



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI MILANO  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE  
DELLA TERRA "ARDITO DESIO"

COSP  
CENTRO FUNZIONALE PER  
L'ORIENTAMENTO ALLO  
STUDIO E ALLE PROFESSIONI



Aperitivi scientifici coi piedi per Terra!

Il respiro della Foresta. La sfida di  
misurare l'atmosfera in Amazzonia.



Luca  
Mortarini

## Definiamo la foresta amazzonica

Il bacino del Rio delle Amazzoni ospita **la più grande foresta pluviale della Terra**. Il bacino occupa il **40% della superficie del continente sudamericano** e comprende parti di: Brasile, Bolivia, Perù, Ecuador, Colombia, Venezuela, Guyana, Guyana Francese e Suriname.



**Il bioma amazzonico**

## Definiamo la foresta amazzonica

L'estensione dell'Amazzonia dipende dalla definizione utilizzata. Il Rio delle Amazzoni drena circa 6.915 milioni di chilometri quadrati, ma in genere si includono anche aree al di fuori del bacino quando si parla di "Amazzonia".

**L'Amazzonia biogeografica varia da 6,29 a 8,24 milioni di chilometri quadrati** (1.96 volte la superficie occupati dai 27 stati della comunità europea), di cui poco più **dell'80% è coperto da foresta.**



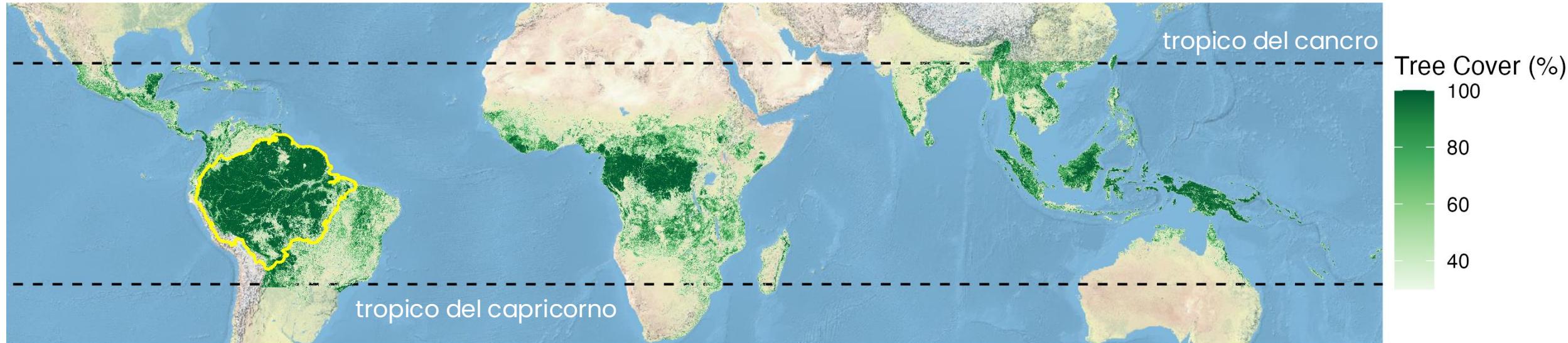
**Il bioma amazzonico**

# Definiamo la foresta amazzonica

Dove si trovano le foreste pluviali?

