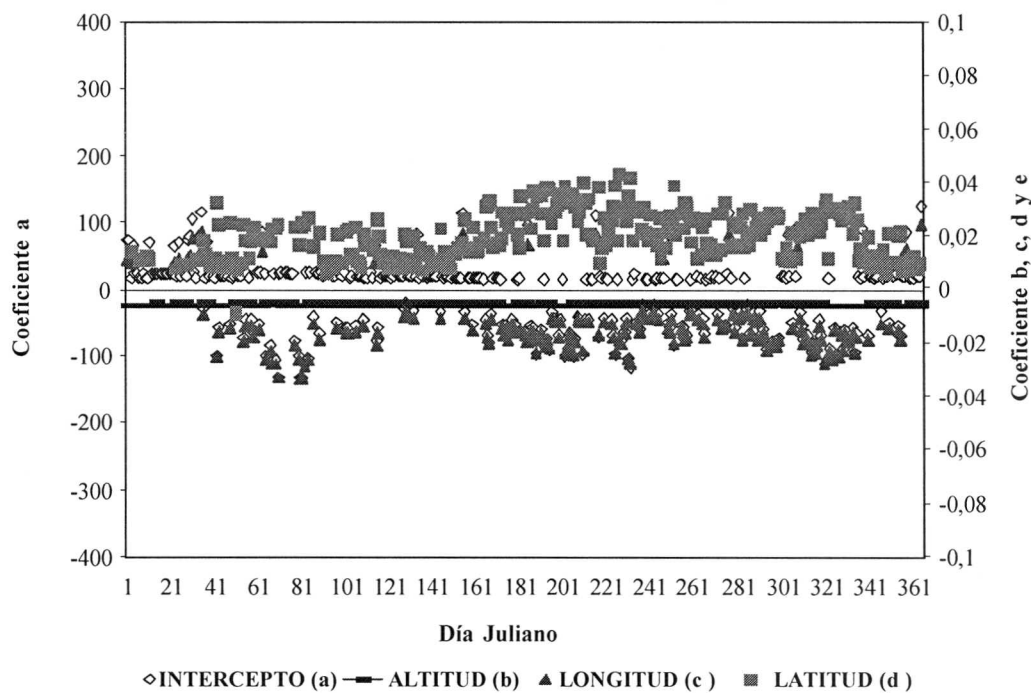
En el período de enero a marzo, el coeficiente  $a$  es superior a 100 y durante los meses de abril y mayo presenta valores oscilando entre 10 y 100 indistintamente. En general, los valores extremos para este coeficiente fueron 164,93 y  $-28,44$ . Los coeficientes  $c$  y  $d$  presentaron valores positivos con magnitudes semejantes entre ellos, variando entre  $0,031977$  y  $-0,01036$  para la longitud y entre  $0,034364$  a  $-0,009191$  para la latitud. La longitud presentó influencia sólo en los meses de diciembre a mayo, en cuanto que la latitud tubo influencia en el resto del año (de junio a noviembre). Para el coeficiente  $b$ , se repitió la misma tendencia observada para las temperaturas mínima y máxima, con valores oscilando entre  $-0,00555$  y  $-0,00632$  (Figura 6).

Esos valores del coeficiente  $b$  presentaron magnitudes semejantes a los obtenidos por Solórzano y Lacruz (1994) para la temperatura media anual en las condiciones del estado Mérida.

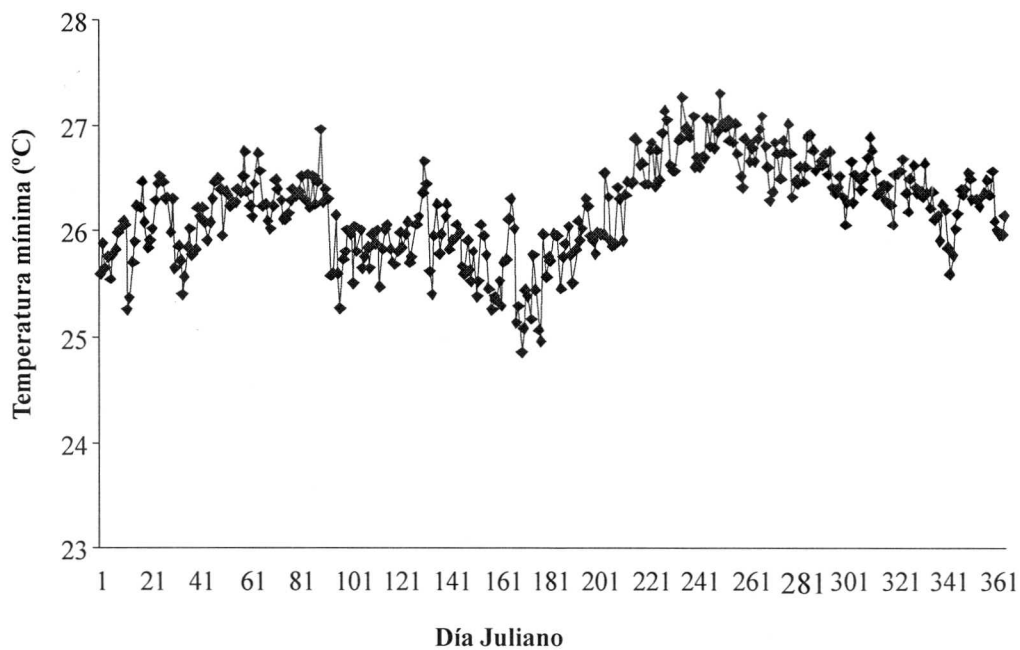
Variación de esa magnitud en los coeficientes de las ecuaciones de estimación de la temperatura del aire no es normalmente observada en los modelos para estimación en escala mensual (Coelho *et al.*, 1973; Ferreira *et al.*, 1974; Feitoza *et al.*, 1979; Pascale y Damario, 2004). Las variaciones observadas para las temperaturas mínima, máxima y media parecen estar asociadas directamente a los modelos de estimación en la escala diaria, dada la oscilación de los valores de esas temperaturas día a día, a lo largo del año (Figuras 1, 3 y 5).

