

ISA compacta (0–100k ft)

Antonio Pérez

1 de octubre de 2025

Tabla D — Nomenclatura (símbolos, descripción, unidades y valor)

Símbolo	Descripción (ES / EN)	Unidades (SI)	Valor (si es constante)
h	Altitud geométrica / Geometric altitude	m (ft)	—
T	Temperatura / Static temperature	K (°C)	—
p	Presión estática / Static pressure	Pa	—
ρ	Densidad / Air density	kg/m ³	—
a	Velocidad del sonido / Speed of sound	m/s (ft/s)	—
μ	Viscosidad dinámica / Dynamic viscosity	Pa·s (cP)	—
σ	Razón de densidad ρ/ρ_0 / Density ratio	—	—
T_0	Temp. nivel del mar	K	288.15
p_0	Presión nivel del mar	Pa	101 325
ρ_0	Densidad nivel del mar	kg/m ³	1.225
g_0	Gravedad estándar	m/s ²	9.807
R	Constante del gas del aire	J/(kg·K)	287.05
γ	Razón de calores	—	1.4
L	Gradiente térmico (troposfera)	K/m	−0.007
h_{11}	Tropopausa	m	11 000
T_{11}	Temp. en h_{11}	K	216.65
p_{11}	Presión en h_{11}	Pa	$p_0 \left(\frac{T_{11}}{T_0} \right)^{-\frac{g_0}{L R}} \approx 22\,631,70$
ρ_{11}	Densidad en h_{11}	kg/m ³	$\frac{p_{11}}{R T_{11}} \approx 0,364$
μ_0	Viscosidad ref. (Sutherland)	Pa·s	1.716e−5
T_{ref}	Temp. de referencia	K	273.15
S	Constante de Sutherland	K	110.4
K	$g_0/(R T)$	m ^{−1}	isoterma: $K = \frac{g_0}{R T_{11}} \approx 1,577\text{e}−4$

ISA h_{11}

En ISA, $h_{11} = 11$ km es la **tropopausa**: debajo (0–11 km) T cae linealmente ($L = -6,5$ K/km); entre 11–20 km la atmósfera es **isoterma** con $T = T_{11} = 216,65$ K. h_{11} fija las condiciones de borde: $p_{11} = p_0(\frac{T_{11}}{T_0})^{-g_0/(LR)}$, $\rho_{11} = p_{11}/(RT_{11})$, y $K = g_0/(RT_{11})$. Entonces, para 11–20 km: $p(h) = p_{11}e^{-K(h-h_{11})}$ y $\rho(h) = \rho_{11}e^{-K(h-h_{11})}$ (con a y μ casi constantes). Sobre 20 km (65 617–104 987 ft), ISA impone +1 **K/km**: $T(h) = T_{20} + 0,001(h - 20\,000)$, lo que hace crecer ligeramente $a = \sqrt{\gamma RT}$ y $\mu(T)$.

Tabla E — Fórmulas por capa

Magnitud	Fórmula	Capa	Nota
$T(h)$	$T = T_0 + Lh$	Troposfera (0–11 km)	$L < 0$.
$p(h)$	$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-g_0/(LR)}$	Troposfera	Empalma con p_{11} .
$p(h)$	$p = p_{11} \exp \left[-\frac{g_0}{RT_{11}}(h - h_{11}) \right]$	Isoterma (11–20 km)	$T = T_{11}$.
$T(h)$	$T = T_{20} + 0,001(h - 20\,000)$	20–32 km	Gradiente +1 K/km.
$p(h)$	$p = p_{20} \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-g_0/(0,001 R)}$	20–32 km	Ley con gradiente > 0 .
$\rho(h)$	$\rho = p/(RT)$	Todas	Gas ideal.
$a(T)$	$a = \sqrt{\gamma RT}$	Todas	Depende de T .
$\mu(T)$	$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{3/2} \frac{T_{\text{ref}} + S}{T + S}$	Todas	Sutherland.

Mapa ISA (ft): 0–36 089 (troposfera), 36 089–65 617 (isoterma, $T = T_{11}$), 65 617–104 987 (estrato inferior, +1 K/km).

