

Contraste de cuatro formulaciones termodinámicas del aire húmedo contra mediciones: Hyland–Wexler, ASHRAE RP-1485, TEOS-10 y gas ideal en el sistema psicro de Calcula 6.0

Diego Saravia Alía

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta
dsa@unsa.edu.ar ORCID 0000-0002-1868-0409

Septiembre de 2026 (borrador)

Resumen

Calcula 6.0 es un programa de software libre que resuelve sistemas de ecuaciones; su sistema psicro, que hasta la versión 5 era el programa Psicro, es una calculadora psicrométrica que resuelve el estado del aire húmedo a partir de tres propiedades cualesquiera con un sistema de ecuaciones común y cuatro modelos de propiedades intercambiables: el histórico del programa (Hyland y Wexler 1983 con la ecuación de equilibrio del Brochure ASHRAE de 1977), la formulación ASHRAE RP-1485 [1], TEOS-10 mediante la biblioteca SIA [2] y las relaciones de gas ideal del *ASHRAE Handbook*. Se contrastan los cuatro contra los datos experimentales disponibles: las mediciones gravimétricas del factor de corrección f de Hyland [3] y de Wylie y Fisher [4], con las formulaciones que ambos ajustaron a ellas; la presión de vapor del agua en el punto triple [5]; y la densidad del aire húmedo según la fórmula CIPM-2007 de la metrología de masa [6]. A presión atmosférica, RP-1485 y TEOS-10 reproducen f de Wylie y Fisher dentro de su incertidumbre ($1,3 \cdot 10^{-4}$) y la densidad CIPM dentro de $4 \cdot 10^{-5}$; el modelo histórico se aparta 2 a $3 \cdot 10^{-4}$ en f y $3,6 \cdot 10^{-4}$ en densidad, y el gas ideal 4 a $6 \cdot 10^{-3}$ en f . Por encima de 1,5 MPa todas las formulaciones se apartan de las mediciones y la separación crece con la presión. Los datos, el programa de contraste y el código son públicos y reproducibles.

El contraste se hizo con Psicro 5; el sistema psicro de Calcula 6.0 tiene los mismos cuatro modelos y el mismo código de propiedades, de modo que los resultados valen sin cambios. Calcula agrega un módulo dinámico con el que cada usuario puede escribir sus propios sistemas en un archivo de texto (sección 7).

1. Introducción

Las propiedades del aire húmedo que usan la climatización, la meteorología y la metrología de humedad salen de formulaciones termodinámicas que comparten una misma estructura, un potencial de Helmholtz o de Gibbs de la mezcla del que se derivan volumen, entalpía, entropía y potenciales químicos, y que difieren en los datos con que se construyen: las ecuaciones de estado de los componentes puros, los coeficientes viriales cruzados aire-agua y las mediciones de la humedad de saturación con que esos coeficientes se ajustan. Hyland y Wexler [3] fijaron en 1975 y 1983 la formulación que la ASHRAE usó hasta 2005; el proyecto RP-1485 [1] la reemplazó en 2009 con las ecuaciones de estado actuales del aire (Lemmon y otros, 2000) y del agua (IAPWS-95) y el segundo virial cruzado calculado desde primeros principios por Harvey y Huang [7]; TEOS-10 [2] usa los mismos ingredientes con las funciones de Helmholtz completas en lugar del desarrollo virial truncado, y lo extiende al agua de mar. Lovell-Smith y otros [8] revisaron el estado de estas formulaciones para la humedad relativa atmosférica y sus incertidumbres.

Psicro [el programa y su manual están en 9] es una calculadora psicrométrica de software libre nacida en 1996 sobre la formulación de Hyland y Wexler, que en su versión 5 separó el sistema de ecuaciones del modelo de propiedades y ofreció los cuatro modelos mencionados con la misma

interfaz, y que desde septiembre de 2026 es el sistema del aire húmedo de Calcula 6.0 (sección 7). Eso hace posible lo que se presenta aquí: evaluar los cuatro en los mismos estados, contra los mismos datos, con el mismo código, y medir cuánto se apartan de las mediciones y cuánto entre sí. El propósito es doble: asignar una incertidumbre a lo que Psicro calcula y dejar un procedimiento reproducible al que se puedan agregar datos.

2. Los modelos

En los cuatro modelos Psicro trabaja en base molar con la fracción molar de agua x , y resuelve por Newton (GSL) el sistema que relaciona las 18 variables del estado; el bulbo húmedo es siempre el termodinámico, por la ecuación exacta de saturación adiabática con las entalpías del modelo, y el rocío se obtiene invirtiendo la propia curva de saturación. Cambian solo las seis funciones de propiedades: presión de vapor $p_{ws}(t)$, fracción molar de saturación $x_s(t, p)$ (o el factor $f = x_s p / p_{ws}$), volumen, entalpía y entropía molares de la mezcla, y entalpía del agua condensada.

