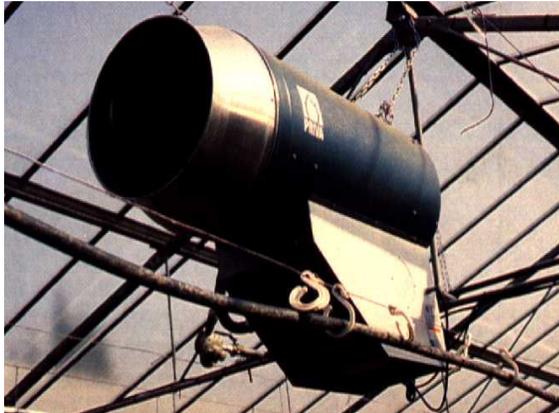


## PARTE III. UNIDAD 2. ENRIQUECIMIENTO

### EN CO<sub>2</sub>



*El enriquecimiento en CO<sub>2</sub> es una práctica corriente en los países con invierno frío, debido a los bajos niveles de radiación, y al hecho que la concentración en CO<sub>2</sub> puede bajar a niveles críticos (invernaderos cerrados). En los países mediterráneos, esta práctica es mucho menos corriente, ya que su*

*rentabilidad queda a demostrar en las condiciones climáticas de estas regiones. En esta Unidad se presentan los métodos y fuentes de CO<sub>2</sub> utilizados para el enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, con especial hincapié en el balance de CO<sub>2</sub> del aire del invernadero.*

### 1- INTRODUCCIÓN

Son numerosos los estudios que han demostrado el efecto positivo de un aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) del aire en la productividad de los cultivos. Durante al menos dos mil años, la concentración de CO<sub>2</sub> del aire ha permanecido prácticamente constante ( $280 \pm 15$  ppm) hasta, aproximadamente, principios del siglo XIX. Desde entonces, no ha cesado de aumentar y se considera que sigue incrementando a un ritmo de unos 1,5 ppm por año.

Así pues, la concentración de CO<sub>2</sub> del aire alcanza actualmente unos 380 ppm y podemos considerar que no varía a la escala temporal que nos interesa (horas, día). Aunque los cultivos al aire libre pueden provocar, a lo largo del día, cambios en la concentración de CO<sub>2</sub>, las capas de aire que rodean a la vegetación se renuevan con frecuencia debido a la acción del viento, compensando así la depresión que puede inducir el proceso fotosintético en la concentración de CO<sub>2</sub> del aire exterior. Así pues, los sistemas de cultivo al aire libre (sistemas abiertos) disponen de una concentración de CO<sub>2</sub> que varía poco a lo largo del día. Esta situación contrasta con la que se observa en cultivos de invernadero, en los que la concentración de CO<sub>2</sub> varía de forma notable a lo largo del día. El invernadero es un medio más o menos confinado que, debido a la presencia de la pared de cubierta y, desde hace unos años a la presencia de las mallas anti-insectos, frena los intercambios del aire con el aire exterior. Estos intercambios tienen lugar solamente a través de los defectos de estanqueidad del invernadero y a través del sistema de ventilación. Esto explica que:

- En período nocturno, cuando las ventanas están cerradas, la concentración de CO<sub>2</sub> del aire del invernadero sea superior a la del aire exterior, debido a la respiración de las plantas y de los microorganismos del suelo (emisión de CO<sub>2</sub>).
- En periodo diurno, debido al proceso de fotosíntesis, ocurra la situación inversa, es decir, una disminución de la concentración en CO<sub>2</sub>, que puede ser drástica cuando el invernadero permanece cerrado debido a bajas temperaturas del aire exterior. En estas

condiciones, la productividad de los cultivos puede verse afectada muy negativamente, sobre todo en los países nórdicos. Las consecuencias son menos graves en los países de clima cálido, donde el clima invernal suave permite abrir el invernadero un cierto número de horas al día.

