

HIGROMETRIA

El objetivo de la medida de la humedad atmosférica es determinar la cantidad de vapor de agua presente en la atmosfera, ya sea por peso, volumen, presión parcial, % de saturación con respecto a una superficie de agua pura.

Esto muestra que es una variable muy difícil de medir especialmente para las estaciones automáticas.

Presión de vapor de agua

El vapor de agua pura en equilibrio con una superficie plana de agua pura experimenta una presión que designamos como e_s . esta presión es función de la T de la fase vapor y líquida y se puede obtener al integrar la ecuación de Clausius-Clapeyron, asumiendo una dependencia lineal del calor latente de vaporización con la T : $L=L_0(1+\alpha(T-T_0))$,

$$e_s = e_{s0} \exp \left[\frac{L_0}{R_v} \left(\frac{T - T_0}{TT_0} + \alpha \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - \frac{\alpha (T - T_0)}{T} \right) \right]$$

Donde: $T_0 = 273,15 \text{ K}$

$L_0 = 2,5008 * 10^6 \text{ J/kg}$ el calor latente del vapor de agua a T_0

$R_v = 461,51 \text{ J/kg K}$, constante del vapor de agua

$e_{s0} = 611,21 \text{ Pa}$

$\alpha = -9.477 * 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. La tasa de cambio promedio del coeficiente de calor latente del vapor de agua respecto a la temperatura.

La presión de vapor de agua como función de T ha sido determinada por numerosos experimentos. Buck (1981) desarrollo una ecuación que es fácil de usar y lo suficientemente precisa en el rango de temperaturas entre los -30 a 50°C :

$$e'_s = 6,1121 \exp \left(\frac{17.502T}{240.97 + T} \right)$$

Donde el error de la ecuación de Buck se presenta en la siguiente grafica

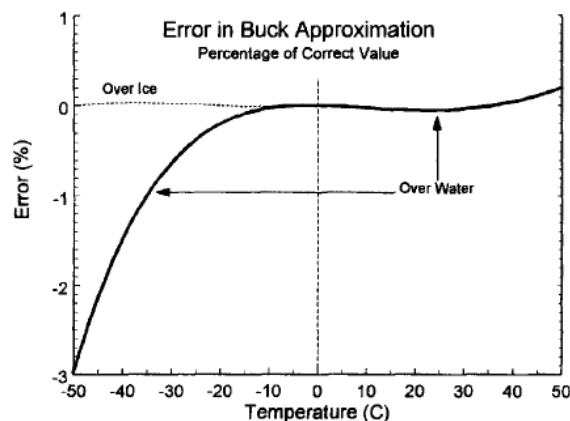


Fig. 5-1 Error in the Buck approximation.

Dado que la presión total tiene un pequeño efecto en la presión de saturación del vapor, llamado efecto de mejora. La ecuación de Buck corrige este efecto obteniendo las siguientes ecuaciones para la presión de vapor y presión de vapor sobre superficie de hielo:

$$e_s = 6,1365 \exp\left(\frac{17.502T}{240.97 + T}\right) \quad e_i = 6,1359 \exp\left(\frac{17.502T}{240.97 + T}\right)$$

La presión de vapor de saturación varía en 2 órdenes de magnitud en el rango normal de temperaturas, lo cual uno debería esperar para cualquier instrumento que mida humedad un decrecimiento de su precisión con un decrecimiento en la temperatura.