Histórico (-hw). Presión de vapor de Hyland y Wexler 1983 (o la IAPWS, según opción), factor f por la ecuación de equilibrio agua-aire del Brochure ASHRAE de 1977 con los coeficientes viriales de Hyland y Wexler de 1973, volumen de gas ideal, entalpía con los viriales del Brochure, escala IPTS-68 con conversión a ITS-90 en la entrada y la salida. Es el modelo de Psicro 4 y de la 5.0 hasta la revisión 5.0-8, y sigue disponible para reproducir resultados anteriores.

RP-1485 (defecto). Implementación en C de la formulación [1] tal como la usa CoolProp: viriales B_{aa} , C_{aaa} de Lemmon 2000 y B_{ww} , C_{www} de IAPWS-95 (como polinomios ajustados, prolongados linealmente fuera de 130–370 K), B_{aw} de Harvey y Huang [7], C_{aaw} y C_{aww} de Hyland y Wexler 1983, mezcla virial hasta el tercer coeficiente, factor f por la ecuación 3.25 de RP-1485 (con la constante de Henry y la compresibilidad del líquido), presión de vapor IAPWS (Wagner y Pruß sobre agua, IAPWS 2011 sobre hielo), referencia ASHRAE exacta ($h = s = 0$ para el aire seco a 0 °C y 101 325 Pa), constantes CODATA y masas molares de la ASHRAE ($M_a = 0,028\,966$). Escala ITS-90.

TEOS-10 (-teos10). Los 21 módulos de la biblioteca SIA versión 4.0.1 [2] enlazados sin cambios: Helmholtz completas de IAPWS-95, IAPWS-06 (hielo) y Lemmon 2000, mezcla virial con los mismos coeficientes cruzados, saturación por igualdad de potenciales químicos del agua en la mezcla y en el líquido o el hielo puros, sin curva de presión de vapor auxiliar ni factor f explícito, $M_a = 0,028\,965\,46$ (Picard 2008). Opcionalmente satura el aire sobre agua de mar de salinidad dada (IAPWS-08). Donde la SIA devuelve su valor de error (fuera de 193–473 K, sobre el punto de ebullición, estados muy sobresaturados) Psicro usa el valor de RP-1485 para que el solver tenga una función continua; ningún estado convergido cae en esa situación.

Gas ideal (-ideal). Las “perfect gas relationships” del *ASHRAE Handbook—Fundamentals* desde 2009: $f = 1$, $v = RT/p$, $h = 1,006\,t + W(2501 + 1,86\,t)$ kJ/kg, bulbo húmedo de gas ideal, presión de vapor IAPWS, constantes de RP-1485. Es lo que usan los libros de texto y la mayoría de las calculadoras.

3. Los datos

Conviene distinguir tres tipos de fuente. Las *mediciones* son los únicos datos que dicen cuál modelo se acerca más a la realidad. Las *formulaciones ajustadas a mediciones* (Hyland 1975, Wylie y Fisher 1996, CIPM-2007) llevan la información de esas mediciones suavizada e interpolada, con la incertidumbre que sus autores les asignaron, y permiten comparar en grillas regulares. Las

tablas de referencia como las del *ASHRAE Handbook* son salidas de un modelo (hoy RP-1485) y solo prueban que un programa lo implementa bien; no se usan aquí.

Hyland 1975 [3]. Siete mediciones del factor f con el higrómetro gravimétrico del NBS: cuatro a 70 °C sobre agua entre 24 y 35 bar, dos a −10 °C y una a −20 °C sobre hielo, a 20 y 29 bar; incertidumbre sistemática de 0,07 % en f . Con ellas y las mediciones anteriores del NBS a 30, 40 y 50 °C ajustó $B_{aw}(T)$ y tabuló f de −50 a 90 °C y de 0,25 a 100 bar (su tabla 8), con la incertidumbre máxima de su tabla 9; se toman los 204 valores hasta 20 bar, con esa incertidumbre dividida por 2 como estimación de $k = 1$. Es la referencia de f del Brochure ASHRAE de 1977 y de Hyland y Wexler 1983. Greenspan [10] publicó ecuaciones explícitas que la aproximan; no aportan datos nuevos.

