

LE CORRENTI A GETTO NELLE ESTATI CALDE

Gianni Comini

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

gianni.comini@cism.it

28 novembre 2022

1 Eventi meteorologici estremi

“Negli ultimi anni, un gran numero di eventi meteorologici estremi si sono abbattuti sull’Emisfero Nord, alternando ondate di calore brucianti ad inverni molto freddi, alluvioni e tempeste a siccità prolungate e incendi nelle foreste. In tutto il Mondo, questi eventi hanno innescato discussioni intense nelle sedi più disparate: dalle conferenze scientifiche, alle agenzie governative, ai bar e agli angoli delle strade. Perché questi eventi hanno luogo? Sono un segnale del cambiamento climatico in atto e, quindi, la loro frequenza è destinata ad aumentare? Le spiegazioni riportate sui mezzi di comunicazione di massa sono ancora discordanti, ma in molti casi un misterioso agente ha assunto il ruolo di protagonista: la corrente a getto [T. Woolings, Jet Stream - quarta di copertina]”.

Partendo da questa spiegazione, condivisa da un numero crescente di meteorologi, nel seguito si cercherà di evidenziare la relazione tra il comportamento anomalo delle correnti a getto e gli eventi dell’estate 2022 (e delle 10 estati “più calde del secolo” che si sono avute dopo il 2003). Naturalmente si dovrà partire un po’ da lontano in quanto, per i non addetti ai lavori, le correnti a getto sono semplicemente quelle entità che, a detta dei piloti, accelerano gli aerei di linea da New York all’Italia mentre li ritardano nella direzione opposta. Invece, le correnti a getto sono un elemento essenziale della circolazione atmosferica globale e, come tali, saranno esaminate nel seguito.

2 Pressione atmosferica

La pressione atmosferica è la forza per unità di superficie esercitata nel punto di misura dalla colonna d’aria sovrastante o, se si vuole, il peso di una colonna d’aria di sezione trasversale unitaria. La pressione si misura in pascal [Pa] cioè in newton per metro quadrato [N/m²]. A livello del mare, alle nostre latitudini, il valore normale della pressione è pari a 101.325 Pa, ovvero 1,033 chilogrammi peso per centimetro quadrato.

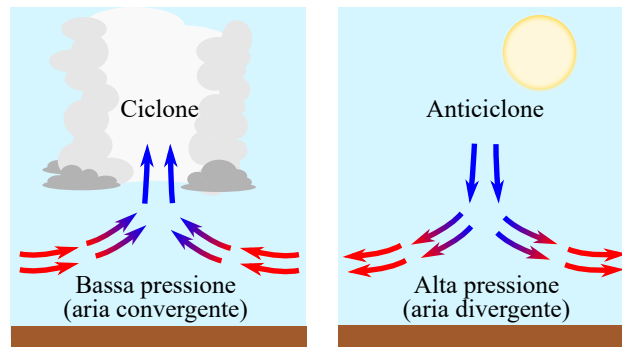


Figura 1: Definizioni meteorologiche di ciclone (a sinistra) e anticiclone (a destra) [G. Comini e M. Libralato, “Il Cambiamento Climatico”].

A livello locale, le variazioni di pressione forniscono indicazioni molto utili sull'evoluzione del tempo. Infatti, se la pressione locale al suolo è in diminuzione, la bassa pressione che si genera richiama correnti d'aria dalle zone circostanti che, non potendo ammassarsi all'infinita, sono costrette a salire. I moti ascendenti, però, trasportano l'aria umida dal suolo verso strati a pressione decrescente con conseguente espansione, raffreddamento e condensazione dell'umidità contenuta. Si genera così una configurazione ciclonica del tipo rappresentato nella Figura 1 a sinistra, dove la presenza di nubi lascia presagire un peggioramento del tempo.