El coeficiente  $b$  presentó en las tres temperaturas valores con una variación muy pequeña a lo largo del año, siendo este el factor con mayor influencia. Esos valores representan que para cada 1 000 m de variación en la altitud las temperaturas sufren una disminución de 5 a 6 °C, los cuales se encuentran próximos del valor del gradiente adiabático medio (6 °C) como lo muestran las Figuras 2, 4 y 6.

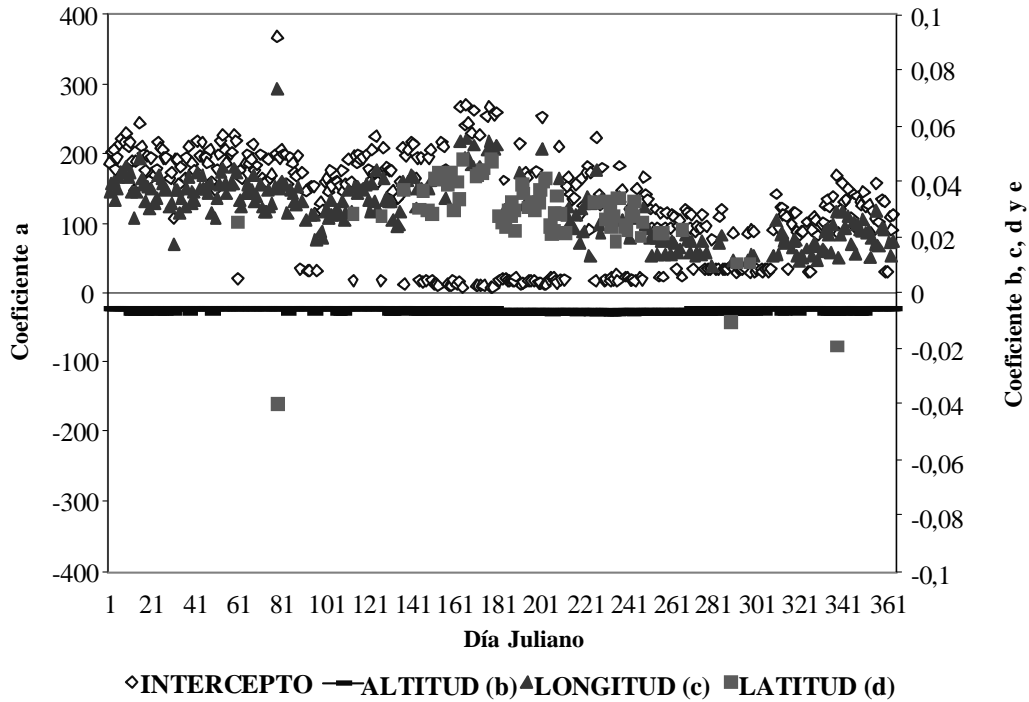
Considerando que la latitud influencia la distribución del calor en la tierra (Coelho *et al.*, 1973), eso puede explicar la influencia diferenciada de la latitud en las temperaturas medias y máximas.