Wylie y Fisher 1996 [4]. Quince mediciones de f a 20, 50 y 75 °C entre 1,5 y 14 MPa (cada una media de unas seis corridas), de las que obtuvieron B_{aw} y los primeros valores experimentales de C_{aaw} ; incertidumbre total 3σ de 15 a $17 \cdot 10^{-4}$, aquí dividida por 3. Su tabla 5 da f de su formulación de 0 a 100 °C y de 0,1 a 15 MPa con 3σ ; se toman los 23 valores hasta 5 MPa. Son las mediciones más recientes de B_{aw} y las que reproduce el cálculo de Harvey y Huang.

Guildner, Johnson y Jones 1976 [5]. Presión de vapor del agua en el punto triple, 611,657 Pa, $\pm 0,010$ Pa al 99 % de confianza (0,004 Pa con $k = 1$).

CIPM-2007 [6]. La fórmula de densidad del aire húmedo de la metrología de masa, ajustada a mediciones gravimétricas de densidad, con incertidumbre relativa $2,2 \cdot 10^{-5}$, válida de 15 a 27 °C, 60 a 110 kPa y humedad relativa hasta 0,8; se evalúa en 48 estados de esa región con $x_{CO_2} = 0,0004$, y el estado (t, p, x) así definido se da a cada modelo.

Greenspan 1977 [11]. Humedad relativa de equilibrio sobre 28 soluciones salinas saturadas, compilación de 1106 mediciones. Está reservada para cuando Psicro tenga un modelo de actividad para sales sueltas; la opción de agua de mar de TEOS-10 no la representa.

Todas las temperaturas se llevan a ITS-90 (las fuentes anteriores a 1990 están en IPTS-68; la conversión de Rusby 1991 cambia f en menos de 10^{-6}). Los datos están en el repositorio de Psicro en `doc/datos-experimentales`, un archivo CSV por publicación con fuente, tipo, temperatura, presión, fracción molar, magnitud, valor, incertidumbre y nota, junto con las copias de los artículos.

4. Método

El programa `tests/contrasta.py` compila Psicro en un directorio temporal y, para cada dato y cada modelo, evalúa la magnitud fuera del solver multivariable cuando la fuente da un estado de saturación (presión de vapor y fracción molar de saturación directamente de las funciones del modelo, $f = x_s p / p_{ws}$ con la p_{ws} del mismo modelo) y con el solver cuando el dato es un estado completo (la densidad de la CIPM, a partir de t, x y p). El desvío es calculado menos dato: absoluto para f , en unidades de 10^{-4} , y relativo para las demás magnitudes, en unidades de 10^{-5} . Para cada fuente, magnitud y modelo se informa el desvío medio, el cuadrático medio, el máximo y cuántos puntos tienen desvío menor que la incertidumbre del dato. La tabla 1 y la tabla 2 son la salida literal del programa (`-latex`); las figuras salen de sus desvíos punto por punto (`-csv`).

5. Resultados

5.1. Presión atmosférica

A 0,1 MPa, que es donde trabaja la psicrometría corriente, RP-1485 queda dentro de $\pm 0,4 \cdot 10^{-4}$ de la formulación de Wylie y Fisher de 0 a 80 °C, y TEOS-10 entre $+0,1$ y $+0,8 \cdot 10^{-4}$, ambos dentro de la incertidumbre de $1,3 \cdot 10^{-4}$ en todos los puntos (tabla 2, figura 1). Contra la formulación de

Cuadro 1: Desvío de cada modelo respecto de los datos: calculado menos dato. Para f , absoluto en unidades de 10^{-4} ; para las demás magnitudes, relativo en unidades de 10^{-5} . La última columna cuenta los puntos cuyo desvío no supera la incertidumbre del dato ($k = 1$).