Se invece la pressione locale al suolo è in aumento, l'alta pressione spinge fuori dalla zona di alta pressione gli strati atmosferici più bassi richiamando correnti d'aria degli strati superiori. In questo modo, i moti discendenti trasportano l'aria verso stati a pressione crescente, con conseguente compressione, riscaldamento ed evaporazione dell'umidità contenuta. Si genera così una configurazione anticiclonica del tipo rappresentato nella Figura 1 a destra, dove l'assenza di nubi lascia presagire un miglioramento del tempo.

Naturalmente, l'atmosfera tende a riportare in equilibrio le differenze di pressione per cui l'aria tende a spostarsi dalle zone di alta a quelle di bassa pressione e questo spostamento è ciò che chiamiamo “vento”.

2.1 Accelerazione di Coriolis

Dalla Figura 1 si potrebbe dedurre che i flussi d'aria convergenti e divergenti seguono un percorso rettilineo. In realtà non è così perché, almeno sulle lunghe distanze, si fa sentire l'effetto Coriolis, legato alla rotazione terrestre, che costringe i flussi a seguire dei percorsi a spirale. In conseguenza della rotazione terrestre, infatti, la velocità tangenziale di ogni punto della Terra diminuisce con la latitudine passando dai circa 1600 chilometri all'ora all'Equatore ad un valore nullo ai Poli. Quando i venti vanno verso nord o sud, cambiando latitudine, tendono a conservare la velocità tangenziale iniziale e, di conseguenza, subiscono delle deviazioni verso destra (est) nelle direzioni Equatore-Poli, e verso sinistra (ovest) nelle direzioni Poli-Equatore, come indicato nella Figura 2 a sinistra.

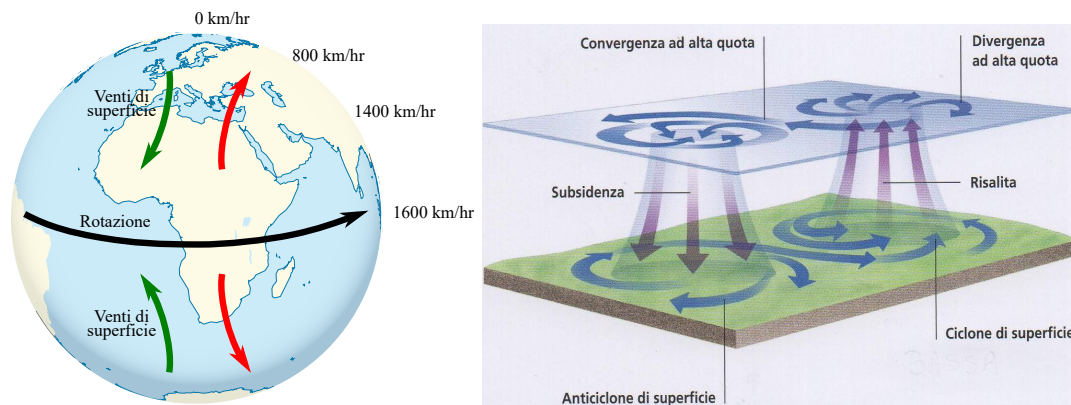


Figura 2: A sinistra: a causa dell'accelerazione di Coriolis, i venti di superficie nelle direzioni Equatore-Poli vanno verso latitudini minori e, tendendo a conservare la velocità tangenziale iniziale, subiscono delle deviazioni verso destra (est), mentre i venti nelle direzioni Poli-Equatore subiscono delle deviazioni verso sinistra (ovest) [G. Comini e M. Libralato, "Il Cambiamento Climatico"]. A destra: movimento dei venti nei cicloni e anticicloni che si sviluppano durante perturbazioni importanti dell'emisfero nord [B. Buckley, E.J. Hopkins e R. Whitaker, "Meteorologia"].

A queste deviazioni, percepite da chi sta su un sistema rotante come la Terra, si dà il nome di effetto Coriolis e, di conseguenza, alla accelerazione apparente che li accompagna si dà il nome di accelerazione di Coriolis. Come conseguenza dell'effetto Coriolis, il campo di moto non segue il gradiente di pressione ma viene deviato e, ad esempio, nelle perturbazioni importanti che si sviluppano su distanze abbastanza grandi nell'emisfero nord, i venti assumono delle vere e proprie configurazioni a spirale come quelle schematizzate nella Figura 2 a destra.

