

# Discussion about models for estimation of relative humidity - case study of the brazilian coast versus influence in concrete durability

## Discusión acerca de modelos para la estimación de la humedad relativa - estudio de caso de la costa brasileña frente la influencia en la durabilidad del hormigón

Ronaldo de Medeiros-Junior<sup>1\*</sup>, Maryangela de Lima\*, Marcelo de Medeiros\*\*

\* Technological Institute of Aeronautics – ITA, Sao Paulo. BRAZIL

\*\* University of Parana, Parana. BRAZIL

Fecha de Recepción: 30/03/2014

Fecha de Aceptación: 30/07/2014

PAG 270-282

### Abstract

Relative humidity is very important for different applications in engineering, including the durability of concrete structures. However, it has been noted that in several cities there are no weather stations with complete time series data. The aim of this paper is to discuss models available in literature to estimate the relative humidity and check its behavior for marine environments. The methodology consisted in comparative analyzes of relative humidity predicted by models and values measured by weather stations for a period of 30 years of data. Two models for 16 different cities of the Brazilian coast were analyzed. For analysis and comparison of these data, the statistical performance of results was evaluated. Among the results, it has been observed through statistical analyzes that one of the models showed better conditions to estimate the relative humidity for marine environments than the other one. However, the need for developing a more appropriate model for this kind of environment has been identified.

*Keywords:* Humidity, concrete structures, models, statistics, coastal environment

### Resumen

En la ingeniería, la humedad relativa es muy importante para diferentes aplicaciones, entre ellas la durabilidad de las estructuras en hormigón. Sin embargo, se ha observado que en algunas ciudades no existen estaciones meteorológicas que reúnan datos completos de las series de tiempo. El objetivo de este trabajo es discutir los modelos disponibles en la literatura para estimar la humedad relativa y comprobar su comportamiento para entornos marinos. La metodología utilizada consiste en el análisis comparativo de la humedad relativa predicha por los modelos y de los valores medidos por las estaciones meteorológicas durante un período de treinta años. Se analizaron dos modelos en dieciséis ciudades de la costa brasileña. Para el análisis y la comparación de los datos, se evaluó el comportamiento estadístico de los resultados. En los resultados de los análisis estadísticos practicados, se observa que uno de los modelos ha demostrado ser mejor para estimar la humedad relativa de los medio ambientes marinos. De igual forma, se identificó la necesidad de desarrollar un modelo más apropiado para este tipo de ambiente.

*Palabras claves:* Humedad, estructuras de hormigón, modelos, estadística, medio ambiente costero

## 1. Introducción

La falta de datos continuos de las estaciones meteorológicas es un problema constante que afecta los estudios relacionados con el monitoreo y análisis de los eventos naturales. Especialmente cuando sucede en países con territorios extensos como Brasil, la escasez de esos datos reduce la posibilidad de efectuar más estudios relacionados con las variables climáticas. La estimación de dichos datos es una alternativa usada con frecuencia para completar las series incompletas (Koehn y Brown, 1985; McVicar y Jupp, 1999; Tardivo y Berti, 2012).

Entre estas variables climáticas, la humedad relativa es extremadamente importante para la ingeniería y sus aplicaciones agrícolas (Castro et al., 2000; Goodrum et al., 2009; Yang et al., 2013; Chai et al., 2014), y además produce un efecto de incomodidad en las personas (Schoen, 2005).

## 1. Introduction

The lack of continuous data from weather stations is a persistent problem that affects studies related to monitoring and analyzing events in nature. Especially when it comes to countries with large territories, such as Brazil, the scarcity of such data reduces the possibility of further studies involving climate variables. The estimation of such data is a commonly used alternative for filling incomplete series (Koehn and Brown, 1985; McVicar and Jupp, 1999; Tardivo and Berti, 2012).

Among these climatic variables, relative humidity is extremely important for engineering and agricultural applications (Castro et al., 2000; Goodrum et al., 2009; Yang et al., 2013; Chai et al., 2014), and it is also related with effect on human discomfort (Schoen, 2005).

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:

Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.  
Dirección: Machado Sidney, 160, apt 503, Centro, Sao Jose dos Campos, Sao Paulo, Brasil. Tel. +55 12 98149-4031  
E-mail: [ronaldodemedeirosjr@yahoo.com.br](mailto:ronaldodemedeirosjr@yahoo.com.br)



La humedad relativa es una variable ambiental esencial en el área de la construcción, especialmente en ambientes marinos, como sucede con la protección del acero de refuerzo contra la corrosión. Por ejemplo, la difusión del ion cloruro es un proceso húmedo, que puede ocurrir sólo cuando existe agua presente en los poros del concreto (Page et al., 1981; Saetta et al., 1993; Bastidas-Arteaga et al., 2010). Algunos modelos predictivos de la penetración del cloruro en el concreto requieren datos sobre la humedad relativa en sus formulaciones (Saetta et al., 1993; Bob, 1996; Andrade, 2001).

Existen dos modelos para estimar la vida útil de las estructuras del hormigón armado que se pueden discutir para ilustrar lo señalado en el párrafo anterior. Saetta et al. (1993) aplican un procedimiento numérico basado en el método de elemento finito para formular la penetración de cloruros en el hormigón. En su análisis, proponen el modelo de la Ecuación 1.

$$D_{c2} = D_{c1} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(RH) \quad (1)$$

Donde  $D_{c1}$  y  $D_{c2}$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) son los coeficientes de referencia y corregido de la difusión de cloruros, respectivamente;  $f_1(T)$  es el factor que representa la influencia de la temperatura;  $f_2(t_e)$  es el factor que representa la influencia de la edad equivalente de maduración, y  $f_3(RH)$  es el factor que representa la influencia de la humedad relativa. Según este modelo, la humedad relativa impacta sobre el coeficiente de difusión de cloruros, de acuerdo a la Ecuación 2.

$$f_3(RH) = \left[ 1 + \frac{(1 - RH)^4}{(1 - RH_c)^4} \right]^{-1} \quad (2)$$

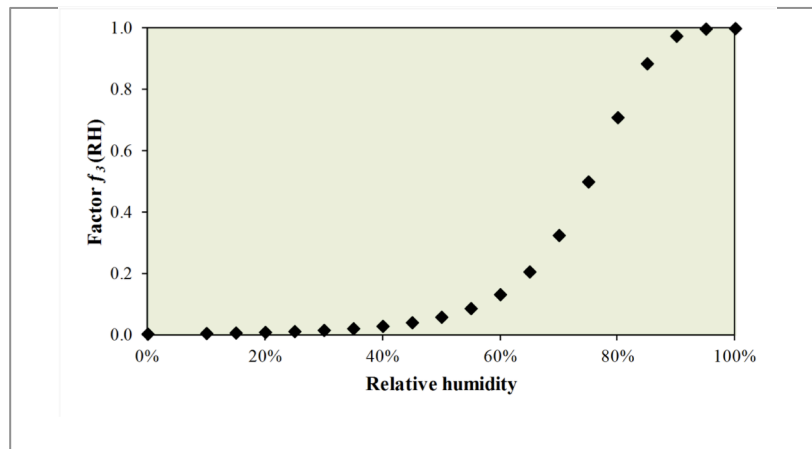
En la Ecuación 2,  $RH_c$  es la humedad en que  $D_{c2}$  cae a media distancia entre sus valores máximos y mínimos, igual al 75 %, según Saetta et al. (1993); y  $RH$  es la humedad relativa actual (%). La Figura 1 muestra la variación  $f_3(RH)$  para diferentes valores de humedad relativa. Se ha observado que la humedad relativa juega un rol importante en la penetración de los cloruros en el hormigón, principalmente en el rango del 60 al 90%.