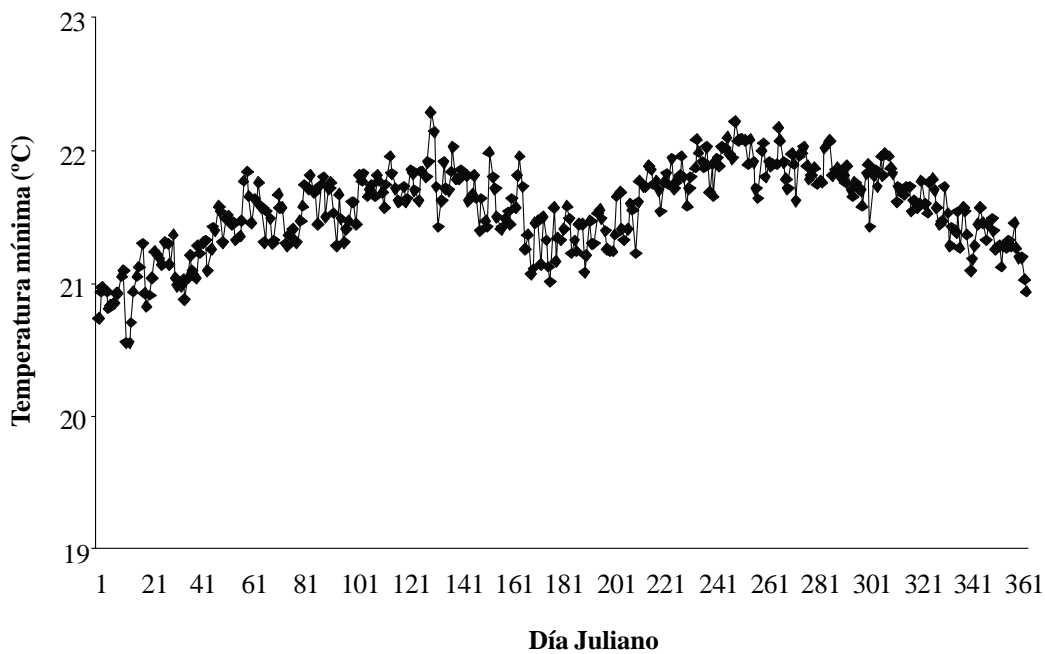
**FIGURA 2.** Coeficientes a (intercepto), b (altitud), c (longitud) y d (latitud) de las ecuaciones de estimación del promedio diario de la temperatura mínima, para los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.



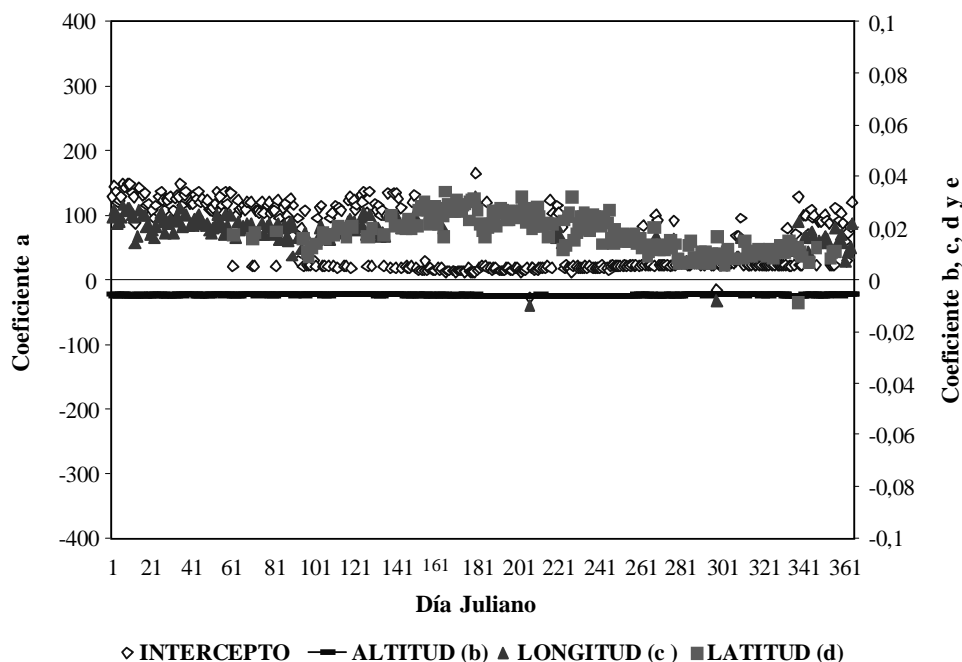
**FIGURA 3.** Promedio diario de la temperatura máxima considerando todas las estaciones de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.



**FIGURA 4.** Coeficientes a (intercepto), b (altitud), c (longitud) y d (latitud) de las ecuaciones de estimación del promedio diario de la temperatura máxima, para los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.



**FIGURA 5.** Promedio diario de la temperatura media considerando todas las estaciones de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.



**FIGURA 6.** Coeficientes a (intercepto), b (altitud), c (longitud) y d (latitud) de las ecuaciones de estimación del promedio diario de la temperatura media, para los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.