L'alternanza di convergenza e divergenza tra superficie ed alta quota è una ovvia conseguenza del principio di conservazione della massa. Nei cicloni si ha convergenza in basso e, per mantenere la risalita, si deve avere divergenza in alto, mentre negli anticicloni si ha divergenza in basso e, per mantenere la subsidenza si deve avere convergenza in alto. Nell'emisfero sud i sensi di rotazione delle perturbazioni si invertono pur mantenendo la convergenza in basso e la divergenza in alto per i cicloni, oltre che la divergenza in basso e la convergenza in alto per gli anticicloni. (A questo proposito, però, va osservato che l'effetto Coriolis ha bisogno di diversi chilometri per svilupparsi e, di conseguenza, va incontro a frustrazioni chi vuole riscontrare rotazioni antiorarie nello scarico di lavandini a vasche da bagno nell'emisfero nord, ovvero rotazioni orarie negli scarichi dell'emisfero sud: sulle distanze piccolissime come queste le rotazioni sono influenzate da fattori contingenti come, ad esempio, la posizione relativa di rubinetti e scarichi.)

3 La circolazione generale dell'atmosfera

La circolazione generale dell'atmosfera può essere considerata una media pluriennale dei flussi d'aria intorno al Mondo. Da questa media, per quanto approssimata, si possono

trarre indicazioni molto utili sulle origini dei venti dominanti e sui meccanismi di redistribuzione del calore dall'Equatore ai Poli. Il "motore" della redistribuzione è la diversa intensità dell'irraggiamento solare che è molto maggiore all'Equatore rispetto ai poli. Ciò genera delle differenze di temperatura che, a loro volta, danno origine ai venti ed è proprio grazie ai venti che le temperature raggiungono un equilibrio termico nel quale le temperature all'Equatore non aumentano senza sosta mentre quelle ai Poli non sono in costante diminuzione.

Per comprendere la circolazione generale è conveniente far riferimento a modelli semplificati che, però, siano in grado di giustificare gli andamenti osservati dei flussi d'aria che più condizionano i fenomeni atmosferici ed il clima delle diverse zone. Il più diffuso di questi modelli è quello a tre celle rappresentato nella Figura 3 dove in alto è riportata la schematizzazione tri-dimensionale della distribuzione dei venti dominanti e delle pressioni al suolo, mentre in basso è riportata una sezione meridiana che illustra la formazione delle correnti a getto nell'emisfero nord.

La più importante delle tre celle è quella di Hadley, che si estende dall'Equatore a circa 30° di latitudine ed è così chiamata in onore del meteorologo inglese George Hadley (1685-1768). All'Equatore l'aria calda e umida degli oceani sale, in entrambi gli emisferi, creando un'ampia area di bassa pressione al suolo verso la quale convergono dalle aree subtropicali gli Alisei con direzione nord-est nell'emisfero nord e con direzione sud-est dell'emisfero sud. (In inglese gli Alisei sono chiamati "trade winds" o "venti del commercio" in quanto, essendo diretti a sud-ovest nell'emisfero nord, hanno reso possibili le prime traversate dell'Atlantico, dall'Europa alle Americhe, ai tempi della navigazione a vela).

All'Equatore, l'aria calda e umida si raffredda durante la salita verso la tropopausa e l'umidità in essa contenuta condensa dando origine alla fascia piovosa nella Zona di Convergenza InterTropicale (ITCZ), nella quale si trovano le grandi foreste tropicali del Sud-America (Amazzonia), dell'Africa (Bacino del Congo) e del Sud-Est Asiatico (Indonesia, Malesia e Brunei). Nella zona di convergenza l'aria tende a salire, mentre i gradienti di pressione ed i venti orizzontali sono bassi al punto da avere fermato per settimane le imbarcazioni sull'Oceano ai tempi della navigazione a vela. Per questi fermi, i marinai dell'epoca avevano coniato l'espressione "in the doldrums" (che, nell'inglese attuale, è usata per indicare gli stati di assenza di attività).