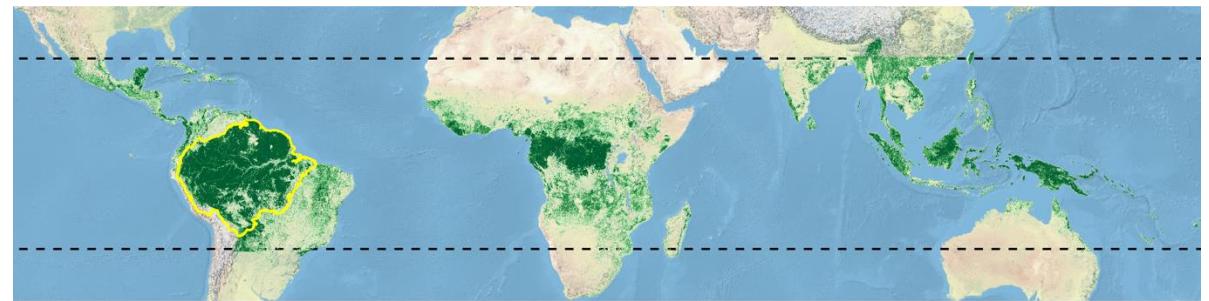
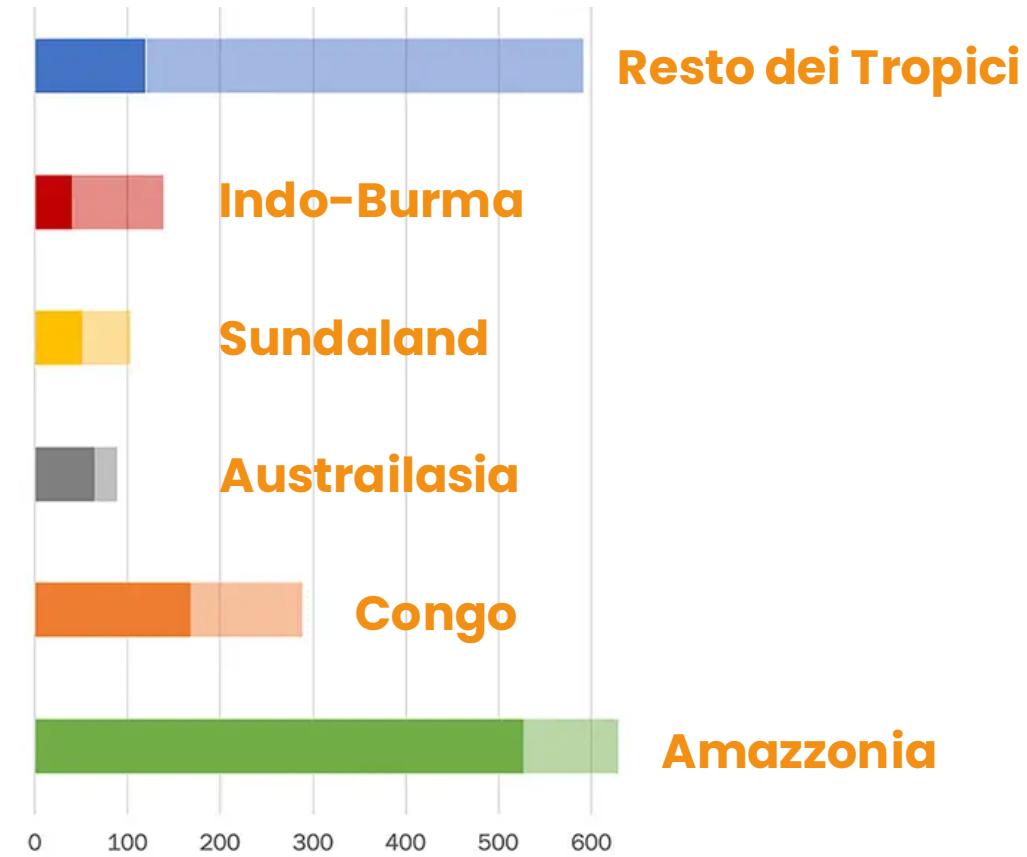
- Australasia** ~ Nuova Guinea, Australia nord-orientale
- Sundaland** ~ Malesia, Sumatra, Giava, Borneo
- Indo-Burma** ~ Birmania, Thailandia, Cambogia, Laos, Vietnam, Cina meridionale, India nord-orientale
- Congo** ~ Repubblica Democratica del Congo, Repubblica del Congo, Camerun, Repubblica Centroafricana, Gabon, Guinea
- Amazzonia** ~ Brasile, Bolivia, Perù, Ecuador, Colombia, Venezuela, Guyana, Guyana Francese e Suriname