En la temperatura media no se observó influencia de la latitud durante los meses de diciembre a abril, período en el cual el sol se encuentra en su posición más al sur, por tanto el hemisferio norte se encuentra en el invierno astronómico, lo que significa una menor disponibilidad de energía. Lo contrario ocurre con las temperaturas máximas durante los meses de mayo a agosto, cuando el sol está más próximo del hemisferio norte, o sea, el verano astronómico, por tanto, se cuenta con mayor cantidad de energía disponible.

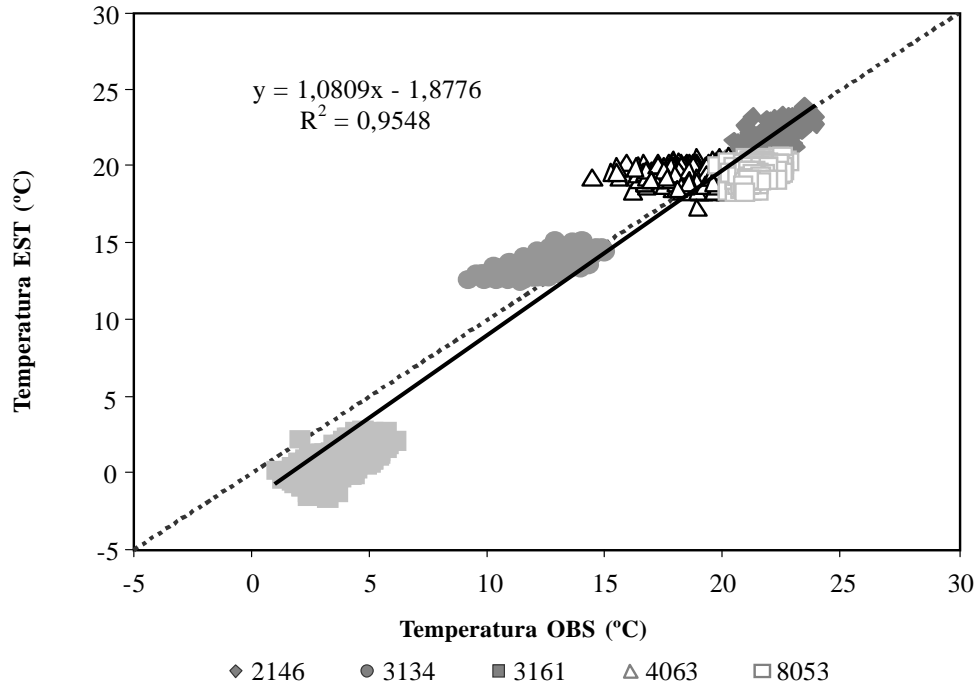
Se obtuvieron valores elevados del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para las relaciones entre las temperaturas y las coordenadas geográficas, los cuales variaron de 0,90 a 0,99, para las temperaturas medias y mínimas, y de 0,69 a 0,96, para la máxima, los menores valores ocurrieron en el primer semestre.

#### Prueba y evaluación de los modelos de estimación de las temperaturas

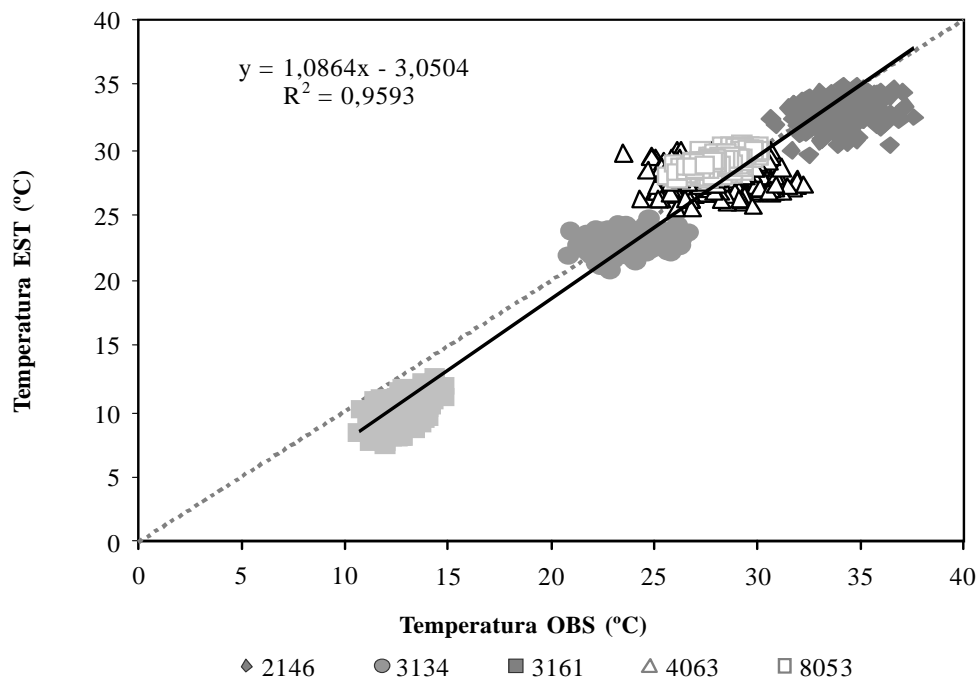
Los modelos obtenidos fueron probados con los datos independientes de 5 estaciones, con altitudes entre 150 a 3 900 m.s.n.m. El análisis de regresión entre los valores observados y los estimados por los modelos indicaron, de un modo general, la existencia de una buena relación de proporcionalidad entre ellos, con  $R^2$  variando de 0,95 a 0,98 y  $d$  entre 0,95 y 0,99.