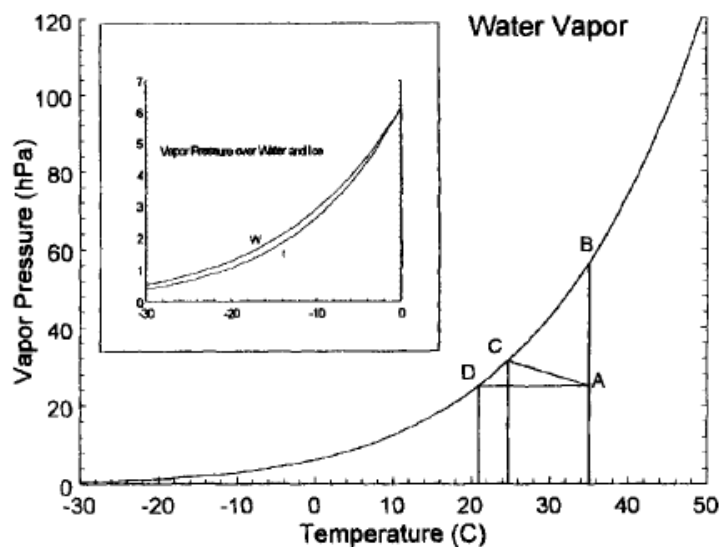


Fig. 5-2 Saturation vapor pressure as a function of temperature. Inset shows saturation vapor pressure with respect to water (top curve) and with respect to ice (bottom curve) for $T < 0^\circ\text{C}$.

Recordando Definiciones

Existen muchas variables que definen humedad:

- 1) *Humedad Absoluta* (d_v) = m_v/Vol kg/m^3
- 2) *Temperatura de punto de rocío* (T_d): es la temperatura a la cual hay que enfriar a la masa de aire para que se sature y comience la condensación, si en vez de rocío de forma hielo, entonces se le llama T de englamamiento (T_f).

$$T_d = 240.97 \frac{\ln(e/6.1365)}{(17.502 - \ln(e/6.1365))} \quad \text{Para } T_f \text{ es igual considerando la otra ecuación.}$$

- 3) *Relación de mezcla* (w) = m_v/m_d . Masa de vapor sobre masa de aire seco.
- 4) *Humedad Relativa* (U) = $100 e/e_s$
- 5) *Humedad específica* (q) = $m_v/m_d + m_v$
- 6) *Temperatura de bulbo húmedo* (T_b)
- 7) *Presión de vapor* (e)

8) *Temperatura virtual* (T_v):
$$T_v = \frac{T}{1 - \frac{e}{p}(1 - 0.622)}$$

Recordando además estas relaciones muy útiles:

$$w = 0.622e / (p - e)$$

$$e = wp / (0.622 + w)$$

$$q = w / (1 + w)$$

$$d_v = 0.2167e / (T + 273.15)$$

Métodos para medir humedad

-Psicrómetro

La humedad se puede determinar midiendo la cantidad de vapor que se debe agregar al aire húmedo para saturarlo. Esto hace que el psicrómetro mida indirectamente la humedad.



Psicrómetro tipo Assman

El psicrómetro está compuesto por 2 termómetros idénticos expuestos al ambiente. Uno de ellos, llamado de bulbo seco, mide la T del aire. El otro, llamado de bulbo húmedo, su bulbo está cubierto con una gasa o muselina la cual está dentro de 1 frasco que contiene agua destilada, por capilaridad el agua continuamente humedece la gasa. Para una buena performance del psicrómetro se requiere una ventilación forzada.

La depresión del bulbo húmedo ($T - T_b$) es proporcional a la diferencia entre la presión de vapor y la presión de vapor respecto al agua a $T = T_b$. El factor de proporcionalidad se llama constante psicrométrica (A).

La ecuación del psicrómetro, la cual es obtenida considerando principios termodinámicos es:

$$e = e_{sw} - Ap(T - T_b)$$

Donde A es la constante del psicrómetro = $0,00062 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para el agua y $A = 0,00054 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para el hielo.

Esto es aproximado ya que en el cálculo se considero un sistema cerrado y no se tuvo en cuenta la velocidad del aire.