## Le Grandi regioni biogeografiche delle foreste tropicali

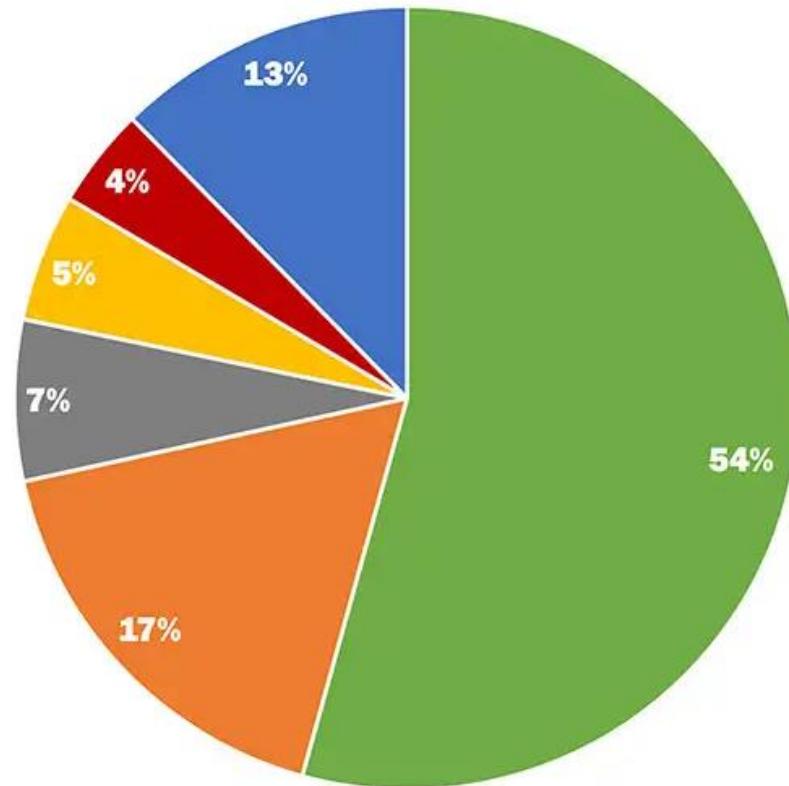


# La foresta primaria

Estensione in milioni di ettari



Percentuale di foresta primaria

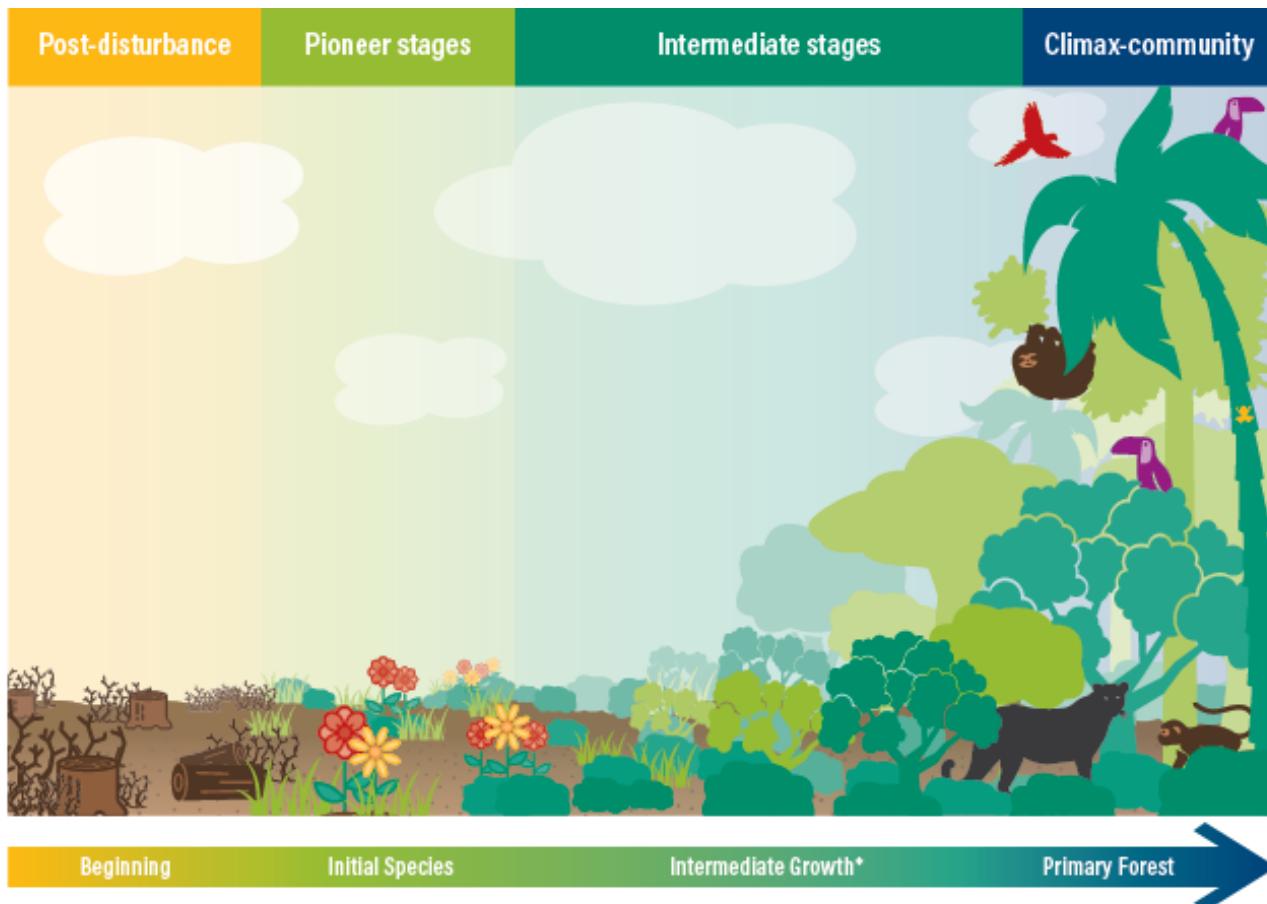


Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# La foresta primaria

La foresta primaria è la foresta nella sua forma definitiva. E' una foresta dominata da una copertura arborea continua che mantiene suolo e acqua non inquinati.

**Età:** Anticha, primaria, intatta — esistono molti termini utilizzati per descrivere le foreste più grandi, antiche e naturali della Terra. Questi vocaboli sono spesso usati in modo intercambiabile, ma nel contesto scientifico esistono distinzioni chiave che li differenziano. L'età è un fattore nella formazione di una foresta primaria, sebbene non esista un'età precisa in cui una foresta diventa "primaria". Tutte le foreste maturano a ritmi diversi in base al loro ambiente. Ciò che conta è il modo in cui gli ecosistemi cambiano da uno stato all'altro a seguito di una perturbazione.