Dato	Modelo	Medio	Cuadr. medio	Máximo	Dentro
Densidad, CIPM-2007, 48 estados, 15–27 °C, 60–110 kPa	RP-1485	+3,6	+3,6	+4,1	0/48
	TEOS-10	+1,3	+1,4	+1,9	48/48
	Hyland-Wexler	-35,6	+36,4	-50,3	0/48
	gas ideal	-31,2	+32,1	-46,0	0/48
p_{ws} en el punto triple, Guildner 1976	RP-1485	+0,0	+0,0	+0,0	1/1
	TEOS-10	-0,4	+0,4	-0,4	1/1
	Hyland-Wexler	+0,0	+0,0	+0,0	1/1
	gas ideal	+0,0	+0,0	+0,0	1/1
f medido, Hyland 1975, 7 puntos, 20–35 bar	RP-1485	+32,0	+41,2	+69,4	1/7
	TEOS-10	+31,6	+41,7	+67,1	1/7
	Hyland-Wexler	+135,7	+149,1	+206,5	0/7
	gas ideal	-814,9	+843,0	-1268,0	0/7
f medido, Hyland 1975, 7 puntos, 20–35 bar (x_s)	RP-1485	+487,3	+504,1	+773,8	0/7
	TEOS-10	+482,0	+497,8	+756,6	0/7
	Hyland-Wexler	+1418,1	+1459,9	+1871,4	0/7
	gas ideal	-7326,9	+7517,9	-10812,1	0/7
f , formulación de Hyland 1975, 204 valores, 0,25–20 bar	RP-1485	+6,6	+14,4	+107,3	137/204
	TEOS-10	+7,2	+14,3	+103,5	100/204
	Hyland-Wexler	+18,4	+30,6	+107,5	30/204
	gas ideal	-170,1	+257,0	-1240,0	0/204
f medido, Wylie y Fisher 1996, 15 puntos, 1,5–14 MPa	RP-1485	+159,5	+253,9	+627,9	4/15
	TEOS-10	+84,8	+128,4	+270,8	4/15
	Hyland-Wexler	+488,4	+618,5	+1178,6	0/15
	gas ideal	-2041,1	+2456,6	-5135,0	0/15
f , formulación de Wylie y Fisher 1996, 23 valores, 0,1–5 MPa	RP-1485	+2,5	+21,7	+75,9	8/23
	TEOS-10	+6,2	+14,5	+53,0	12/23
	Hyland-Wexler	+94,4	+133,5	+270,8	1/23
	gas ideal	-603,7	+808,1	-2003,0	0/23

Cuadro 2: Factor de corrección f a presión atmosférica: desvío de cada modelo, en unidades de 10^{-4} , respecto de la formulación de Wylie y Fisher 1996 a 0,1 MPa y de la de Hyland 1975 a 1 bar, con la incertidumbre ($k = 1$, mismas unidades) que cada fuente asigna a su valor.

Fuente	t (°C)	Incert.	RP-1485	TEOS-10	Hyland-Wexler	Gas ideal	f dato
Wylie-Fisher 1996	0,0	1,4	+0,3	+0,8	+2,7	-41,2	1,00412
	20,0	1,3	-0,4	+0,4	+2,9	-41,7	1,00417
	40,0	1,3	-0,2	+0,4	+2,1	-48,2	1,00482
	60,0	1,3	-0,2	+0,3	+0,2	-58,0	1,00580
	80,0	1,3	+0,0	+0,1	-2,3	-56,6	1,00566
Hyland 1975	-50,0	3,0	+3,9	+4,0	+2,1	-58,0	1,00580
	-40,0	2,8	+3,3	+3,4	+3,2	-52,0	1,00520
	-30,0	2,5	+3,0	+3,1	+4,0	-47,0	1,00470
	-20,0	2,3	+1,8	+2,0	+3,8	-44,0	1,00440
	-10,0	2,0	+1,9	+2,2	+4,5	-41,0	1,00410
	0,0	1,8	+1,5	+2,0	+3,9	-40,0	1,00400
	0,0	1,8	+1,5	+2,2	+4,9	-39,0	1,00390
	10,0	1,5	+1,4	+2,1	+4,8	-38,8	1,00388
	20,0	1,0	+1,3	+2,1	+4,6	-40,0	1,00400
	30,0	0,5	+1,4	+2,0	+4,2	-42,6	1,00426
	40,0	0,5	+1,3	+1,9	+3,6	-46,7	1,00467
	50,0	0,5	+1,1	+1,6	+2,5	-51,9	1,00519
	60,0	0,5	+0,7	+1,2	+1,1	-57,1	1,00571
	70,0	0,5	+0,2	+0,8	-0,5	-59,9	1,00599
	80,0	0,3	+0,3	+0,3	-2,0	-56,4	1,00564
	90,0	0,1	+0,2	+0,0	-2,4	-39,4	1,00394

