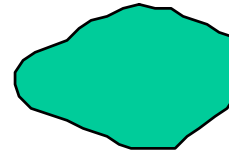


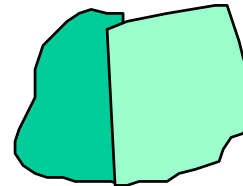
# Sistema eterogeneo

sistema

omogeneo

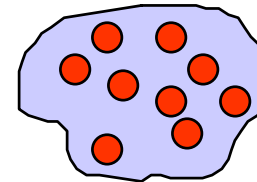


eterogeneo

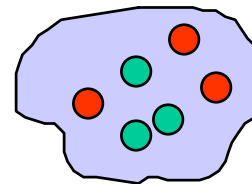


sistema

monocomponente

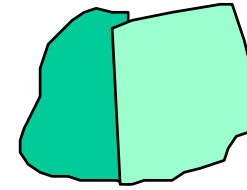


multicomponente



*stato o fase?*

# Sistema eterogeneo



grandezze estensive del sistema eterogeneo  
costituito da due stati (o fasi)  $\alpha$  e  $\beta$

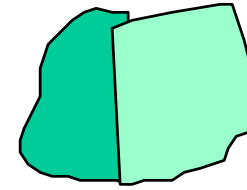
$$M = M_{\alpha} + M_{\beta}$$

$$E = E_{\alpha} + E_{\beta}$$

$$e = \frac{M_{\alpha}}{M} e_{\alpha} + \frac{M_{\beta}}{M} e_{\beta}$$

Le grandezze  
estensive specifiche  
risultano dalla  
media pesata sulle  
masse dei valori  
delle grandezze  
estensive specifiche  
delle singole fasi

# Sistema eterogeneo



grandezze estensive del sistema eterogeneo  
costituito da due stati (o fasi)  $\alpha$  e  $\beta$

$$M = M_{\alpha} + M_{\beta}$$

$$x_{\alpha} = \frac{M_{\alpha}}{M} \quad x_{\beta} = \frac{M_{\beta}}{M} \quad \text{frazione massica}$$

$$e = x_{\alpha} e_{\alpha} + x_{\beta} e_{\beta} \quad x_{\alpha} + x_{\beta} = 1$$

$$e = (1 - x_{\beta}) e_{\alpha} + x_{\beta} e_{\beta}$$

# REGOLA DI GIBBS

$$V = C + 2 - F$$

$V = n^\circ$  di variabili INTENSIVE atte a descrivere il sistema

$C = n^\circ$  di componenti

$F = n^\circ$  di fasi

Per il sistema monocomponente bifase  $V=1$

Pressione e temperatura non sono variabili indipendenti durante una transizione di fase

Transizione di fase= passaggio da uno stato di aggregazione a un altro

$dh = dq + vdP$  La transizione di fase avviene a  $P$  cost quindi  $dh = dq$

# Sistema eterogeneo monocomponente

*stati monofasi*

solido  
liquido  
aeriforme (gas)

*stati bifasi*

coesistenza di solido e liquido  
coesistenza di solido e aeriforme (vapore)  
coesistenza di liquido e aeriforme (vapore)

*stati tripli*

coesistenza di solido, liquido e  
aeriforme (vapore)

