

Universal Transverse Mercator

di Michele T. Mazzucato

L'Universal Transverse Mercator, in acronimo anglosassone UTM, è un sistema cartografico internazionale. Universale in quanto il sistema è definito per tutto il globo terrestre, trasversa in quanto inversa dalla rappresentazione cilindrica diretta e Mercatore in onore del cartografo fiammingo. Le carte topografiche edite dall'Istituto Geografico Militare Italiano IGMI implementano tale sistema con tracciato il relativo reticolato chilometrico. Sono fornite informazioni storiche e caratteristiche di questo importante sistema globale di coordinate con il quale ogni punto della superficie terrestre viene inequivocabilmente identificato.

E finalmente abbiamo avuto l'idea grandiosa! Abbiamo realizzato una mappa del paese alla scala di un chilometro per un chilometro!

Lewis Caroll (pseud. di Charles Lutwidge Dodgson 1832-1898)
in *Sylvie and Bruno Concluded*, chapter XI *The man in the Moon*, p. 169 (1893)

Nel sistema internazionale UTM (Universal Transverse Mercator) il globo terrestre è suddiviso in 60 fusi (= $360^\circ/6^\circ$), ciascuno con ampiezza longitudinale di 6° e una ampiezza latitudinale di $+84^\circ$ nell'emisfero boreale o settentrionale e di -80° nell'emisfero australe o meridionale, numerati da 1 a 60 procedendo verso est (senso orario) a partire dall'antimeridiano di Greenwich (situato a 180° di longitudine).

L'ampiezza di 6° è la massima possibile compatibilmente con le deformazioni tollerabili in una buona carta topografica mentre le calotte polari (latitudini a sud di -80° e a nord di $+84^\circ$) sono state escluse in quanto l'estensione del territorio compreso in un fuso risulta molto ristretto come anche la presenza di distorsioni non tollerabili con l'utilizzo della UTM projection, per queste aree si utilizza il sistema internazionale UPS (Universal Polar Stereographic) projection.

Fuso UTM	Ampiezza longitudinale	Fuso UTM	Ampiezza longitudinale	Fuso UTM	Ampiezza longitudinale
1	-180° -177° -174°	21	-060° -057° -054°	41	+060° +063° +066°
2	-174° -171° -168°	22	-054° -051° -048°	42	+066° +069° +072°
3	-168° -165° -162°	23	-048° -045° -042°	43	+072° +075° +078°
4	-162° -159° -156°	24	-042° -039° -036°	44	+078° +081° +084°
5	-156° -153° -150°	25	-036° -033° -030°	45	+084° +087° +090°
6	-150° -147° -144°	26	-030° -027° -024°	46	+090° +093° +096°
7	-144° -141° -138°	27	-024° -021° -018°	47	+096° +099° +102°
8	-138° -135° -132°	28	-018° -015° -012°	48	+102° +105° +108°
9	-132° -129° -126°	29	-012° -009° -006°	49	+108° +111° +114°
10	-126° -123° -120°	30	-006° -003° -000°	50	+114° +117° +120°
11	-120° -117° -114°	31	+000° +003° +006°	51	+120° +123° +126°
12	-114° -111° -108°	32	+006° +009° +012°	52	+126° +129° +132°
13	-108° -105° -102°	33	+012° +015° +018°	53	+132° +135° +138°
14	-102° -099° -096°	34	+018° +021° +024°	54	+138° +141° +144°
15	-096° -093° -090°	35	+024° +027° +030°	55	+144° +147° +150°
16	-090° -087° -084°	36	+030° +033° +036°	56	+150° +153° +156°
17	-084° -081° -078°	37	+036° +039° +042°	57	+156° +159° +162°
18	-078° -075° -072°	38	+042° +045° +048°	58	+162° +165° +168°
19	-072° -069° -066°	39	+048° +051° +054°	59	+168° +171° +174°
20	-066° -063° -060°	40	+054° +057° +060°	60	+174° +177° +180°

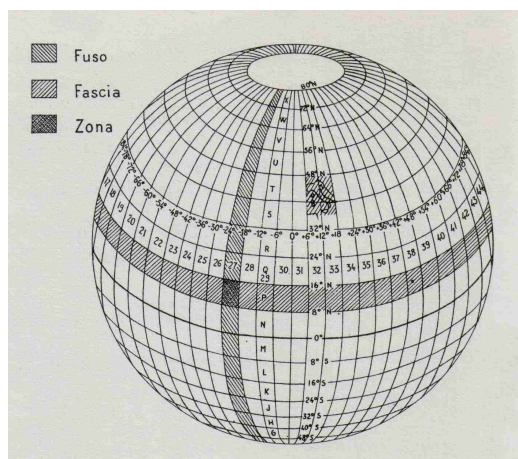
Tab. 1 - In rosso la longitudine del meridiano centrale di ogni fuso UTM con longitudine positiva (+) a est e longitudine negativa (-) a ovest dal meridiano fondamentale di Greenwich.