*Relative humidity is an essential environmental variable for the built environment (especially in marine environment), as in the case of reinforcement corrosion. For example, the chloride ion diffusion is a damp process, which can occur only if water is present in the pores of concrete (Page et al., 1981; Saetta et al., 1993; Bastidas-Arteaga et al., 2010). Some predicting models of chloride penetration into concrete require data on relative humidity in their formulations (Saetta et al., 1993; Bob, 1996; Andrade, 2001).*

*Two models to estimate the service life of reinforced concrete structures can be discussed to illustrate what has been mentioned in the previous paragraph. Saetta et al. (1993) applied a numerical procedure based on the finite element method to formulate the chloride penetration in concrete. In their analysis, they proposed the model of Equation 1.*

*Where  $D_{c1}$  and  $D_{c2}$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) are the reference and corrected chloride diffusion coefficient, respectively;  $f_1(T)$  is the factor that represents the influence of temperature;  $f_2(t_e)$  is the factor that represents the influence of the equivalent maturation time; and  $f_3(RH)$  is the factor that represents the influence of relative humidity. According to this model, relative humidity impacts the chloride diffusion coefficient according to Equation 2.*

*In Equation 2,  $RH_c$  is the humidity at which  $D_{c2}$  drops halfway between its maximum and minimum values, equal to 75 %, according Saetta et al. (1993); and  $RH$  is the currently considered relative humidity (%). Figure 1 shows the  $f_3(RH)$  variation for different values of relative humidity. It has been observed that relative humidity plays an important role in chloride penetration in concrete mainly in the range 60-90%.*



**Figura 1.** Variación del  $f_3(RH)$  como función de la humedad relativa  
**Figure 1.**  $f_3(RH)$  variation as a function of relative humidity



Andrade (2001) propuso otro modelo (Ecuación 3) para estimar la profundidad de penetración de los cloruros en el hormigón.

Andrade (2001) proposed another model (Equation 3) for estimating the depth penetration of chlorides in concrete.

$$x = 7.35 \cdot \frac{UR^{0.7} \cdot T^{0.1} \cdot Cl^{0.7}}{k_1 \cdot f_{ck} \cdot k_2 \cdot (1 + Ad)^{0.2}} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Donde:  $x$  = profundidad de penetración de los cloruros (equivalente a un contenido de cloruros del 0,4% en masa de cemento);  $UR$  = humedad relativa promedio (%);  $T$  = temperatura promedio (°C);  $Cl$  = concentración de cloruro superficial (% en masa de cemento);  $k_1$  = factor dependiente del tipo de cemento (tabulado);  $f_{ck}$  = características de la resistencia a la compresión del hormigón (MPa);  $k_2$  = factor dependiente del tipo de mezcla mineral (tabulado);  $Ad$  = cantidad de mezcla de mineral en el hormigón (% en masa de cemento).

Where:  $x$  = depth of chloride penetration (equivalent to a chloride content of 0.4% by mass of cement);  $UR$  = average relative humidity (%);  $T$  = average temperature (°C);  $Cl$  = surface chloride concentration (% by mass of cement);  $k_1$  = factor dependent on the type of cement (tabulated);  $f_{ck}$  = characteristic compressive strength of concrete (MPa);  $k_2$  = factor dependent on the type of mineral admixture (tabulated);  $Ad$  = amount of mineral admixture in concrete (% by mass of cement).

De acuerdo al modelo de Andrade (2001), la penetración de los cloruros varía con la humedad relativa en una relación exponencial ( $y = a^b$ ; donde  $b = 0,7$ ). Además de los modelos ya discutidos, cabe mencionar que otros modelos (Bob, 1996) también usan la humedad relativa como parámetro de entrada en las ecuaciones para estimar la vida útil del concreto. Sin embargo, la falta de datos puede inhibir la implementación de esos modelos.

According to Andrade's (2001) model, the chloride depth varies with relative humidity by an exponential relationship ( $y = a^b$ ; where  $b = 0.7$ ). In addition to the models discussed, it is noteworthy that other models (Bob, 1996) also use the relative humidity as input parameter in equations to estimate concrete service life. However, the lack of such data may inhibit the implementation of these models.

Este ejemplo describe la importancia de la humedad relativa en la durabilidad de las estructuras de concreto. Se han discutido muchos otros casos, como el desarrollo de la carbonatación y el proceso de lixiviación del concreto, entre otros, pero no son el tema de este trabajo.

This is just one example about the importance of relative humidity in durability of concrete structures. Several other cases can be discussed, such as carbonation evolution and leaching process in concrete, among others, but they were not the subject of this paper.

## 2. Cómo estimar la humedad relativa

## 2. How to estimate relative humidity

Para sortear la escasez de datos, la humedad relativa se puede obtener, entre otras formas, usando las tablas psicrométricas (Stull, 2011), interpolando espacialmente los datos climáticos en mallas (Hijmans et al., 2005), o bien, mediante modelos que posean la capacidad de estimar esta variable como una función de otros parámetros medioambientales como en los modelos de Castellví et al. (1996), Laurence et al. (2002) y Silva (2006).

As a way to overcome data gaps, the relative humidity can be obtained, among other ways, using psychrometric tables (Stull, 2011), by spatially interpolated climate data on grids (Hijmans et al., 2005), or by models having the capacity of estimating this variable as a function of other environmental parameters as in Castellví et al. (1996), Laurence et al. (2002) and Silva (2006) models.

Castellví et al. (1996) sugieren la aplicación de la Ecuación 4 para calcular la humedad relativa.

Castellví et al. (1996) suggest the application of Equation 4 for calculating relative humidity.

$$RH = 100 \frac{e_s(T_n)}{e_s(T_m)} \quad (4)$$

Donde  $e_s(T_n)$  es la presión de vapor de saturación (hPa), determinada a partir de la temperatura del punto de rocío (°C), y puede ser reemplazada por la temperatura mínima ( $T_n$ ), de acuerdo con las experiencias de Castellví et al. (1996) y Mcvicar y Jupp (1999), y  $e_s(T_m)$  es la presión de vapor de saturación (hPa), calculada a partir de la temperatura promedio horaria (°C).

Where  $e_s(T_n)$  is the saturation vapor pressure (hPa), determined from the dewpoint temperature (°C), and it may be replaced by the minimum temperature ( $T_n$ ), according to experiments of Castellví et al. (1996) and Mcvicar and Jupp (1999); and  $e_s(T_m)$  is the saturation vapor pressure (hPa), calculated from the hourly average temperature (°C).

Una forma de calcular la presión de vapor de saturación ( $e_s$ , en Pa) es usando la clásica Ecuación 5 propuesta por Tetens (1930), donde la temperatura ( $T$ ) está dada en grados Celsius (°C).

One way to calculate the saturation vapor pressure ( $e_s$  in Pa) is through the classic Equation 5 proposed by Tetens (1930), where temperature ( $T$ ) is given in Celsius degrees (°C).

$$e_s = 610.8 \cdot e^{\left(\frac{17.3T}{237.3+T}\right)} \quad (5)$$



Otro modo de determinar  $e_s$  usando la Ecuación 6 dada por Kuo y Raymond (1980), y que fue aplicada por Raymond (2000) para estudiar la advección de humedad usando la humedad relativa.  $T$  está dada en grados Kelvin (K).