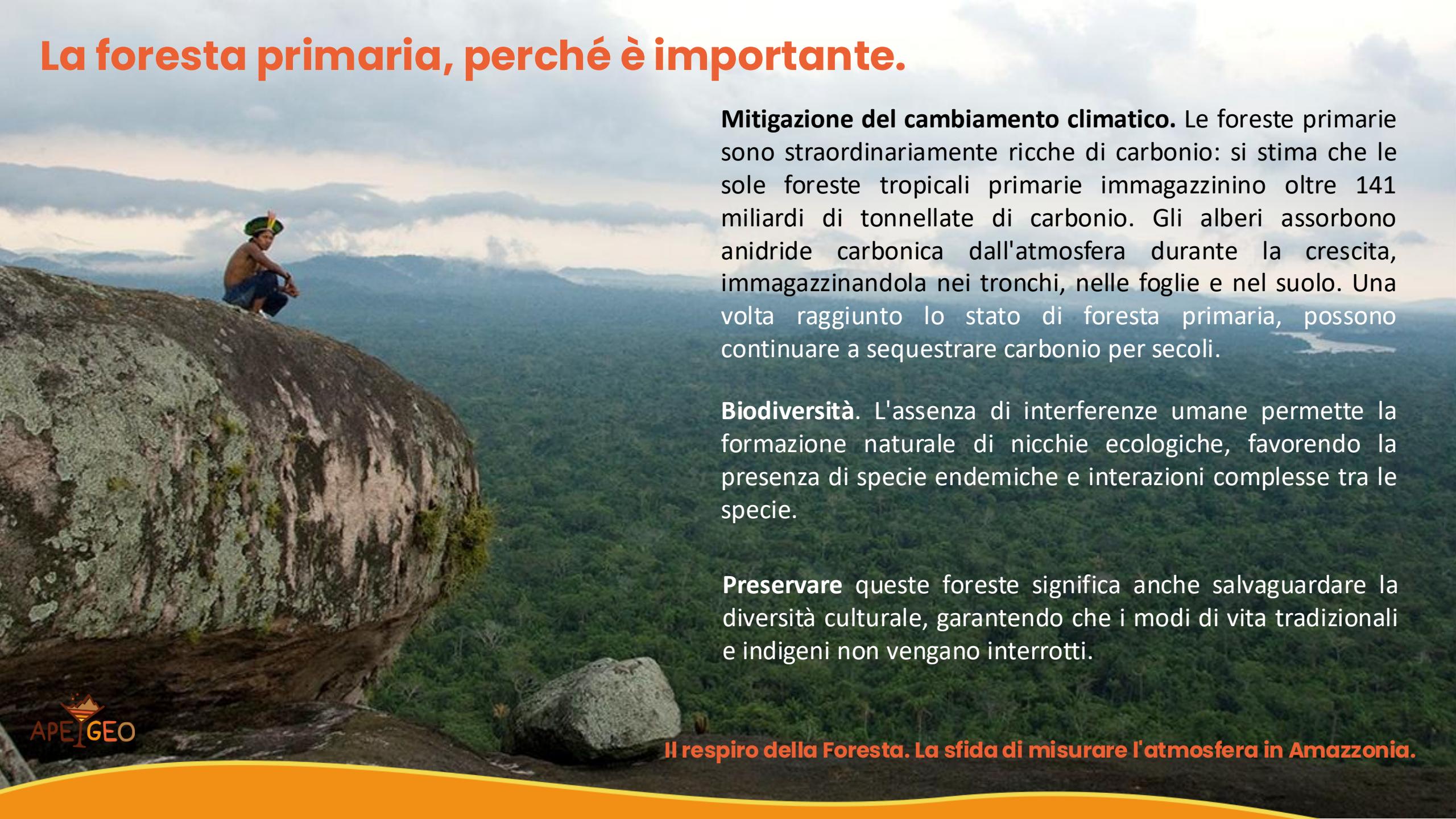
Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# La foresta primaria

**Integrità ecologica:** minima o assente interferenza umana, la composizione di specie native non deve essere alterata da specie invasive importate.



# La foresta primaria, perché è importante.



**Mitigazione del cambiamento climatico.** Le foreste primarie sono straordinariamente ricche di carbonio: si stima che le sole foreste tropicali primarie immagazzinino oltre 141 miliardi di tonnellate di carbonio. Gli alberi assorbono anidride carbonica dall'atmosfera durante la crescita, immagazzinandola nei tronchi, nelle foglie e nel suolo. Una volta raggiunto lo stato di foresta primaria, possono continuare a sequestrare carbonio per secoli.

**Biodiversità.** L'assenza di interferenze umane permette la formazione naturale di nicchie ecologiche, favorendo la presenza di specie endemiche e interazioni complesse tra le specie.

**Preservare** queste foreste significa anche salvaguardare la diversità culturale, garantendo che i modi di vita tradizionali e indigeni non vengano interrotti.

# L'Amazzonia, perché è importante. L'evapotraspirazione: **os rios voadores, i fiumi volanti**

Il south america low level jet svolge un ruolo fondamentale nella regolazione delle precipitazioni nella regione amazzonica e oltre.

Ogni giorno, 20 miliardi di tonnellate d'acqua vengono rilasciate nell'atmosfera dagli alberi dell'Amazzonia. Una quantità d'acqua circa 13 volte maggiore di quella scaricata dal fiume Mississippi.

Solo il 6% dei terreni agricoli in Brasile è irrigato, rendendo la regione fortemente dipendente dalle precipitazioni.