Si la velocidad del viento varia, A varia a modo de ejemplo se presenta la siguiente tabla:

Vel (m/s)	$A_w(10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$	$A_i(10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$
0-0,5	120	106
1-1,5	80	71
3,5-4	66	58
4-10	64	43

La dependencia de A con la ventilación fue determinada por Sworykin (1881)

Principales fuentes de error en un psicrómetro:

- 1) Sensibilidad, precisión, Los psicrómetros son menos sensibles al error absoluto en los sensores de temperatura que a los errores relativos.
- 2) Ventilación: Necesita una ventilación de por lo menos 3 m/s para maximizar la transferencia de calor por conveccion y la evaporación y para minimizar la transferencia de calor por conducción y radiación.
- 3) Radiación incidente en sensores: Los sensores deben estar protegidos de la radiación solar directa y reflejada y también de la radiación de onda larga terrestre. Este es uno de las fuentes de error mas grandes en las mediciones de campo que no puede ser estimada en el laboratorio.
- 4) Características de la mecha: Se debe usar las mechas que ofrece el proveedor del psicrómetro (no usar cualquiera!!!). Incluso las mechas originales se deben hervir en una solución de detergente y lejía luego hervirlas en agua destilada y enjuagarla en agua destilada antes de ser usada.
- 5) Posiciones relativas entre ambos termómetros: No debe fluir aire desde el bulbo húmedo (frío) al bulbo seco (más calido).
- 6) Pureza del agua: Solo se puede usar agua destilad o desionizada para mojar la mecha

El grafico siguiente (5.6) muestra el error del Psicrómetro. La sensibilidad aumenta marcadamente al aumentar la temperatura y menos pronunciada cuando la humedad relativa decrece.

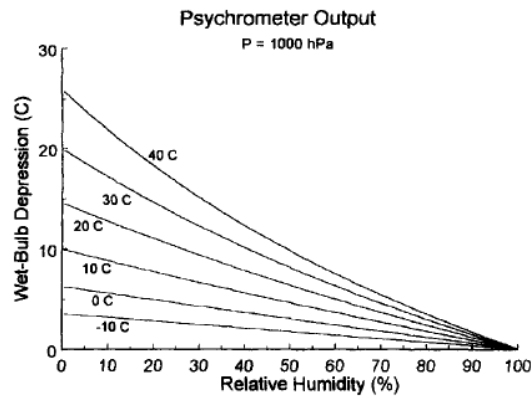


Fig. 5-6 Psychrometer output: wet-bulb depression versus relative humidity. Each curve shows the wet-bulb depression for ambient temperatures from -10 to 40°C .

El error en la humedad relativa causado por un error de $0,1^{\circ}\text{C}$ en la depresión del bulbo húmedo como muestra el gráfico siguiente, deja en claro que es muy difícil alcanzar un error menor al 1% para temperaturas menores a 10°C .

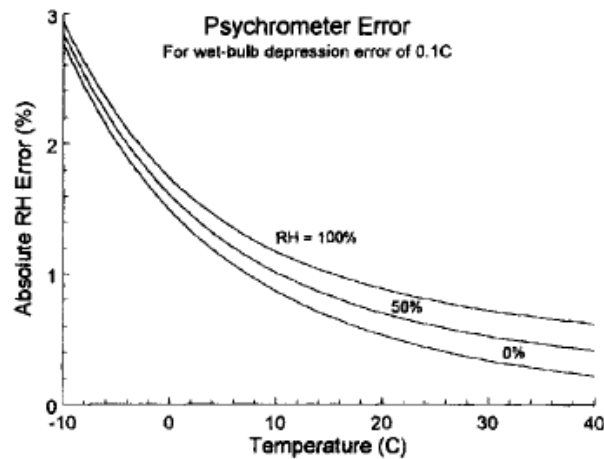


Fig. 5-7 Error induced in a psychrometer due to a 0.1°C error in wet-bulb depression.

-Higrómetros mecánicos: Higrómetro de cabello

Algunas materias orgánicas se contraen o alargan cuando la humedad con respecto a agua líquida aumenta (se alarga) o disminuye (se acortan). En el siglo 18 Saussure descubrió que los cabellos tenían esa propiedad. Para que los cabellos desarrollen esta propiedad, deben contar con cierto tratamiento; primero se los lava con detergentes especiales (generalmente éter), luego con agua destilada y finalmente se los seca al horno.