Another way to determine  $e_s$  is by Equation 6 given by Kuo and Raymond (1980), and which was applied by Raymond (2000) to study moisture advection using relative humidity.  $T$  is given in Kelvin (K).

$$e_s = 6.11 \cdot \exp \left[ 25.22 \left( 1 - \frac{273.16}{T} \right) \right] \cdot \left( \frac{273.16}{T} \right)^{5.31} \quad (6)$$

Vuille et al. (2003) encontraron coherencia al aplicar el método propuesto por Castellví et al. (1996) para estimar la humedad relativa. Aplicaron dicho modelo en el estudio del Cambio Climático Global en los Andes Tropicales durante el periodo entre 1950 y 1998.

Vuille et al. (2003) found consistency in applying the method proposed by Castellví et al. (1996) to estimate the relative humidity. They applied such model to study the Global Climate Change in the Tropical Andes during the period from 1950 to 1998.

Silva (2006) evaluó estadísticamente los valores mensuales de diversas variables meteorológicas con el fin de obtener una ecuación que compensara la falta de datos sobre la humedad relativa para los estados de Alagoas, Bahia y Sergipe en Brasil.

Silva (2006) statistically evaluated monthly values of several meteorological variables in order to obtain an equation to compensate the lack of data about relative humidity for the Brazilian states of Alagoas, Bahia and Sergipe.

Las variables independientes evaluadas y propuestas por Silva (2006) para elaborar el modelo son: el índice de humedad efectiva ( $I_m$ ); las precipitaciones; la temperatura mínima ( $T_n$ ), media ( $T_m$ ) y máxima ( $T_x$ ); la presión de vapor de saturación mínima y máxima; el déficit de presión de vapor de saturación; la amplitud térmica y variables geográficas como la longitud ( $\lambda$ ), latitud ( $\theta$ ) y altura ( $z$ ).

The independent variables evaluated and proposed by Silva (2006) to elaborate the model were: the effective moisture index ( $I_m$ ); the rainfall; the minimum ( $T_n$ ), medium ( $T_m$ ) and maximum ( $T_x$ ) temperature; the minimum and maximum saturation vapor pressure; the saturation vapor pressure deficit; the thermal amplitude; and geographical variables such as longitude ( $\lambda$ ), latitude ( $\theta$ ) and elevation ( $z$ ).

En consecuencia, Silva (2006) seleccionó las variables independientes medio ambientales y geográficas más importantes de las regresiones múltiples y propuso el modelo representado por la Ecuación 7.

Thus, Silva (2006) selected the most important environmental and geographical independent variables from multiple regressions and proposed the model represented by Equation 7.

$$UR = a \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{-(I_m - b)}{c} \right] \right\} \cdot [d + e(T_m \lambda)] \quad (7)$$

Donde los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  y  $e$  fueron ajustados regionalmente por Silva (2006). Estos parámetros se encuentran en la Tabla 1.

Where parameters  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  and  $e$  were regionally adjusted by Silva (2006). These parameters are shown in Table 1.

**Tabla 1.** Parámetros propuestos por Silva (2006)  
**Table 1.** Parameters proposed by Silva (2006)

Parámetros/Parameters	Valor ( $\pm$ desviación estándar)/Value ( $\pm$ standard deviation)
a	83.04 ( $\pm$ 1.34)
b	- 139.20 ( $\pm$ 5.49)
c	56.01 ( $\pm$ 6.29)
d	1.496 ( $\pm$ 0.043)
e	$5.04 \times 10^{-4}$ ( $\pm$ $0.439 \times 10^{-4}$ )

El coeficiente de correlación ( $r$ ) y el índice de acuerdo ( $d$ ) determinado por Silva (2006) para validar el modelo propuesto (Ecuación 7) eran de 0.86 y 0.92, respectivamente. Según Silva (2006), los valores mostraron una precisión aceptable para estimar la humedad relativa para una ubicación específica, y un buen comportamiento cuando interesaba estimar los valores promedio. El modelo también se recomienda para preparar mapas climáticos zonales.

The correlation coefficient ( $r$ ) and the index of agreement ( $d$ ) determined by Silva (2006) to validate the proposed model (Equation 7) were 0.86 and 0.92, respectively. According to Silva (2006), the values showed an acceptable accuracy for estimating the relative humidity for a specific location, and a good performance when the interest is to estimate average values. The model is also recommended to prepare climatic zoning maps.



Laurence et al. (2002) compararon la humedad relativa calculada por las mediciones del radar meteorológico con la humedad relativa observada por las estaciones meteorológicas. Sin embargo, la aplicabilidad de dicho estudio es más adecuada a escala micro climática, siendo difícil su extrapolación a áreas más extensas.

En general, se ha observado que los modelos para estimar la humedad relativa constituyen herramientas interesantes para lugares que cuentan con pocos datos climatológicos. Sin embargo, cabe señalar que los diferentes tipos de ambientes externos pueden requerir datos más precisos de humedad relativa, como por ejemplo para el ambiente marino.

El medio ambiente marino se puede caracterizar como una región que está influenciada por el océano, y su área depende de las variables climáticas locales. La intensa urbanización en este ambiente es responsable de los grandes movimientos de personas y recursos, especialmente en los países en vías de desarrollo. Como se mencionó anteriormente, la humedad relativa es uno de los parámetros más significativos en relación a la durabilidad de las estructuras de concreto en dicho ambiente (Andrade y Castillo, 2003; Nielsen y Geiker, 2003; Rincón y Duracon Collaboration, 2006).

La presencia del océano proporciona al clima costero ciertas peculiaridades en la composición y acción de las diferentes variables climáticas. Los estudios señalan la presencia de grandes cantidades de cloruros (Cl) en la composición del agua en aerosol y agua de nubes en este ambiente (Menon et al., 2000; Rincón et al., 2004; Hossain et al., 2009). Además, los vientos, el tamaño de las gotas de lluvia y las líneas de precipitación también pueden tener características diferentes en el ambiente marino (Pestaina-Haynes y Austin, 1976; Goroch et al., 1982; Haque et al., 2007; Wilson et al., 2011).

En consecuencia, este estudio busca verificar la eficiencia de algunos de los modelos descritos para estimar la humedad relativa, observando su comportamiento para el medio marino a través del estudio de las costas de Brasil. Por lo tanto, se ha buscado validar una alternativa que permita complementar los datos incompletos para esta variable, así como identificar la necesidad de mejorar o desarrollar nuevos modelos para estos fines.

### 3. Materiales y métodos

Los materiales usados en este estudio fueron los datos de humedad relativa registrados y recopilados por las estaciones meteorológicas ubicadas lo largo de la costa brasileña. El conjunto de datos ininterrumpidos disponibles para realizar este estudio abarca el periodo comprendido entre los años 1961 y 1990, con un total de 30 años de datos. No fue posible obtener series de datos continuos para periodos más largos o posteriores al mencionado.