Dopo essersi liberata dall'umidità nella zona ITCZ, e non potendo salire oltre la troposfera, l'aria in quota proveniente dall'Equatore deve dirigersi verso i poli (nel nostro emisfero verso il Polo Nord). La sua direzione, però, viene deviata progressivamente verso est dall'accelerazione di Coriolis mentre la convergenza dei meridiani (dal cerchio massimo dell'Equatore al singolo punto del Polo Nord) fa aumentare via via la quantità specifica d'aria trasportata per ogni settore longitudinale. A circa 30° gradi di latitudine, il flusso d'aria è quasi allineato (da ovest verso est) con i paralleli e, non potendo più avanzare, si divide in due flussi. Un flusso resta in alto e continua il suo percorso verso est dando origine alla "corrente a getto subtropicale", mentre l'altro scende e, nella discesa, si riscalda per compressione (dalle basse pressioni della tropopausa alla pressione atmosferica al livello del mare). Pertanto, arriva in superficie caldo e secco e qui si divide ulteriormente in due flussi: quello principale, più stabile, ritorna verso l'Equatore generando i già citati Alisei, mentre quello secondario e instabile si dirige verso nord e,

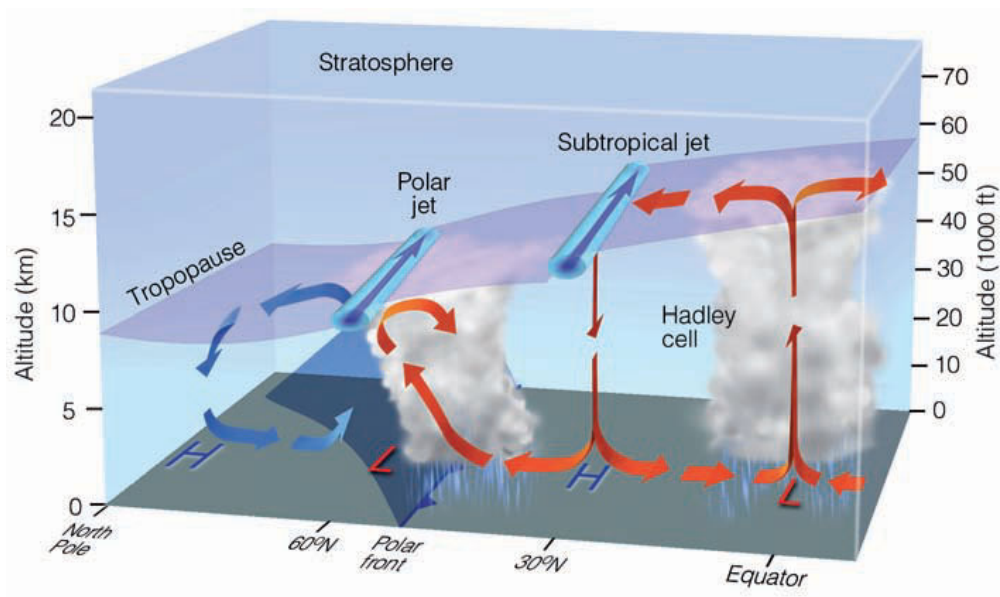
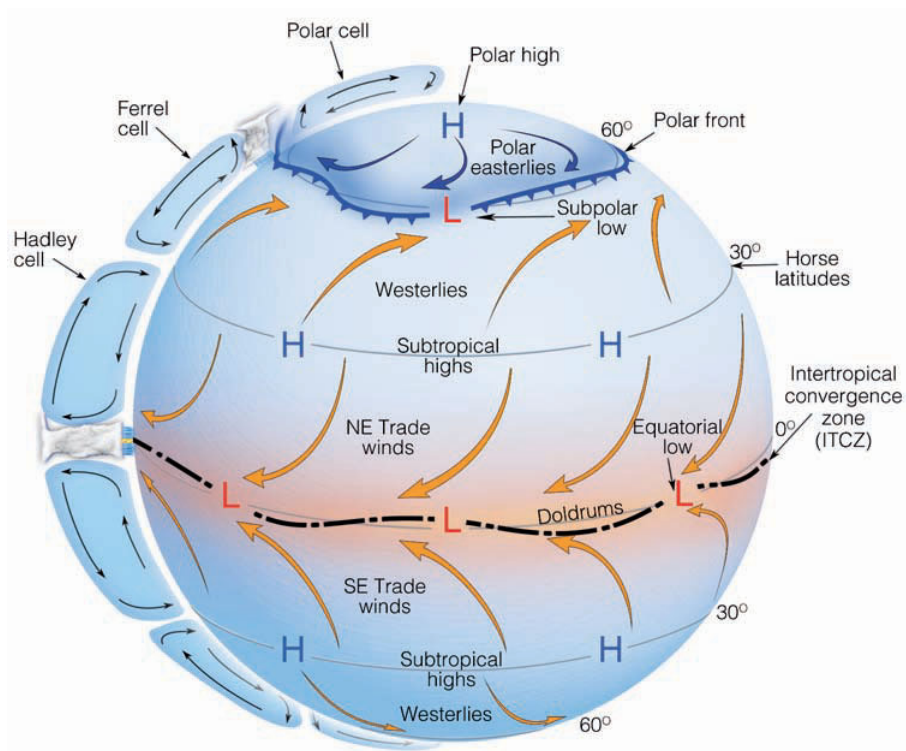