## LIQUIDO SOTTORAFFREDDATO

Liquido NON in procinto di evaporare

## LIQUIDO SATURO

Liquido in procinto di evaporare

## MISCELA SATURA LIQUIDO-VAPORE

## VAPORE SATURO

vapore in condizioni di incipiente condensazione

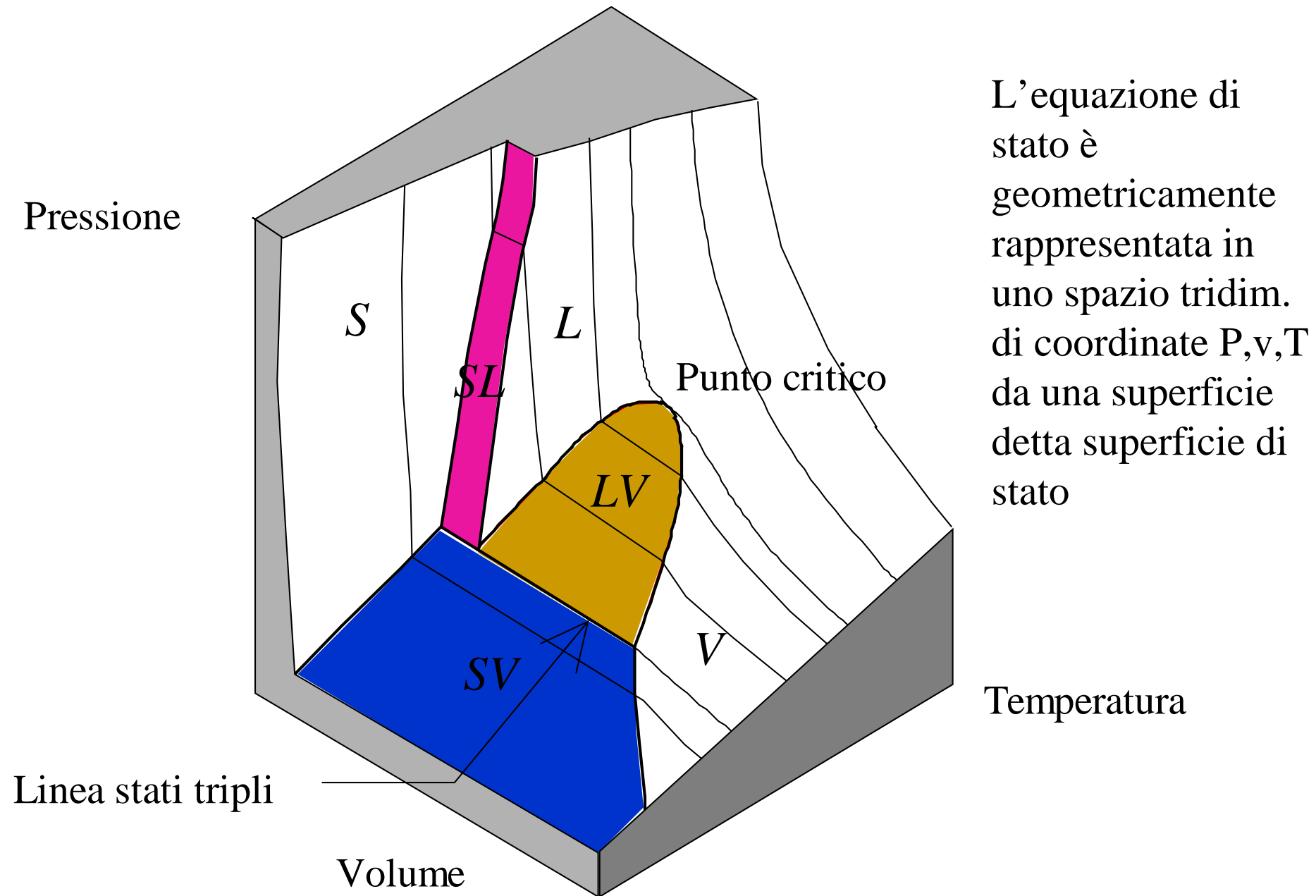
## VAPORE SURRISCALDATO

Vapore NON in procinto di condensare

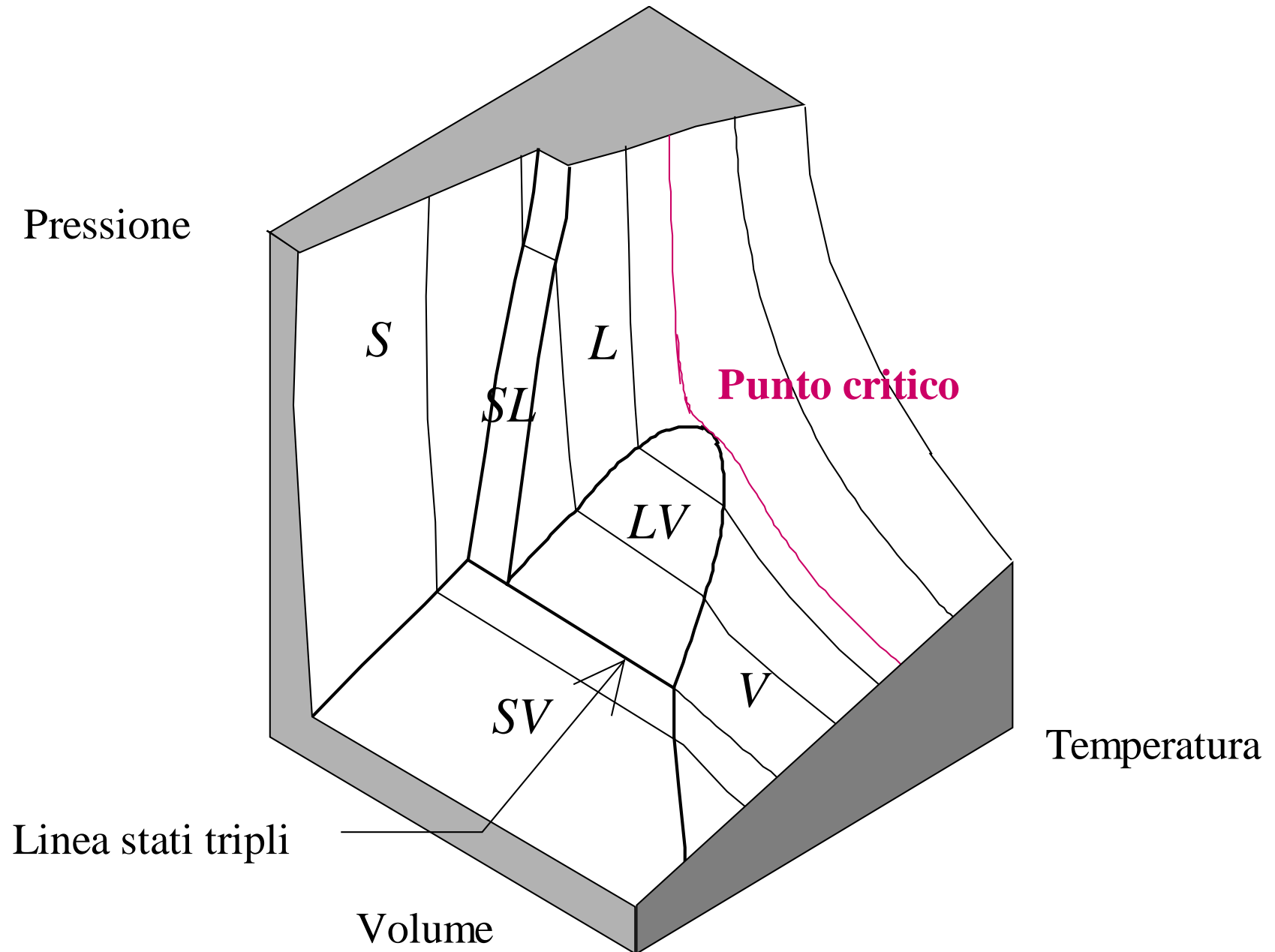
## TEMPERATURA DI SATURAZIONE

Temperatura alla quale una sostanza pura comincia ad evaporare, fissata la pressione