# In che senso la foresta respira?

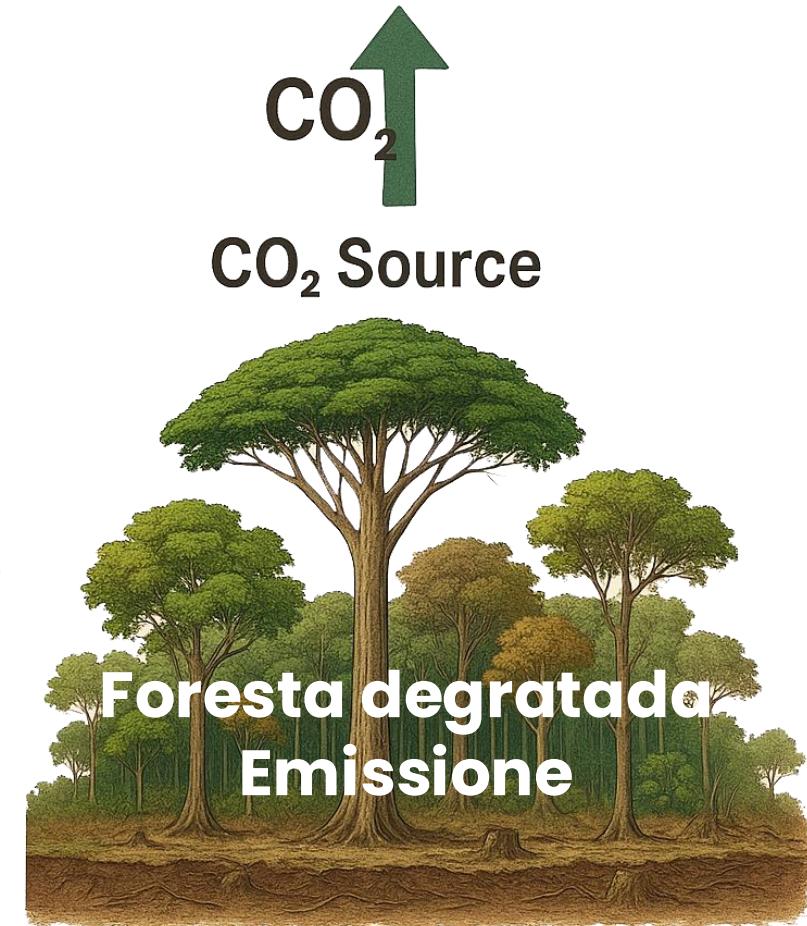
La foresta scambia CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> attraverso tre processi: la respirazione, la fotosintesi e la respirazione del suolo.

Il risultato di questi tre processi è lo scambio netto di carbonio dell'ecosistema (**Net Ecosystem Exchange, NEE**).

NEE > 0 → sorgente

NEE < 0 → pozzo

$$\text{NEE} = \text{Respirazione}_{\text{piante + suolo}} - \text{Fotosintesi}$$



Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# Quanto sappiamo delle emissioni di gas climalteranti dalle foreste?

## Flusso di Carbonio delle tre principali foreste pluviali



Pozzo

Pozzo

Sorgente

Flusso Netto  
Emissione  
Assorbimento

(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): -0.10  
(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): 1.1  
(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): -1.2

(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): -0.61  
(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): 0.53  
(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): -1.1

(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): 0.49  
(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): 1.6  
(Gt CO<sub>2</sub>e/yr): -1.1

Harris et al. (2021)

Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# Quanto sappiamo delle emissioni di gas climalteranti dalle foreste?

## Incertezza sulla stima del calcolo del flusso di carbonio

	boreale	temperata	subtropicale	tropicale	totale
Estensione (Mha)	1090	590	340	1990	4029
Flusso netto (GtCO <sub>2</sub> e yr <sup>-1</sup> )	$-1.6 \pm 1.1$	$-3.6 \pm 48$	$-0.65 \pm 0.81$	$-1.7 \pm 8.0$	$-7.6 \pm 49$

Harris et al. (2021)



Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# Quanto sappiamo delle emissioni di gas climalteranti dalle foreste?

## Incertezza sulla stima del calcolo del flusso di carbonio

	boreale	temperata	subtropicale	tropicale	totale
<b>Estensione (Mha)</b>	1090	590	340	1990	4029
<b>Flusso netto (GtCO<sub>2</sub>e yr<sup>-1</sup>)</b>	$-1.6 \pm 1.1$	$-3.6 \pm 48$	$-0.65 \pm 0.81$	$-1.7 \pm 8.0$	$-7.6 \pm 49$

**Abbiamo bisogno di misure migliori e, soprattutto, di una migliore comprensione dei processi che regolano lo scambio dei gas climalteranti tra la biosfera e l'atmosfera.**

# Un po' di fisica dell'Atmosfera!

L'equazione che regola la dinamica dell'atmosfera, una delle equazioni più belle della storia della fisica, si chiama equazione di **Navier-Stokes (1822)**:

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{\text{accelerazione locale}} + \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{\text{avvezione}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{forza di pressione}} + \nu \underbrace{\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}}_{\text{diffusione viscosa}}$$