¿Qué es 65 617–104 987 ft, “+1 K/km”? Es la capa **20–32 km** (estrato inferior ISA) donde el **gradiente térmico es positivo**: por cada km que subes, la temperatura **aumenta 1 K**. Matemáticamente

$$T(h) = T_{20} + 0,001(h - 20\,000 \text{ m}), \quad T_{20} = 216,65 \text{ K}.$$

Al subir T , la **velocidad del sonido** $a = \sqrt{\gamma RT}$ y la **viscosidad** $\mu(T)$ *crecen ligeramente*; la **presión** y la **densidad** siguen bajando, pero con la ley de gradiente positivo:

$$p(h) = p_{20} \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{g_0}{0,001 R}}, \quad \rho(h) = \frac{p}{RT}.$$

Ej.: a 70,000 ft ($\approx 21,3$ km), $T \approx 218$ K (un poco mayor que 216,65 K).

Tabla A — Temperatura, velocidad del sonido y viscosidad (0–100k ft)

Alt (ft)	h (m)	T (K)	T (°C)	a (m/s)	a (ft/s)	μ (Pa·s)	μ (cP)
0	0	288.15	15.0	340.29	1 116.44	1.789e−5	0.018
1000	305	286.17	13.0	339.12	1 112.60	1.780e−5	0.018
2000	610	284.19	11.0	337.94	1 108.74	1.770e−5	0.018
3000	914	282.21	9.1	336.76	1 104.87	1.760e−5	0.018
4000	1 219	280.23	7.1	335.58	1 100.99	1.751e−5	0.018
5000	1 524	278.24	5.1	334.39	1 097.09	1.741e−5	0.017
6000	1 829	276.26	3.1	333.20	1 093.17	1.731e−5	0.017
7000	2 134	274.28	1.1	332.00	1 089.25	1.722e−5	0.017
8000	2 438	272.30	−0.8	330.80	1 085.31	1.712e−5	0.017
9000	2 743	270.32	−2.8	329.60	1 081.35	1.702e−5	0.017
10000	3 048	268.34	−4.8	328.39	1 077.38	1.692e−5	0.017
20000	6 096	248.53	−24.6	316.03	1 036.84	1.591e−5	0.016
30000	9 144	228.71	−44.4	303.17	994.66	1.487e−5	0.015
31000	9 449	226.73	−46.4	301.86	990.34	1.476e−5	0.015
32000	9 754	224.75	−48.4	300.53	986.01	1.466e−5	0.015
35000	10 668	218.81	−54.3	296.53	972.88	1.433e−5	0.014
38000	11 582	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
39000	11 887	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
40000	12 192	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
41000	12 497	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
42000	12 802	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
45000	13 716	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
48000	14 630	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
49000	14 935	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
50000	15 240	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
51000	15 545	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
52000	15 850	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
55000	16 764	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
58000	17 678	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
59000	17 983	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
60000	18 288	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
61000	18 593	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
62000	18 898	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
65000	19 812	216.65	−56.5	295.07	968.07	1.422e−5	0.014
68000	20 726	217.38	−55.8	295.56	969.69	1.426e−5	0.014
69000	21 031	217.68	−55.5	295.77	970.37	1.427e−5	0.014
70000	21 336	217.99	−55.2	295.98	971.05	1.429e−5	0.014
80000	24 384	221.03	−52.1	298.04	977.82	1.446e−5	0.015
90000	27 432	224.08	−49.1	300.09	984.54	1.462e−5	0.015
100000	30 480	227.13	−46.0	302.12	991.21	1.479e−5	0.015

Tabla B — Presión, densidad y razón de densidad (0–100k ft)