# Diagramma PVT di una sostanza monocomponente

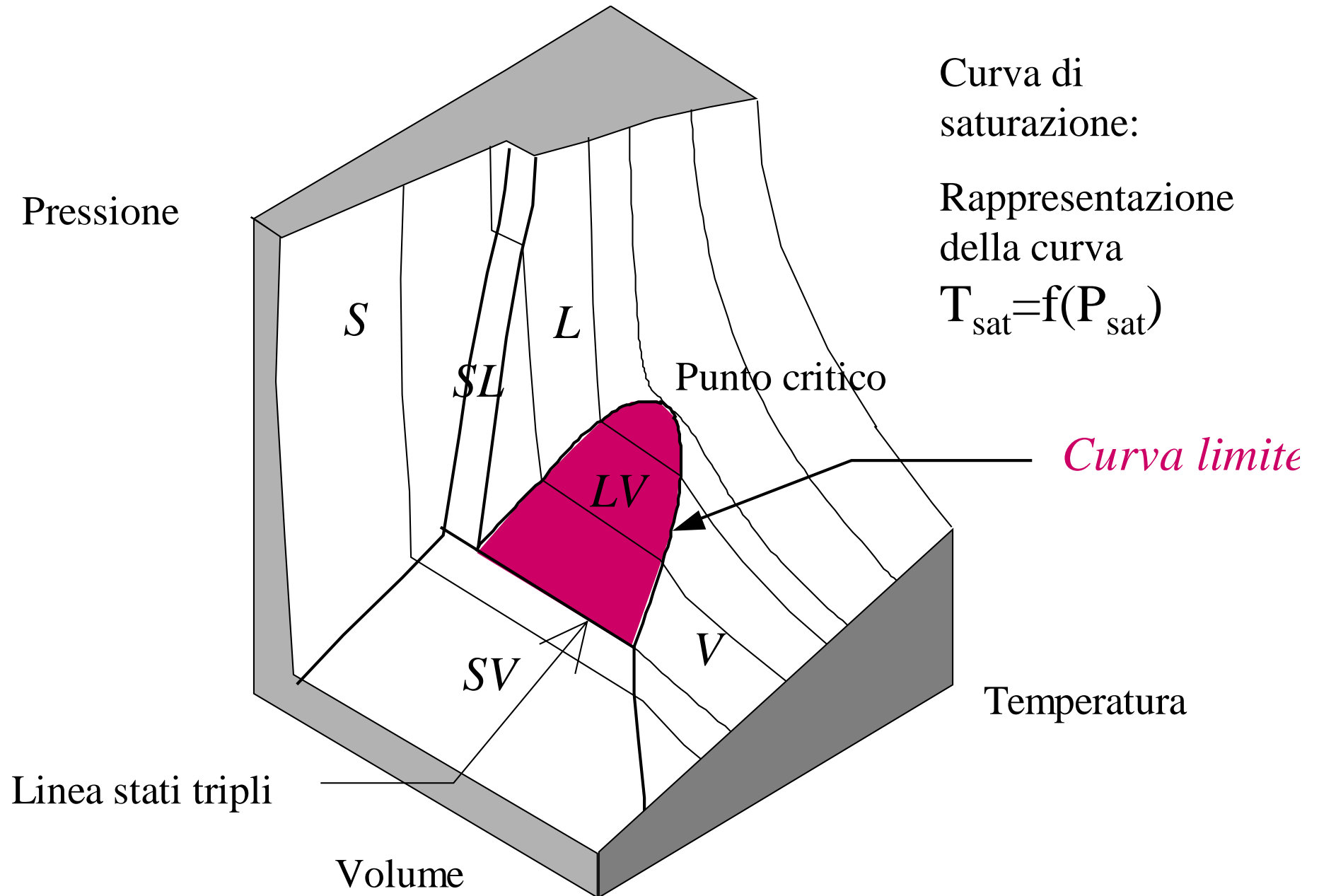


# Diagramma PVT di una sostanza monocomponente

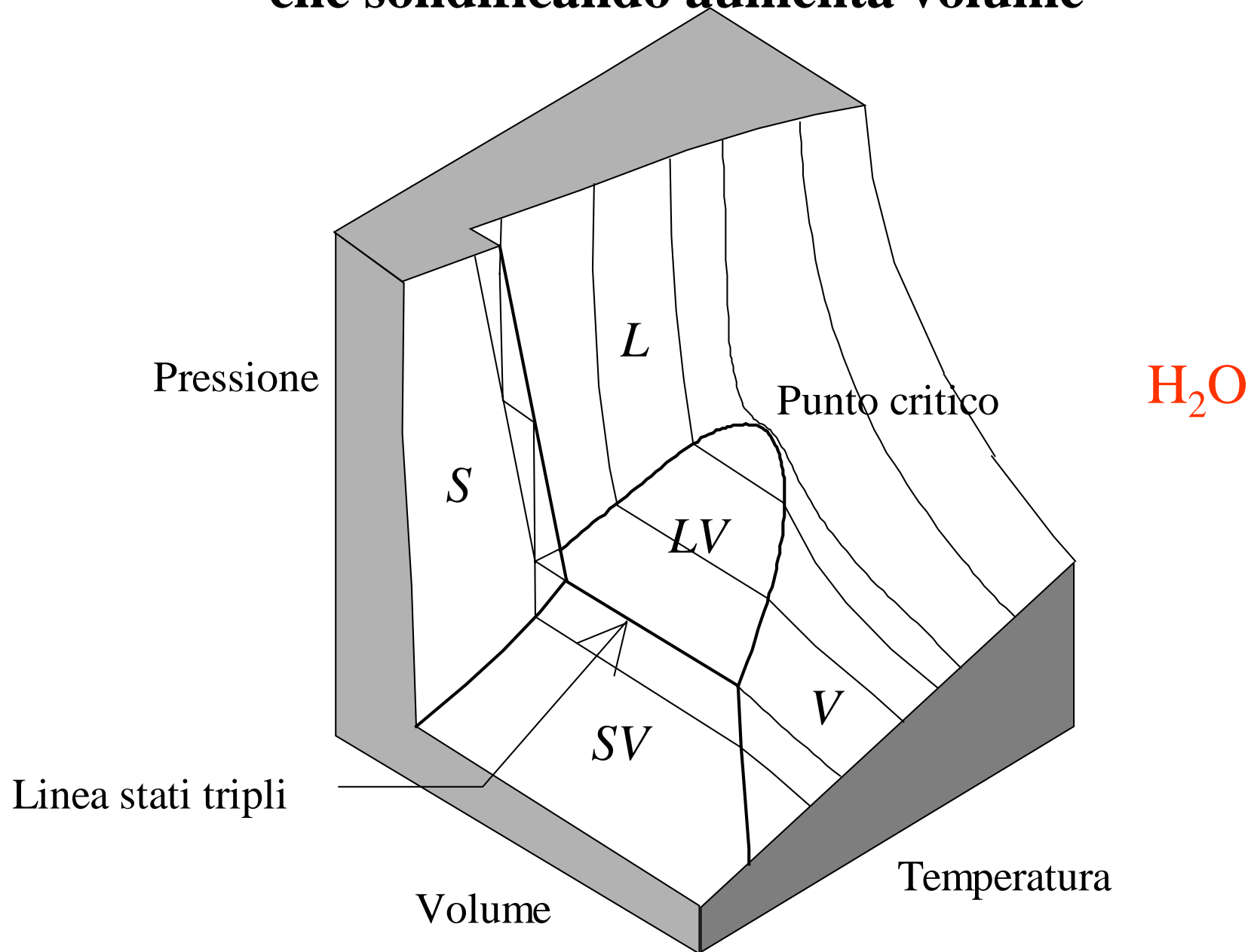




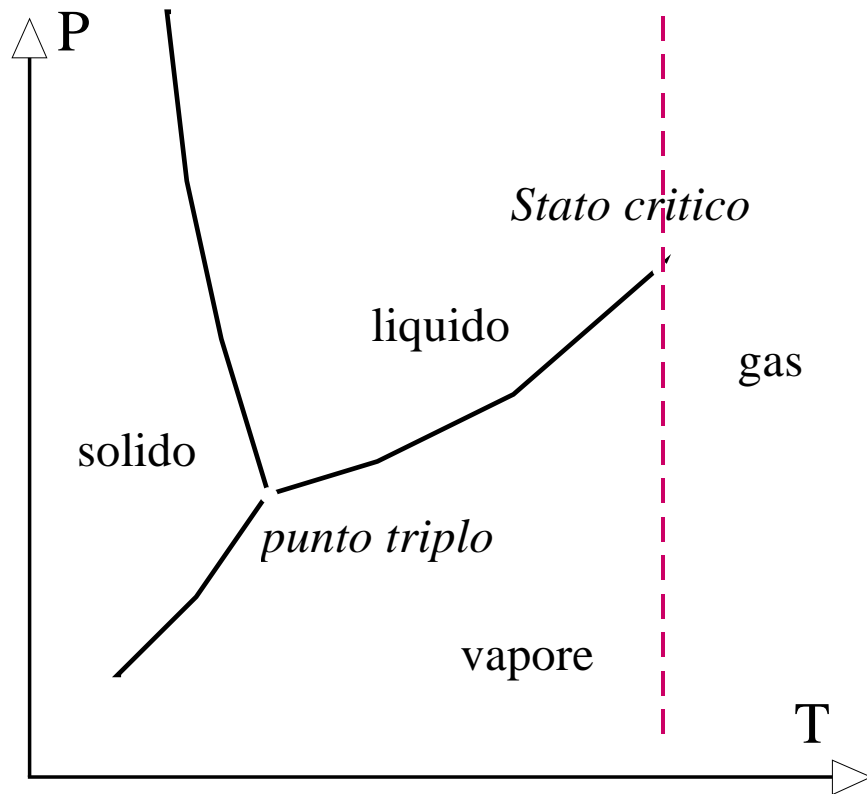
# Diagramma PVT di una sostanza monocomponente