Así pues, no resulta extraño que la técnica de enriquecimiento artificial de la atmósfera haya sido, y siga siendo, utilizada de forma corriente en países como Holanda, Bélgica o Alemania, y que no haya gozado de mucha popularidad entre los agricultores del Sur de Europa. Sin embargo, en algunos casos, y para cultivos de alto valor comercial, el enriquecimiento en CO<sub>2</sub> puede ser rentable, por lo que algunas explotaciones modernas del Sur de Francia o de España han optado por esta técnica. Es de resaltar que, en zonas del Mediterráneo, la radiación solar es relativamente elevada, comparada con la que se alcanza en los países nórdicos, y que la eficiencia del enriquecimiento en CO<sub>2</sub> es pequeña cuando la planta recibe niveles bajos de radiación solar.

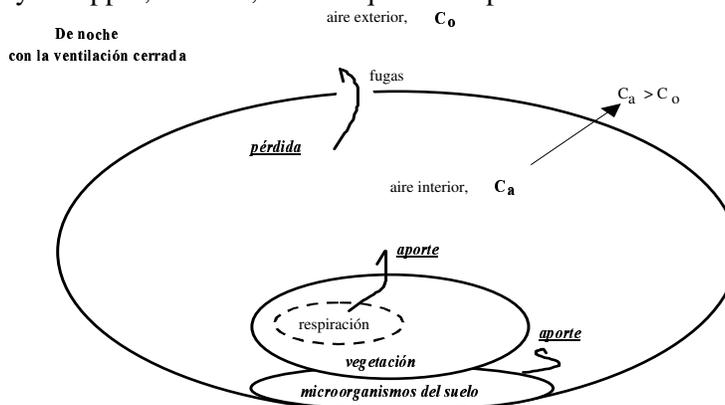
## 2- CONCEPTO DE FUENTES Y SUMIDEROS DE CO<sub>2</sub>

Para comprender la variabilidad de la concentración de CO<sub>2</sub> en invernadero, nos podemos basar en el concepto de **fuentes** y **sumideros** de CO<sub>2</sub>. El invernadero es un sistema semi-cerrado. El aire exterior actúa, a través de los defectos de estanqueidad del invernadero, o de la ventilación, ya sea como una fuente (aporte) o bien como un sumidero (pérdida) de CO<sub>2</sub>. Estas diferencias de comportamiento dependen de la concentración de CO<sub>2</sub> que prevalece bajo invernadero que viene determinada, esencialmente, por la actividad de los microorganismos del suelo, por la actividad respiratoria y fotosintética de las plantas y, cuando existe enriquecimiento carbónico, por el nivel fijado de consigna de CO<sub>2</sub>.

### 2.1- ACCIÓN DE LA VENTILACIÓN COMO SUMIDERO DE CO<sub>2</sub>

#### - Durante la noche

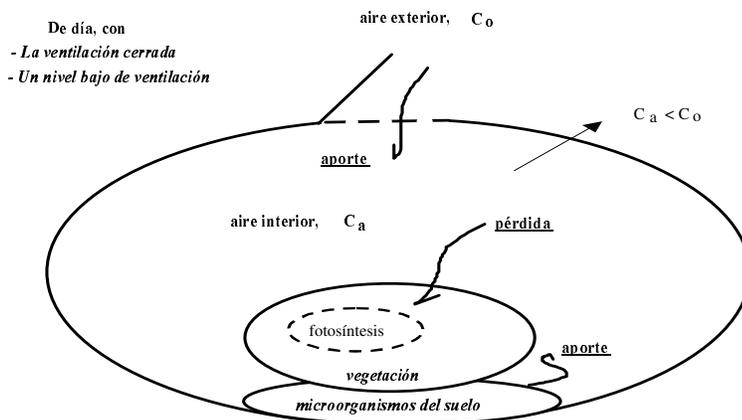
La renovación de aire a través de las fugas (defectos de estanqueidad del invernadero) actúa como un sumidero de CO<sub>2</sub>, debido a la actividad respiratoria de las plantas y de los microorganismos del suelo (Figura 1). En general, la tasa de CO<sub>2</sub> que corresponde a estos procesos respiratorios es superior a la tasa de CO<sub>2</sub> que se pierde por fugas. Bajo estas condiciones, la concentración de CO<sub>2</sub> del aire interior puede llegar a alcanzar entre 500 y 600 ppm, es decir, valores que son superiores a la concentración del aire exterior.