In ogni fuso il meridiano centrale, tangente al cilindro, e l'equatore costituiscono un sistema di assi cartesiani ortogonali sul quale si realizza un reticolato chilometrico a maglie quadrate indipendente da quello degli altri fusi. Ogni punto del fuso può essere identificato misurando la sua distanza da questi assi (coordinate chilometriche E e N). Al fine di non avere valori negativi per le ascisse (coordinate est E) dei punti che si trovano ad ovest del meridiano centrale di tangenza del fuso, si attribuisce a questo il valore convenzionale di 500 km (falsa origine meridiana). Analogamente, al fine di non avere valori negativi per

le ordinate (coordinate nord N) dei punti che si trovano a sud dell'equatore, si attribuisce ad esso il valore convenzionale di 10000 km (falsa origine equatoriale).

Il globo terrestre è ulteriormente suddiviso in 20 fasce parallele all'equatore (10 nell'emisfero boreale e 10 nell'emisfero australe), ciascuna con ampiezza latitudinale di 8°, designate da una lettera maiuscola dell'alfabeto inglese a partire dalla C alla X (con l'esclusione delle lettere I e O perché confondibili con i numeri uno e zero) procedendo verso nord a partire dal parallelo di latitudine -80°. Esistono anche le fasce A (occidentale) e B (orientale) nelle regioni antartiche e le fasce Y (occidentale) e Z (orientale) nelle regioni artiche.

L'incrocio dei 60 fusi con le 20 fasce da origine a 1200 zone (20 per ogni fuso), ciascuna con ampiezza longitudinale di 6° e una ampiezza latitudinale di 8°, contraddistinte da un numero (indicante il fuso) e da una lettera (indicante la fascia). Eccezioni sono la zona 31V (con ampiezza longitudinale di 3°) e la zona 32V (con ampiezza longitudinale di 9°) che interessa la costa sud occidentale della Norvegia e le fasce 31X e 37X (con ampiezza longitudinale di 9°) e le fasce 33X e 35X (con ampiezza longitudinale di 12°) che interessa l'arcipelago delle Svalbard nel mare Glaciale Artico, mentre, le fasce 32X, 34X e 36X non vengono utilizzate. A loro volta le zone sono ulteriormente ripartite in quadrati di 100 chilometri di lato.



Fascia UTM	Ampiezza latitudinale	Designazione
Z	+90° +84°	fascia orientale artica
Y		fascia occidentale artica
X	+84° +72°	10a fascia N
W	+72° +64°	9a fascia N
V	+64° +56°	8a fascia N
U	+56° +48°	7a fascia N
T	+48° +40°	6a fascia N
S	+40° +32°	5a fascia N
R	+32° +24°	4a fascia N
Q	+24° +16°	3a fascia N
P	+16° +08°	2a fascia N
N	+08° +00°	1a fascia N
M	-00° -08°	10a fascia S
L	-08° -16°	9a fascia S
K	-16° -24°	8a fascia S
J	-24° -32°	7a fascia S
H	-32° -40°	6a fascia S
G	-40° -48°	5a fascia S
F	-48° -56°	4a fascia S
E	-56° -64°	3a fascia S
D	-64° -72°	2a fascia S
C	-72° -80°	1a fascia S
B		fascia orientale antartica
A	-80° -90°	fascia occidentale antartica

Fig. 1 - Fusi, fasce e zone nel sistema internazionale UTM (a sinistra) e Tab. 2 - designazioni delle fasce con latitudine positiva (+) a nord e latitudine negativa (-) a sud dell'equatore (a destra). Un espediente mnemonico, che riguarda le fasce, consiste nel ricordare che la lettera N è la prima lettera nell'emisfero nord e che pertanto ogni lettera che precede la N si trova nell'emisfero sud mentre ogni lettera che segue la N (e anche se stessa) si trova nell'emisfero nord.

Ogni quadrato di 100 chilometri di lato è identificato da una coppia di lettere maiuscole dell'alfabeto inglese. La prima indica la colonna verticale ed è distinta dalle 24 lettere a partire dalla A alla Z procedendo dal 180° meridiano verso est mentre la seconda indica la riga orizzontale distinta dalle 20 lettere a partire dalla A alla V procedendo da sud verso nord (in entrambi i casi con l'esclusione delle lettere I e O perché confondibili con i numeri uno e zero) in modo tale che non si ripetono entro i 18°, rispettivamente, di longitudine (ossia ogni tre fusi, poi si ricomincia dalla A) per le colonne e di latitudine (ossia poco più di 2 fasce, poi si ricomincia dalla A) per le righe. L'utilizzo di questi quadrati deriva dal sistema prevalentemente usato dai militari che prende il nome di Military Grid Reference System MGRS.