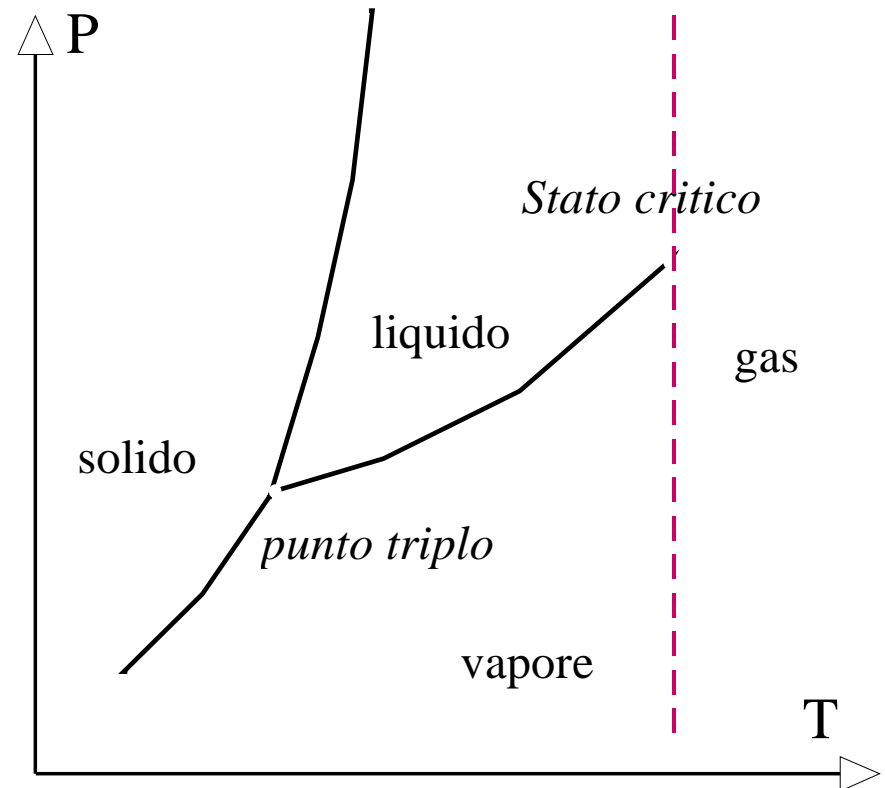
# Diagramma PVT di una sostanza monocomponente che solidificando aumenta volume