Con los datos sobre humedad relativa, se evaluó el comportamiento de los modelos de Castellví et al. (1996) y Silva (2006) para estimar la humedad relativa en diferentes ciudades de Brasil, ubicadas en un medio ambiente marino. El criterio empleado para seleccionar las ciudades de la costa brasileña que se usarían para los modelos de análisis fueron:

(1) Ciudades ubicadas en un ambiente que sufre la influencia directa del mar (es decir, ciudades costeras);

*Laurence et al. (2002) compared the relative humidity calculated from weather radar measurements to the relative humidity observed at weather stations. However, the applicability of such study is more suitable in microclimatic scale, making it difficult to extrapolate for larger areas.*

*Generally, it has been observed that the estimation models of relative humidity are an interesting tool for sites that have few climatologically data. However, it should be noted that different types of external environment may require more accurate data of relative humidity, such as the marine environment.*

*The marine environment can be characterized as a region which is influenced by the ocean, and its area depends on the local climatic variables. The intense urbanization of this environment is responsible for the large movement of people and resources, especially in developing countries. As stated before, relative humidity is one of the most significant parameters regarding the durability of concrete structures in such environment (Andrade and Castillo, 2003; Nielsen and Geiker, 2003; Rincón and Duracon Collaboration, 2006).*

*The presence of the ocean near the marine environment provides, to the coastal climate, peculiarities in composition and action of different climate variables. Studies point to the presence of large amounts of chloride (Cl) in the composition of aerosol and cloud water in this environment (Menon et al., 2000; Rincón et al., 2004; Hossain et al., 2009). Besides, the winds, the raindrop size, and precipitation lines may also have different characteristics in the marine environment (Pestaina-Haynes and Austin, 1976; Goroch et al., 1982; Haque et al., 2007; Wilson et al., 2011).*

*Therefore, this paper aims to verify the efficiency of some models to estimate the relative humidity, observing their behavior for marine environment by studying the Brazilian coast. Thus, it has been sought to validate an alternative for complementing incomplete data for this variable, as well as to identify the need for improvement or for development of new models for this purpose.*

### 3. Material and methods

*The materials used in this study were the relative humidity data recorded and collected in weather stations arranged along the Brazilian coast. The set of uninterrupted data available to be used in this study covered the period from 1961 to 1990, totaling 30 years of data. It has not been possible to get a series of continuous data for a longer or later period than the one mentioned from the weather stations.*

*Having the data on relative humidity, the performance of Castellví et al. (1996) and Silva (2006) models to estimate the relative humidity was evaluated for different cities in Brazil, located in the marine environment. The criteria for the selection of cities on the Brazilian coast that served for the models analysis were:*

*(1) Cities located in an environment that suffers direct influence of the sea (i.e. coastal cities);*



- (2) Ciudades con registros validados por el Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (INMET, 1992) de todos los datos de entrada (esto es,  $T_n$ ,  $T_m$ ,  $I_m$ ,  $\lambda$ ) para los modelos analizados comprendidos entre 1961 y 1990;
- (3) Ciudades con datos de humedad relativa registrados por las estaciones meteorológicas en el periodo comprendido entre 1961 y 1990 (INMET, 1992) para su comparación con los valores de humedad relativa estimados por los modelos.

Es importante destacar que las ciudades ubicadas en ambientes marinos de la región del norte de Brasil, fueron excluidas de los análisis debido a la significativa influencia de los ríos aledaños, que hacen que estas ciudades tengan características muy diferentes del objetivo propuesto en esta investigación.

Siguiendo estos criterios, se seleccionaron 16 ciudades, que se presentan en la Tabla 2 y se señalan en el mapa de la Figura 2.

Una vez determinadas las ciudades que concordaban con los criterios empleados en este trabajo, se realizaron los análisis comparativos entre los resultados de los modelos y la humedad relativa efectivamente registrada por las estaciones meteorológicas del INMET (1992). Por lo tanto, se evaluó el comportamiento estadístico de cada modelo seleccionado.

- (2) Cities with validated records by the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET, 1992) of all input data (i.e.  $T_n$ ,  $T_m$ ,  $I_m$ ,  $\lambda$ ) for the models analyzed in the period from 1961 to 1990;
- (3) Cities with relative humidity data recorded by weather stations in the period from 1961 to 1990 (INMET, 1992) for comparison with relative humidity values estimated by the models.

It is important to highlight that cities located in marine environment, which belong to the Northern region of Brazil, were excluded from analyzes due to the significant influence of the rivers around them, making these cities with characteristics very different from the proposed objective of this paper.

According to the criteria, 16 cities have been selected, presented in Table 2 and located on the map of Figure 2.

Once cities that meet the criteria used in this paper have been established, comparative analyzes were performed between the model results and the relative humidity effectively recorded by INMET (1992) weather stations. Therefore, the statistical performance of each selected model was evaluated.

**Tabla 2.** Ciudades brasileñas seleccionadas para verificar los modelos necesarios para estimar la humedad relativa  
**Table 2.** Brazilian cities selected for verification of models to estimate the relative humidity

Referencia/Reference	Ciudad/City	Estado/State
1	Macau	Rio Grande do Norte (RN)
2	Natal	Rio Grande do Norte (RN)
3	Joao Pessoa	Paraíba (PB)
4	Recife	Pernambuco (PE)
5	Maceio	Alagoas (AL)
6	Aracaju	Sergipe (SE)
7	Salvador	Bahia (BA)
8	Caravelas	Bahia (BA)
9	Vitoria	Espirito Santo (ES)
10	Cabo Frio	Rio de Janeiro (RJ)
11	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro (RJ)
12	Ilha Guaiba	Rio de Janeiro (RJ)
13	Angra dos Reis	Rio de Janeiro (RJ)
14	Santos	Sao Paulo (SP)
15	Florianopolis	Santa Catarina (SC)
16	Rio Grande	Rio Grande do Sul (RS)



**Figura 2.** Ubicación de las ciudades seleccionadas para el análisis de los modelos para estimar la humedad relativa  
**Figure 2.** Location of the cities selected for analysis of models to estimate relative humidity



Para los ensayos estadísticos de los modelos, se adoptaron los siguientes índices estadísticos descritos y recomendados por Willmott et al. (1985) y por Jacovides y Kontoyiannis (1995): (1) el coeficiente de correlación ( $r$ ); (2) el índice de acuerdo ( $d$ ); (3) el sesgo medio del error (MBE); y (4) la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), como se aprecia en las Ecuaciones 8, 9, 10 y 11, respectivamente.

For statistical tests of models, the following statistical indices recommended and described by Willmott et al. (1985) and Jacovides and Kontoyiannis (1995) have been adopted: (1) the correlation coefficient ( $r$ ); (2) the index of agreement ( $d$ ); (3) the mean bias error (MBE); and (4) the root mean square error (RMSE), as shown in Equations 8, 9, 10 and 11, respectively.

$$r = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n P_i (O_i - \bar{O}_i) \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \right]^{0.5}} \quad (8)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right] \quad (9)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (10)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

Donde:  $P_i$ = valor previsto por el modelo;  $O_i$ = valor observado;  $\bar{P}_i$  = media de los valores predichos;  $\bar{O}_i$  = media de los valores observados y  $n$ = número de pares de datos.

El coeficiente  $r$  es un valor indicativo de la precisión de un modelo y revela la idoneidad de las variables independientes para explicar la variabilidad de la humedad relativa. La correlación entre los valores es mayor cuando  $r$  se aproxima a 1 (Willmott et al., 1985).

El índice  $d$  sugiere el grado de exactitud entre los valores observados y predichos para los modelos, y al igual que  $r$ , la precisión del modelo de predicción es mayor cuando  $d$  se aproxima a 1 (Willmott et al., 1985).