Figura 3: Modello a tre celle della circolazione generale dell'atmosfera. In alto: aree di alta e bassa pressione e venti dominanti al suolo e, in basso: sezione meridiana che illustra la formazione delle correnti a getto subtropicale e polare, entrambe dirette da ovest ad est [C.D. Ahrens e R. Henson "Meteorology Today"].

deviato progressivamente dall'accelerazione di Coriolis genera quei venti occidentali (in inglese "Westerlies") che, avendo direzione Nord-Est, hanno reso possibili i ritorni dalle Americhe verso l'Europa ai tempi della navigazione a vela.

Al suolo, in corrispondenza della discesa del flusso d'aria alla latitudine di 30° si trova un'area di alta pressione che comprende le zone più calde del Pianeta come, ad esempio, il deserto del Sarah in Africa, il deserto del Sonoran in America Settentrionale e il deserto australiano. Alla stessa latitudine sull'Oceano, vi è una zona di grande calma di vento poiché a causa della divergenza tra i due flussi d'aria, i gradienti di pressione orizzontali sono molto deboli. (Secondo la leggenda, ai tempi della navigazione a vela la calma di vento intorno alla "Horse Latitude" di 30° costringeva i marinai a liberarsi dei cavalli che morivano di sete buttandoli fuori bordo o, più verosimilmente, mangiandoseli).

A circa 60° di latitudine, i venti occidentali (Westerlies) diretti a nord-est, che sono umidi e relativamente tiepidi, incontrano i freddi venti polari orientali (in inglese Easterlies) diretti a sud-ovest. Invece di mescolarsi li scavalcano salendo rapidamente fino alla tropopausa dove si liberano dell'umidità generando così una zona di bassa pressione al suolo caratterizzata da nubi tempestose e forti precipitazioni. In alto nella tropopausa i venti occidentali si dividono in due flussi: quello principale continua il suo percorso verso est dando origine alla corrente a getto polare, mentre quello secondario resta in quota ma ritorna verso sud. Nel ritorno viene progressivamente deviato verso ovest dall'accelerazione di Coriolis fino a quasi allinearsi con i paralleli e scendere, riscaldandosi nella discesa, nella zona di alta pressione al suolo a 30° di latitudine. In questo modo si completa la cella di Ferrell che si estende dai 60° ai 30° di latitudine e prende il nome del meteorologo statunitense William Ferrell (1817-1891). (Va notato, tuttavia, che la descrizione del comportamento medio dei venti nella cella di Ferrell cade spesso in difetto poiché, come si è detto, i venti occidentali sono relativamente deboli e spesso sono instabili al punto da lasciare campo libero ad alternanze di cicloni e anticicloni del tipo schematizzato nella Figura 2 a destra).

