

YAMEL LÓPEZ FORERO

DISEÑO: ELKIN J. CALLE / FOTOGRAFÍA: JESÚS GONZÁLEZ



Elementos de FISIOLÓGÍA vegetal tropical





ELEMENTOS DE FISIOLÓGIA VEGETAL TROPICAL
[2013]

Autor: **YAMEL LÓPEZ FORERO**
Ingeniero Agrónomo / Msc. Fisiología Vegetal / Msc. Biología Aplicada
Phd Fisiología Vegetal
Profesor Emérito Universidad Nacional de Colombia

Nota: Reservados todos los derechos de PROPIEDAD INTELECTUAL sobre la presente obra.
Hecho el registro ante el Ministerio de Gobierno de la República de Colombia.

DEDICATORIA

Dedico, Con amor mi Norte, y a:
Catalina, Fernando, Luis David, Juan Felipe, Samuel, Miró, Juno y Elisa,
mis hijos y nietos,
ellos han sido una bendición y la luz de mis ojos.

Y con infinita gratitud y afecto a la stirpe López Forero,
a Rocío, Karim y a todos aquellos que me han dado aliento
en medio de la tempestad.

También dedico este esfuerzo a los comandantes Ernesto Guevara de la Serna
y Hugo Chávez Frías, quienes junto con el camarada Ho-Chi Minh
han demostrado que es posible combatir y vencer al capitalismo
en su fase superior, el imperialismo.

Yamel



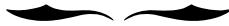
*Dichoso el que halla sabiduría,
 El que adquiere inteligencia.
 Porque ella es de más provecho que la plata y rinde más ganancias
 Que el oro.
 ¡Es más valiosa que las piedras preciosas!
 ¡Ni lo más deseable
 Se le puede comparar!*

*Con la mano derecha ofrece larga vida;
 Con la izquierda, honor y riquezas.
 Sus caminos son placenteros y en sus senderos hay paz.*

Proverbios 3,13

*Pero ahora el sol está muy lejos, lejos de mi silencio y de mi mano
 El sol está en la aldea y alegra las espigas
 Y trabaja hombro a hombro con los hombres del campo*

Del poema "Sol", de **Aurelio Arturo**
 [poeta colombiano]



PRESENTACIÓN

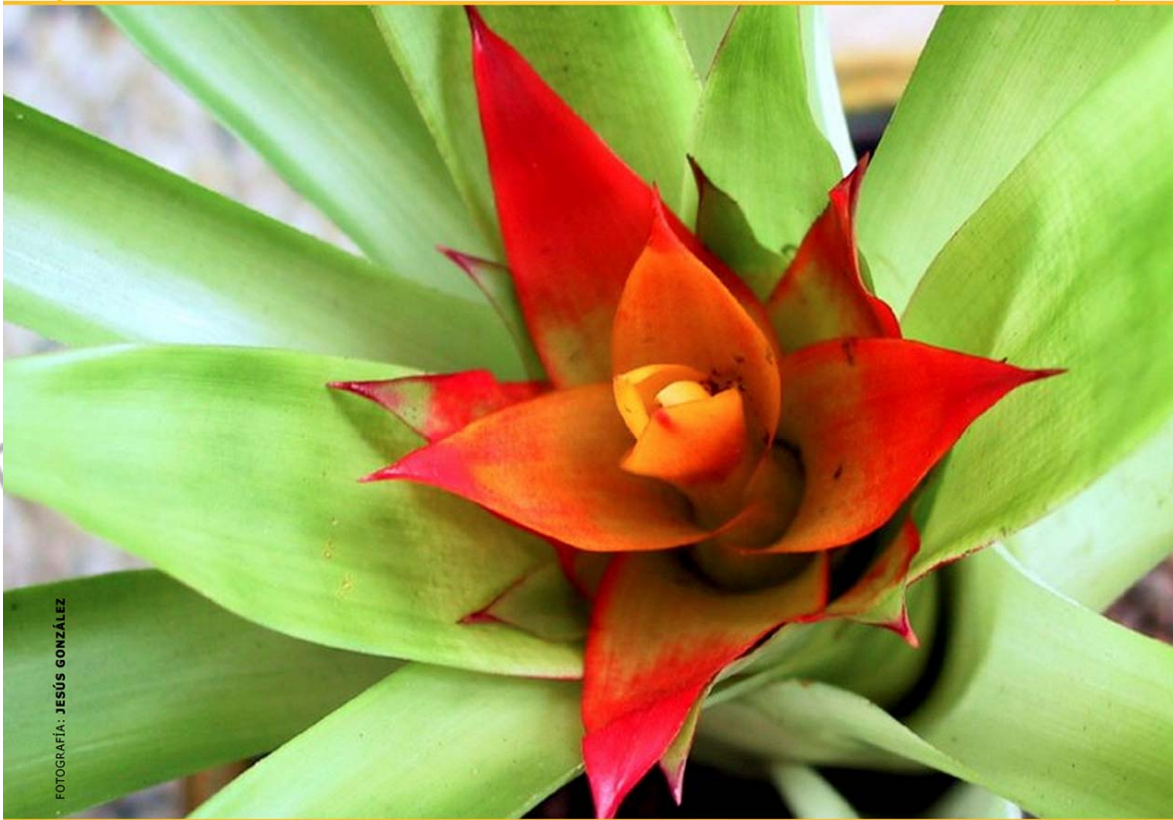
Este libro es el resultado de la síntesis efectuada por su autor durante 37 años como docente e investigador en la Universidad Nacional de Colombia, basada tanto en los resultados personales de sus trabajos de investigación en fisiología de cultivos tropicales, como en la literatura consultada hasta el día de su última corrección, síntesis que incluyó las notas de clase enriquecidas por la participación colectiva de los alumnos de los diferentes cursos ofrecidos mientras pudo actuar activamente como docente en la Universidad Nacional de Colombia.