En cuanto a los errores estadísticos, el sesgo medio del error (MBE) evalúa el comportamiento de un modelo a largo plazo, a diferencia de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), que entrega evaluaciones a corto plazo (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Para ambos, el MBE y el RMSE, los valores más bajos determinados por las Ecuaciones 10 y 11 indican un mejor comportamiento de los modelos estimativos.

Where:  $P_i$ = value predicted by the model;  $O_i$ = value observed;  $\bar{P}_i$  = mean of predicted values;  $\bar{O}_i$  = mean of observed values; and  $n$ = number of data pairs.

The  $r$  coefficient is an indicative of a model accuracy and reveals the adequacy of independent variables in explaining the variability of relative humidity. The correlation between the values is higher as  $r$  nears 1 (Willmott et al., 1985).

Index  $d$  suggests the degree of exactness between the observed and predicted values for models, and as  $r$ , the accuracy of the prediction model is higher as  $d$  nears 1 (Willmott et al., 1985).

Regarding the statistical errors, the mean bias error (MBE) evaluates the performance of a long-term model, unlike the root mean square error (RMSE), which provides short-term assessments (Jacovides and Kontoyiannis, 1995). For both MBE and RMSE, lower values determined by Eqs. (10) and (11) indicate better performance of the estimation models.

## 4. Resultados y Discusión

### Estimación de la humedad relativa – resultados de los ensayos estadísticos

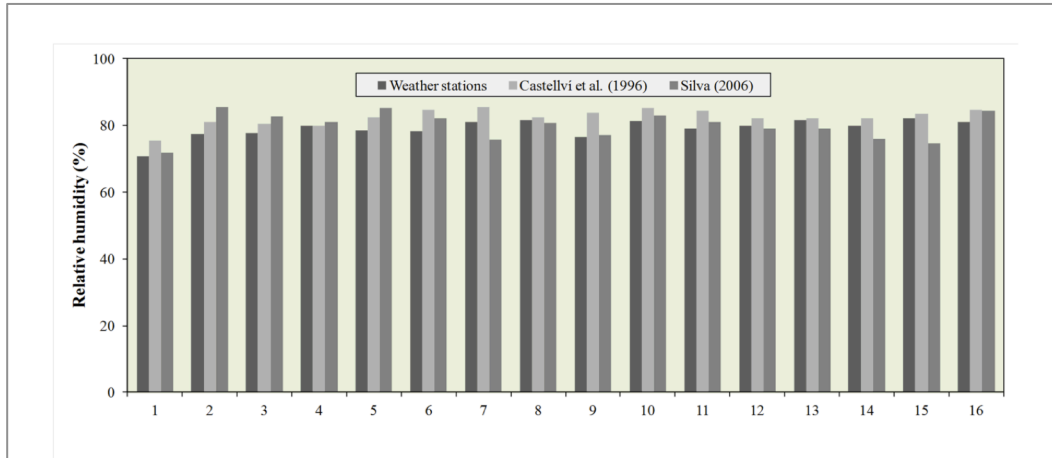
La Figura 3 muestra los valores de la humedad relativa promedio observados por las estaciones meteorológicas y estimados por los modelos analizados para el periodo de 30 años (esto es, desde 1961 a 1990) para las ciudades costeras de Brasil estudiadas en esa investigación (Tabla 2).

## 4. Results and discussion

### Estimation of the relative humidity - statistical tests results

Figure 3 shows the values of the mean relative humidity observed by weather stations and estimated by the models analyzed for the period of 30 years (i.e. from 1961 to 1990) for the Brazilian coast cities studied in this paper (Table 2 previously presented).





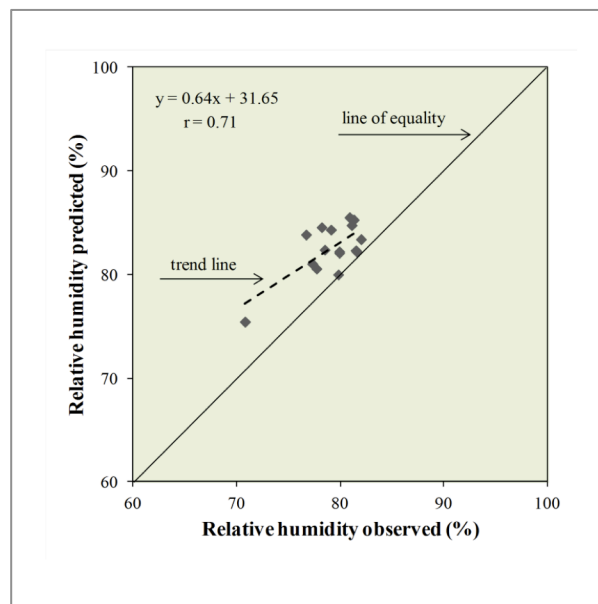
**Figura 3.** Valores de la humedad relativa promedio observados por las estaciones meteorológicas y calculados por los modelos  
*Figure 3.* Mean relative humidity values observed by weather stations and calculated by models

Al observar la Figura 3, es posible apreciar que la mayor diferencia entre la humedad relativa observada y estimada por el modelo de Castellví et al. (1996) se encontró para la ciudad de Vitória (Referencia 9 en la Figura 3), con una variación porcentual de 9,33 % entre los valores. Al igual que en el modelo de Silva (2006), esto sucede para la ciudad de Natal (Referencia 2 en la Figura 3), con un rango porcentual de 10,67 %.

Otro hecho observado en la Figura 3 es que el modelo de Castellví et al. (1996) sobrestima la humedad relativa para todas las ciudades estudiadas, a diferencia del modelo de Silva (2006), en que existe una sobrestimación y subestimación, dependiendo de la localidad estudiada. Se evaluó el comportamiento estadístico de cada modelo estudiado y los resultados se muestran en las Figuras 4 y 5, y en la Tabla 3.

Observing Figure 3, it is possible to see that the greatest difference between the observed and estimated relative humidity for Castellví's et al. (1996) model was found for the city of Vitória (Reference 9 in Figure 3), with a percentage variation of 9.33 % between values. As for Silva's (2006) model, this actually happened to the city of Natal (reference 2 in Figure 3), with percentage range of 10.67 %.

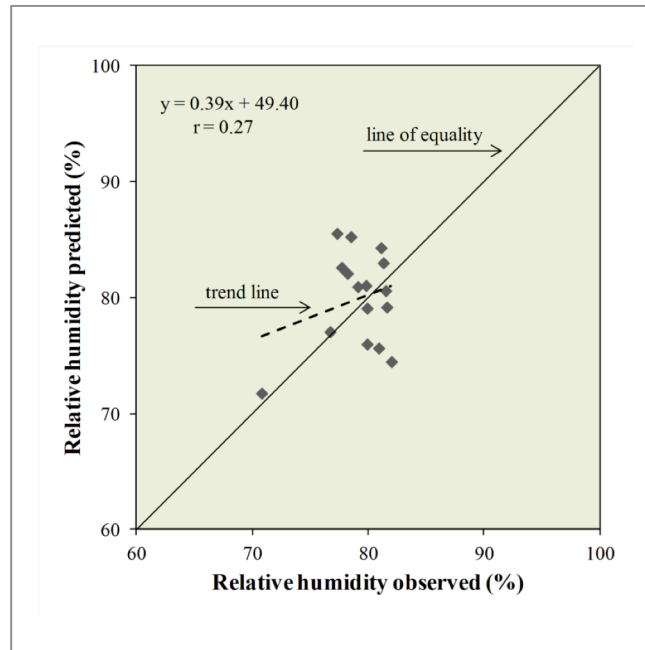
Another fact observed in Figure 3 is that Castellví's et al. (1996) model overestimated the relative humidity for all cities studied, unlike Silva's (2006) model, in which there was overestimation and underestimation, depending on the studied locality. The statistical performance of each model studied has been evaluated and the results are shown in Figure 4 and 5, and in Table 3.