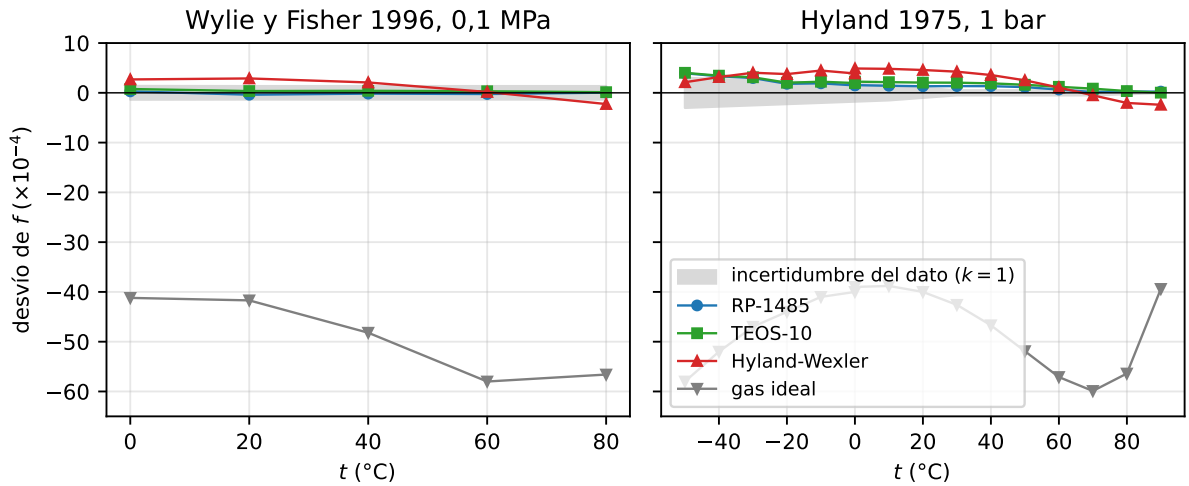


Figura 1: Desvío del factor f de cada modelo a presión atmosférica respecto de la formulación de Wylie y Fisher 1996 (izquierda, 0,1 MPa) y de la de Hyland 1975 (derecha, 1 bar). La banda gris es la incertidumbre que cada fuente asigna a su valor ($k = 1$).

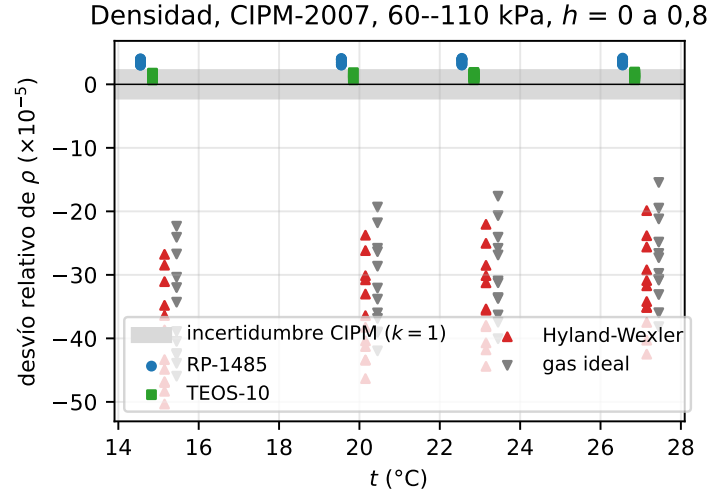


Figura 2: Desvío relativo de la densidad de cada modelo respecto de la fórmula CIPM-2007 en 48 estados (cuatro temperaturas, cuatro presiones y tres humedades; los puntos de un mismo modelo están desplazados en t para distinguirlos). Banda gris: incertidumbre de la CIPM.

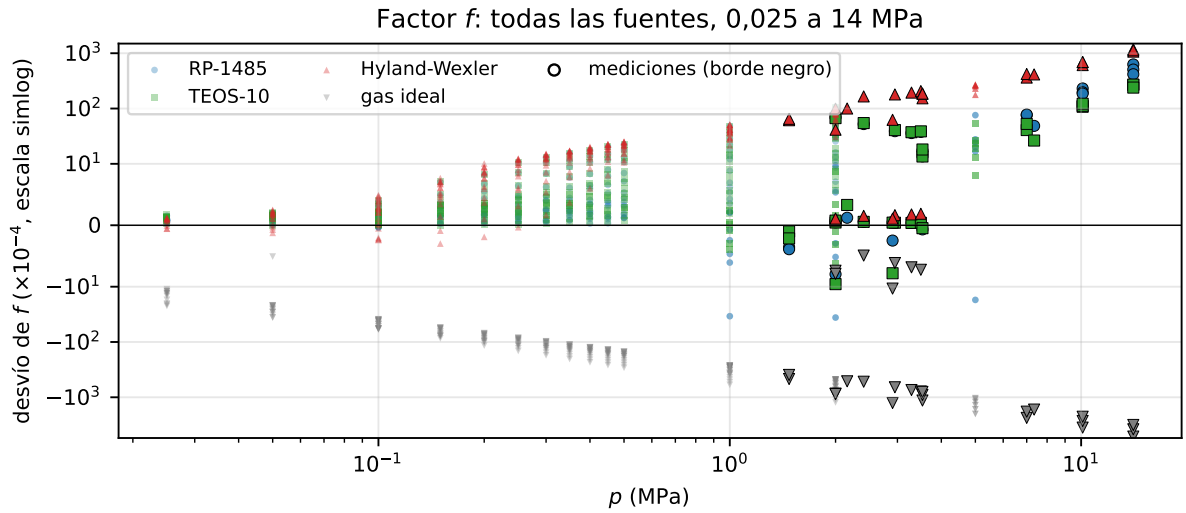


Figura 3: Desvío del factor f contra la presión para todas las fuentes. Los puntos con borde negro son mediciones (Hyland 1975 a 20–35 bar, Wylie y Fisher 1996 a 1,5–14 MPa); los demás, las formulaciones ajustadas. Escala logarítmica en p y simétrico-logarítmica en el desvío.