**Figura 1.** Representación de los aportes y pérdidas de CO<sub>2</sub> en un invernadero cultivado durante la noche.

**- Durante el día.**

La ventilación actúa como sumidero de CO<sub>2</sub> solamente cuando se aplica enriquecimiento carbónico, con niveles de concentración de CO<sub>2</sub> superiores a la concentración del aire exterior.



**Figura 2.** Representación de los aportes y pérdidas de CO<sub>2</sub> en un invernadero cultivado durante el día.

**2.2- ACCIÓN DE LA VENTILACIÓN COMO FUENTE DE CO<sub>2</sub>**

La ventilación es una fuente de CO<sub>2</sub> en periodo de día cuando no hay enriquecimiento carbónico (Figura 2). La actividad fotosintética de un cultivo desarrollado puede inducir una fuerte caída en la concentración de CO<sub>2</sub> del aire. Esto se explica debido a que el consumo inherente a la tasa fotosintética no es compensado con una entrada equivalente de CO<sub>2</sub> a través del proceso de ventilación y/o de las fugas. Es ésta una situación típica de invernaderos con cultivos desarrollados, que tiene lugar con frecuencia durante los meses más fríos del año. Además, puede ocurrir en invernaderos cerrados y en invernaderos con la ventilación abierta siempre que la tasa de renovación de CO<sub>2</sub> a través de la ventilación sea insuficiente.

Se deduce que la ventilación tiene una importancia relevante en el nivel de CO<sub>2</sub> del aire del invernadero. Esto explica que, durante el día, la concentración de CO<sub>2</sub> pueda alcanzar niveles del orden de 120-150 ppm, en invernaderos cerrados. Sin embargo, también se pueden alcanzar bajo un invernadero ventilado niveles inferiores a la concentración exterior si la pérdida de CO<sub>2</sub> que conlleva la tasa de fotosíntesis no se compensa con una tasa de ventilación adecuada. Cabe resaltar que una tasa de ventilación pequeña induce niveles muy bajos de velocidad del aire dentro el invernadero y, por consiguiente, limita además el transporte de CO<sub>2</sub> desde el aire hasta las hojas.

**3- VARIABILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN EN CO<sub>2</sub>**

La Figura 3 da una representación esquemática de la acción de la vegetación y de la ventilación en la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> del aire del invernadero, donde se puede apreciar:

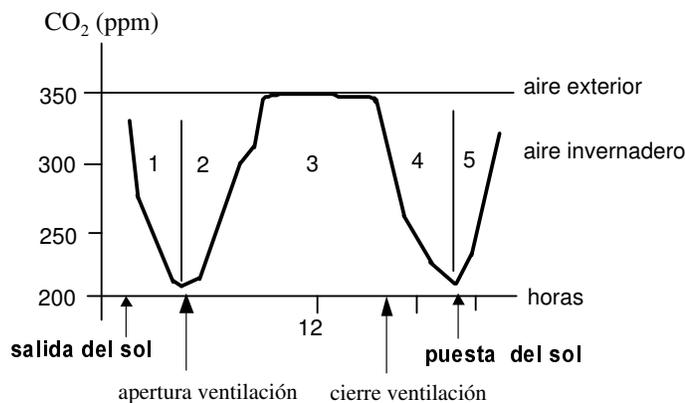
Zona 1- Disminución de la concentración de CO<sub>2</sub> del aire interior desde la salida del sol, cuando la ventilación permanece cerrada. La renovación del CO<sub>2</sub> aire del invernadero a

través de las fugas no es suficiente para compensar el consumo de CO<sub>2</sub> inherente a la actividad fotosintética de las hojas.