El autor [Marzo, 2013]

El autor quiere expresar su gratitud a la Universidad Nacional de Colombia, mi hogar durante tantos años, al Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, al Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFÉ, de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y a mis inolvidables maestros Constant Myttenaere de la Université Catholique de Louvain y Mabrouk El-Sharkawy del CIAT, quienes me enseñaron Fisiología Vegetal y a ser un mejor ser humano. Es por todos ellos que puedo afirmar en esta etapa de mi vida, como Don Quijote: "Encantadores podrán quitarme la ventura, pero nunca el esfuerzo y el ánimo".

CAPÍTULO I

EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (UNIDADES SI)



FOTOGRAFÍA: JESÚS GONZÁLEZ

ELEMENTOS DE FISIOLÓGÍA VEGETAL TROPICAL

YAMEL LÓPEZ FORERO

CAPÍTULO I

EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

(UNIDADES SI)

A medida que la ciencia se desarrolla, ella depende cada vez más de la medición precisa de cantidades físicas que requieren de un sistema de medidas estándar, reconocidas y aceptadas por todos aquellos que las realizan y procuran comunicar sus resultados. Como respuesta a esta necesidad, durante la época de la Revolución Francesa (1789-1799), se desarrolló el Sistema Métrico de medidas. Este ha sido el primer intento en la historia de la Ciencia para establecer un sistema decimal de medidas que simplifique y unifique los cálculos.

Historia

El sistema métrico decimal, que toma su nombre de la unidad de longitud, el metro (del griego *metro*, medida), fue desarrollado en Francia en la década de 1790, y adoptado luego como sistema común de pesos y medidas por muchos países.

El metro (*m*) se definió originalmente como una diez millonésima parte de la distancia entre el ecuador y el polo norte a lo largo del meridiano de París (la diezmillonésima parte de un cuarto de meridiano terrestre), suponiendo que la tierra es perfectamente esférica. Esta distancia fue medida inicialmente por científicos franceses entre 1792 y 1799. Más tarde, después de descubrirse que la forma de la Tierra no es totalmente esférica, el metro se definió como la distancia entre dos líneas finas trazadas en una barra de aleación de platino e iridio, el Metro Patrón Internacional, conservado en París.

Cerca de un siglo después, y luego de reconocer la necesidad de mejorar el Sistema, durante la Convención del Metro firmada por 71 países en París en 1875, se estableció la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM). La tarea del BIPM es asegurar la unificación mundial de las medidas físicas. Opera con oficinas y laboratorios en Sèvres, cerca de París, bajo la supervisión del Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM), que consta de 18 miembros de diferentes nacionalidades. Este comité, se encuentra bajo la

autoridad de la Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM), que consta de delegados de los Estados miembros de la Convención del Metro (46 en 1991).