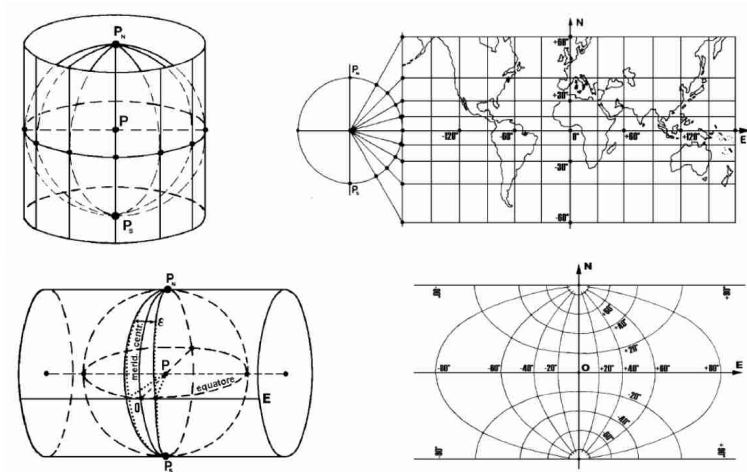


Fig. 2 - Confronto fra la proiezione di sviluppo cilindrica diretta (sopra) e quella inversa o trasversa (sotto), con i relativi reticolati delle trasformate dei meridiani e dei paralleli.

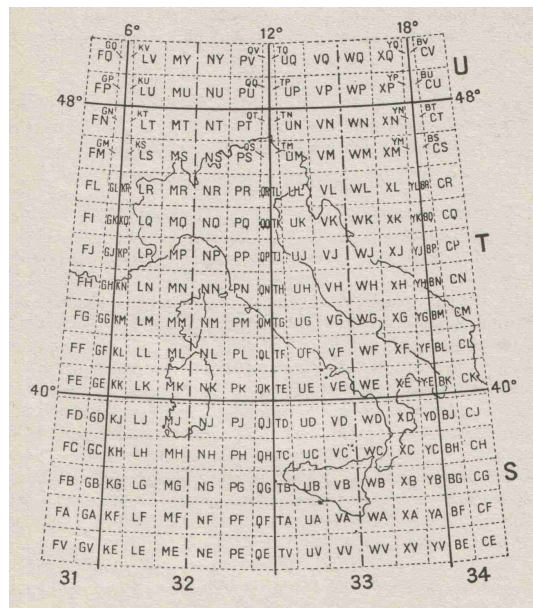


Fig. 3 - Fusi (32, 33 e una piccola parte del 34), Fasce (S e T) e zone (32S, 33S, 32T, 33T, 34S e 34T) e quadrati di 100 chilometri di lato (reticolato centichilometrico) nell'areale italo.

Il sistema internazionale UTM e il sistema internazionale UPS utilizzano, rispettivamente, la *rappresentazione conforme di Gauss* e la *proiezione prospettica stereografica polare*. Nella prima, puramente analitica, le trasformate dei meridiani e dei paralleli, sulla carta, sono curve complesse, mentre, solo il meridiano di tangenza e l'equatore sono delle rette. Nella seconda, geometrica prospettica, le trasformate dei meridiani e dei paralleli, sulla carta, sono delle rette e delle circonferenze concentriche, rispettivamente, in cui l'equatore è una circonferenza di raggio pari a due volte il raggio del globo terrestre. In particolare, è una *proiezione* in quanto ottenuta con mezzi geometrici, *prospettica* in quanto la superficie soggettiva è un piano tangente alla superficie oggettiva in un punto centrale alla zona interessata, *stereografica* in quanto il centro di proiezione è situato sulla superficie di riferimento in posizione diametralmente opposta al punto di tangenza del piano e *polare* in quanto il punto di tangenza del piano è situato in corrispondenza di uno dei poli. Entrambe le rappresentazioni cartografiche sono conformi, da Carl Friedrich Gauss (1777-1855), od ortomorfe, da Sophie Germain (1776-1831), o autogonali, da Nicolas Auguste Tissot (1824-1897), o isogoniche, ossia conservano gli angoli fra direzioni corrispondenti. Motivazioni storiche stanno alla base della scelta di una rappresentazione cartografica conforme. Ciò si deve al fatto che nel passato, prima dell'avvento dei distanziometri elettronici, le misure angolari erano quelle maggiormente eseguite e pertanto risultava quanto mai conveniente adottare un sistema tale che consentisse l'inserimento di misure angolari direttamente senza apportarne correzioni.

Nato per finalità squisitamente belliche, il reticolato UTM doveva rendere facile il calcolo delle gittate dei cannoni prima e quelle assai maggiori dei successivi missili intercontinentali, già durante la Prima Guerra Mondiale quando lo Stato Maggiore dell'esercito francese fece sovrastampare alla cartografia militare una sorta di reticolato il cui nuovo sistema prese il nome di *Nord de Guerre*. Ma fu durante la Seconda Guerra Mondiale che vide la luce il *Deutsches Herresgitter* (ossia *reticolato tedesco per l'esercito*) sin dal 1942, anch'esso fatto sovrastampare sull'esistenti carte, considerato il vero e proprio antesignano del reticolato centochilometrico UTM dell'US Army Map Service sviluppato dal 1947.