Hyland 1975 a 1 bar quedan a $+1,3$ y $+2 \cdot 10^{-4}$, al borde de la incertidumbre que Hyland asignó, que es optimista: la formulación de Hyland es $1,5 \cdot 10^{-4}$ más baja que la de Wylie y Fisher, cosa que estos últimos señalan en su artículo, y el B_{aw} de Harvey y Huang [7], el de RP-1485, se ajustó a los datos de Wylie y Fisher. El modelo histórico se aparta $+2$ a $+3 \cdot 10^{-4}$ de Wylie y Fisher entre 0 y 40 °C y cambia de signo hacia 80 °C: son los coeficientes viriales cruzados de 1973 que conservó el Brochure de 1977. El gas ideal, que no tiene factor f , queda 40 a $58 \cdot 10^{-4}$ por debajo, es decir un 0,4 a 0,6 % en la humedad de saturación.

En la densidad (figura 2) TEOS-10 cae dentro de la incertidumbre de la CIPM en los 48 estados, con un desvío medio de $+1,3 \cdot 10^{-5}$; en parte porque usa la misma masa molar del aire que la CIPM. RP-1485 queda a $+3,6 \cdot 10^{-5}$, apenas afuera, por su M_a de 0,028 966 contra 0,028 965 46 y el virial truncado. El histórico y el gas ideal, que toman el volumen de la mezcla como gas ideal, quedan a $-3,6$ y $-3,1 \cdot 10^{-4}$, quince veces la incertidumbre. En la presión de vapor del punto triple los cuatro modelos coinciden con Guildner dentro de $4 \cdot 10^{-6}$: tres usan la IAPWS y el cuarto la de Hyland y Wexler 1983, todas ancladas en ese punto.

5.2. Presión elevada

Por encima de 1,5 MPa (figura 3) todos los modelos se van por encima de las mediciones y la separación crece con la presión: contra las siete mediciones de Hyland a 20–35 bar, RP-1485 y TEOS-10 quedan a $+32 \cdot 10^{-4}$ (0,3 %) y el histórico a $+136 \cdot 10^{-4}$; contra las quince de Wylie y Fisher a 1,5–14 MPa, a $+159$ y $+85 \cdot 10^{-4}$ en promedio, con máximos de $+628$ y $+271 \cdot 10^{-4}$ a 14 MPa. Contra la formulación de Hyland entre 0,25 y 20 bar, RP-1485 queda dentro de la incertidumbre en 137 de los 204 valores y TEOS-10 en 100; los que quedan afuera están a 10 y 20 bar. Nada de esto es inesperado: RP-1485 trunca la mezcla en el tercer coeficiente virial y declara validez hasta 5 MPa, TEOS-10 usa la misma mezcla virial, y Psicro está pensado para la atmósfera. Estas filas fijan el límite del rango, no eligen modelo.

6. Discusión

El resultado principal es que a presión atmosférica RP-1485 y TEOS-10 son indistinguibles entre sí y de las mejores mediciones disponibles de f , y que la densidad las separa apenas por la masa molar del aire que cada una adopta. No es casualidad: comparten los coeficientes viriales cruzados, las ecuaciones de estado de los componentes y, a baja densidad, la función de Helmholtz completa se reduce a su propio desarrollo virial. La elección entre ambos en Psicro es de rango y de rigor, no de exactitud: TEOS-10 vale en el líquido y a presiones mayores y agrega el agua de mar, a costa de una dependencia Fortran y de un tiempo de cálculo cincuenta veces mayor.

El modelo histórico, que sigue siendo el de muchas herramientas, se aparta de las mediciones en 2 a $3 \cdot 10^{-4}$ en f y en $3,6 \cdot 10^{-4}$ en densidad. Ninguna de esas diferencias tiene consecuencias en la climatización (W cambia un 0,03 %), pero sí en la metrología de humedad, donde la incertidumbre de los generadores es de ese orden. El gas ideal está a 0,5 % en W y 0,03 % en v del mejor modelo; lo primero es del orden de la incertidumbre de un buen higrómetro y lo segundo es irrelevante para casi cualquier uso.