A mediados del siglo 20, el Sistema Métrico se utilizaba ampliamente en la ciencia, pero en muchos casos, las ramas individuales de la ciencia habían desarrollado sus propias unidades y términos especializados. Por ejemplo, el sistema CGS (centímetro.gramo.segundo) de unidades mecánicas, utilizado especialmente en Física, incluía términos tales como la dina, el ergio, el pois, el stoke, el gauss, el oersted y el maxwell, los cuales se consideran obsoletos hoy día.

Con el fin de unificar aún más el Sistema Métrico, se decidió estudiar y recomendar un sistema práctico de unidades de medida aconsejables para ser adoptados por todos los países firmantes de la Convención del Metro. Esta conferencia (1954), propuso un conjunto de símbolos para seis unidades básicas. El nombre de Sistema Internacional de Unidades (Système International d'Unités, International System of Units) se adoptó en 1960, con la abreviatura internacional SI. Se considera que el SI es, de lejos, el mejor sistema de medidas que la humanidad ha sido capaz de desarrollar.

En Gran Bretaña, Estados Unidos y muchos otros países angloparlantes, todavía se emplean las pulgadas, pies, millas, libras o galones como unidades comunes para medir longitudes, pesos y volúmenes. Sin embargo, estas unidades tradicionales, están basadas legalmente en patrones métricos.

Cantidades y unidades

En la ciencia en general y en las ciencias vegetales en particular, se debe tratar con cantidades físicas. Para comunicar estas cantidades físicas, se usan tres clases de símbolos: Uno para la cantidad física, otro para el valor numérico (por ejemplo, un número) y otro para la unidad. Por ejemplo, si se desea dar cuenta de la longitud de un objeto, se puede escribir

$$l = 5.67 \text{ m}$$

Si se quiere que esta notación constituya una forma de comunicación significativa, aquellos a quienes se espera comunicarla deben estar de acuerdo en que el símbolo para la longitud es l , que se usan caracteres arábigos y que el metro m representa la medida estándar de longitud, equivalente a la longitud recorrida por la luz en el vacío, durante un intervalo de tiempo de $(299\,792\,458)^{-1} \text{ s}$ ($\frac{1}{299\,792\,458} \text{ s}$). Para propósitos prácticos, en la construcción de los instrumentos de medidas de longitud, los fabricantes se guían por un estándar confiable.

El símbolo para la cantidad física (longitud en el ejemplo) se escribe en cursiva y el símbolo para la unidad se escribe en tipo romano. Esta regla también se debe seguir con los símbolos griegos y con los del alfabeto romano.

Unidades del Sistema Internacional (SI)

Al SI también se le llama Sistema Coherente de Unidades. En este sistema, se definen unas unidades para las cantidades básicas (unidades básicas), y luego se derivan otras unidades a partir de las unidades básicas, con base en las igualdades entre las cantidades. Por ejemplo, la ecuación para la velocidad v muestra que la velocidad equivale al cambio gradual en la distancia por cada cambio gradual en el tiempo

$$dv = \frac{dl}{dt}$$

Así, la unidad para la velocidad es el metro por segundo (m/s ó $m \text{ s}^{-1}$). En consecuencia, el SI incluye unidades básicas y unidades derivadas (Tabla 1).

Tabla 1. Unidades básicas del SI

Magnitud o Cantidad Física	Unidad	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg

Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Intensidad lumínica	candela	cd
Cantidad de sustancia	mole	mol

Además, existen dos unidades suplementarias, el *radián* (*rad* para el ángulo plano) y el *esterradián* (*sr* para el ángulo sólido).

Las unidades espaciales (longitud, área y volumen) se pueden combinar con las de masa, tiempo y temperatura para derivar las unidades de cualquier cantidad física.

La unidad básica de longitud es el metro (*m*), definido inicialmente la longitud de una barra de iridio preservada en Sèvres (Francia), equivalente a la diez millonésima parte de la longitud de un cuarto de meridiano terrestre. En 1960 se definió el metro como una longitud igual a 1 650 763.73 longitudes de onda de la radiación en el vacío, correspondiente a la transición entre los niveles $2p_{10}$ y $5d_5$ del átomo de kriptón-86. En 1983, el metro se redefinió como la distancia que recorre la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $299\,792\,458\text{ s}^{-1}$. Por razones históricas, el gramo (*g*), no es la unidad básica para la masa en el SI, siendo el kilogramo (*kg*), la única unidad básica cuyo nombre porta un prefijo. El *kg*, es igual a la masa de un prototipo internacional de kilogramo fabricado en una aleación de platino-iridio, que se guarda desde 1889 en el BIPM, bajo condiciones específicas.