Zonas 2 y 3- Aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>, inducido por la apertura de la ventilación (2), hasta alcanzar, en este ejemplo, un valor cercano a la concentración exterior (350 ppm) cuando la tasa de ventilación permite compensar el gasto que induce la tasa de fotosíntesis (3).

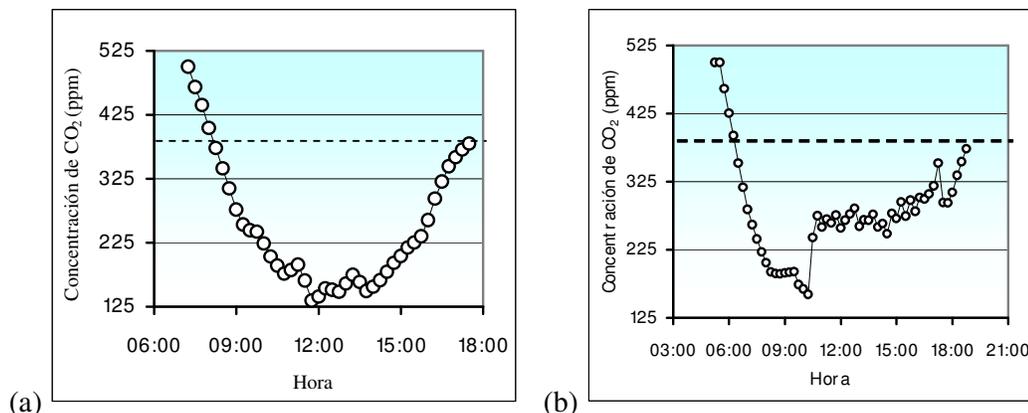
Zona 4- Empobrecimiento de la concentración de CO<sub>2</sub> del aire cuando se cierra la ventilación debido a la actividad fotosintética de las hojas.

Zona 5- Aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> debido a la actividad respiratoria de las plantas y de los microorganismos cuando la ventilación permanece cerrada de noche.



**Figura 3.** Evolución diaria de la concentración de CO<sub>2</sub> en un invernadero cultivado.

Las Figuras 4a-b dan ejemplos típicos de la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub>, con un cultivo desarrollado, cuando el invernadero permanece cerrado y cuando se abre la ventilación.