La terza cella è quella polare, nella quale la circolazione dell'aria è simile a quella che si riscontra nella cella di Hadley con la differenza che le energie in gioco sono molto più modeste in quanto l'aria contiene poca umidità e le differenze di temperatura sono limitate. Di conseguenza, alla latitudine di 60° si ha una risalita lenta dell'aria che, una volta arrivata nella tropopausa, deve necessariamente dirigersi verso il Polo Nord. Al Polo l'aria ridiscende generando un'area di alta pressione al suolo caratterizzata dalla ben nota assenza di precipitazioni. Infine, la circolazione nella cella si chiude in superficie con i già citati venti polari orientali (easterlies).

3.1 Le correnti a getto

Le correnti a getto (in inglese "jet-streams"), scoperte da Terra fin dagli anni '30 grazie al movimento delle nubi, sono state "incontrate" per la prima volta dai piloti militari della seconda guerra mondiale durante i voli ad alta quota dagli Stati Uniti al Giappone. Ad un certo punto, volando in prossimità della tropopausa, i piloti dei bombardieri B29, si accorsero che stavano viaggiando ad una velocità verso terra dell'ordine dei 700 km/h, superiore di 150 km/h alla velocità massima che quei bombardieri erano in grado di raggiungere in condizioni normali.

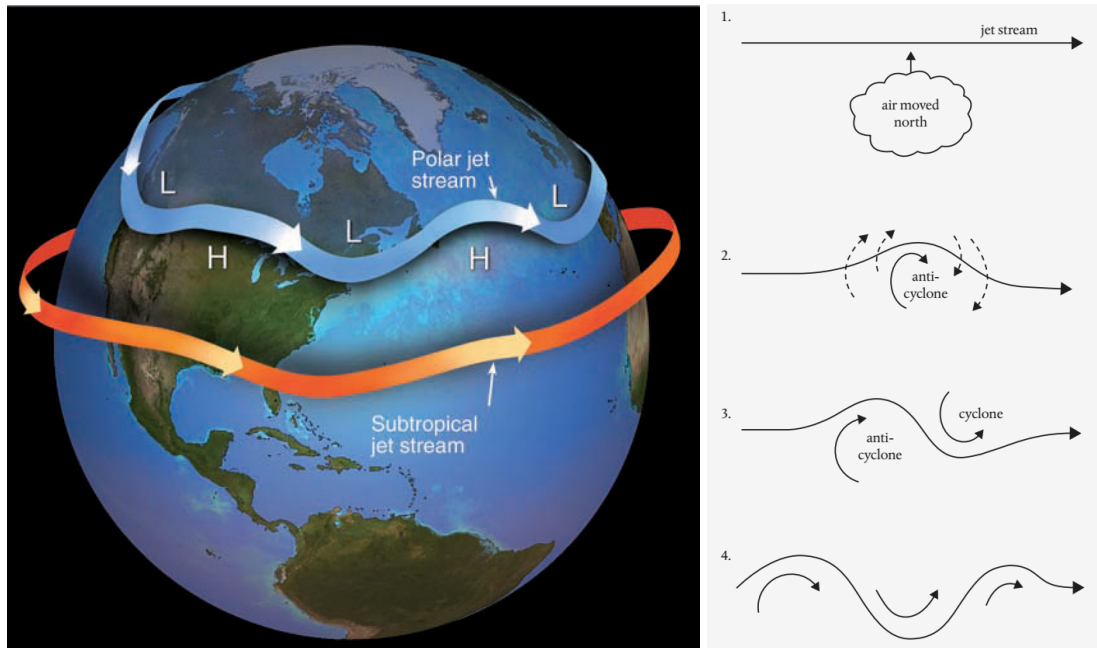


Figura 4: A sinistra: “istantanea” dell’andamento medio, tra ottobre e marzo, delle Onde di Rossby [C.D. Ahrens e R. Henson “*Meteorology Today*”]. A destra: sviluppo di un’Onda di Rossby nell’emisfero nord [T. Woolings “*Jet Stream*”].