# Diagramma PT di una sostanza monocomponente

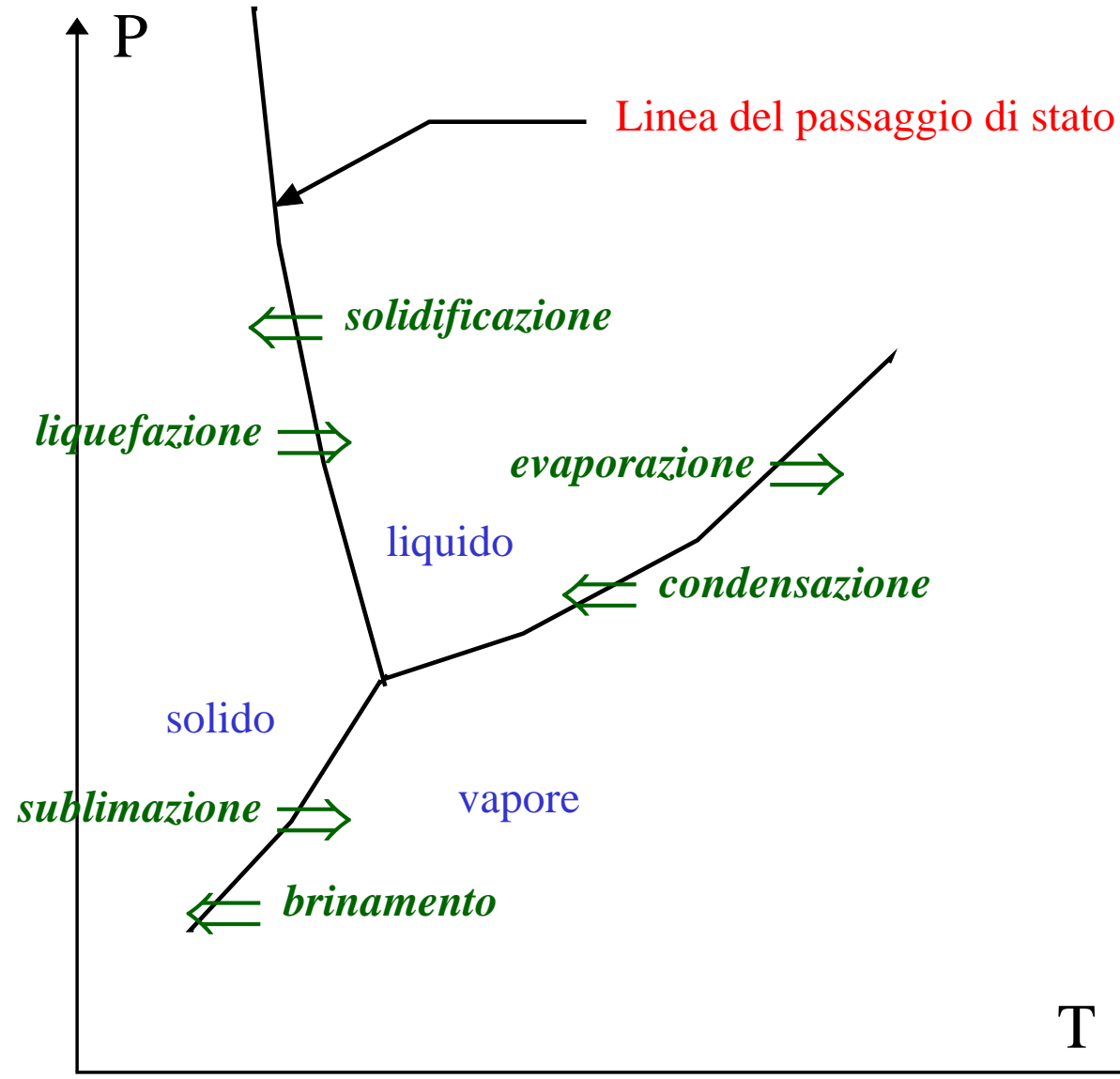


Sostanze che solidificando  
aumentano di volume



Sostanze che solidificando  
diminuiscono di volume

# Diagramma PT di una sostanza monocomponente



# entalpia (calore) di transizione di fase

$$h_{\text{sol}} < h_{\text{liq}} < h_{\text{vap}}$$

entalpia di liquefazione

$$h_{\text{liq}} - h_{\text{sol}} > 0$$

entalpia di solidificazione

$$h_{\text{sol}} - h_{\text{liq}} < 0$$

entalpia di evaporazione

$$h_{\text{vap}} - h_{\text{liq}} > 0$$

entalpia di condensazione

$$h_{\text{liq}} - h_{\text{vap}} < 0$$

entalpia di sublimazione

$$h_{\text{vap}} - h_{\text{sol}} > 0$$

entalpia di brinamento

$$h_{\text{sol}} - h_{\text{vap}} < 0$$

# Le proprietà termodinamiche dei sistemi trifase

titolo di vapore  $x_v = \frac{M_v}{M}$

titolo di liquido  $x_l = \frac{M_l}{M}$

titolo di solido  $x_s = \frac{M_s}{M}$

$$x_v + x_l + x_s = 1$$

# Le proprietà termodinamiche dei sistemi trifase

$$v = (1 - x_1 - x_v) v_s + x_1 v_1 + x_v v_v$$

$$u = (1 - x_1 - x_v) u_s + x_1 u_1 + x_v u_v$$

$$s = (1 - x_1 - x_v) s_s + x_1 s_1 + x_v s_v$$

$$h = (1 - x_1 - x_v) h_s + x_1 h_1 + x_v h_v$$

# Le proprietà termodinamiche dei sistemi bifase (liquido-vapore)

titolo di vapore  $x = x_v = \frac{M_v}{M}$

titolo di liquido  $x_l = \frac{M_l}{M}$

$$x_v + x_l = 1$$



# Le proprietà termodinamiche dei sistemi bifase (liquido-vapore)

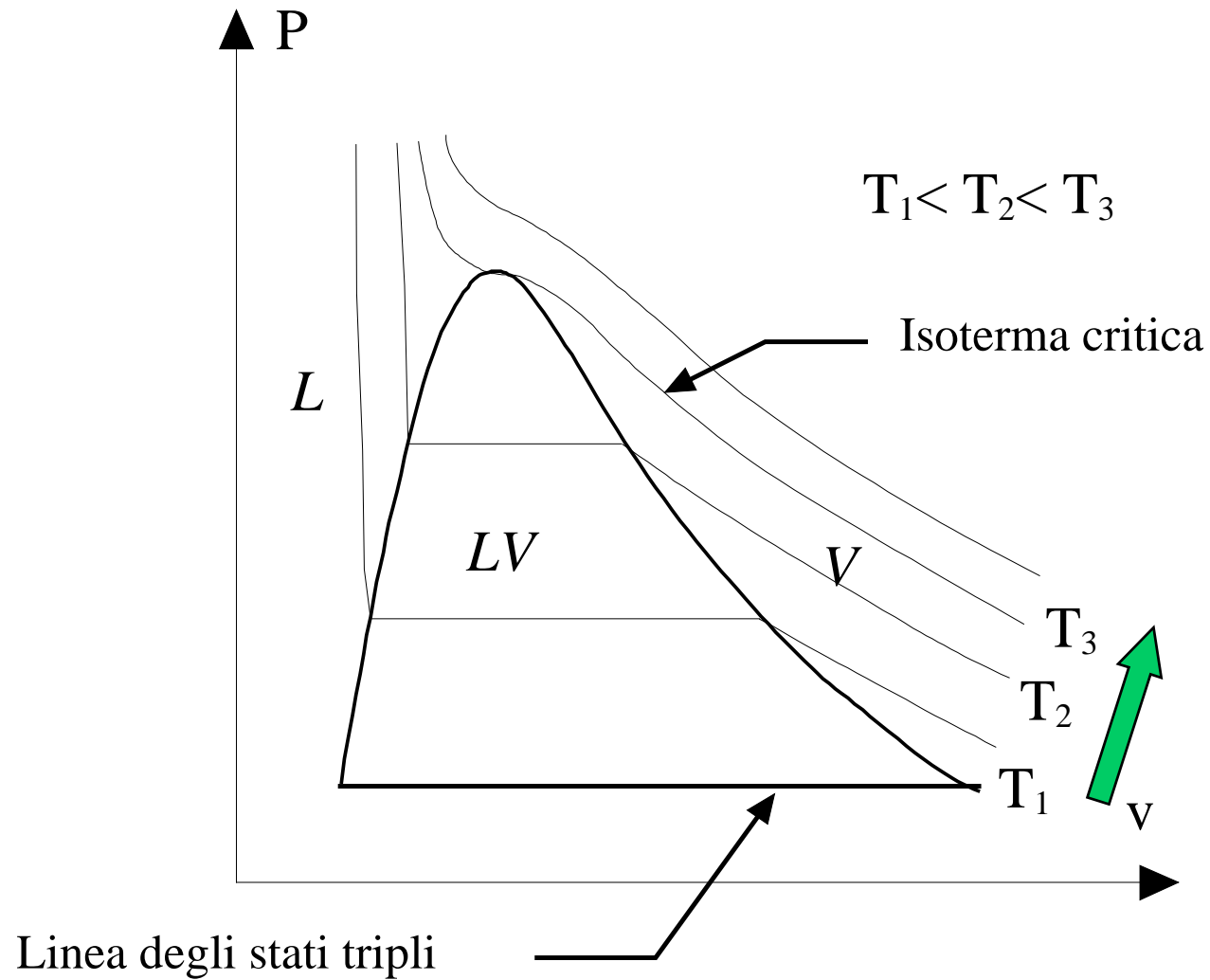
$$v = (1 - x)v_l + xv_v = v_l + xv_{lv}$$