Fig. 4 - (a sinistra) Gerhard Kremer (Mercatore) (1512-1594) in una incisione del tedesco Frans Hogenberg (1535-1590) tratta dall'*Atlas sive Cosmographicae Meditationes de Fabrica Mundi et Fabricati Figura* (1595), (al centro) Johann Heinrich Lambert (1728-1777) in una incisione dell'alsaziano Godefroy Engelmann (1788-1839) del 1829 e (a destra) Adrien Charles Adolphe Germain (1837-1895) in una fotografia del francese Louis Eugène Pirou (1841-1909) del 1885.

Si deve al francese Adrien Charles Adolphe Germain (1837-1895) che, nella sua opera *Traité des projections des cartes géographiques; représentation plane de la sphère et du sphéroïde* (1866), chiamò per la prima volta *Transverse Mercator Projection*, la *proiezione cilindrica inversa* ideata dallo svizzero Johann Heinrich Lambert (1728-1777) e descritta in *Anmerkungen und Zusätze zur Entwerfung der Land- und Himmelscharten* (1772) come variante della *proiezione cilindrica diretta* del fiammingo Gerhard Kremer (latinizzato in Gerardus Mercator) (1512-1594) che utilizzò nella sua mappa mondiale *Nova et aucta orbis terrae descriptio ad usum navigantium emendata accomodata* (1569).

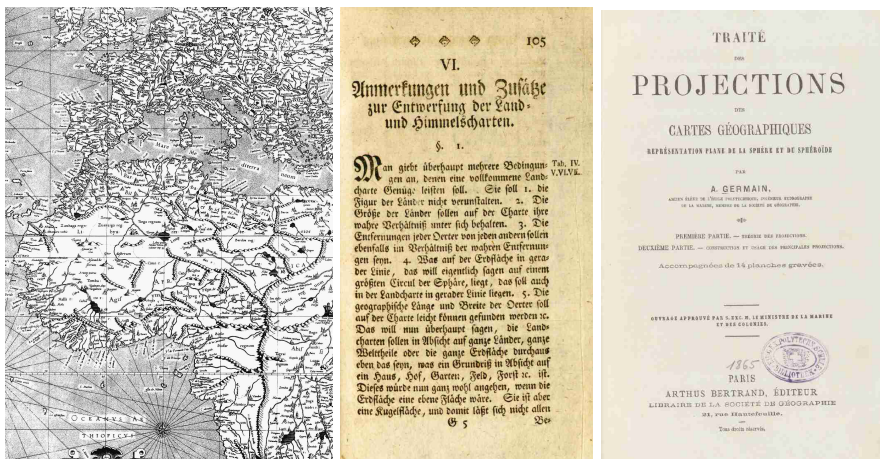


Fig. 5 - (da sinistra a destra) Particolare della mappa di Mercatore (1569), pagina iniziale del lavoro di Lambert (1772) e frontespizio dell'opera di Germain (1866) citati nel testo.