Viste anche le implicazioni per i viaggi aerei, le correnti a getto sono state oggetto di intensi studi, condotti dapprima con sonde aerostatiche e, negli ultimi anni, con i satelliti meteorologici. In questo modo, le correnti a getto sono state da subito interpretate correttamente come componenti essenziali della circolazione generale nell’atmosfera mentre, solo successivamente, ci si è resi conto dell’influenza che esercitano sull’evoluzione dei fenomeni atmosferici a scala planetaria.

Nel precedente paragrafo si è visto che, in ogni emisfero, esistono due correnti a getto dirette da ovest verso est: la più intensa (e instabile) è la corrente a getto polare, mentre la meno intensa (ma più stabile) è la corrente a getto subtropicale. A differenza di quel che forse poteva far credere la schematizzazione della Figura 3 (sotto), le correnti a getto non seguono percorsi rettilinei ma hanno andamenti tortuosi solo mediamente allineati con i paralleli (si veda la Figura 4 a sinistra). Come sottolineato in didascalia, la figura è riferita all’emisfero nord ed è una “istantanea”, rappresentativa delle condizioni “medie” invernali. Infatti, le onde si spostano di giorno in giorno lungo i paralleli e, in condizioni normali, hanno un ciclo di vita non superiore alle due-tre settimane poiché, essendo costantemente alimentate da nuove masse d’aria, tendono ad aumentare l’ampiezza delle loro oscillazioni meridiane fino a rompersi. Queste oscillazioni sono chiamate Onde di Rossby in onore del meteorologo svedese Carl-Gustaf Rossby (1898-1957), che per primo le identificò nell’atmosfera e ne giustificò teoricamente l’esistenza.

Dal punto di vista meteorologico va notato che nei promontori si insediano anticicloni, mentre nelle saccature si insediano cicloni. Nella Figura 4 a sinistra, anticicloni e cicloni sono contrassegnati, rispettivamente, dalle lettere H (“high” cioè alta) ed L (“low” cioè

bassa), riferite alle pressioni in superficie che, appunto, sono alte nel caso degli anticicloni e basse nel caso dei cicloni. Per quanto riguarda la genesi, si può notare che le oscillazioni possono essere innescate da irregolarità al suolo, come i rilievi montuosi, dall'alternarsi in superficie di oceani e continenti, ma anche da semplici perturbazioni casuali che fanno arrivare masse d'aria più calde da sud ovvero più fredde da nord. Per convicersene senza ricorrere a troppe equazioni si può far ricorso ad un esempio che illustra la formazione di un treno d'onde causata dall'arrivo casuale di una massa d'aria calda da sud.

All'arrivo della massa calda, un osservatore che si sposti con la corrente a getto nell'emisfero nord può descrivere il meccanismo di destabilizzazione ricorrendo alle considerazioni implicite nella Figura 4 a destra. Se la massa d'aria calda arriva da sud (fase 1), si genera necessariamente un promontorio che ospita un anticiclone in quanto l'accelerazione di Coriolis ha certamente deviato verso destra (est) la massa, innescando così una rotazione in senso orario ovvero ciclonica (fase 2). A causa dei trascinamenti delle masse d'aria vicine (segnati a tratto) l'anticiclone si sposta verso sinistra (ovest) e genera una insaccatura a destra (est) che ospita un ciclone in quanto la rotazione è in senso orario (fase 3). A sua volta, a causa del trascinamento delle masse d'aria sull'altro lato, il nuovo ciclone genera un promontorio a destra (est) che ospita un anticiclone (fase 4). Si crea così un "treno" di anticicloni e cicloni che tende a spostarsi verso ovest rispetto al getto anche se, in condizioni normali, prevale la velocità di spostamento del getto che così trascina anche il treno d'onde verso est, ma a velocità inferiore a quella che avrebbe avuta in assenza di onde.