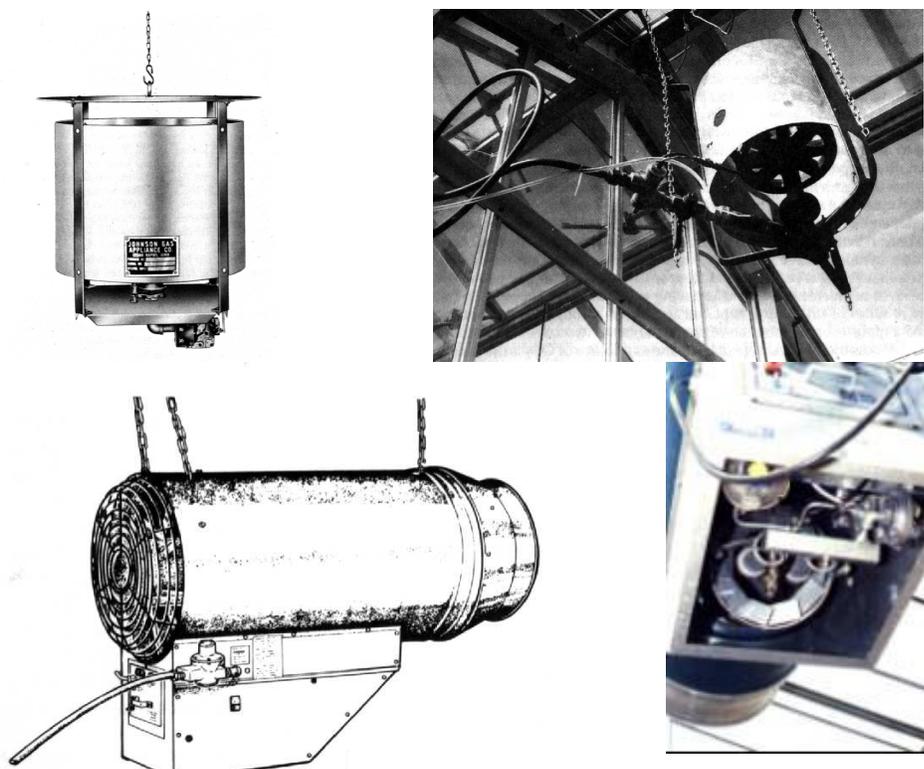


**Figura 4.** Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> bajo invernadero (cultivo de pepino desarrollado): (a) un día de diciembre con la ventilación cerrada; (b) un día de abril con la ventilación cerrada hasta las 10 h. La línea discontinua indica la concentración de CO<sub>2</sub> al exterior.

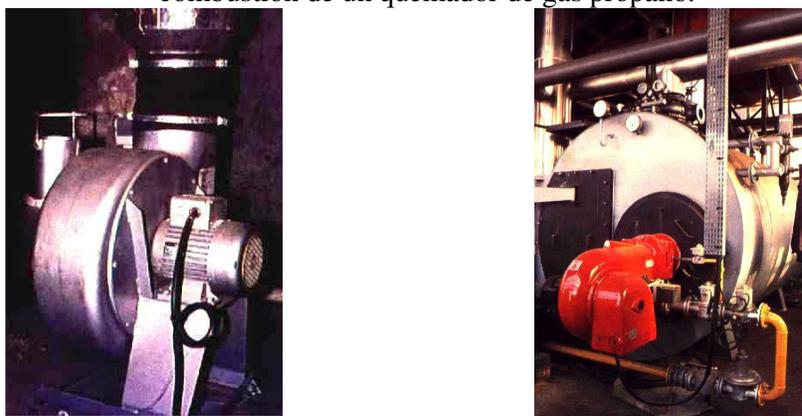
#### 4- LOS SISTEMAS DE ENRIQUECIMIENTO

Los dos principales sistemas utilizados para el enriquecimiento en CO<sub>2</sub> son:

- Inyección directa a partir de combustión de gases (Figuras 5 y 6).

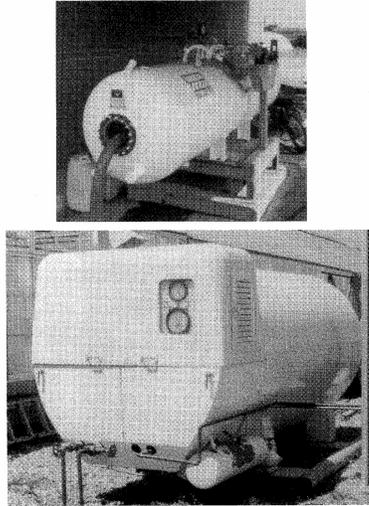


**Figura 5.** Ejemplos de generador de CO<sub>2</sub> “caliente” por inyección directa de gases de combustión de un quemador de gas propano.