No obstante, del excelente desempeño de los modelos indicados por los índices  $R^2$  y  $d$ , se observó que tendieron a subestimar las temperaturas medias diarias para la localidad situada a 3 878 m.s.n.m. En el caso de las localidades situadas entre 200 y 1 500 m.s.n.m., las estimaciones estuvieron más próximas de la línea de valores (1:1), no se observó un buen desempeño para estimar la variabilidad de las temperaturas observadas, especialmente en el caso de la temperatura mínima (Figura 7). Esa misma tendencia fue observada para la temperatura máxima y media, más no de una forma tan evidente (Figuras 8 y 9).

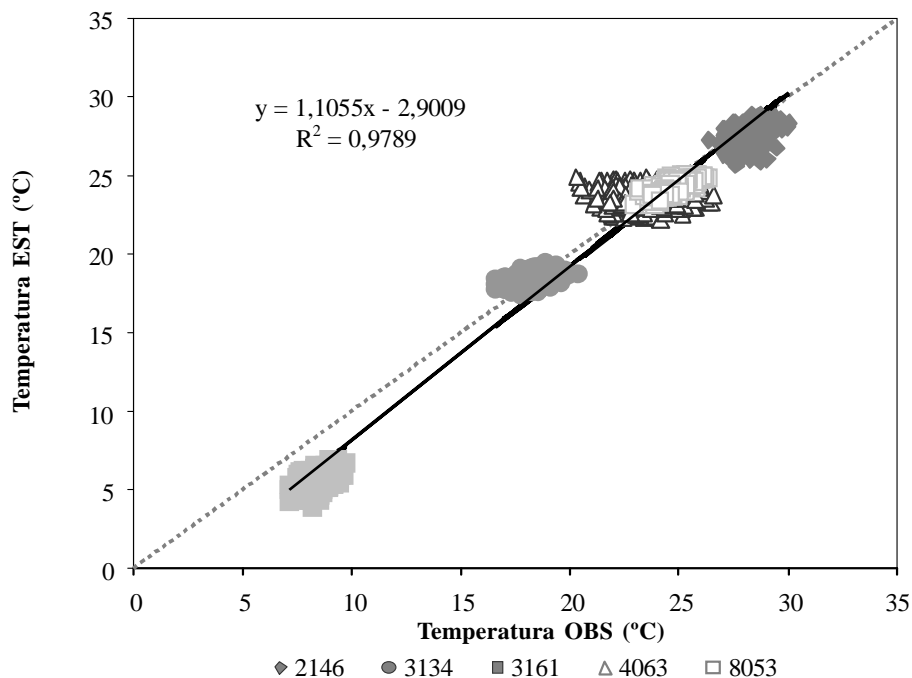
A pesar de las subestimaciones observadas, los modelos presentaron un bajo nivel de error, evidenciados por el MSE que varió entre 1,53 y 1,82 °C. En la descomposición del MSE en los componentes sistemático (MSEs) y aleatorio (MSEa), se encontró que para las temperaturas mínima y máxima prevalece el componente aleatorio (80 y 70 % del MSE), indicando que los modelos pueden ser utilizados con un alto nivel de exactitud. En el caso de la temperatura media el RMSEa fue menor a los anteriores (54% del MSE), más sigue siendo superior al RMSEs, lo que sugiere que los modelos aún pueden ser utilizados, considerándose la posibilidad de minimizar ese error sistemático, con la finalidad de mejorar la capacidad predictiva del modelo (Cuadro3).



**FIGURA 7.** Relación entre el promedio diario de la temperatura mínima observada (TEMP OBS) y la estimada (TEMP EST) con los modelos de las coordenadas geográficas, considerándose cinco estaciones meteorológicas de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, en Venezuela.



**FIGURA 8.** Relación entre el promedio diario de la temperatura máxima observada (TEMP OBS) y la estimada (TEMP EST) con los modelos de las coordenadas geográficas, considerándose cinco estaciones meteorológicas de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, en Venezuela.