Las condiciones de borde son:

$$\text{Para HR} = 100\% \quad 100 \Delta L_{100}/L_0 = 2.5$$

$$\text{HR} = 0\% \quad 100 \Delta L_0/L_0 = 0$$

La relación entre la HR y la elongación del cabello como una fracción de su longitud total menos la inicial cuando esta sometida a una HR de 100% fue determinada experimentalmente por Gay-Lussac dando los siguientes valores:

Table 5-4 Average elongation of human hair (as a percentage of the total elongation) as a function of relative humidity.

Relative humidity (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Elongation of hair (%)	0	21	39	53	64	73	79	85	90	95	100

Se observa que entre 20 y 100 la relación no se aparta demasiado de una relación logarítmica. La ley teórica experimental que se adapta a dichos valores es:

$$\Delta L = K[\log(0.90HR + 1)]L_0 \quad \text{con } K = 0,025$$

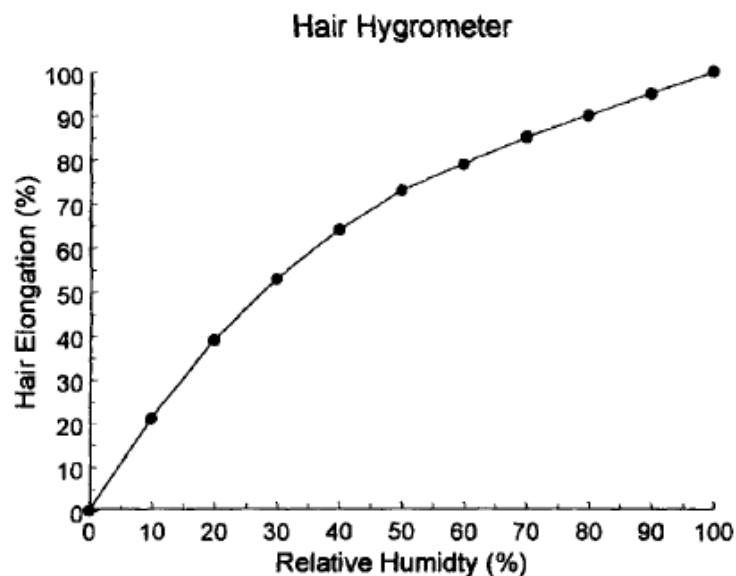


Fig. 5-13 Transfer plot for a hair hygrometer.

La temperatura no es una variable que afecte la longitud de los cabellos, es despreciable.

El coeficiente de dilatación en un ambiente seco es $\alpha = 3.4 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

La temperatura trae aparejado otro problema más importante: a temperaturas mayores a 60 °C los cabellos se dañan. A muy baja temperatura en cambio se comportan de una manera singular, a HR constante se alargan sorpresivamente como si la HR hubiese aumentado. Esto es debido a que el agua absorbida por el cabello se congela.

Retardo

La variación de la longitud del cabello en función de HR es debido a la absorción de las moléculas de agua. El mecanismo de fijación no es muy conocido, se trata de un mecanismo termodinámico y químico. La velocidad de alargamiento es tanto mayor, cuanto mayor es la cantidad de moléculas de agua que entran en contacto con el cabello

por unidad de tiempo. Si se calcula el retardo en función de la e_s se observa que para $T < -40^\circ\text{C}$ prácticamente no registra. Esto puede ser debido a la cristalización, es por esto que para $T < -20^\circ\text{C}$ los higrómetros de cabello no sirven y por lo tanto no pueden ser usados para radiosondeos. Tampoco pueden ser utilizados en regiones polares, donde se alcanzan temperaturas de dicho orden o menores.