Alt (ft)	p (Pa)	p (psi)	ρ (kg/m ³)	ρ (slug/ft ³)	$\sigma = \rho/\rho_0$
0	101 325	14.696	1.225 012	2.376 916e−3	1
1000	97 717	14.173	1.189 565	2.308 137e−3	0.971
2000	94 213	13.664	1.154 908	2.240 891e−3	0.943
3000	90 812	13.171	1.121 029	2.175 155e−3	0.915
4000	87 510	12.692	1.087 915	2.110 904e−3	0.888
5000	84 307	12.228	1.055 555	2.048 115e−3	0.862
6000	81 199	11.777	1.023 936	1.986 765e−3	0.836
7000	78 185	11.340	0.993 048	1.926 830e−3	0.811
8000	75 262	10.916	0.962 877	1.868 289e−3	0.786
9000	72 428	10.505	0.933 412	1.811 119e−3	0.762
10000	69 681	10.106	0.904 643	1.755 296e−3	0.738
20000	46 563	6.753	0.652 695	1.266 438e−3	0.533
30000	30 089	4.364	0.458 311	8.892 702e−4	0.374
31000	28 744	4.169	0.441 651	8.569 454e−4	0.361
32000	27 448	3.981	0.425 459	8.255 272e−4	0.347
35000	23 842	3.458	0.379 595	7.365 361e−4	0.310
38000	20 646	2.994	0.331 983	6.441 535e−4	0.271
39000	19 677	2.854	0.316 404	6.139 252e−4	0.258
40000	18 754	2.72	0.301 556	5.851 154e−4	0.246
41000	17 874	2.592	0.287 405	5.576 576e−4	0.235
42000	17 035	2.471	0.273 918	5.314 883e−4	0.224
45000	14 747	2.139	0.237 137	4.601 209e−4	0.194
48000	12 767	1.852	0.205 294	3.983 367e−4	0.168
49000	12 168	1.765	0.195 660	3.796 439e−4	0.160
50000	11 597	1.682	0.186 479	3.618 283e−4	0.152
51000	11 053	1.603	0.177 728	3.448 487e−4	0.145
52000	10 534	1.528	0.169 387	3.286 659e−4	0.138
55000	9 120	1.323	0.146 642	2.845 332e−4	0.120
58000	7 895	1.145	0.126 951	2.463 266e−4	0.104
59000	7 525	1.091	0.120 994	2.347 672e−4	0.099
60000	7 171	1.04	0.115 316	2.237 502e−4	0.094
61000	6 835	0.991	0.109 905	2.132 502e−4	0.090
62000	6 514	0.945	0.104 747	2.032 430e−4	0.086
65000	5 639	0.818	0.090 682	1.759 519e−4	0.074
68000	4 883	0.708	0.078 258	1.518 454e−4	0.064
69000	4 655	0.675	0.074 496	1.445 452e−4	0.061
70000	4 438	0.644	0.070 919	1.376 054e−4	0.058
80000	2 761	0.401	0.043 522	8.444 661e−5	0.036
90000	1 730	0.251	0.026 888	5.217 150e−5	0.022
100000	1 090	0.158	0.016 720	3.244 218e−5	0.014

Observación. En 36 089 ft–65 617 ft (isoterma) T es constante; por eso a y μ casi no cambian. Desde $\sim 65\,617$ ft (20 km), T aumenta a +1 K/km, elevando levemente a y μ hacia ~ 100 kft.

Interpolación práctica (bracketing 48k–49k ft)

Objetivo. Encontrar la altitud h^* tal que $\sigma(h^*) = \sigma^* = 0,162$.

1) Datos de la tabla (capa isoterma, 48–49 kft).

$$\sigma_{48} = 0,168 \quad (\text{a } 48\,000 \text{ ft}), \quad \sigma_{49} = 0,160 \quad (\text{a } 49\,000 \text{ ft}).$$

Como σ decrece con h , el valor buscado 0,162 cae entre 48k y 49k ft.

2) Proporción dentro del tramo (regla de tres).

$$\theta = \frac{\sigma_{48} - \sigma^*}{\sigma_{48} - \sigma_{49}} = \frac{0,168 - 0,162}{0,168 - 0,160} = 0,75.$$

Interpretación: estamos al *75 % del camino* desde 48k hacia 49k (porque σ^* está 0.006 por debajo de 0.168 en un “salto” total de 0.008).

3) Altitud interpolada.

$$h^* \approx 48,000 \text{ ft} + \theta (49,000 - 48,000) \text{ ft} = 48,000 + 0,75 \times 1,000 = \boxed{48,750 \text{ ft}}.$$

4) Chequeo con ISA exacta (inversión analítica).

$$h_{\text{exacto}} \approx 48,705 \text{ ft} \quad \Rightarrow \quad \text{error} \approx 45 \text{ ft } (0,09 \%).$$

Nota. Entre 48k–49k ft la relación $\sigma(h)$ es casi lineal (segmento corto de una exponencial), por eso la interpolación lineal funciona muy bien en la práctica.