En este punto, es necesario aclarar una confusión común que consiste en asimilar *peso* a *masa*. El peso, es una medida de la fuerza ejercida por la acción de la gravedad, mientras la *masa* es una cantidad fundamental que no cambia con la fuerza de la gravedad (por ejemplo, con la localidad). Por otro lado, el peso de los objetos, es cerca del 1% menor en el Ecuador que en los polos, y es el 82% menor en la luna. Por esta razón, es técnicamente incorrecto usar la palabra *peso* conjuntamente con la unidad *kg*. La unidad apropiada para el peso es el *newton*. En la tierra, el peso de un objeto de 10 *kg* de *masa* es de cerca de 98 *newtons*. Aunque en muchos campos técnicos y en el uso cotidiano, se considera que el

término “peso” es un sinónimo aceptable para *masa*, los científicos de las plantas deben utilizarlo en su forma apropiada. Por ejemplo, se debe decir que Rubisco tiene una masa molecular de 600 kDa y no un peso molecular de 600 kDa.

Una balanza, compara la masa desconocida de un objeto, contra una masa estándar definida. Por esta razón, la balanza mide la masa verdadera de los objetos. Para que funcionen, todas las balanzas dependen de una fuerza de aceleración, pero la magnitud de la fuerza de aceleración no afecta la lectura. Desafortunadamente, la magnitud de la fuerza de aceleración afecta las medidas de *masa* en las “balanzas” electrónicas porque ellas son realmente escalas que miden el peso. Usualmente, esto no es un problema serio debido a que la fuerza de gravedad es constante para una localidad dada, y las balanzas electrónicas y de resorte se calibran con un conjunto estándar de objetos de masa conocida.

Todos los objetos con masa, también tienen un volumen y, por esta razón, desplazan algo de aire cuya densidad es de 1.205 kg m^{-3} [aire seco a presión atmosférica estándar (1.01325 kPa y $20 \text{ }^\circ\text{C}$)]. En algunas situaciones, como cuando se debe medir la masa de un globo de helio, pudiera ser necesaria una corrección debido a este desplazamiento de volumen. Sin embargo, la mayoría de las plantas tienen una densidad similar a la del agua (1000 kg m^{-3}) por lo cual, tal corrección sólo alcanza un valor cercano al 0.1 %.

La cantidad de una sustancia, se puede expresar sea en términos de masa o sea en términos del número de partículas de las cuales está compuesta: El *mole* es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como las que se encuentran en 0.012 kg de ^{12}C , que contienen el Número de Avogadro (N) de átomos de ^{12}C ($N = 6.022045 \times 10^{23}$ partículas). Cuando se usa el *mole*, se debe especificar cuál es la entidad elemental (átomo, molécula, ión, electrón, otra partícula o grupo específico de tal partícula). Los fisiólogos vegetales, incluyen los fotones entre las partículas que pueden ser expresadas en moles. Se debe tener en cuenta que el *einstein* (1.0 moles de fotones) no es una unidad del SI y, por tanto, no debe ser empleado en Fisiología Vegetal.

La definición astronómica de segundo (*s*), tomado como $(86\,400)\text{día solar}^{-1}$ promedio o día solar promedio/86400, es una medida muy inexacta cuando se trata de magnitudes temporales muy pequeñas tales como la vida media de un puente de H (10^{-9}s). Por esta razón, en 1967, se definió el segundo (*s*) como la duración de 9192631770 períodos de la

radiación (movimiento ondulatorio) correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado básico del isótopo ^{133}Cs . Aunque los minutos, horas, días, meses y años no son oficialmente parte del SI, los fisiólogos vegetales pueden continuar usándolos cuando lo consideren apropiado.

El amperio (ampere) (A), se define como la corriente constante que se requiere para producir en el vacío una fuerza de $2 \times 10^{-7} \text{ newton m}^{-1}$ de longitud entre dos conductores paralelos de longitud infinita separados por 1.0 m de distancia. Ya que la fuerza (en *newton*) se define en términos de longitud, masa y tiempo, la corriente también debe ser definida en esos términos.

El *kelvin* (K), se definió en 1967 como 273.15^{-1} de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. En el mismo año, se cambió la notación antigua de grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) por la de *kelvin* (K). Además de la definición de la cantidad física temperatura termodinámica (símbolo T, unidad K), se usa también la temperatura Celsius (símbolo *t*, unidad $^{\circ}\text{C}$), donde por definición $t = T - T_0$ y $T_0 = 273.15 \text{ K}$. Un intervalo o diferencia de temperatura Celsius, pueden ser expresados tanto en kelvins como en grados Celsius.