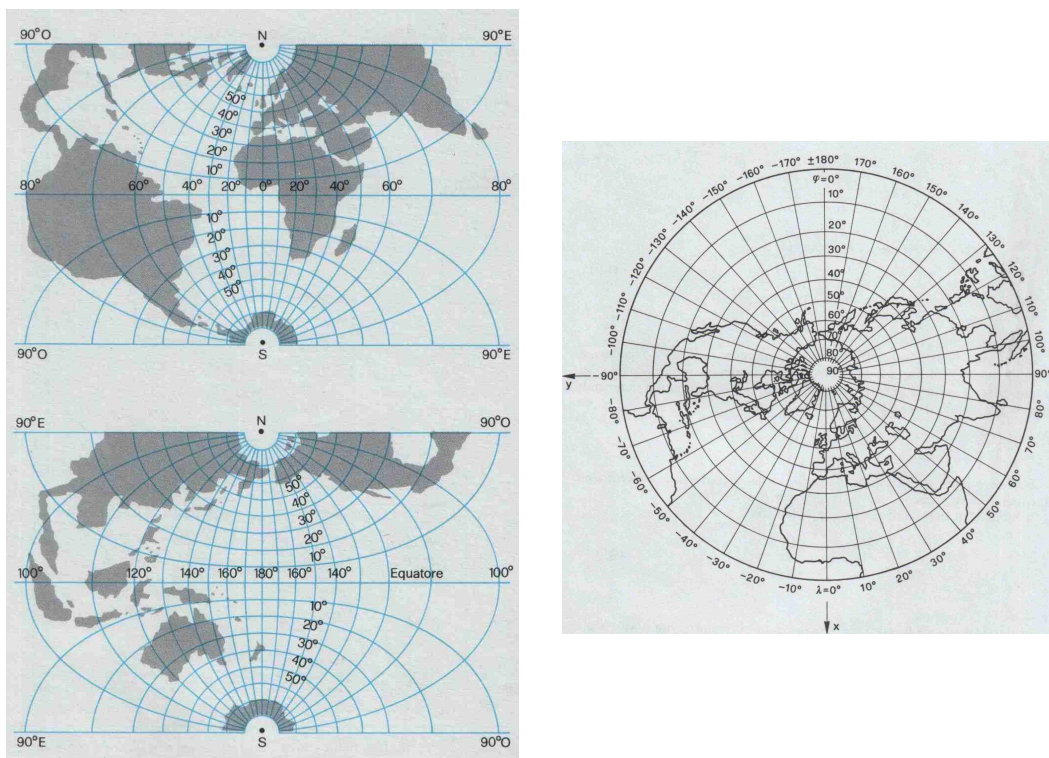


Fig. 6 - Reticolato delle trasformate dei meridiani e dei paralleli nella rappresentazione conforme di Gauss (a sinistra) e nella proiezione prospettica stereografica polare (a destra) utilizzate, rispettivamente, nei sistemi cartografici internazionali UTM e UPS.

Nel sistema internazionale UTM ogni punto del globo terrestre è inequivocabilmente identificato da un codice alfanumerico la cui designazione completa, per esempio, è così espressa:

32T NK 560512 4491524

in cui tale punto si trova nella zona 32T (fuso 32 e fascia T), nel quadrato NK (colonna N e riga K) di 100 chilometri di lato a 60512 metri (560512 - 500000 valore della falsa origine) ad est del meridiano centrale del fuso 32 ($\lambda = 9^\circ$ E da Greenwich) ed a 4491524 metri a nord dell'equatore terrestre. Se la coordinata E (est) fosse minore di 500000 (valore della falsa origine) si esegue 500000-E, e il punto si troverebbe ad ovest del meridiano centrale del fuso a cui appartiene. I valori E= 60512 metri e N= 4491524 metri sono le coordinate gaussiane o rettangolari chilometriche o cartografiche piane ortogonali denominate, rispettivamente, coordinata est e coordinata nord.

Nel sistema nazionale Gauss-Boaga la falsa origine assume i seguenti valori di 1500 km per il meridiano centrale di tangenza del fuso ovest o primo od occidentale ($\lambda = 9^\circ$ E da Greenwich) e di 2520 km per quello del fuso est o secondo od orientale ($\lambda = 15^\circ$ E da Greenwich) (i 20 chilometri aggiunti permettono di evitare che vi siano decine uguali nelle coordinate dei punti nella zona di sovrapposizione fra i due fusi italiani). Con questa scelta, inoltre, se la coordinata gaussiana E inizia con 1, il punto si trova nel fuso primo, se inizia con 2 esso si trova nel fuso secondo. Il reticolato chilometrico, in tale sistema nazionale, non è disegnato sulla carta topografica ma è possibile tracciarlo unendo opportuni *repère* posti lungo la cornice geografica della carta stessa.

Nei computi relativi al modulo di deformazione lineare per segmenti finiti, alla convergenza o disorientamento dei meridiani, alle riduzioni alle corde, etc. occorre ricordarsi di togliere alle coordinate gaussiane E il valore della falsa origine, operazione denominata *depurazione dell'entità della falsa origine*. Anche nel sistema internazionale UTM, come nel sistema nazionale Gauss-Boaga, viene adottata sia la riduzione delle coordinate gaussiane di 0.9996 (coefficiente o fattore di contrazione) sia una zona di sovrapposizione di 30' tra i fusi. Normalmente le coordinate gaussiane E e N vengono fornite approssimate al decametro per gli elementi cartografici con rapporto di scala al 25000 (riferimento numerico 4+4 cifre), all'ettometro

per quelli con rapporto di scala al 50000 e al 100000 (riferimento numerico di 3+3 cifre) e al chilometro per quelli con rapporto di scala al 200000 e al 250000 (riferimento numerico 2+2 cifre). Le relazioni di posizione per punti situati in elementi cartografici diversi, ma appartenenti allo stesso fuso UTM, possono essere ricavate attraverso le formule della geometria piana. In considerazione del fatto che ogni fuso UTM possiede un reticolato chilometrico (rete di posizionamento) distinto e indipendente i punti situati in fusi diversi non sono collegabili attraverso le coordinate gaussiane E e N ma occorre passare attraverso le coordinate geografiche λ (longitudine) e φ (latitudine).

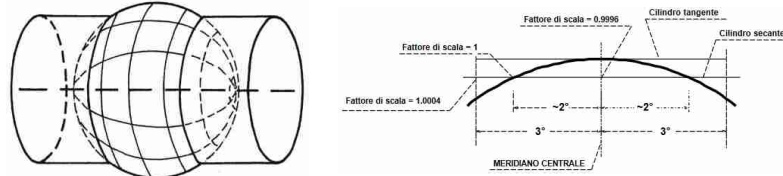


Fig. 7 - Il coefficiente o fattore di contrazione 0.9996 applicato alle coordinate gaussiane del sistema internazionale UTM, dal punto di vista geometrico, corrisponde a utilizzare un cilindro più piccolo e quindi secante il globo terrestre ellissoidale permettendo di ridurre le deformazioni lineari ai margini dei fusi rispetto a un cilindro tangente. Deformazioni che sono nulle sulle linee di tangenza (per un cilindro diretto) o di secanza (per un cilindro inverso secante) e aumentano allontanandosene.