$$u = (1 - x)u_l + xu_v = u_l + xu_{lv}$$

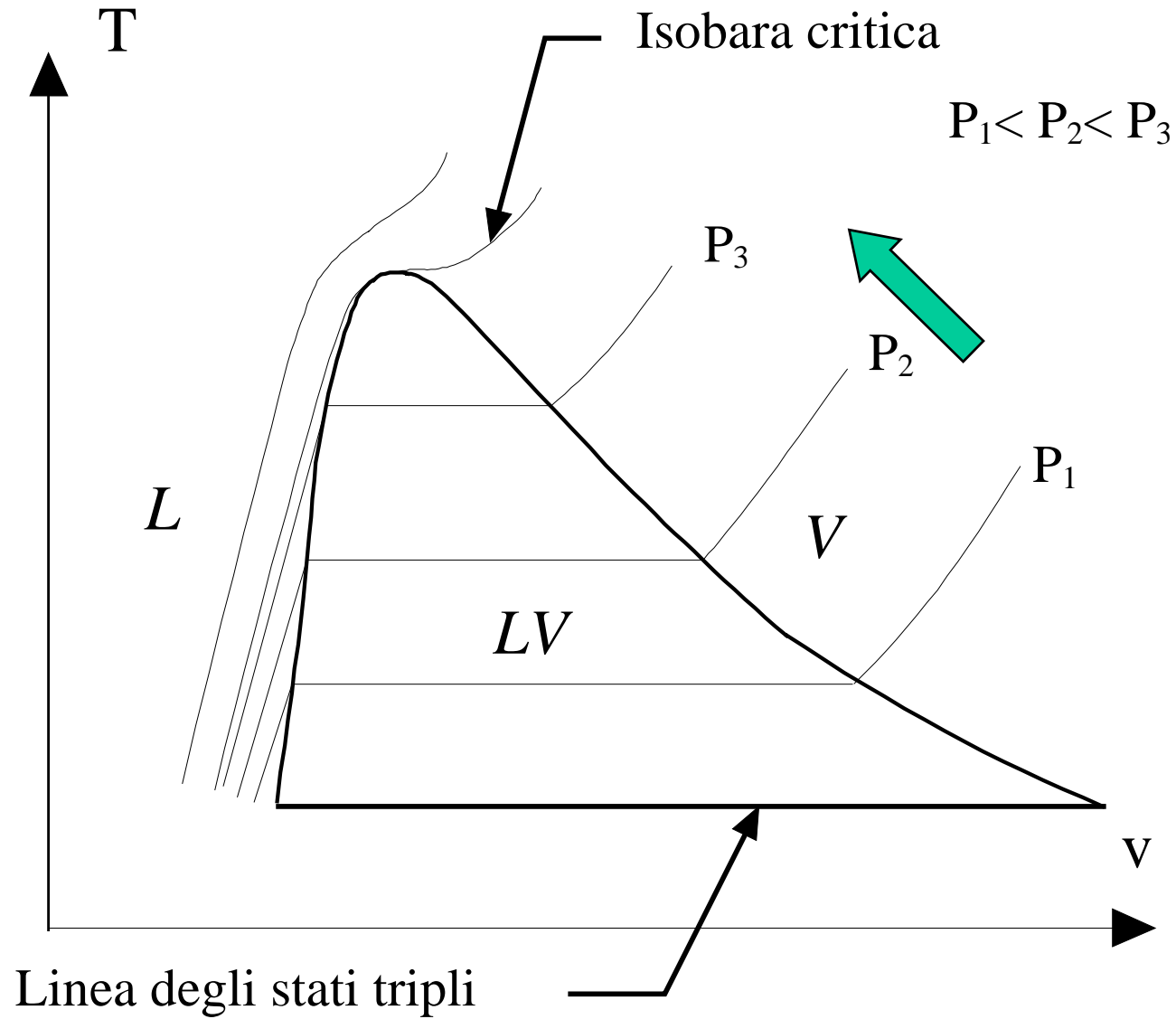
$$s = (1 - x)s_l + xs_v = s_l + xs_{lv}$$

$$h = (1 - x)h_l + xh_v = h_l + xh_{lv}$$

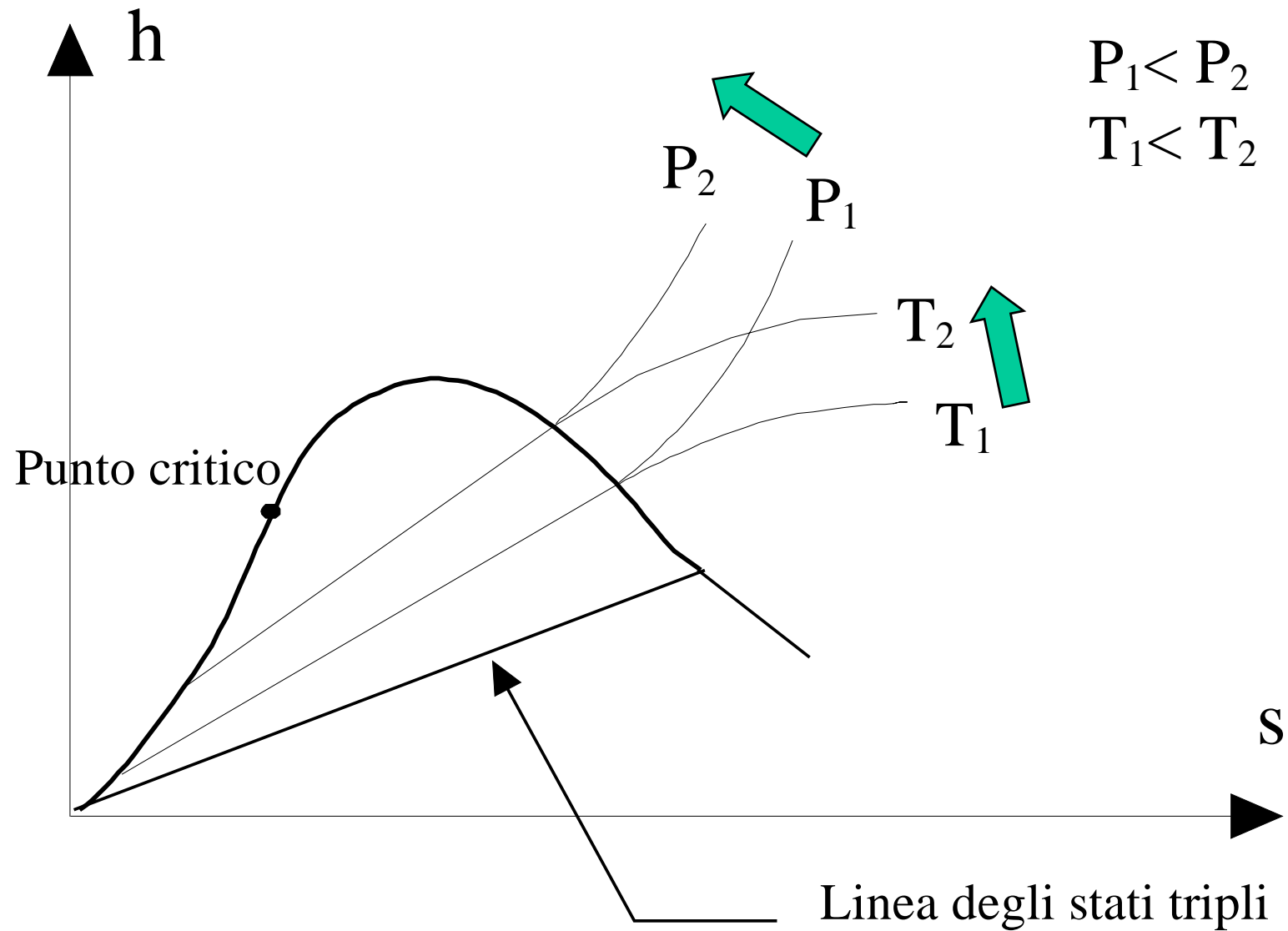
# Diagramma Pv di una sostanza monocomponente