Per chi è interessato alle formule si può scrivere:

$$c = u - w = u - bL^2 \quad (1)$$

dove u è la velocità, diretta da ovest verso est, della corrente a getto, w è la velocità, diretta da est verso ovest, del treno d'onde che risale la corrente a getto, c è la velocità assoluta di avanzamento dell'intera configurazione, L è la lunghezza delle onde di Rossby. Poiché le velocità sono espresse in metri al secondo [m/s] e la lunghezza d'onda è espressa in metri [m], b è una costante dimensionale che tiene conto dell'accelerazione di Coriolis, ed a 45° di latitudine è pari a $0.41 \cdot 10^{-12}$ [1/(m s)].

3.2 Il blocco ad omega

Particolarmente importanti dal punto di vista meteorologico sono le situazioni in cui si ha $c = 0$ perché, quando si instaurano, "bloccano" la stessa configurazione per lunghi periodi sopra la stessa zona. Tali situazioni si verificano quando la lunghezza delle onde di Rossby è pari alla lunghezza critica che, ad esempio per una velocità della corrente a getto $u = 10$ m/s, bassa ma ormai non insolita nei mesi estivi, fornisce

$$L_c = \sqrt{\frac{u}{b}} = \sqrt{\frac{10}{0,41 \cdot 10^{-12}}} \approx 5 \cdot 10^6 \text{ m} = 5.000 \text{ km} \quad (2)$$

L'abbassamento della velocità della corrente del getto polare è dovuto al cambiamento climatico che è stato particolarmente forte nell'Artico, con la conseguenza di ridurre le differenze di temperatura tra la cella di Ferrell e la cella polare e con esse la forza motrice della corrente a getto polare.



Figura 5: Blocchi estivi ad omega sull'Italia nel 2022. La configurazione con l'anticiclone nord-africano al centro ed i due cicloni laterali richiama la lettera greca Ω (omega maiuscola) [Royal Meteorological Society].

Nell'estate del 2022, ciò ha consentito lo stabilirsi delle configurazioni stazionarie "ad omega" con le quali abbiamo dovuto familiarizzare per lunghi periodi. In tali situazioni, schematizzate nella Figura 5, a ovest discendeva il ciclone islandese che deviava verso nord-est il benefico ciclone delle Azzorre (apportatore di temperature relativamente miti e di frequenti e moderati temporali). Ciò consentiva l'avanzata verso nord della corrente a getto sub-tropicale e, insieme, dell'anticiclone africano caratterizzato da una vasta area di alta pressione. La configurazione ad omega era poi completata ad est da un secondo ciclone, proveniente dalla Siberia, che si instaurava nell'area caucasica.

Bibliografia

C.D. Ahrens e R. Henson, *Meteorology Today - An Introduction to Weather, Climate and the Environment - 13^a ed.*, Cengage, Boston, Ma., 2022.

B. Buckley, E.J. Hopkins a R. Whitaker, *Meteorologia*, Touring Club Italiano, 2006.

G. Comini e M. Libralato, *Il Cambiamento Climatico - Il Punto di Vista Fisico-Tecnico, Nuova Edizione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

D. Giaiotti, *Le onde di Rossby*, Dispense dal Corso di Fisica dell'Atmosfera, Università di Trieste, visto il 24.11.2022.

Meteo Expert, *Manuale di Meteorologia*, Alpha Test, Milano, 2019.

Met Office, *Blocking Weather Patterns*, [https://www.youtube.com/watch?v=Fr2EmBYDK_8], visto il 19/11/2022.

RMets, *Omega Block*, [<https://www.youtube.com/watch?v=vphrLPXTZhM>], visto il 20/11/2022.

R. Stull, *Practical Meteorology - An Algebra - based Survey of Atmospheric Science*, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2017.

T. Woollings, *Jet Stream - A Journey Through our Changing Climate*, Oxford University Press, Oxford, 2020.