**Figura 4.** Relación entre los valores observados y los predichos para la humedad relativa – modelo de Castellví et al. (1996)  
*Figure 4.* Relationship between observed and predicted values of relative humidity – Castellví's et al. (1996) model







**Figura 5.** Relación entre los valores observados y los predichos para la humedad relativa – modelo de Silva (2006)  
**Figure 5.** Relationship between observed and predicted values of relative humidity – Silva’s (2006) model

**Tabla 3.** Índices estadísticos  
**Table 3.** Statistical index

Modelo/Model	<i>r</i>	<i>d</i>	MBE (%)	RMSE (%)
De Castellví et al./Castellví’s et al. (1996)	0.71	0.62	3.40	3.89
De Silva/Silva’s (2006)	0.27	0.56	3.40	4.17

Según las Figuras 4 y 5, el coeficiente de correlación determinado por el modelo de Castellví et al. (1996) es más cercano a 1 ( $r = 0.71$ ) que el mismo coeficiente encontrado para el modelo de Silva (2006) ( $r = 0.27$ ). Al analizar la Tabla 3, se observa que el modelo de Castellví et al. (1996) comparado con el de Silva (2006) también tiene el valor  $d$  cercano a 1. Por lo tanto, el modelo de Castellví et al. (1996) muestra una mejor estimación de los valores promedio de la humedad relativa que el modelo de Silva (2006).

Según la Tabla 3, ambos modelos analizados tiene el mismo valor para el MBE. Sin embargo, al analizar los valores para las RMSE, se comprobó que una vez más el modelo de Castellví et al. (1996) muestra un mejor comportamiento para las ciudades seleccionadas, expresado por las menores RMSE encontradas.

Silva et al. (2007) encontraron valores para  $r$  cercanos a 0,86 para estimar la humedad relativa usando el modelo de Silva (2006) en los estados de Alagoas, Bahia y Sergipe. Los valores para los MBE y RMSE determinados por Silva et al. (2007) fueron de 0.63 % y 2.03 %, respectivamente. Sin embargo, cabe señalar que el modelo de Silva (2006) fue propuesto para esos 3 estados de Brasil.

Delgado et al. (2009) aplicaron el modelo de Silva (2006) para el estado de Minas Gerais y encontraron valores de  $d$  que variaban en el rango de 0,68 a 0,96. Estos autores encontraron valores que variaban entre 5.33 a 17.95 % para las RMSE. No obstante, es importante señalar que el área estudiada por Delgado et al. (2009) no se encuentra ubicada en la costa sino más hacia el interior del continente.

According to Figure 4 and 5, the correlation coefficient determined for Castellví’s et al. (1996) model was closer to 1 ( $r = 0.71$ ) than the same coefficient found for Silva’s (2006) model ( $r = 0.27$ ). Analyzing Table 3, it has been observed that Castellví’s et al. (1996) model also had  $d$  value closer to 1, as compared to Silva’s (2006) model. Thus, Castellví’s et al. (1996) model showed a better estimation of average values of relative humidity than Silva’s (2006) model.

According to Table 3, both models analyzed had the same value of MBE. However, when analyzing RMSE values, it has been proven that once again Castellví’s et al. (1996) model showed a better performance for the selected cities, expressed by the lower RMSE found.

Silva et al. (2007) found values for  $r$  around 0.86 to estimate the relative humidity by Silva’s (2006) model in the states of Alagoas, Bahia and Sergipe. The MBE and RMSE values determined by Silva et al. (2007) were 0.63 % and 2.03 %, respectively. However, it should be noted that Silva’s (2006) model was proposed exactly for these 3 states in Brazil.

Delgado et al. (2009) applied Silva’s (2006) model for the state of Minas Gerais, Brazil, and found values of  $d$  varying in the range 0.68 to 0.96. These authors found values ranging from 5.33 to 17.95 % for the RMSE. However, it is important to note that the area studied by Delgado et al. (2009) is not located on the coast but within continental Brazil.



De acuerdo con la verificaciones estadísticas realizadas, se observa que el modelo de Castellví et al. (1996) muestra una mejor estimación de la humedad relativa para los ambientes marinos. Nuevamente, se debe resaltar que la propuesta inicial de Silva (2006) es para la estimación de la humedad relativa en los estados de Alagoas, Bahía y Sergipe, ya que los parámetros del modelo fueron ajustados para esos estados. Por lo tanto, el modelo de Silva (2006) parece ser más adecuado para el clima continental que para el costero, lo que probablemente influye en la eficiencia del modelo para estimar los valores de la humedad relativa para la región de interés de este estudio.

## 5. Ejemplo de aplicación

Como se discutió anteriormente, la mayor variación entre los valores de la humedad relativa observados y estimados por el modelo de Castellví et al. (1996) fue para la ciudad de Vitória (Referencia 9 en la Figura 3). Según los resultados de esta investigación, la humedad relativa observada para esa ciudad fue de 76.7% y el valor estimado por Castellví et al. (1996) fue de 83.9%. Entonces, se usó el modelo de Saetta et al. (1993) para verificar la forma en que esta variación influye en el coeficiente de difusión de los cloruros, según las Ecuaciones 1 y 2. También se calculó, la profundidad de penetración de los cloruros (equivalente a un contenido del 0.4% en masa de cemento) para ambos valores de humedad relativa usando el modelo de Andrade (2001).

Además, se aplicaron estos dos modelos a los resultados del modelo de Silva (2006), sin embargo, se usaron los resultados de la humedad relativa para la ciudad de Natal (Referencia 2 en la Figura 3). Esta ciudad mostró la mayor variación en entre la humedad relativa observada y la estimada. Para esa ciudad, la humedad relativa observada por las estaciones meteorológicas fue del 77.3% y el valor estimado por el modelo de Silva (2006) fue del 85.5%.

Para ambos casos, se asumieron las condiciones y los parámetros definidos en la Tabla 4. La Tabla 5 muestra los resultados.

According to the statistical verifications performed, it has been observed that Castellví's et al. (1996) model showed a better estimation for relative humidity for the marine environment. It must be emphasized again that the initial proposal of Silva (2006) is the estimate of relative humidity in the states of Alagoas, Bahia and Sergipe, since the model parameters were adjusted to these states. Therefore, it must be emphasized that Silva's (2006) model appears to be more suitable for the continental climate than to the coastal one, which probably influenced the efficiency of the model in estimating values of relative humidity for the region of interest in this paper.

## 5. Example of application

As discussed before, the largest variation between the observed and estimated values of relative humidity for Castellví's et al. (1996) model was found for the city of Vitória (Reference 9 in Figure 3). According to the results of this paper, the relative humidity observed for this city was 76.7% and the value estimated by Castellví et al. (1996) was 83.9%. Thus, the Saetta et al. (1993) model was used to check how this variation impacts the chloride diffusion coefficient, according to Equation 1 and 2. Depth of chloride penetration (equivalent to a chloride content of 0.4% by mass of cement) was also calculated to both values of relative humidity through Andrade's (2001) model.