Las incertidumbres declaradas por las fuentes no son homogéneas: las de Hyland son máximas y resultan optimistas frente a Wylie y Fisher; las de Wylie y Fisher son 3σ totales; las de la CIPM son estándar. Las divisiones por 2 y por 3 con que se llevaron a $k = 1$ son aproximadas y condicionan el conteo de puntos “dentro”, no los desvíos.

7. De Psicro 5 a Calcula 6.0

Después de este contraste Psicro dejó de ser un programa y pasó a ser un sistema de *Calcula 6.0*. Calcula conserva de Psicro 5 el lenguaje de entrada, el solver de Newton sobre la GSL y la carga de módulos, y resuelve sistemas de ecuaciones cualesquiera: dados tantos datos como grados de

libertad tiene un sistema, halla las demás variables. Un *sistema* es lo que el usuario nombra; cada uno corre en un *módulo*, una biblioteca que evalúa sus ecuaciones. Psicro es exclusivamente uno de esos sistemas, el del aire húmedo, con sus ecuaciones compiladas en el módulo del mismo nombre; hay otros, como un péndulo y un circuito eléctrico.

Los cuatro modelos de propiedades y su código son los mismos que se contrastan aquí, y la batería de regresión de Calcula 6.0 reproduce los mismos 1747 casos por modelo, así que los desvíos de las secciones anteriores valen igual para el sistema psicro de Calcula. Cambia la forma de invocarlo: el sistema se nombra siempre, por ejemplo `calcula -s psicro -p 't=25,wr=.5,alt=0'`, y el modelo se elige con las mismas opciones (`--teos10`, `--hw`, `--ideal`; por defecto RP-1485).

La novedad que abre el programa a otros problemas es el *módulo dinámico*: toma las variables y las ecuaciones de un archivo de texto y las evalúa en tiempo de ejecución con la biblioteca ExprTk, de modo que cualquier usuario puede agregar un sistema propio sin programar ni compilar. Basta con un archivo `.din` (secciones de constantes, funciones, variables con su valor inicial y unidad, y ecuaciones) y un archivo `.sis` que le da nombre, colocados en la carpeta de sistemas del usuario; desde ese momento el sistema se resuelve como cualquier otro, con cualquier subconjunto de sus variables como datos. Antes de resolver, el módulo verifica con el jacobiano de los residuos que los datos elegidos determinen a las demás variables. Así, un modelo alternativo del aire húmedo o un sistema que combine la psicrometría con otras ecuaciones podría escribirse y contrastarse con el mismo procedimiento de este trabajo.

La interfaz web Puyuspa 6.0 se organiza también por sistemas, con una página y gráficos configurables para cada uno; la carta psicrométrica es la página del sistema psicro. Calcula se distribuye bajo la GNU GPL 3 o superior y Puyuspa bajo la GNU AGPL 3 o superior.

8. Limitaciones y trabajo pendiente

No hay mediciones directas de entalpía ni de entropía del aire húmedo a temperatura ambiente con precisión suficiente para distinguir los modelos (las diferencias son de 0,3 kJ/kg), y el bulbo húmedo termodinámico no es una magnitud medible; esas propiedades quedan validadas solo por consistencia con f y v . La entropía del modelo histórico no lleva el término virial (su expresión en el código original era la de la entalpía y se dejó anulada). Las mediciones de f por debajo de 0 °C son escasas (tres puntos de Hyland, a 20 y 29 bar) y las de −50 a 0 °C a presión atmosférica no existen. Los datos de soluciones salinas de Greenspan esperan un modelo de actividad. La comparación de Lovell-Smith y otros [8], que trata las mismas formulaciones con un análisis de incertidumbre completo, es la referencia con la que habría que cotejar los números de este trabajo.

9. Contribuciones y uso de inteligencia artificial

El autor concibió Psicro, su formulación termodinámica original y el sistema de ecuaciones, dirigió este trabajo, tomó las decisiones de modelo (qué formulaciones incorporar, cuál es la de defecto, no modelar el agua sobreenfriada, tratar la biblioteca SIA como está), consiguió las publicaciones y revisó los resultados y el texto.