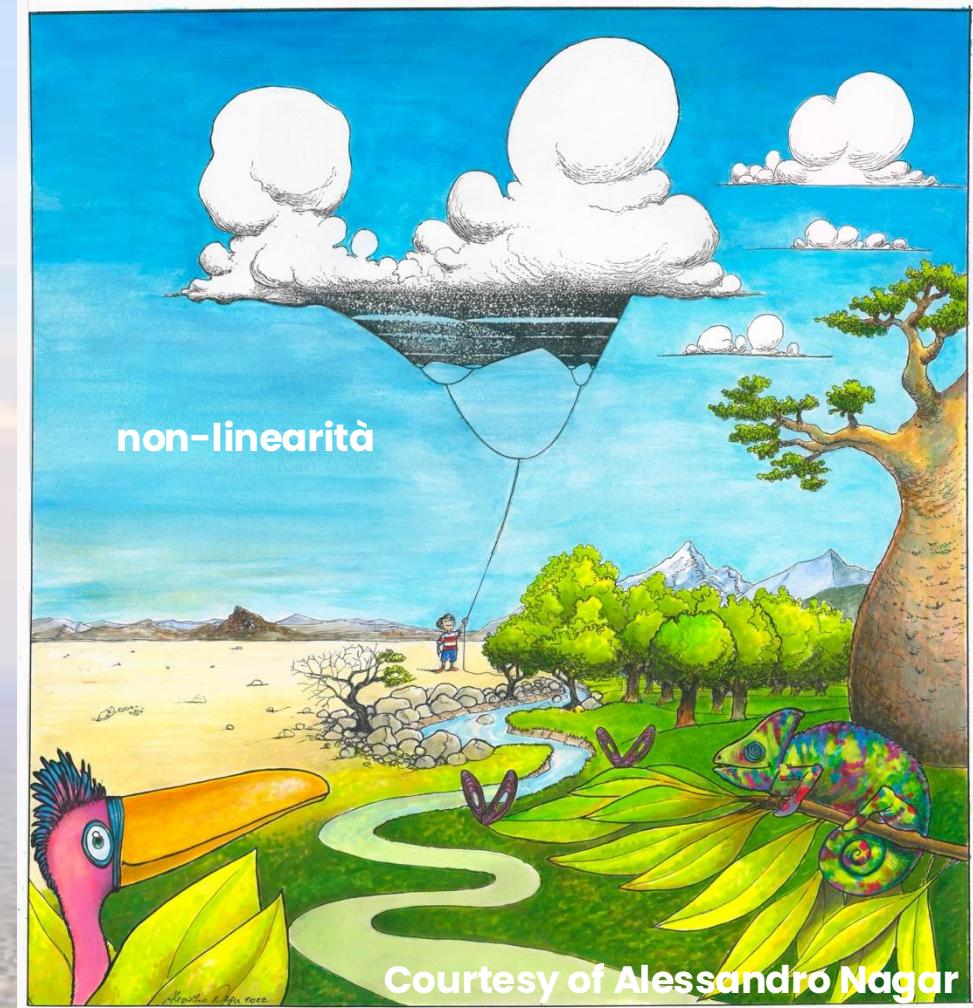
L'equazione di Navier-Stokes esprime il secondo principio della dinamica per i fluidi.

# Un po' di fisica dell'Atmosfera!

L'equazione che regola la dinamica dell'atmosfera, una delle equazioni più belle della storia della fisica, si chiama **equazione di Navier-Stokes (1822)**:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