Es importante recordar que los higrómetros de cabellos registran la humedad relativa respecto al agua sea cual fuere el ΔT . Si se lo quiere comparar con un psicrómetro debe recordarse que las tablas psicrométricas para $T < 0^\circ\text{C}$ dan el e_{si} y no el e_{sw} por lo tanto antes de compararlo con un higrógrafo al valor de HR obtenido debe aplicarse el factor:

$$e_{si} / e_{sw}$$

Cabellos Laminados

Frankenberg realizó una serie de experiencias con cabellos comunes tratados por un método especial. Pasó cabellos por rodillos que los iban aplanando y su espesor se reducía a 3/10 o 4/10 de su ancho. De este modo logró reducir mucho el retardo. El problema es que se volvían muy quebradizos, para solucionar esto, los sumergió en aceite caliente (38°C) con lo que le restituyó su elasticidad original. Estos cabellos tienen más sensibilidad que los otros, la relación es $100 \Delta L_{100}/L_0=3$

Comparación :

T(°C)	20	10	0	-10	-20	-30
Cabello Común retardo seg	30	40	55	175	400	800
Cabello Frankenberg retardo seg	10	10	12	15	20	30

Es importante mencionar que el polvo en regiones desérticas y la sal en regiones costeras inutilizan sus propiedades moleculares y provoca errores por defecto de hasta un 15%. La solución consiste en lavarlos periódicamente con agua destilada antes de la observación. Según la OMM la tolerancia (o sensibilidad) para un higrómetro de cabello a $T=20^\circ\text{C}$ es del 3%.

HIGROMETROS ELECTRICOS

Capacitivo

Se basan en el cambio de sus características eléctricas cuando varía la humedad del medio que lo rodea. Los más utilizados son los capacitivos y los conductivos de acuerdo al principio predominante de comportamiento. La salida de estos sensores puede ser T o e.

Los capacitores, están formados por una placa fina de oro, una capa fina de un polímetro y una capa muy muy fina de oro. El polímetro tiene una constante dieléctrica muy baja, cercana a 4, mientras que el agua tiene una constante dieléctrica de 80 aprox., por lo que la absorción de pequeñas cantidades de agua entre las placas afectará la capacitancia

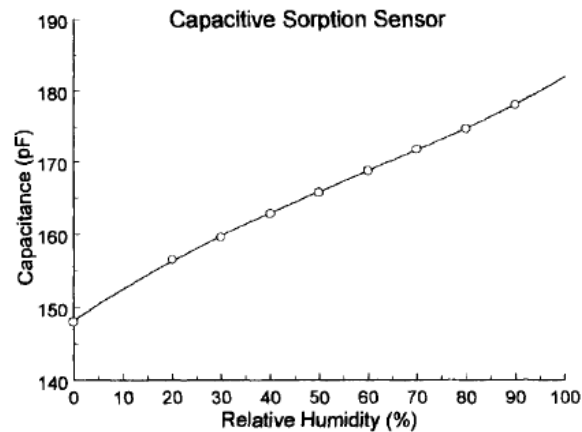
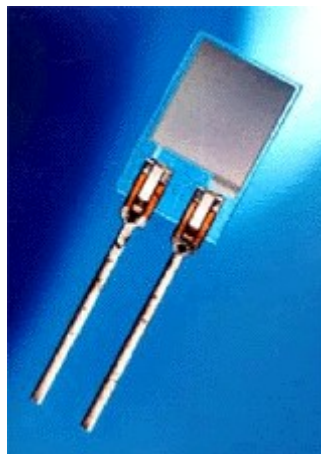


Fig. 5-10 Capacitance of a sorption sensor as a function of relative humidity.

Primero se convierte la capacitancia a frecuencia y luego a un voltaje.

Al variar la humedad ambiente la cantidad de vapor absorbido por el dieléctrico hará cambiar la característica física del mismo lo cual se traduce en una variación de la capacidad, la respuesta característica es sensiblemente lineal en el rango de medición. Una de las ventajas importantes que tiene es la de tener bajo coeficiente de retardo, además de ser prácticamente independiente de la temperatura. Los valores esperados de retardo se encuentran entre los 2 y 10 segundos, definidos para una variación del 80% de la humedad relativa. Otra ventaja es su tamaño, ya que el sensor está contenido en una superficie no mayor de 8 * 6 mm.