La unidad para medir la intensidad lumínica es la candela (cd), definida inicialmente como la intensidad lumínica percibida por el ojo humano en comparación con la intensidad lumínica emitida por el platino congelado. En 1979 se redefinió como una radiación monocromática con una frecuencia de 540×10^{12} hertz ($540 \times 10^{12} \text{ Hz}$) y una intensidad radiante de $683^{-1} \text{ watt esteradián}^{-1}$. El watt (unidad de potencia), también combina longitud, masa y tiempo.

Aunque el SI reconoce siete unidades básicas, estrictamente hablando, sólo las unidades de longitud, masa, tiempo, temperatura y número de unidades elementales de materia (mole), son verdaderamente básicas, ya que ellas no se derivan de ninguna otra unidad.

Debido a que la candela (cd), y las unidades derivadas de ella, se basan en la sensibilidad del ojo humano, y las sensibilidades vegetales pueden ser muy diferentes (dependiendo del pigmento relacionado), la candela y sus derivados (como el lux) no deben ser utilizados por los estudiosos de las plantas, a pesar de que la definición más reciente se basa en la luz monocromática. Se pueden derivar otras medidas de radiación a partir de la potencia por unidad de área (watt m^{-2}), o el número de fotones por unidad de área por unidad de tiempo

(usualmente, $\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Estas son las unidades que deben ser utilizadas por los científicos de las plantas, y en cada caso, se deben especificar las longitudes de onda o las frecuencias correspondientes.

Con mucha frecuencia en Fisiología Vegetal (y en Biología General), para medir una determinada variable, es necesario utilizar fracciones o múltiplos de las unidades básicas, porque la magnitud del fenómeno es o muy pequeña, o muy grande. En estos casos se utilizan sean los múltiplos, o sean los submúltiplos de las unidades básicas, que se nombran con prefijos griegos siguiendo el Sistema Decimal (Tabla 2):

Tabla 2: Prefijos del SI

Múltiplos			Submúltiplos		
Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo	Factor
deka	da	10^1	deci	D	10^{-1}
hecto	h	10^2	centi	C	10^{-2}
kilo *	k *	10^3	mili *	m *	10^{-3} *
Mega *	M *	10^6	micro *	μ *	10^{-6} *
Giga *	G	10^9	nano *	n *	10^{-9} *
tera	T	10^{12}	pico *	p *	10^{-12} *
peta	P	10^{15}	femto	F	10^{-15}
exa	E	10^{18}	atto	A	10^{-18}
zetta	Z	10^{21}	zepto	Z	10^{-21}
yotta	Y	10^{24}	yocto	Y	10^{-24}

(*) Prefijos de los múltiplos y submúltiplos, de uso común en Fisiología Vegetal y en Biología General.

A partir de las unidades básicas del SI, se pueden derivar unidades que son muy importantes en Biología y, en particular, en Fisiología Vegetal. Se debe aclarar que la

aceleración estándar debida a la gravedad es una unidad determinada experimentalmente, y que la unidad unificada de masa atómica es arbitraria (Tabla 3).

Tabla 3. Unidades derivadas del SI, de interés en Fisiología Vegetal y en Biología general.

Cantidad (Símbolo)	Nombre de la unidad	Símbolo	Definición
Area (A)	metro cuadrado	m^2	$m \times m$
Volumen (V)	metro cúbico	m^3	$m \times m \times m$
Velocidad	metros por segundo	$m \text{ s}^{-1}$	$m \text{ s}^{-1}$
Fuerza	newton	N	kg m s^{-2}
Energía (E), Trabajo (W) o Calor (Q)	joule	J	N m $\text{m}^2 \text{ kg s}^{-2}$
Potencia (P)	Wattio	W	J s^{-1} $\text{m}^2 \text{ kg s}^{-3}$
Presión	Pascal	Pa	N m^{-2} $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$
Frecuencia (ν)	Hertz	Hz	ciclo s^{-1}
Carga eléctrica	Columbio	C	A s^{-1}
Potencial eléctrico (V ó ϕ)	Voltio	V	W A^{-1} $\text{J A}^{-1} \text{ s}^{-1}$ J C^{-1}
Resistencia eléctrica (R)	Ohm	Ω	V A^{-1}
Conductancia eléctrica (G)	Siemens	S	A V^{-1} Ω^{-1}
Capacitancia eléctrica (C)	Faradio	F	C V^{-1}
Concentración (c)	moles por metro cúbico	mol m^{-3}	mol m^{-3}
Irradiancia (energía, E)	wattios por metro cuadrado	W m^{-2}	$\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
Irradiancia (moles de	moles de fotones por metro	$\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

fotones)	cuadrado por segundo		
Aceleración estándar debida a la gravedad	Aceleración estándar debida a la gravedad	g_n	9.806 m s^{-2}
Unidad unificada de masa atómica	Unidad unificada de masa atómica	u	12^{-1} de la masa del ^{12}C