Buena parte del trabajo material lo realizó un modelo de lenguaje, Claude Fable 5.1 de Anthropic, operando como agente de programación bajo la dirección del autor en sesiones de septiembre de 2026, cuyo registro completo está en la bitácora del repositorio (`doc/bitacora-2026-09-22.md`, revisiones 8 a 75). En concreto: la separación del modelo de propiedades del sistema de ecuaciones en Psicro 5; la incorporación de RP-1485 a partir del código C de una revisión externa (otro agente de la misma familia, que también aportó la versión Python de referencia); la corrección del término virial anulado en la entalpía del modelo histórico, del corchete de la búsqueda del bulbo húmedo y de la prolongación de los polinomios viriales fuera de su rango; el modelo de gas ideal; el enlace de la biblioteca SIA de TEOS-10 con su puente Fortran-C, su respaldo con RP-1485 y la opción de agua de mar; la batería de regresión de la 5.0 (adaptada de la que otro agente, Astra,

escribió para Psicro 4 al corregir su solver); el programa de contraste, el formato de los datos y la transcripción de las tablas de Hyland, Wylie y Fisher, Guildner y Picard, con la verificación de las constantes de la CIPM contra el original; las tablas y figuras de este artículo y el borrador de su texto.

Cada paso quedó commiteado en el repositorio con su explicación, y cada cambio de modelo se validó con la batería de regresión (1747 casos por modelo). Los errores de transcripción o de interpretación que pudieran quedar son responsabilidad del autor, que revisó el conjunto. El modelo de lenguaje no es autor: no puede responder por el trabajo ni dar su consentimiento, y así lo entienden las normas editoriales vigentes; se lo declara aquí para que el lector sepa cómo se hizo lo que lee.

La transformación en Calcula 6.0 (sección 7), con el registro de sistemas, el módulo dinámico, Puyuspa 6.0 y la actualización de este texto y del manual, se hizo del mismo modo, con Claude Fable 5.1 y Claude Opus 5.5 bajo la dirección del autor, y quedó registrada en la misma bitácora.

10. Reproducibilidad

Calcula 6.0 con el sistema psicro (y Psicro 5, con el que se hizo el contraste), sus cuatro modelos, los datos en CSV, las copias de los artículos y los programas `tests/test_solver.py` (batería de regresión de 1747 casos por modelo) y `tests/contrasta.py` están en el repositorio del programa. `make datos` en `doc/articulo-contraste` vuelve a correr el contraste y a generar las tablas y las figuras de este artículo. En Calcula 6.0 los mismos programas están en `calcula-6.0/tests`.

Referencias

- [1] Sebastian Herrmann, Hans-Joachim Kretzschmar, and Donald P. Gatley. Thermodynamic properties of real moist air, dry air, steam, water, and ice (RP-1485). *HVAC&R Research*, 15(5):961–986, 2009. doi: 10.1080/10789669.2009.10390874.
- [2] Rainer Feistel, Daniel G. Wright, Hans-Joachim Kretzschmar, Eberhard Hagen, Sebastian Herrmann, and Roland Span. Thermodynamic properties of sea air. *Ocean Science*, 6(1): 91–141, 2010. doi: 10.5194/os-6-91-2010.
- [3] Richard W. Hyland. A correlation for the second interaction virial coefficients and enhancement factors for moist air. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry*, 79A(4):551–560, 1975. doi: 10.6028/jres.079A.017.
- [4] Russell G. Wylie and Robert S. Fisher. Molecular interaction of water vapor and air. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 41(1):133–142, 1996. doi: 10.1021/je950092l.
- [5] Leslie A. Guildner, Daniel P. Johnson, and Frank E. Jones. Vapor pressure of water at its triple point. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry*, 80A(3):505–521, 1976. doi: 10.6028/jres.080A.054.
- [6] A. Picard, R. S. Davis, M. Gläser, and K. Fujii. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia*, 45(2):149–155, 2008. doi: 10.1088/0026-1394/45/2/004.
- [7] Allan H. Harvey and Peter H. Huang. First-principles calculation of the air–water second virial coefficient. *International Journal of Thermophysics*, 28(2):556–565, 2007. doi: 10.1007/s10765-007-0197-8.
- [8] J. W. Lovell-Smith, R. Feistel, A. H. Harvey, O. Hellmuth, S. A. Bell, M. Heinonen, and J. R. Cooper. Metrological challenges for measurements of key climatological observables. part 4: Atmospheric relative humidity. *Metrologia*, 53(1):R40–R59, 2016. doi: 10.1088/0026-1394/53/1/R40.

- [9] Diego Saravia Alía. Calcula 6.0 y puyuspa 6.0. el sistema psico: una calculadora psicrométrica y su interfaz gráfica web. manual del usuario. <http://www.psicro.org/>, 2026. Repositorio Subversion <https://cssan.simusol.org/users/dsa/repos/psicro>, doc/manual-6.0.
- [10] Lewis Greenspan. Functional equations for the enhancement factors for CO₂-free moist air. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry*, 80A(1):41–44, 1976. doi: 10.6028/jres.080A.007.
- [11] Lewis Greenspan. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section A: Physics and Chemistry*, 81A(1): 89–96, 1977. doi: 10.6028/jres.081A.011.