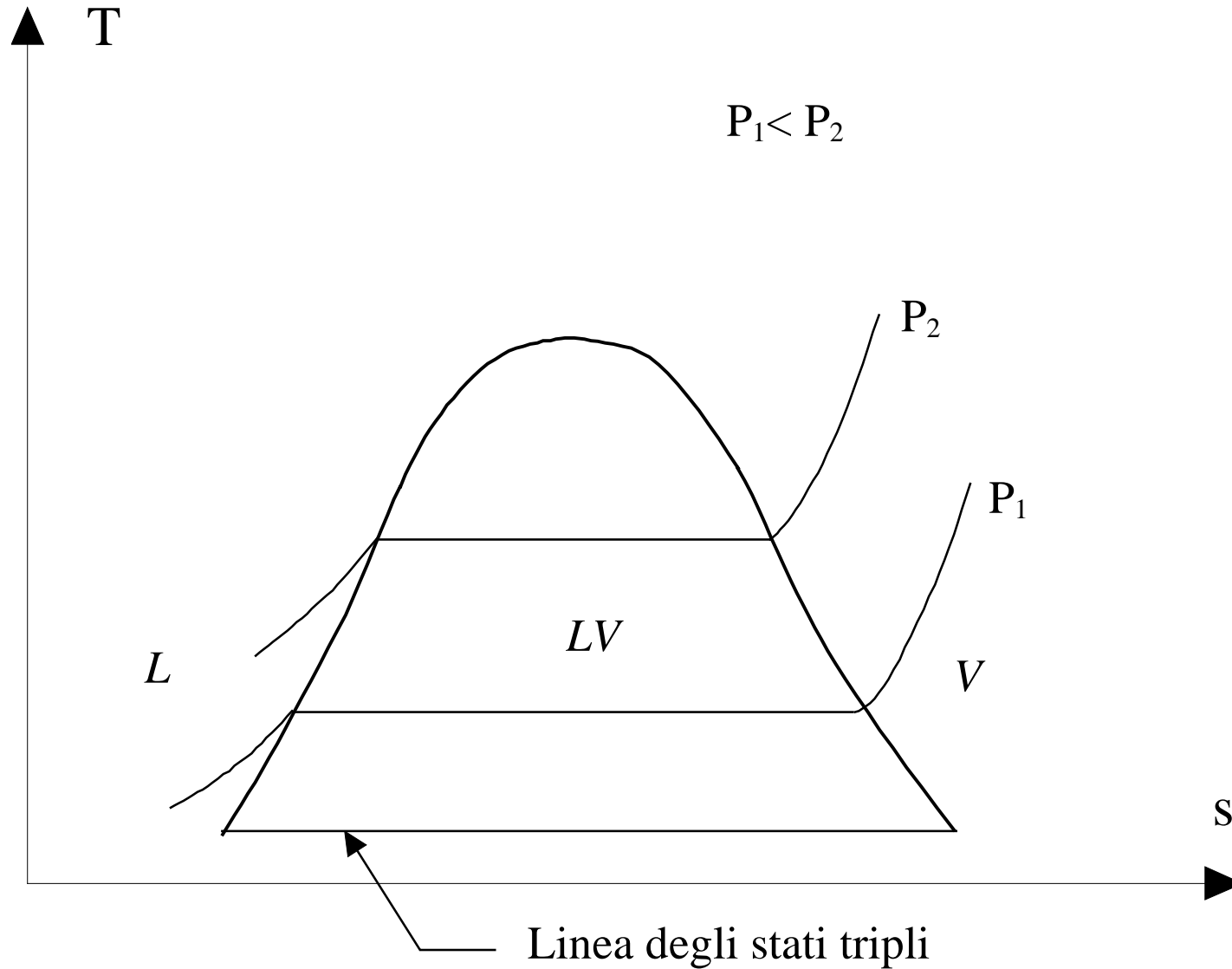
# Diagramma Tv di una sostanza monocomponente



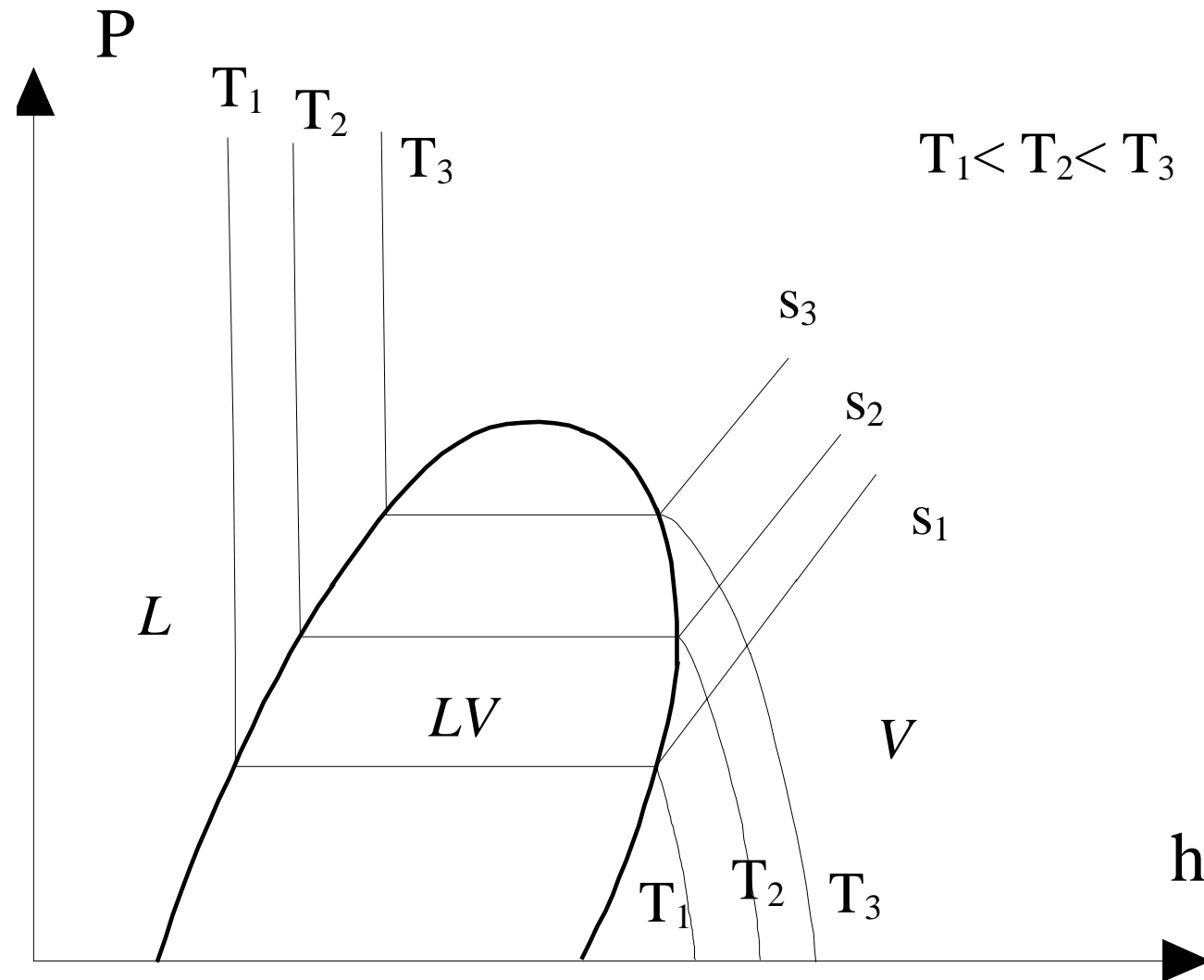
# Diagramma $h$ s di una sostanza monocomponente