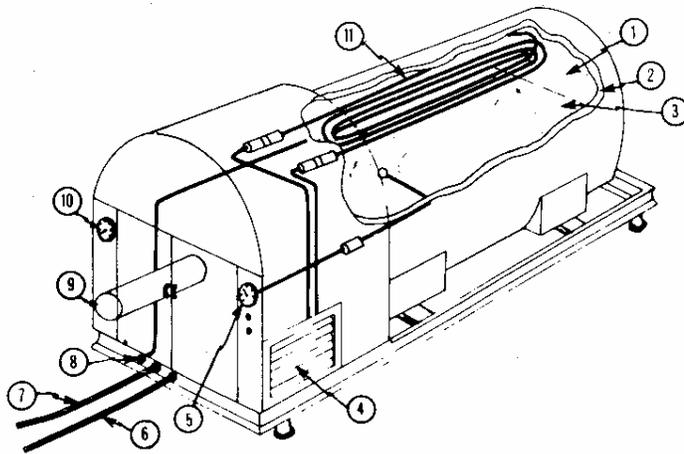


**Figura 6.** Recuperación de CO<sub>2</sub> “caliente” a partir de los gases de combustión de las calderas. A la derecha, el CO<sub>2</sub> se distribuye vía el tubo amarillo.

- Inyección a partir de CO<sub>2</sub> líquido (CO<sub>2</sub> “frío”). Se utilizan cisternas o tanques con CO<sub>2</sub> líquido a alta presión (Figuras 7 a 9).



**Figura 7.** Tipos de cisternas de CO<sub>2</sub> “frío” (Hanan, 1998).



**Figura 8.** Componentes de un sistema de almacenamiento de CO<sub>2</sub> líquido (Hicklenton, 1988):

- (1) vapor de CO<sub>2</sub> a saturación
- (2) Aislamiento
- (3) CO<sub>2</sub> líquido
- (4) Unidad de refrigeración
- (5) Indicador de nivel de CO<sub>2</sub>
- (9) Vaporizador
- (10) Sensor de presión
- (11) Bobina de refrigeración



**Figura 9.** Tanques de almacenamiento de CO<sub>2</sub> frío para una explotación de 3 ha de invernaderos.

## 5- DISTRIBUCIÓN DE CO<sub>2</sub> EN EL INTERIOR DEL INVERNADERO

La distribución de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero se realiza generalmente a través de tubos plásticos flexibles y permeables al CO<sub>2</sub> que se ubican al interior de la vegetación o ligeramente por encima de las plantas (Figura 10). En algunos casos, el CO<sub>2</sub> se distribuye a través de bocas situadas en diversos puntos del invernadero.



**Figura 10.** Distribución de CO<sub>2</sub> al interior del invernadero por medio de tubos o de bocas ubicadas en varios puntos del invernadero (foto de abajo a la derecha).

Las medidas del nivel de CO<sub>2</sub> se realizan generalmente con un analizador de CO<sub>2</sub> por infrarrojos (IRGA, Figura 11a, ver también Unidad 2).

En el caso de inyección del CO<sub>2</sub> contenido en los gases de combustión directa de los generadores de aire caliente (ver Unidad 3), la legislación vigente en materia de seguridad e higiene impone la instalación de un detector de monóxido de carbono (CO, Figura 11 b), gas altamente tóxico para el ser humano.



**Figura 11a.** Analizador de CO<sub>2</sub>, tipo IRGA (Infra-Red Gas Analyser).



**Figura 11b.** Analizador de CO (necesario en caso de enriquecimiento a partir de gases de combustión).

## 6- UNIDADES Y TERMINOLOGÍA

El CO<sub>2</sub> es un gas incoloro, inodoro y no inflamable a temperatura ambiente. Su peso molecular es 44 g mol<sup>-1</sup> y, en condiciones estándar de presión y de temperatura su densidad es  $\rho(\text{CO}_2) = 1,98 \text{ kg m}^{-3}$ .

El Cuadro 1 da un ejemplo de las magnitudes utilizadas para caracterizar la cantidad de un constituyente dentro de una mezcla. Se ha considerado el caso general de una mezcla de gases (por ejemplo el aire) con *i* constituyentes (ejemplo: CO<sub>2</sub>, vapor de agua, O<sub>2</sub>, etc. con:

$m$  = masa total de aire (g, kg, etc. )

$\rho_a$  = densidad del aire (kg m<sup>-3</sup>)

$V$  = volumen total de aire (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, etc.)