Para evitar la degradación del sensor debido a la presencia de agentes nocivos, se lo recubre con una protección con forma de tubo cilíndrico de bronce poroso que tiene la propiedad de retener las partículas de polvo y otros núcleos de tamaño pequeño.



- Sensores por equilibrio de absorción y/o adsorción de vapor de agua

El vapor de agua interactúa con casi todas las sustancias, a través de los procesos de absorción y/o adsorción y a veces por reacciones químicas.

(La adsorción es el proceso mediante el cual un sólido poroso (a nivel microscópico) es capaz de retener partículas de un fluido en su superficie tras entrar en contacto con éste.)

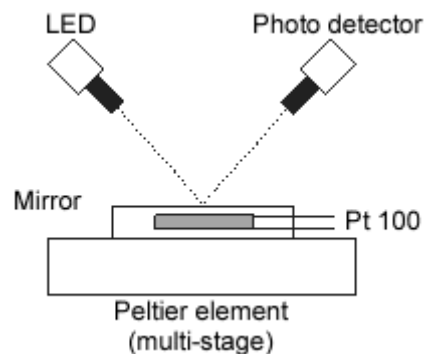
Esta interacción causa que el material se expanda o se contraiga, o altere sus características de resistencia eléctrica o la capacitancia. Cuando el material muestra que el cambio es suficientemente reversible, reproducible y detectable, puede ser utilizado como sensor de humedad.

Este tipo de sensor cumple lo siguiente:

- 1) La entrada al sensor no es la humedad relativa, ya que no hay ninguna característica física de las moléculas de vapor de agua en una parcela que corresponda a la humedad relativa. Si recordamos la definición de humedad relativa ($100 \cdot e/e_s$). La salida del sensor debe ser e o T pero nunca e_s . Entonces el sensor debe computar de alguna manera e_s .
- 2) Denton et al. (1985) determinaron experimentalmente que la masa que el sensor absorbe y/o adsorbe es proporcional a la humedad relativa, demostrando que el sensor toma la sustancia agua en forma líquida o sólida.
- 3) Se determinó por medio de las propiedades dieléctricas del sensor que la sustancia agua en el mismo está en forma líquida. Forma un film delgado sobre la superficie del sensor o en los poros superficiales del sensor. Anderson (1995) demostró que el espesor de la fina capa de agua está relacionado casi linealmente con la humedad relativa en casi todo el rango de medida, se vuelve casi no lineal cuando la HR > 90%.
- 4) El sensor debe ser un poco higroscópico.

-Higrómetro de punto de rocío y punto de fusión.

Otra forma de medir la humedad se puede obtener enfriando una superficie hasta que se alcance el equilibrio vapor-líquido o vapor sólido. El más usado es



La temperatura de una superficie reflectora (espejo) es enfriada hasta el punto donde comienza a ser cubierta por la condensación. La temperatura medida en ese momento por medio de un termistor o un RTD (Pt100 en la fig) corresponde a la temperatura de punto de rocío. El enfriamiento o calentamiento del espejo se realiza utilizando el efecto Peltier.

La formación del rocío o hielo sobre el espejo se detecta ópticamente con una LED (Light emitting Diode) y uno o más fotodetectores que detectan el cambio en el scattering de la luz cuando se forma el rocío o el hielo. El sensor de temperatura debe colocarse debajo del espejo y lo suficientemente cerca para minimizar los posibles gradientes de temperatura entre el sensor y el espejo. Es muy importante mantener el espejo limpio, ya que partículas de polvo o sal afectan la condensación, provocando errores en la medida.