These two models were also applied in the results of Silva's (2006) model, however, results of relative humidity for the city of Natal (Reference 2 in Figure 3) were used. This city showed the largest relative humidity variation between observed and estimated. For this city, the relative humidity observed by weather stations was 77.3% and the value estimated by Silva's (2006) model was 85.5%.

For both cases, the conditions and parameters defined in Table 4 were assumed. Table 5 shows the results.

**Tabla 4.** Valores para el cálculo  
**Table 4.** Values for the calculation

$D_{cl}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$5.0 \times 10^{-8}$
$f_j(T)$	1.0
$f_2(t_w)$	1.0
$RH_c$ (%)	75
$T$ (°C)	23
$Cl$ (%)	2.0
$k_1$	1.0
$f_{ck}$ (MPa)	30
$k_2$	1.0
$Ad$ (%)	0.0
$t$ (years)	20

**Tabla 5.** Ejemplos de las variaciones del coeficiente de difusión y profundidad de penetración de los cloruros debido a las diferencias entre la humedad relativa observada y a la estimada por los modelos

**Table 5.** Examples of variations in diffusion coefficient and penetration depth of chlorides due to differences between the relative humidity observed and the one estimated by models

Ciudad/City	UR (%)		$D_{c2}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$x$ (mm)
Vitoria	76.7	Valor observado/Value observed	$2.85 \times 10^{-8}$	50.8
Vitoria	83.9	Estimado por el modelo de Castellví (1996)/Estimated by Castellví's (1996) model	$4.26 \times 10^{-8}$	54.1
Natal	77.3	Valor observado/Value observed	$2.98 \times 10^{-8}$	51.1
Natal	85.5	Estimado por el modelo de Silva (2006)/Estimated by Silva's (2006) model	$4.50 \times 10^{-8}$	54.8



Según la Tabla 5, la variación porcentual del 9,3% entre la humedad relativa observada y la estimada por el modelo de Castellví et al. (1996) para la ciudad de Vitória resultó en un incremento del 49.5% en el coeficiente de difusión de los cloruros y del 6.4% en la profundidad de penetración de los cloruros. Respecto de la ciudad de Natal, se encontró un incremento del 51.1% en el coeficiente de difusión de los cloruros y el 7.4% en la profundidad de penetración de los cloruros debido a la variación porcentual del 10,7% entre la humedad relativa observada y la estimada por el modelo de Silva (2006).

Este ejemplo de aplicación muestra que a pesar de que el modelo de Castellví et al. (1996) presenta mejores resultados para la estimación de la humedad relativa para el medio ambiente marino que el modelo de Silva (2006), se identificó la necesidad de desarrollar un modelo más adecuado para este tipo de ambiente para los estudios que requieran más precisión para estimar los valores puntuales de la humedad relativa.

Se debe considerar que el ejemplo aplicado usó ciudades que mostraban las mayores variaciones de humedad relativa entre los valores observados y los estimados para analizar los casos más críticos de variación. Sin embargo, también se observa que los modelos mostraban valores similares entre la humedad relativa observada y la estimada en otras ciudades como Recife y Caravelas (Referencias 4 y 8 en la Figura 3), por ejemplo, que ciertamente podrían reducir los cambios porcentuales encontrados en los coeficientes de difusión de los cloruros y en la profundidad de penetración de los cloruros calculados en este ejercicio.

## 6. Conclusiones

La humedad relativa es una variable muy importante para diversas aplicaciones, entre ellos el medio ambiente marino. A través de los análisis estadísticos, representados por el coeficiente de correlación ( $r$ ), el índice de acuerdo ( $d$ ), los errores estadísticos: el sesgo medio del error (MBE) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el modelo propuesto por Castellví et al. (1996) demostró obtener mejores resultados para estimar la humedad relativa para los ambientes marinos que el modelo presentado por Silva (2006), comprobando ser una herramienta útil para completar los conjuntos de datos.

Sin embargo, cabe destacar que su aplicabilidad puede verse comprometida en estudios que requieran mayor precisión para estimar esta variable para el ambiente marino. Para aplicaciones en modelos de durabilidad del concreto, por ejemplo, el coeficiente de correlación y el índice de acuerdo encontrado por en este estudio pueden no ser adecuados para el grado de precisión requerido, como se señaló en el ejemplo.

Se encontró que el modelo de Castellví et al. (1996) tiende a sobre estimar la humedad relativa, mientras que el modelo de Silva (2006) en ocasiones sobre estima los valores y a veces los subestima.

*According to Table 5, the percentage variation of 9.3% between the relative humidity observed and estimated by Castellví's et al. (1996) model for Vitoria city resulted in an increase of 49.5% in the chloride diffusion coefficient and of 6.4% in the depth of chloride penetration. Regarding the city of Natal, an increase of 51.1% in the chloride diffusion coefficient and 7.4% in the depth of chloride penetration was found due to a percentage variation of 10.7% between the relative humidity observed and estimated by Silva's (2006) model.*

*This application example shows that although Castellví's et al. (1996) model presents better results for estimating the relative humidity to the marine environment than Silva's (2006) model, it has been identified a need to develop a more suitable model for this type of environment for studies that require better precision in estimating point values of relative humidity.*

*One must consider that the applied example used cities that showed the largest variations of relative humidity between observed and estimated values in order to analyze the most critical cases of variation. However, it has also been observed that the models showed similar values between the observed and estimated relative humidity to some other cities, such as Recife and Caravelas (References 4 and 8 in Figure 3), for instance, which would certainly reduce the percentage changes found in chloride diffusion coefficients and in depth of chlorides penetration calculated in this exercise.*

## 6. Conclusions

Relative humidity is a variable of great importance for different applications, including the case of marine environment. Through statistical analyzes, represented by the correlation coefficient ( $r$ ), the agreement index ( $d$ ), the statistical errors: mean bias error (MBE) and root mean square error (RMSE), the model proposed by Castellví's et al. (1996) showed better results to estimate the relative humidity for marine environments than the model presented by Silva's (2006), proving to be a useful tool for filling datasets.

However, it should be noted that its enforceability may be compromised for studies requiring greater accuracy in estimating this variable for the marine environment. For applications in models of durability of concrete, for example, the correlation coefficient and the agreement index found in this paper may not be adequate for the degree of accuracy required, as has been shown in the application example.

It has been found that the model of Castellví et al. (1996) tends to overestimate the relative humidity, while the model of Silva (2006) sometimes results in overestimated values and sometimes in underestimated values.



## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación para el Apoyo a la Investigación del Estado de São Paulo (FAPESP), al personal de la Coordinadora para el Mejoramiento de la Educación Superior (CAPES), al Consejo Nacional para el Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq), al grupo de investigación Redelitoral, al Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) y al Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (INMET).

## 7. Acknowledgments

The authors would like to thank the Foundation for Research Support of the State of São Paulo (FAPESP), the Coordination for Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), the research group Redelitoral, the Technological Institute of Aeronautics (ITA), and the National Institute of Meteorology (INMET).