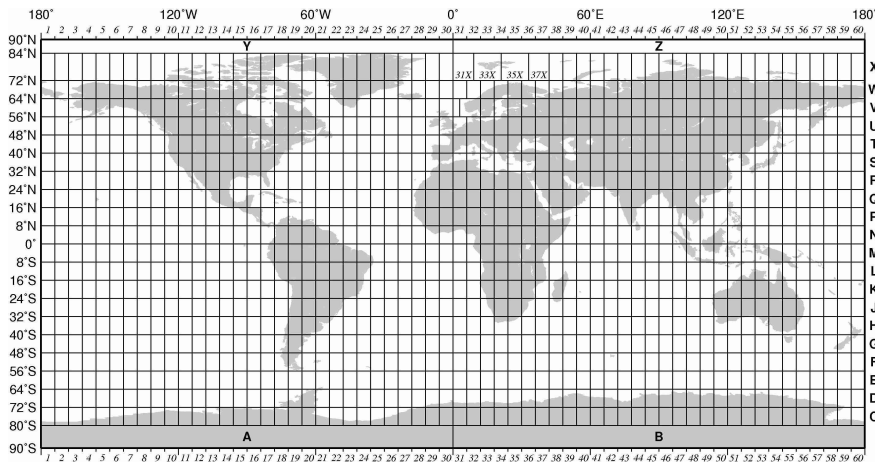


Fig. 8 - La griglia delle 1200 zone UTM formata dall'incrocio dei 60 fusi (verticali) con le 20 fasce (orizzontali).

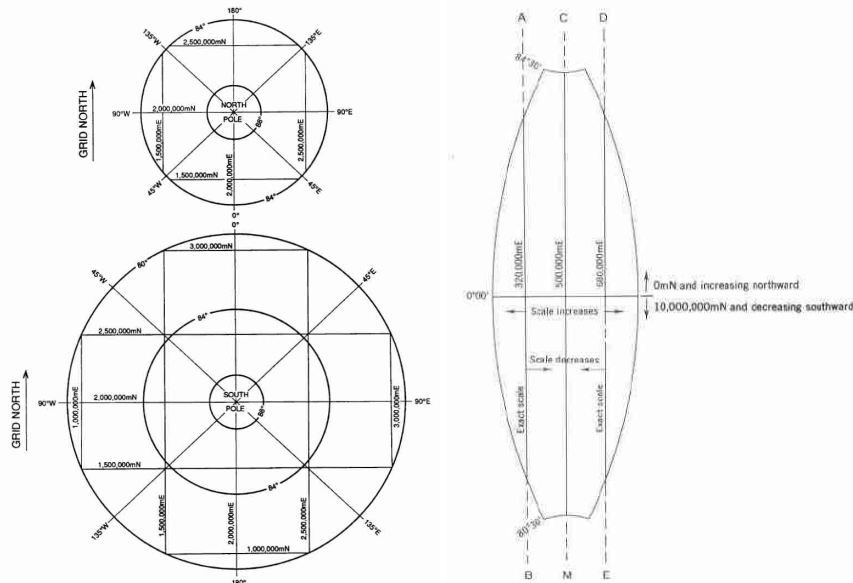


Fig. 9 - Al fine di evitare valori negativi nelle coordinate E (est) e N (nord), nel sistema internazionale UPS, viene attribuita un falsa origine polare il cui valore convenzionale è di 2000 km (a sinistra), mentre, nel sistema internazionale UTM, vengono attribuiti i valori convenzionali di 500 km al meridiano centrale di tangenza del fuso e di 10000 km all'equatore.