Desventajas:

- 1) Es difícil medir la temperatura arriba del espejo sin interferir con la detección de rocío o hielo. Debemos recordar que estamos midiendo la temperatura del espejo y NO la temperatura de punto de rocío
- 2) El mecanismo de control debe ser sensible a los cambios de HR y de T
- 3) La presencia de pequeñas partículas sobre la superficie pueden disminuir e en por ende el punto de rocío.

Solución saturada de sal

La relación de mezcla del aire húmedo en equilibrio con una superficie plana de solución acuosa saturada salina es función de la temperatura y la presión.

El higrómetro dewcell contiene una solución de cloruro de litio (CLi) aplicado en un vidrio. Sigue los mismos principios físicos que el higrómetro de punto de rocío.

Puede operar en un rango de temperaturas desde -30 a 100 °C.

Higrómetros Espectroscópicos

Las propiedades físicas del aire como ser el índice de refracción, la absorción de radiación, conductividad térmica, viscosidad, densidad y la velocidad sonora cambian con la cantidad de vapor de agua presente.

El higrómetro espectroscópico mide la atenuación de la absorción debido a la absorción de vapor de agua en ciertas bandas del espectro. Estas bandas ocurren principalmente en la región del UV y en el IR.

Recordando la ley de Beer, que nos dice la fracción de la radiación incidente transmitida a través del espesor de atmósfera:

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-K_\lambda d_v x)$$

Donde x= espesor óptico (m)

d_v = humedad absoluta (kg/m^3) reducida a una atmósfera standard ($p= 1013, 25$ hPa y $T= 273,15$ K)

K_λ =coeficiente de absorción.

I e I_0 representan la fuente de intensidad y la intensidad de la luz luego de pasar por la capa.

Para utilizar este método debemos conocer el I_0 en cierta banda de longitud de onda, el I y el x. Debemos conocer además el coeficiente de absorción en el intervalo de longitudes de onda en que vamos a medir. En intervalo de longitudes de onda debe ser elegido de tal forma que no haya otros gases que absorban en el mismo y que los materiales con que se construya el sensor tampoco absorban.

La región del infrarrojo desde 1000 a 3000 nm es una de las mejores regiones, ya que hay muy poca emisión solar y terrestre en esta región y existe una fuerte absorción del vapor de agua en dicha banda.

Dra. Madeleine Renom

10

Fac. de Ciencias

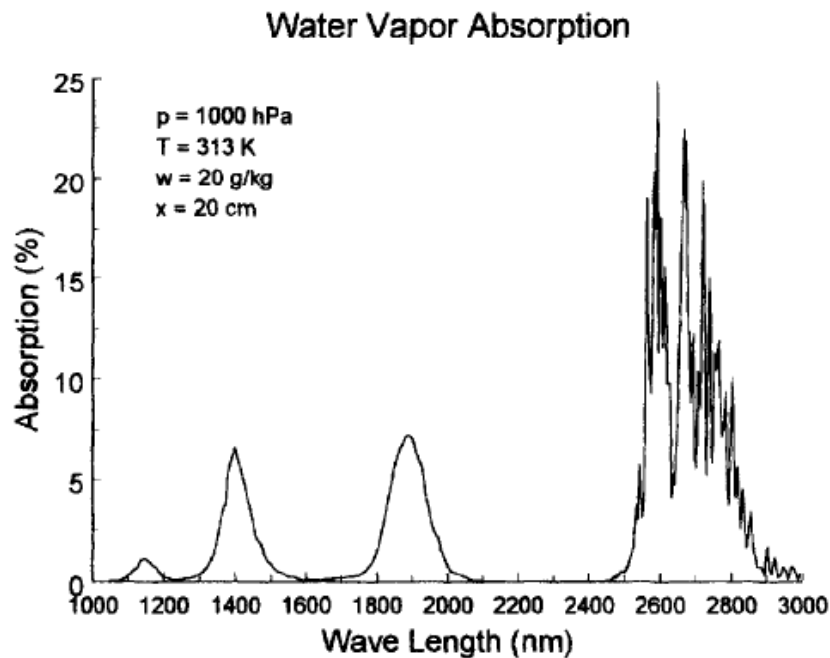


Fig. 5-14 Water vapor absorption of infrared radiation showing bands of little or no absorption and bands of strong absorption.