**FIGURA 9.** Relación entre el promedio diario de la temperatura media observada (TEMP OBS) y la estimada (TEMP EST) con los modelos de las coordenadas geográficas, considerándose cinco estaciones meteorológicas de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, en Venezuela.

El hecho de que las temperaturas mínimas observadas sean superiores a las estimadas, refleja el efecto de la alta nebulosidad existente en las estaciones localizadas sobre los 3 500 m.s.n.m., en la región andina, por tanto, se presume que en esas condiciones es el gradiente adiabático saturado que determina la disminución de la temperatura ( $-4\text{ }^{\circ}\text{C}/1\ 000\text{ m}$ ), aproximadamente entre 1 y  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor que los coeficientes obtenidos para los modelos seleccionados. Por otro lado, la mayor disponibilidad de calor en las capas más próximas a la superficie

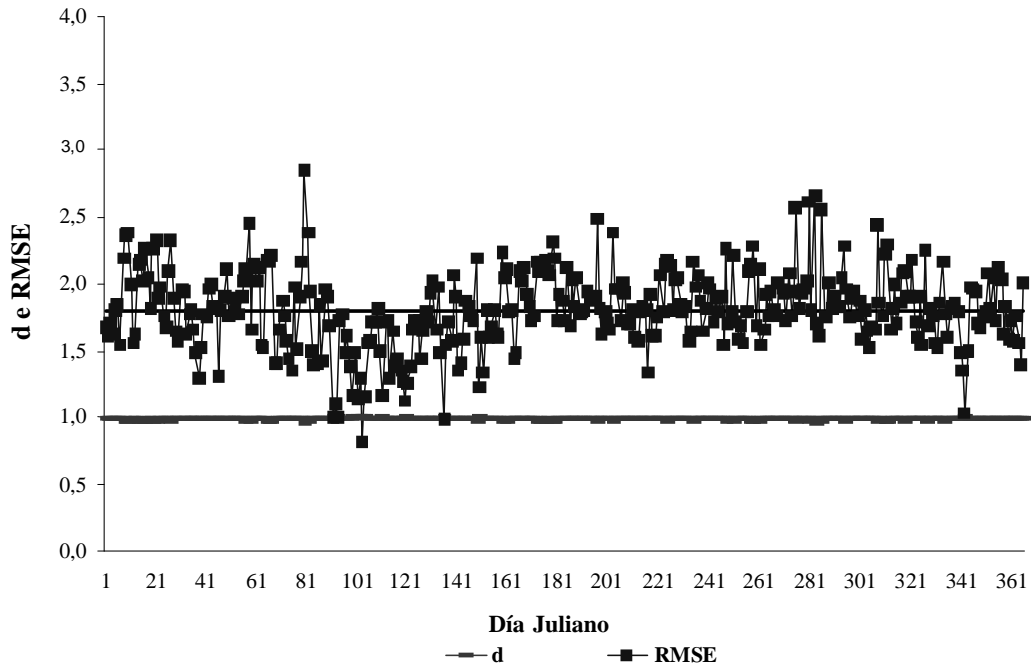
estarían influenciando las temperaturas en las estaciones situadas en altitudes menores, siendo el caso de la estación a 200 m.s.n.m.

El valor medio del RMSE de cada modelo diario, representado en las Figuras 10, 11 y 12, por la línea continua, presentó valores próximos a los mencionados por Magarey *et al.* (2001) como errores aceptables en la estimación de la temperatura diaria ( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) para aplicaciones en el manejo de las enfermedades.

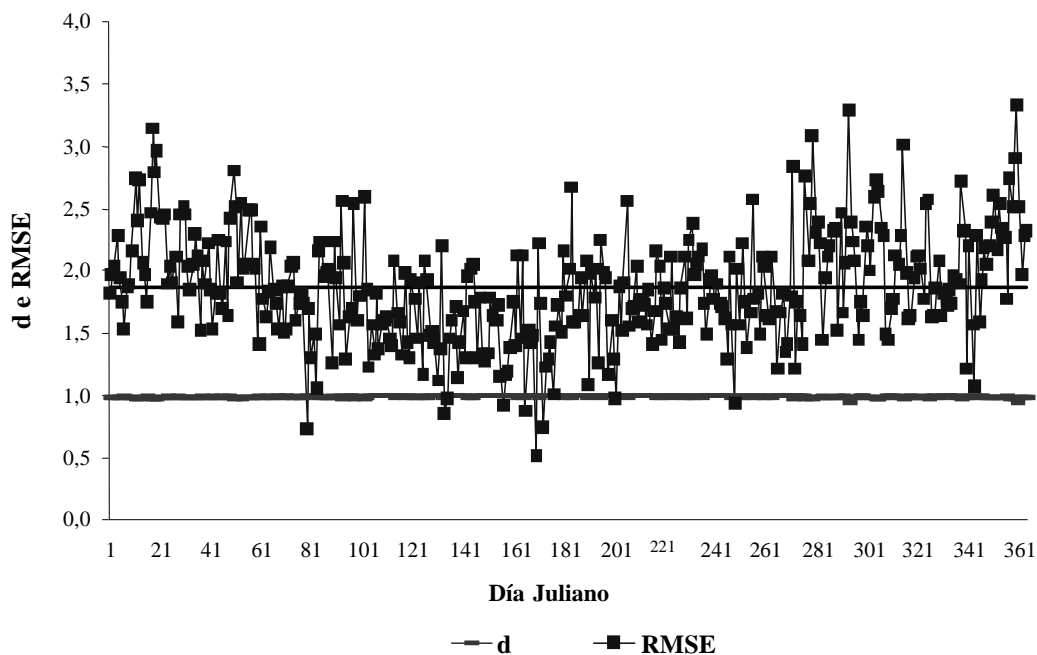
**CUADRO 3.** Índice de concordancia (d), Raíz del Error Cuadrado Medio (RMSE) y la relación entre los componentes aleatorio (MSEa) y sistemático (MSEs) y el Error Cuadrado Medio (MSE) de los modelos de coordenadas geográficas, considerándose cinco estaciones meteorológicas de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.