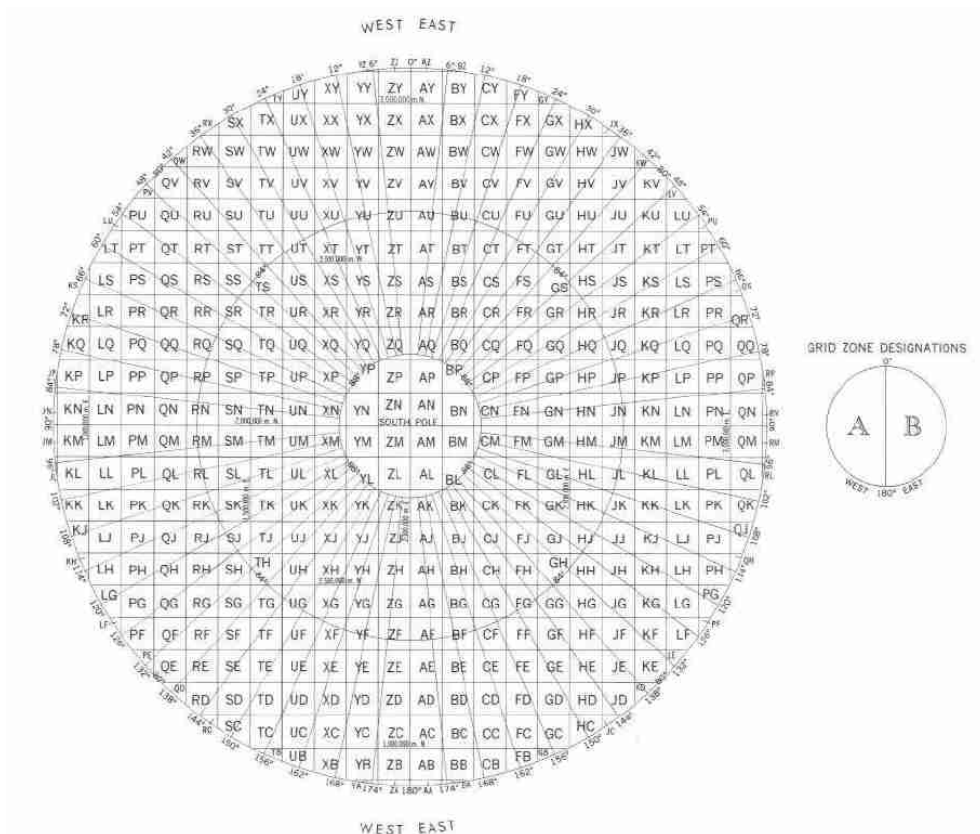
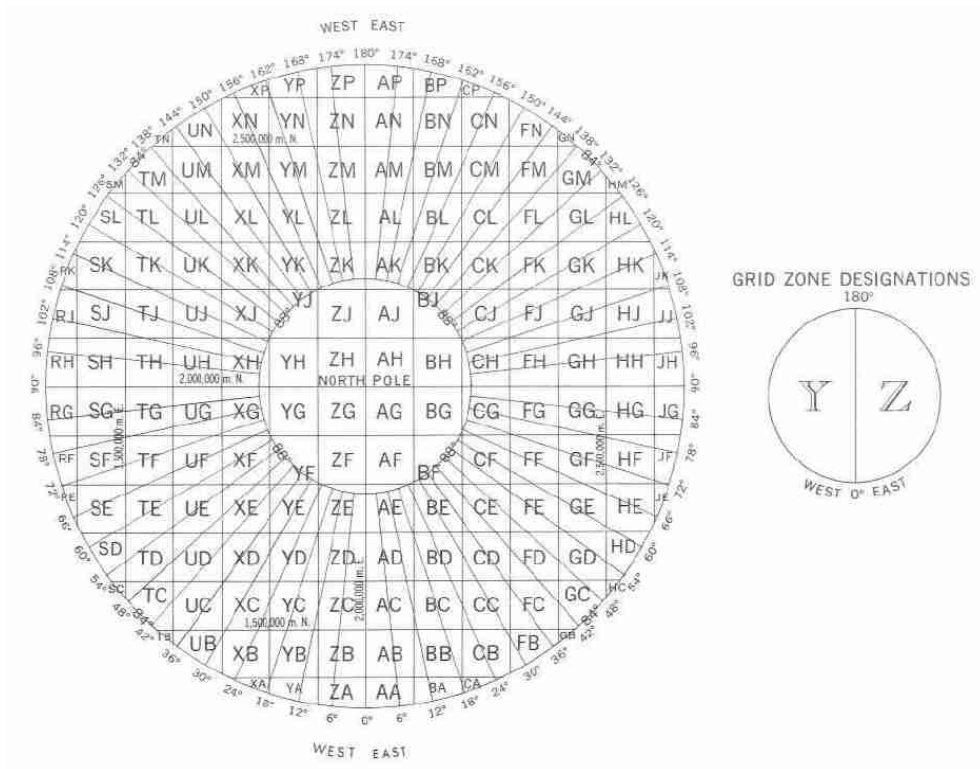


Fig. 10 - Identificazione dei quadrati di 100 chilometri di lato presenti nella calotta polare artica estesa dal polo nord fino alla latitudine 84° nord nelle fasce UTM Y occidentale e Z orientale (sopra) e in quella antartica estesa dal polo sud fino alla latitudine 80° sud nelle fasce UTM A occidentale e B orientale (sotto).

Ricavate le coordinate piane gaussiane E (est) e N (nord) dall'elemento cartografico si possono trasformare in quelle angolari geografiche λ (longitudine) e φ (latitudine) mediante l'utilizzo di formule

come quelle fornite dal geodeta finlandese Reino Antero Hirvonen (1908-1989) in *The use of subroutines in geodetic computations* (1970) qui di seguito riportate:

da (N; E) a (φ ; λ) [problema inverso] (formule di Hirvonen, 1970)

$$y = E - E_0 \quad c' = k_0 \frac{a^2}{b}$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad e_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{1 + \sqrt{1 - e^2}}$$

$$A_1 = k_0 a \left(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} \right)$$