# Diagramma Ts di una sostanza monocomponente



# Diagramma Ph di una sostanza monocomponente



# Tabella di saturazione dell'acqua

T (°C)	P (kPa)	volume specifico (m <sup>3</sup> /kg)			entalpia specifica (kJ/kg)			entropia specifica (kJ/kgK)		
		v <sub>l</sub> ·10 <sup>3</sup>	v <sub>lv</sub>	v <sub>v</sub>	h <sub>l</sub>	h <sub>lv</sub>	h <sub>v</sub>	s <sub>l</sub>	s <sub>lv</sub>	s <sub>v</sub>
50	12.335	1.0121	12.045	12.046	209.26	2382.9	2592.2	0.7035	7.3741	8.0776
55	15.741	1.0145	9.578	9.579	230.17	2370.8	2601.0	0.7677	7.2249	7.9926
60	19.920	1.0171	7.678	7.679	251.09	2358.6	2609.7	0.8310	7.0798	7.9108
65	25.009	1.0199	6.201	6.202	272.02	2346.3	2618.4	0.8933	6.9389	7.8322
70	31.160	1.0228	5.045	5.046	292.97	2334.0	2626.9	0.9548	6.8017	7.7565
75	38.549	1.0259	4.133	4.134	313.94	2321.5	2635.4	1.0154	6.6681	7.6835
80	47.360	1.0292	3.408	3.409	334.92	2308.8	2643.8	1.0753	6.5379	7.6132
85	57.810	1.0326	2.828	2.829	355.92	2296.1	2652.0	1.1343	6.4111	7.5454
90	70.110	1.0361	2.3603	2.3613	376.94	2283.2	2660.1	1.1925	6.2874	7.4799

# Tabella del vapore surriscaldato dell'acqua

Pressione (kPa) (T <sub>sat</sub> (°C))		Temperatura (°C)								
		50	100	150	200	250	300	350	400	450
100 (99.63)	v		1.6955	1.9362	2.1723	2.4061	2.6387	2.8708	3.1025	3.3340
	h		2676.2	2776.3	2875.4	2974.5	3074.5	3175.6	3278.2	3382.4
	s		7.3618	7.6137	7.8349	8.0342	8.2166	8.3859	8.5442	8.6935
150 (111.4)	v			1.2851	1.4444	1.6013	1.7570	1.9122	2.0669	2.2215
	h			2772.5	2872.9	2972.9	3073.3	3174.7	3277.5	3381.8
	s			7.4194	7.6439	7.8447	8.0280	8.1976	8.3562	8.5057
200 (120.2)	v			0.9595	1.0804	1.1989	1.3162	1.4328	1.5492	1.6653
	h			2768.5	2870.5	2971.2	3072.1	3173.8	3276.7	3381.1
	s			7.2794	7.5072	7.7096	7.8937	8.0638	8.2226	8.3722



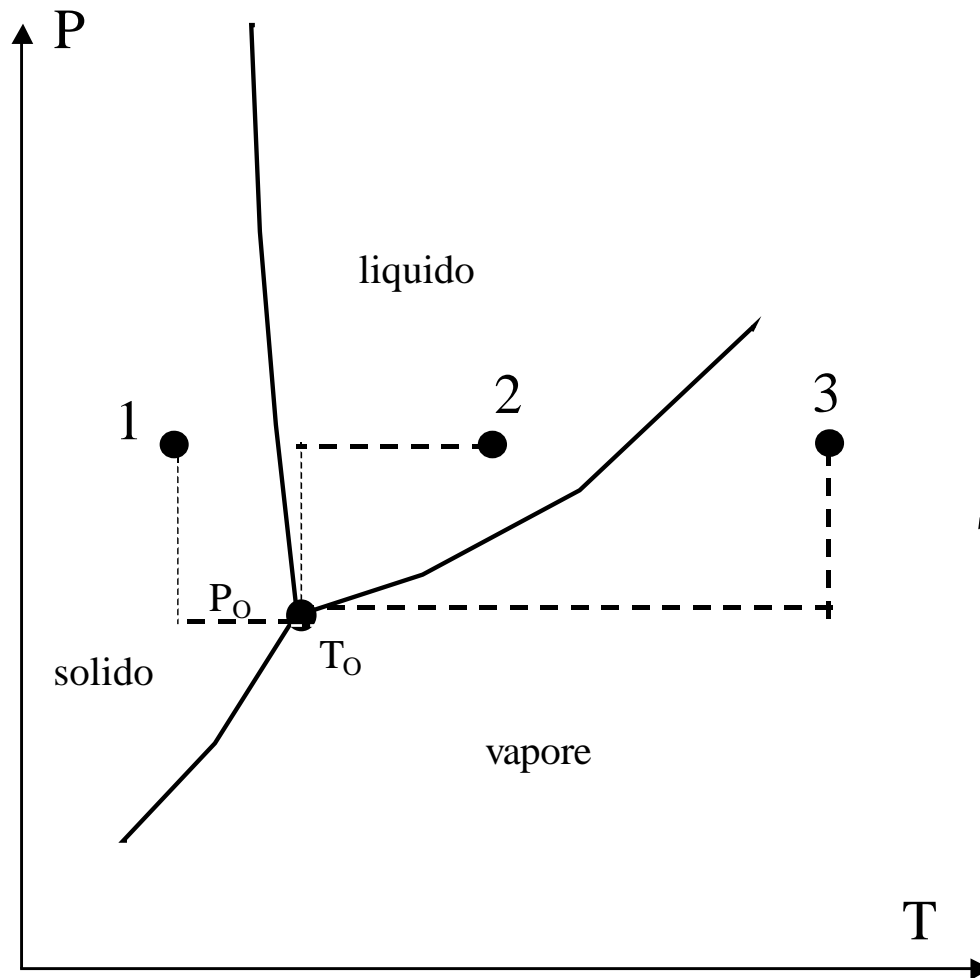
# Interpolazione dei dati tabulati

## 1) Interpolazione lineare

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{P - P_1}{P_2 - P_1}$$

# Espressioni approssimate per il calcolo di entalpia ed entropia specifica



stato di riferimento:  
*stato triplo liquido saturo*

# Espressioni approssimate per il calcolo di entalpia ed entropia specifica per l'acqua

stato di riferimento:

stato solido (1)

*stato triplo liquido saturo*

$$h = h_o + h_{lst} + c_s (T - T_o) + v(P - P_o)$$

$$s = s_o + s_{lst} + c_s \ln \frac{T}{T_o} = s_o + \frac{h_{lst}}{T_o} + c_s \ln \frac{T}{T_o}$$

stato liquido (2)

$$h = h_o + c_l (T - T_o) + v(P - P_o)$$

$$s = s_o + c_l \ln \frac{T}{T_o}$$

# Proprietà termodinamiche dell'acqua

Stato triplo  $T_t = 273.16 \text{ K}$   $P_t = 611.2 \text{ Pa}$

Stato critico  $T_{cr} = 647.29 \text{ K}$   $P_{cr} = 220.9 \text{ bar}$

calore specifico del ghiaccio  $c_s = 2093 \text{ J/kgK}$

calore specifico del liquido  $c_l = 4186 \text{ J/kgK}$

calore specifico medio a pressione

costante del vapore  $c_{pv} = 2009 \text{ J/kgK}$

entalpia di solidificazione allo

stato triplo  $h_{lst} = -333 \text{ kJ/kgK}$

entalpia di evaporazione

allo stato triplo  $h_{lvt} = 2501.6 \text{ kJ/kgK}$