## 8. Referencias/References

- Andrade C. and Castillo A. (2003)**, Evolution of reinforcement corrosion due to climatic variations, *Materials and Corrosion*, 54, 379-386. DOI: 10.1002/maco.200390087
- Andrade J. J. O. (2001)**, Contribution to the prediction of the service life of reinforced concrete structures attacked by reinforcement corrosion: initiation by chlorides (in Portuguese), Thesis (PhD in Engineering), Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.
- Bastidas-Arteaga E., Chateaufort A., Sánchez-Silva M., Bressolette Ph. and Schoefs F. (2010)**, Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: a stochastic approach, *Structural Safety*, 32, 238-249. DOI: 10.1016/j.strusafe.2010.03.002
- Bob C. (1996)**, Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures, *Concrete in the Service of Mankind - Concrete Repair, Rehabilitation and Protection*, R. K. Dhir and M. R. Jones, eds., 1rd, Dundee, 17-28.
- Castellví F., Perez P. J., Villar J. M. and Rosell J. L. (1996)**, Analysis of methods for estimating vapor pressure deficits and relative humidity, *Agricultural and Forest Meteorology*, 82, 29-45. DOI: 10.1016/0168-1923(96)02343-X
- Castro P., Sanjuán M. A. and Genesá J. (2000)**, Carbonation of concretes in the Mexican Gulf, *Building and Environment*, 35, 145-149. DOI: 10.1016/S0360-1323(99)00009-8
- Chai C., de Brito J., Gaspar P. and Silva A. (2014)**, Predicting the service life of exterior wall painting: techno-economic analysis of alternative maintenance strategies, *Journal of Construction Engineering and Management*, 140, 04013057. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000812
- Delgado R. C., Sediya G. C., Zolnier S. and Costa M. H. (2009)**, Physico-mathematical models to estimate air relative humidity from air temperature data (in Portuguese), *Ceres*, 56, 256-265.
- Goodrum P., Zhai D. and Yasin M. (2009)**, Relationship between changes in material technology and construction productivity, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135, 278-287. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:4(278)
- Goroch A. K., Fairall C. W. and Davidson K. L. (1982)**, Modeling wind speed dependence of marine aerosol distribution by a gamma function, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 21, 666-671. DOI: 10.1175/1520-0450(1982)021<0666:MWSDOM>2.0.CO;2
- Haque M. N., Al-Khaiat H. and John B. (2007)**, Climatic zones - A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf, *Building and Environment*, 42, 2410-2416. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.04.006
- Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G. and Jarvis A. (2005)**, Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. DOI: 10.1002/joc.1276
- Hossain K. M. A., Easa S. M. and Lachemi M. (2009)**, Evaluation of the effect of marine salts on urban built infrastructure, *Building and Environment*, 44, 713-722. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.06.004
- INMET – National Institute of Meteorology (1992)**, Climatological normals 1961-1990 - only in Portuguese, (CD-ROM), A. M. Ramos, L. A. R. dos Santos and L. T. G. Fortes, Eds., Brazil, 1-465.
- Jacovides C. P. and Kontoyiannis H. (1995)**, Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models, *Agricultural Water Management*, 27(3-4), 365-371.
- Koehn E. and Brown G. (1985)**, Climatic effects on construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 111, 129-137. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1985)111:2(129)
- Kuo H. L. and Raymond W. H. (1980)**, A quasi-one-dimensional cumulus cloud model and parameterization of cumulus heating and mixing effects, *Monthly Weather Review*, 108, 991-1009. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<0991:AQODCC>2.0.CO;2
- Laurence H., Fabry F., Dutilleul P., Bourgeois G. and Zawadzki I. (2002)**, Estimation of the spatial pattern of surface relative humidity using ground based radar measurements and its application to disease risk assessment, *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 223-231. DOI: 10.1016/S0168-1923(02)00019-9
- McVicar T. R. and Jupp D. L. B. (1999)**, Estimating one-time-of-day meteorological data from standard daily data as inputs to thermal remote sensing based energy balance models, *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, 219-238. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00052-0
- Menon S., Saxena V. K. and Logie B. D. (2000)**, Chemical heterogeneity across cloud droplet size spectra in continental and marine air masses, *Journal of Applied Meteorology*, 39, 887-903. DOI: 10.1175/1520-0450(2000)039<0887:CHACDS>2.0.CO;2
- Nielsen E. P. and Geiker M. R. (2003)**, Chloride diffusion in partially saturated cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 33, 133-138. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00939-0
- Page C. L., Short N. R. and Tarras A. El. (1981)**, Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 11, 395-406. DOI: 10.1016/0008-8846(81)90111-3
- Pestaina-Haynes M. and Austin G. L. (1976)**, Comparison between maritime tropical (GATE and Barbados) and continental mid-latitude (Montreal) precipitation lines, *Journal of Applied Meteorology*, 15, 1077-1082. DOI: 10.1175/1520-0450(1976)015<1077:CBMTAB>2.0.CO;2
- Raymond W. H. (2000)**, Moisture advection using relative humidity, *Journal of Applied Meteorology*, 39, 2397-2408. DOI: 10.1175/1520-0450(2000)039<2397:MAURH>2.0.CO;2
- Rincón O. T., Castro P., Moreno E. I., Torres-Acosta A. A., Bravo O. M., Arrieta I., García D. and Martínez-Madrid M. (2004)**, Chloride profiles in two marine structures - meaning and some predictions, *Building and Environment*, 39, 1065-1070. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.01.036
- Rincón O. T. and Duracon Collaboration (2006)**, Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results, *Building and Environment*, 41, 952-962. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.04.005



- Saetta A. V., Scotta R. V. and Vitaliani R. V. (1993)**, Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete, *ACI Materials Journal*, 90, 441-451.
- Schoen C. (2005)**, A new model empirical of the temperature-humidity index, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44, 1413-1420. DOI: 10.1175/JAM2285.1
- Silva T. G. F. (2006)**, Agroclimatic zoning of the Bahia state to the atemoya culture (in Portuguese), Thesis (Magister Scientiae) – Federal University of Viçosa, Minas Gerais, Brazil.
- Silva T. G. F., Zolnier S., Moura M. S. B. and Sedyama G. C. (2007)**, Estimation and spatial distribution of relative humidity in the states of Alagoas, Bahia and Sergipe (in Portuguese), *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 15, 1-9.
- Stull R. (2011)**, Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2267-2269. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0143.1
- Tardivo G. and Berti A. (2012)**, A dynamic method for gap filling in daily temperature datasets, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 1079-1086. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0117.1
- Tetens O. (1930)**, Über einige meteorologische Begriffe (in German), *Zeitschrift für Geophysik*, 6, 297-309.
- Vuille M., Bradley R. S., Werner M. and Keimig F. (2003)**, 20TH century climate change in the Tropical Andes: observations and model results, *Climatic Change*, 59, 75-99. DOI: 10.1007/978-94-015-1252-7\_5
- Willmott C. J., Ackleson S. G., Davis R. E., Feddema J. J., Klink K. M., Legates D. R., O'Donnell J. and Rowe C. M. (1985)**, Statistics for the evaluation and comparison of models, *Journal of Geophysical Research*, 90(C5), 8995-9005.
- Wilson J. W., Knight C. A., Tessendorf S. A. and Weeks C. (2011)**, Polarimetric radar analysis of raindrop size variability in maritime and continental clouds, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1970-1980. DOI: 10.1175/2011JAMC2683.1
- Yang X., Zhao L., Bruse M. and Meng Q. (2013)**, Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces, *Building and Environment*, 60, 93-104. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.11.008