La absorción ocurre en ciertas líneas. Hay líneas de fuerte vibración-rotación en las longitudes de onda de: 2663, 2734, 3163 y 6271 nm. Estas líneas se ensanchan debido a la presión atmosférica y al movimiento molecular (ensanchamiento de Doppler) y esto es función de la temperatura. La ley de Beer se puede aplicar si el vapor de agua fuese el único gas absorbente y si la resolución en longitud de onda del instrumento es pequeña comparado con el ensanchamiento de las líneas de absorción. Esta segunda condición se puede cumplir utilizando una fuente de banda angosta como el láser.

Los higrómetros láser son muy caros y no son prácticos para utilizar en campo. Por otro lado los higrómetros IR utilizan fuentes de banda ancha y filtros para definir las bandas de las ondas. Utilizan 2 bandas en la región de absorción, una alrededor de los 2600 nm y una banda de referencia o no absorbente alrededor de los 2300 nm.

La ecuación de transferencia para el higrómetro IR es:

$$V_{\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{gl} \tau_{al} R_{\lambda} + B$$

Donde $I_{0\lambda}$ es la intensidad de la fuente en la longitud de onda λ (banda de referencia), τ_{gl} es la transmisividad de los componentes ópticos (lentes, ventanas), τ_{al} es la transmisividad de la capa atmosférica absorbente y R_{λ} es la capacidad de respuesta del detector. B es el bias.

Finalmente es necesario medir la temperatura del aire y la presión para obtener la humedad absoluta.

$$d_v = f(T, p, \tau_{a\lambda})$$

donde la función se debe obtener teóricamente pero debe ser confirmada por calibración.

El higrómetro Lyman-alfa, tiene el mismo principio que el higrómetro IR, solo que trabaja en el UV, por ello su nombre (se da este nombre a líneas de absorción en el rango del UV). Utiliza la línea de emisión Lyman-alfa del hidrogeno atómico en 121.56 nm como fuente de radiación. El vapor de agua es un fuerte absorbente en los 121.56 nm, por lo que una capa de pequeño espesor es suficiente (0.2 a 5 cm). El oxígeno y el ozono absorben en esta λ , el oxígeno es un débil absorbente y su efecto se corrige usando la T y la presión del aire para estimar su densidad. La contribución del ozono es despreciable ya su absorción en la troposfera es muy pequeña.

Elección del sensor de humedad

Como todo instrumental para la elección nos fijamos en el costo, precisión, mantenimiento requerido, que se ajuste a la aplicación, velocidad de respuesta y consumo de energía (batería, panel solar, etc)

Procedimiento	Ventajas	Desventajas
Medición Mecánica	<ul style="list-style-type: none"> • Operación simple • baratos 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran retardo • Costos altos de mantenimiento. • Rango de medición limitado • Decaimiento
Mediciones Psicométricas	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión • Estabilidad de largo tiempo • Alta confiabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento de la humedad de la muselina • Errores en la lectura • Son caros cuando se automatiza
Capacitivos	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión • Operación simple • No requiere compensación • Tiempo de respuesta corto • Buena relación costo – performance 	<ul style="list-style-type: none"> • El sensor necesita una compensación por temperatura
Espejo de punto de rocío higrómetro	<ul style="list-style-type: none"> • Muy alta precisión • Alta confiabilidad • Estabilidad a largo plazo • Tiempo de respuesta chicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Caro • Altos costo de mantenimiento por la limpieza regular del espejo
Higrómetros espectroscópicos	<ul style="list-style-type: none"> • Lyman-alfa bajo tiempo de respuesta 	<ul style="list-style-type: none"> • Caros • Mantenimiento complicado