	RMSE	d	RMSEs	RMSEa	MSEs/MSE	MSEa/MSE
TempMed	1,53	0,99	1,03	1,13	0,46	0,54
TempMáx	1,92	0,95	1,05	1,61	0,30	0,70
TempMín	1,82	0,95	0,82	1,63	0,20	0,80

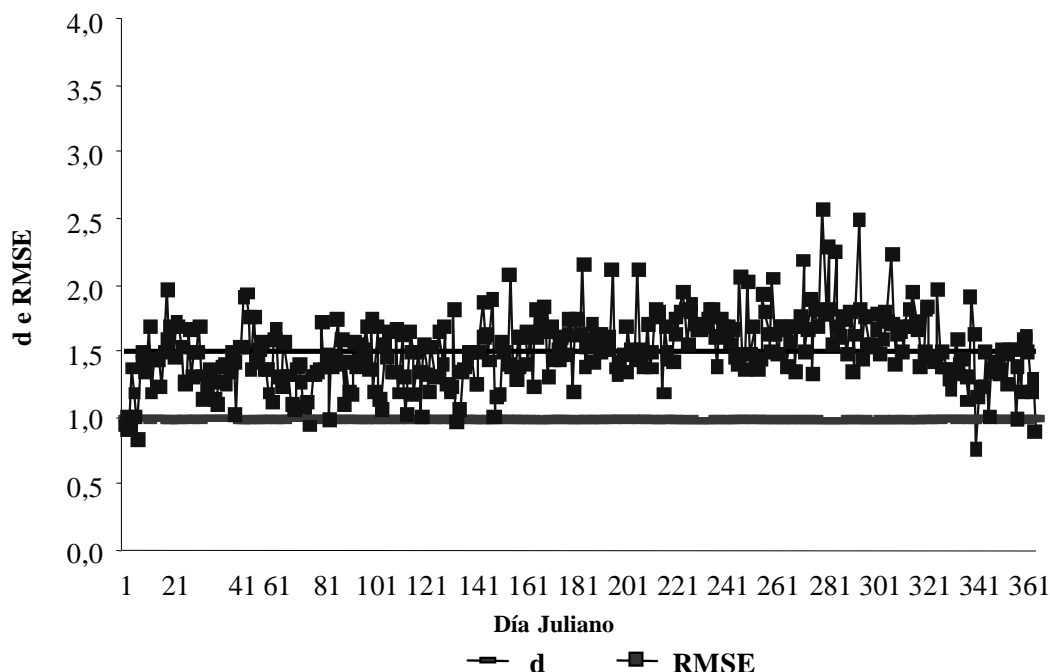
TempMed = Temperatura media TempMax = Temperatura máxima TempMin = Temperatura mínima



**FIGURA 10.** Índice de concordancia (d) y Raíz del Error Cuadrado Medio (RMSE) de las ecuaciones de estimativa del promedio diario de la temperatura mínima, de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.



**FIGURA 11.** Índice de concordancia (d) y Raíz del Error Cuadrado Medio (RMSE) de las ecuaciones de estimativa del promedio diario de la temperatura máxima, de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.



**FIGURA 12.** Índice de concordancia (d) y Raíz del Error Cuadrado Medio (RMSE) de las ecuaciones de estimativa del promedio diario de la temperatura media, de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, Venezuela.

La mayor variación a lo largo del año es observada para las temperaturas máximas en el período de marzo a noviembre, con valores inferiores a  $1,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lo contrario ocurre en el resto del año. EL máximo error cometido en la estimación de las temperaturas máximas fue de  $3,33\text{ }^{\circ}\text{C}$  y el mínimo de  $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 11).