$$B_2 = \frac{3e_1}{2} - \frac{27e_1^3}{32} \quad B_4 = \frac{21e_1^2}{16} - \frac{55e_1^4}{32} \quad B_6 = \frac{151e_1^3}{96} \quad B_8 = \frac{1097e_1^4}{512}$$

$$\xi = \frac{N}{A_1} + B_2 \sin 2 \frac{N}{A_1} + B_4 \sin 4 \frac{N}{A_1} + B_6 \sin 6 \frac{N}{A_1} + B_8 \sin 8 \frac{N}{A_1}$$

$$e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}} \quad v = \sqrt{1 + e'^2 \cos^2 \xi} \quad \lambda' = \arctan \frac{v \sinh \frac{y}{c'}}{\cos \xi}$$

$$\lambda = \lambda' + \lambda_0 \quad \varphi = \arctan [\tan \xi \cos(v\lambda')]$$

da (φ ; λ) a (N; E) [problema diretto] (formule di Hirvonen, 1970)

$$\lambda' = \lambda - \lambda_0 \quad c' = k_0 \frac{a^2}{b}$$

$$v_1 = \sqrt{1 + e'^2 \cos^2 \varphi} \quad \xi = \arctan \frac{\tan \varphi}{\cos(v_1 \lambda')}$$

$$v = \sqrt{1 + e'^2 \cos^2 \xi} \quad y = c' \operatorname{arcsinh} \frac{\cos \xi \tan \lambda'}{v}$$

$$A_1 = k_0 a \left(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} \right) \quad A_2 = k_0 a \left(\frac{3e^2}{8} + \frac{3e^4}{32} + \frac{45e^6}{1024} \right)$$

$$A_4 = k_0 a \left(\frac{15e^4}{256} + \frac{45e^6}{1024} \right) \quad A_6 = k_0 a \left(\frac{35e^6}{3072} \right)$$

$$x = A_1 \xi - A_2 \sin 2\xi + A_4 \sin 4\xi - A_6 \sin 6\xi$$

$$E = y + E_0 \quad N = x$$

legenda per le formule di Hirvonen (1970)		
a	raggio equatoriale (ellissoide)	esempio: 6 378 388 m (ellissoide di Hayford, 1909) 6 378 137 m (ellissoide WGS, 1984)
s	schiacciamento geometrico (ellissoide)	esempio: 0.003 367 003 367... (ellissoide di Hayford, 1909) 0.003 352 810 704... (ellissoide WGS, 1984)
b	raggio polare (ellissoide)	$b = a(1 - s)$
c	raggio curvatura polare (ellissoide)	$c = \frac{a^2}{b}$
e	eccentricità prima (ellissoide)	$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$
e'	eccentricità seconda (ellissoide)	$e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}}$
E ₀	falsa origine meridiana	500 000 m al meridiano centrale di ogni fuso UTM (per i punti a est del meridiano centrale)
N ₀	falsa origine equatoriale	10 000 000 m all'equatore (per i punti a sud dell'equatore)
λ ₀	longitudine del meridiano centrale del fuso	esempio: + 9° E da Greenwich per il fuso 32 (Italia) + 15° E da Greenwich per fuso 33 (Italia)
k ₀	coefficiente di contrazione (cartografia UTM)	0.9996
N	coordinata piana gaussiana NORD	ricavate dall'elemento cartografico (carta topografica)
E	coordinata piana gaussiana EST	
sinh	funzione trigonometrica seno iperbolico	$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ diretta $x = \operatorname{arcsinh}(y) = \log(y + \sqrt{y^2 + 1})$ inversa con base e = 2.718 281 828 459 045... (numero di Nepero)
π	di greco	3.141 592 653 589 793... (costante di Archimede)

Per saperne di più

- aa.vv. *Istruzione elementare sull'uso della quadrettatura UTM*, IGM Firenze 1952
- Aruta, L. - Marescalchi, P. *Cartografia. Lettura delle carte*, Flaccovio, Palermo 1981
- Bezoari, G. - Monti, C. - Selvini, A. *Fondamenti di rilevamento generale*, Hoepli, Milano 2 voll. 1984
- Buchroithner, M. F. - Pfahlbusch, R. *Geodetic grids in authoritative maps. New findings about the origin of the UTM Grid*, Cartography and Geographic Information Science, 2016 pp. 1-15
- Cannarozzo, S. *Corso di topografia ed esercitazioni*, Signorelli, Roma 4 voll. 1978
- Defense Mapping Agency *Datums, ellipsoids, grids and grid reference systems*, DMA Technical Manual 8358.1, rev. 1996
- Defense Mapping Agency *The Universal Grids: Universal Transverse Mercator UTM and Universal Polar Stereographic UPS*, DMA Technical Manual 8358.2, 1989
- Mazzucato, M.T. *Coordinate geografiche e gaussiane. Un metodo di trasformazione*, Matematicamente.it Magazine n. 20/2013 pp. 44-49
- Mazzucato, M.T. *Elementi di Orientamento*, Maggioli, Rimini 2007
- Mazzucato, M.T. *Il sistema cartografico UTM*, Orologi Solari n. 31/2023 pp. 48-54