$i$  = constituyente de la mezcla (en este caso el CO<sub>2</sub>)

$m_i$  = masa del constituyente  $i$

$n_i$  = número de moles del constituyente  $i$

$M_i$  = peso molecular del constituyente  $i$

La cantidad de CO<sub>2</sub>, o bien de otro constituyente del aire, se caracteriza por medio de las magnitudes siguientes (Cuadro 1):

- Concentración másica (g m<sup>-3</sup>)
- Concentración molar (mol m<sup>-3</sup>)
- Fracción másica (g kg<sup>-1</sup>)
- Presión (kPa)
- Partes por millón (ppm)
- Volumen por millón (vpm)
- Porcentaje (%)

Para establecer la equivalencia entre unidades basta con conocer el peso molecular del CO<sub>2</sub> ( $M = 44 \text{ g mol}^{-1}$ ), su densidad (1,98 kg m<sup>-3</sup> a presión y temperatura normal) y la ecuación de los gases perfectos, como se detalla en el Cuadro 2.

**Cuadro 1.** Magnitudes utilizadas para caracterizar la cantidad de un constituyente, en este caso CO<sub>2</sub>, dentro de una mezcla.

| Magnitud                             | Expresión              | Unidades (i=CO <sub>2</sub> )   |
|--------------------------------------|------------------------|---|
| Concentración másica, x <sub>i</sub> | = m <sub>i</sub> /V    | g CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> aire; kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> aire; etc.                         |
| Concentración molar, x <sub>mi</sub> | = n <sub>i</sub> /V    | mol <sub>CO<sub>2</sub></sub> /m <sup>3</sup> aire; μmol <sub>CO<sub>2</sub></sub> /m <sup>3</sup> aire; etc. |
| Fracción másica, q <sub>i</sub>      | = m <sub>i</sub> /m    | g <sub>CO<sub>2</sub></sub> /kg <sub>aire</sub> ; kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> /kg <sub>aire</sub> ; etc.     |
| Fracción molar, q <sub>mi</sub>      | = n <sub>i</sub> /n    | mol <sub>CO<sub>2</sub></sub> /mol <sub>aire</sub> ; μmol <sub>CO<sub>2</sub></sub> /mol <sub>aire</sub> etc. |
| Presión parcial, e <sub>i</sub>      | = n <sub>i</sub> R T/V | Pa, kPa   |
| Volumen por millón                   |                        | (vpm)   |
| Partes por millón (ppm)              |                        | (ppm)   |
| Porcentaje (%)                       |                        | (%)   |

**Cuadro 2.** Equivalencia entre unidades, siendo R = constante de los gases perfectos para el aire = 0.00831 (kPa m<sup>3</sup> mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) y T la temperatura en K.

| Magnitud  | Equivalencia (i= CO <sub>2</sub> )  |
|---|---|
| Concentración másica<br>x <sub>i</sub> (g <sub>CO<sub>2</sub></sub> /m <sup>3</sup> aire) | $= x_{mi} M_i = \frac{e_i}{RT} M_i = \frac{e_i}{RT} M_i = q_i \rho$               |
| Concentración molar:<br>x <sub>mi</sub> (mol CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> aire)        | $\frac{n_i}{V} = \frac{e_i}{RT}$  |
| Fracción másica : q <sub>i</sub> (g CO <sub>2</sub> /kg <sub>aire</sub> )                 | $= \frac{e_i}{RT} \frac{M_i}{\rho}$   |
| Partes por millón (ppm)   | = 1 μmol CO <sub>2</sub> /mol aire = 1,96 mg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> aire |
| Volumen por millón (vpm)  | 44,64 μmol CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> aire                                   |
| Porcentaje (%)  | 10 <sup>4</sup> ppm   |