El SI, fue propuesto con el objetivo de establecer un sistema coherente en el cual, las unidades derivadas, son las combinaciones de las unidades básicas, sin que se necesite incluir factores numéricos de multiplicación para convertir unas en otras. Sin embargo, en 1969, el CIPM aceptó que hay usuarios del SI que prefieren emplear algunas unidades que no forman parte del SI pero que son importantes y de amplia utilización, entre las que se incluyen la unidad unificada de masa atómica y la aceleración estándar debida a la gravedad. Todas estas unidades, requieren factores de conversión y por esta razón, pierden algunas de las ventajas que ofrece la coherencia del SI. Se recomienda, que su uso se restrinja a casos especiales. Por ejemplo, cuando se trata de exponer sus metodologías y resultados, para los investigadores en plantas es necesario utilizar los minutos, horas, días, semanas y años (como en el caso de los fenómenos asociados con el desarrollo) (Tabla 4). El litro (*l* ó *L*), es una unidad mucho más conveniente para los investigadores en plantas que el metro cúbico (m^3), unidad de volumen del SI.

Tabla 4. Algunas unidades que se usan con el SI pero que no forman parte de él.

Nombre	Símbolo	Valor en unidades SI
minuto	<i>min</i>	60 s
hora	<i>hr</i>	3600 s
día	<i>d</i>	86 400 s
grado	°	$(180^{-1}\pi)$ rad
minuto de arco	'	$(60^{-1})^\circ$ $(10\ 800^{-1})$ rad

segundo de arco	“	$(60^{-1})'$ $(648\ 000^{-1}\pi)$ rad
litro	<i>L ó l</i>	10^{-3} m ³
unidad unificada de masa atómica	<i>U</i>	12^{-1} de la masa del isótopo ¹² C
aceleración estándar debida a la gravedad	<i>g_n</i>	9.806 m s ⁻²

Algunas unidades utilizadas con cierta frecuencia, deben ser evitadas, ya que introducen confusión cuando se presentan los datos y no son aceptadas por el SI (Tabla 5):

Tabla 5: Algunas unidades métricas descartadas.

Unidad métrica descartada	Símbolo de la unidad descartada	Unidad del SI aceptable	Símbolo de la unidad aceptable
micrón o micra	μ	micrómetro	μm
milimicrón o milimicra	$m\mu$	nanómetro	nm
angstrom	A°	10^{-1} nm	10^{-1} nm
bar	bar	10^{-1} megapascuales 100 kilopascuales	10^{-1} MPa 10^2 kPa
caloría	cal	4.182 joules	4.182 J
grado centígrado	$^\circ\text{C}$	grado Celsius	$^\circ\text{C}$
hectárea	ha	10 000 metros cuadrados	10 000 m ²
einstein	E, Ei	mole de fotones mole de cuantos	$\text{mol}_{(\text{fotones})}$ $\text{mol}_{(\text{cuantos})}$
dalton	Da	unidad unificada de masa atómica	u
gravedad estándar	<i>g, g, G, G, x g</i>	Aceleración estándar debida a la gravedad	<i>g_n</i>
solución molar	M	moles por litro	mol L^{-1}
solución molal	m	moles por kg	mol kg^{-1}

partes por millón	ppm	miligramos por kilogramo micromoles por mol milímetros cúbicos por metro cúbico	mg kg^{-1} $\mu\text{mol mol}^{-1}$ $\text{mm}^3 \text{m}^{-3}$
partes por billón	ppb	microgramos por kilogramo nanomoles por mol milímetros cúbicos por metro cúbico	$\mu\text{g kg}^{-1}$ nmol mol^{-1} $\text{mm}^3 \text{m}^{-3}$

Nota: En los países anglosajones billón equivale a mil millones o sea el mismo millardo latino (1 000 000 000 ó 10^9).