En las temperaturas mínimas los RMSE de los modelos diarios son menores que el valor medio ( $1,79\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) durante el período en que ocurren las temperaturas mínimas más elevadas (abril – junio), y se mantuvieron próximos al valor medio del RMSE en el resto del año (Figura 1 y 10).

Los menores valores del RMSE se observaron en las temperaturas medias, los cuales variaron entre  $0,76\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con menor oscilación que en las temperaturas mínimas y máximas, siendo el valor medio del RMSE igual a  $1,50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 12).

Los valores de RMSE para los modelos diarios de estimación de las temperaturas mínima, máxima y media, permiten inferir que los modelos determinados pueden ser aplicados sin otros ajustes, obteniendo estimados con una elevada exactitud.

Los valores del índice d mostraron que existe una perfecta concordancia entre las temperaturas estimadas

por los modelos y las observadas, dado que sus valores variaron de 0,98 a 1,00 (Figuras 10, 11 y 12) indicando que los estimados de los modelos están libres de errores significativos.

En función de los valores elevados de los coeficientes de correlación y determinación, así como el excelente desempeño de los índices d y RMSE, los modelos determinados permitirán estimar las temperaturas promedio diaria de las mínimas, máximas y media de la región Andina de Venezuela, con un mínimo de error.

## CONCLUSIONES

- La regresión lineal múltiple es una técnica adecuada para la determinación de modelos de estimación de los promedios diarios de las temperaturas mínimas, máximas y medias en regiones montañosas, con elevada precisión y exactitud, además de lo práctico de su aplicación.
- Los modelos diarios determinados permiten estimar los promedios diarios de las temperaturas mínimas, máximas y medias de los estados Táchira, Mérida y Trujillo, de la región andina de Venezuela, con un mínimo grado de error.

## BIBLIOGRAFÍA

- Coelho, D, G. Sedyama e M. Vieira, 1973. Estimativa das temperaturas medias mensais y anais no estado de Minas Gerais. *Revista Ceres*, 20(112):455-459.
- Feitoza, M., J. A. Scárdua, G. Sedyama e S. S. Valle. 1980. Estimativa das medias das temperaturas mínimas mensais y anais del estado del Espírito Santo. *Revista Centro Ciências Rurais*, 10(1):15-24.
- Ferreira, M., G. A. Buriol e I. A. Pignatano. 1974. Estimativa das temperaturas medias mensais e anais del estado de Santa Catarina. *Revista Centro Ciências Rurais*, 4(1):19-38.
- Garabatos, M. 1990. *Temas de Agrometeorología: Naturaleza de la Agrometeorología*, Unidad de Agrometeorología. Buenos Aires: CPIA/OGE.
- Larcher, W. 2000. *Ecofisiologia Vegetal*. Tradução de C.H. Prado y A.C. Franco. São Carlos: RIMA.
- Lookingbill, T. R. and D. L. Urban. 2003. Spatial estimation of air temperature differences for Landscape-scale studies in mountain environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, 114:141-151.
- Magarey, R., R. C. Seem, J. M. Russo, J. W. Zack, K. T. Waight, J. W. Travis and P. V. Oudemans. 2001. Site-specific wheatear information without on-site sensors. *Plant disease*, New York, 85(12):1.216-1.226.
- Pascale, A. L. y E. A. Damario. 2004. *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía.
- Pedro Jr, M. J., M. H. A. Mello, A. A. Ortolani, R. R. Alfonsi e P. C. Sentelhas 1991. Estimativa das temperaturas medias mensais das máximas y das mínimas no estado de São Paulo. Campinas: Inst. Agronômico de Campinas. 11 p. *Boletim Técnico*, 142.
- Pereira, A. R., L. R. Angelocci e P. C. Sentelhas. 2002. *Agrometeorologia: fundamentos y aplicações práticas*. Piracicaba: Editora Agropecuária.
- Price, D. T, D. W. Mckenney, I. A. Naider, M. F. Hutchinson and J. L. Kesteven. 2000. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, 101: 81-9.
- Rondon, F. 1986. Estimación de temperatura media mensual y anual para zonas sin información climatólogica - aplicación al cálculo de evaporación y evapotranspiración potencial. *Oriente Agropecuario*, Jusepín, 13(1/2):112.
- Solórzano, G. y G. Lacruz. 1994. Delimitación de áreas homoclimáticas de precipitación y temperatura en el Estado Mérida, Venezuela. *Acta Científica Venezolana*, Caracas, 45, (suppl. 1):44.
- Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, Norwich, 2(2):184-194.
- Zacharias, S., C. D. Heatwole and C. W. Coakley. 1996. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. *Transactions of the ASAE*. 39(1):47-54.