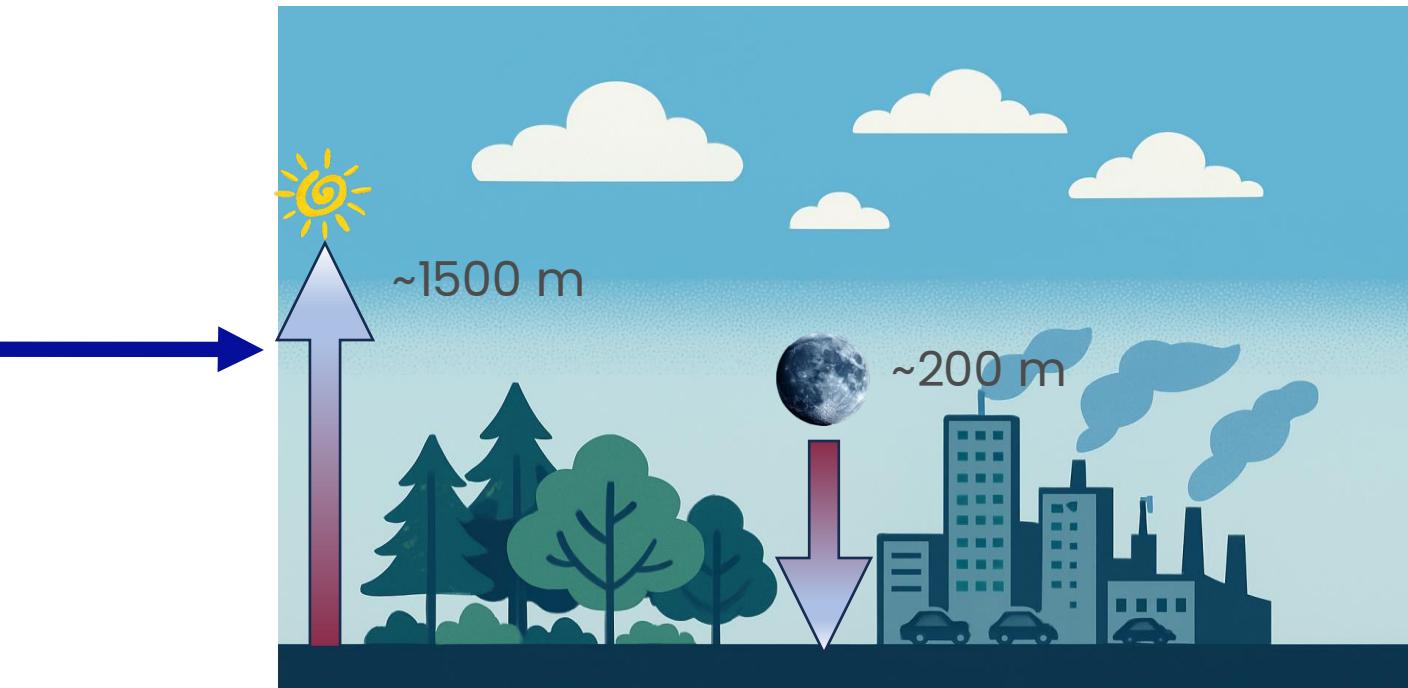
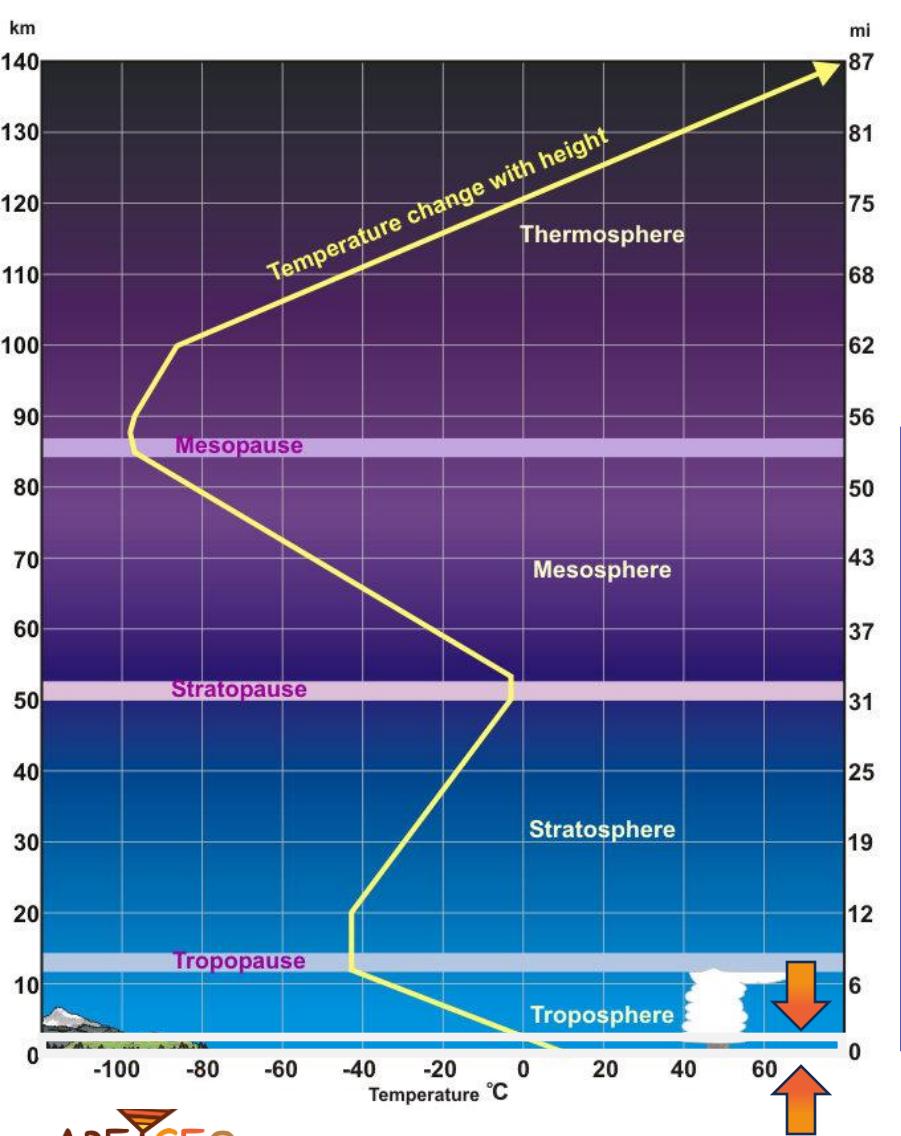
Apparentemente innocua, l'equazione di Navier-Stokes è uno dei Millennium Prize Problems selezionati dal Clay Mathematics Institute.



Courtesy of Alessandro Nagar

Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# La stretta di mano fra la biosfera e l'atmosfera: Lo strato limite planetario



Lo strato limite planetario è la porzione più bassa dell'atmosfera terrestre che risente direttamente dell'interazione con la superficie del pianeta (suolo, vegetazione, mari, città) su scale temporali dell'ordine di un'ora o meno.

Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# **La stretta di mano fra la biosfera e l'atmosfera: Lo strato limite planetario**



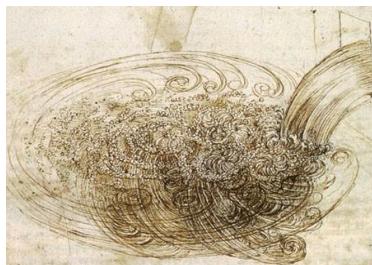
Courtesy of Lorenzo Gentile



# La stretta di mano fra la biosfera e l'atmosfera: La turbolenza

Un **flusso atmosferico** è il modo in cui la superficie terrestre scambia energia e sostanze con l'atmosfera.. Possiamo immaginare un flusso come un **trasporto** di calore di umidità o di gas che avviene dal suolo verso l'atmosfera o viceversa. I flussi sono il linguaggio con cui la biosfera e l'atmosfera comunicano.

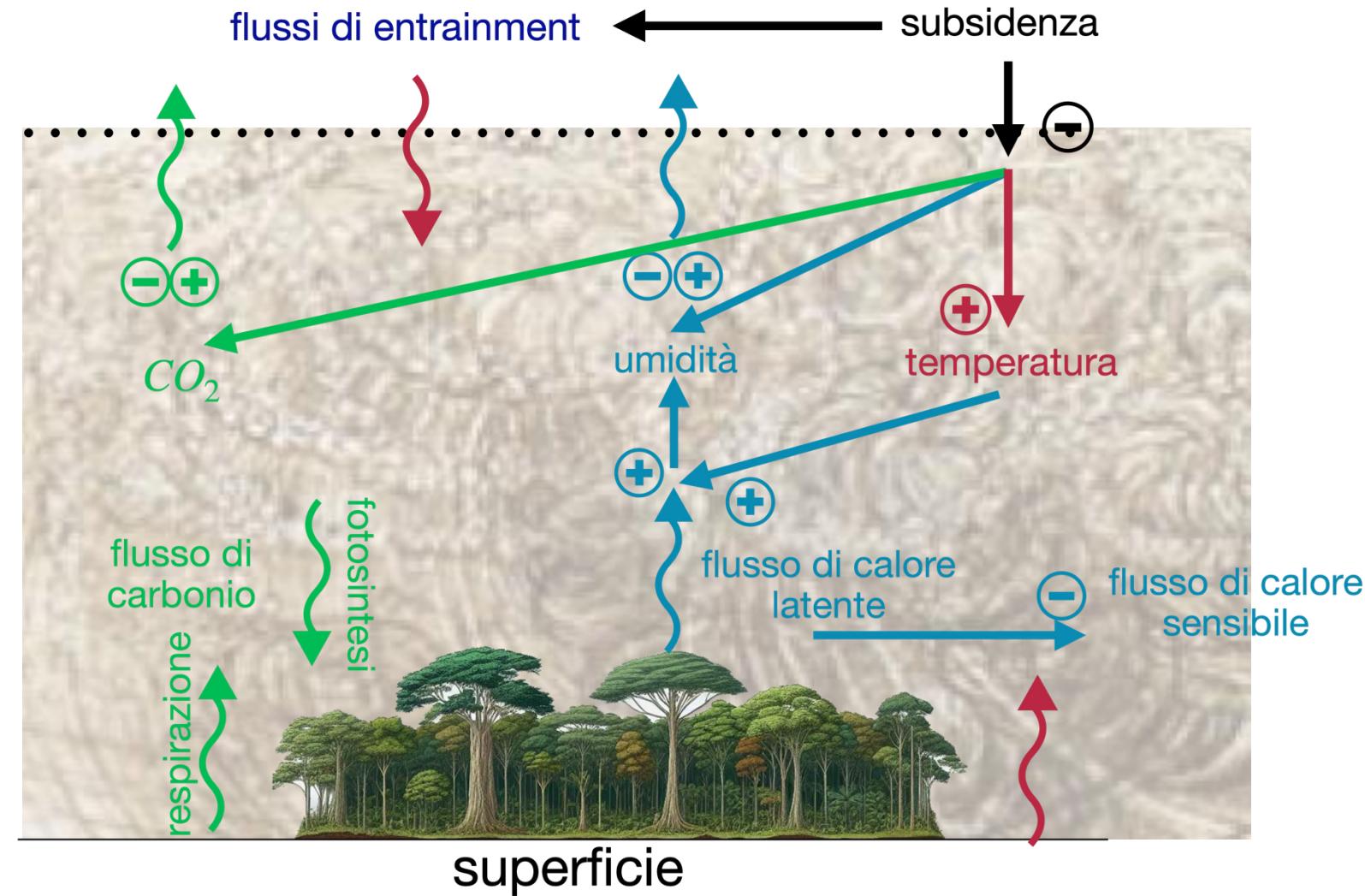
Leonardo,  
1509



I flussi atmosferici sono regolati dal **rimescolamento turbolento**, ovvero l'energia e i gas sono dispersi all'interno di strutture turbolente che possiamo immaginare come una miriade di vortici e mulinelli.



## Strato limite planetario



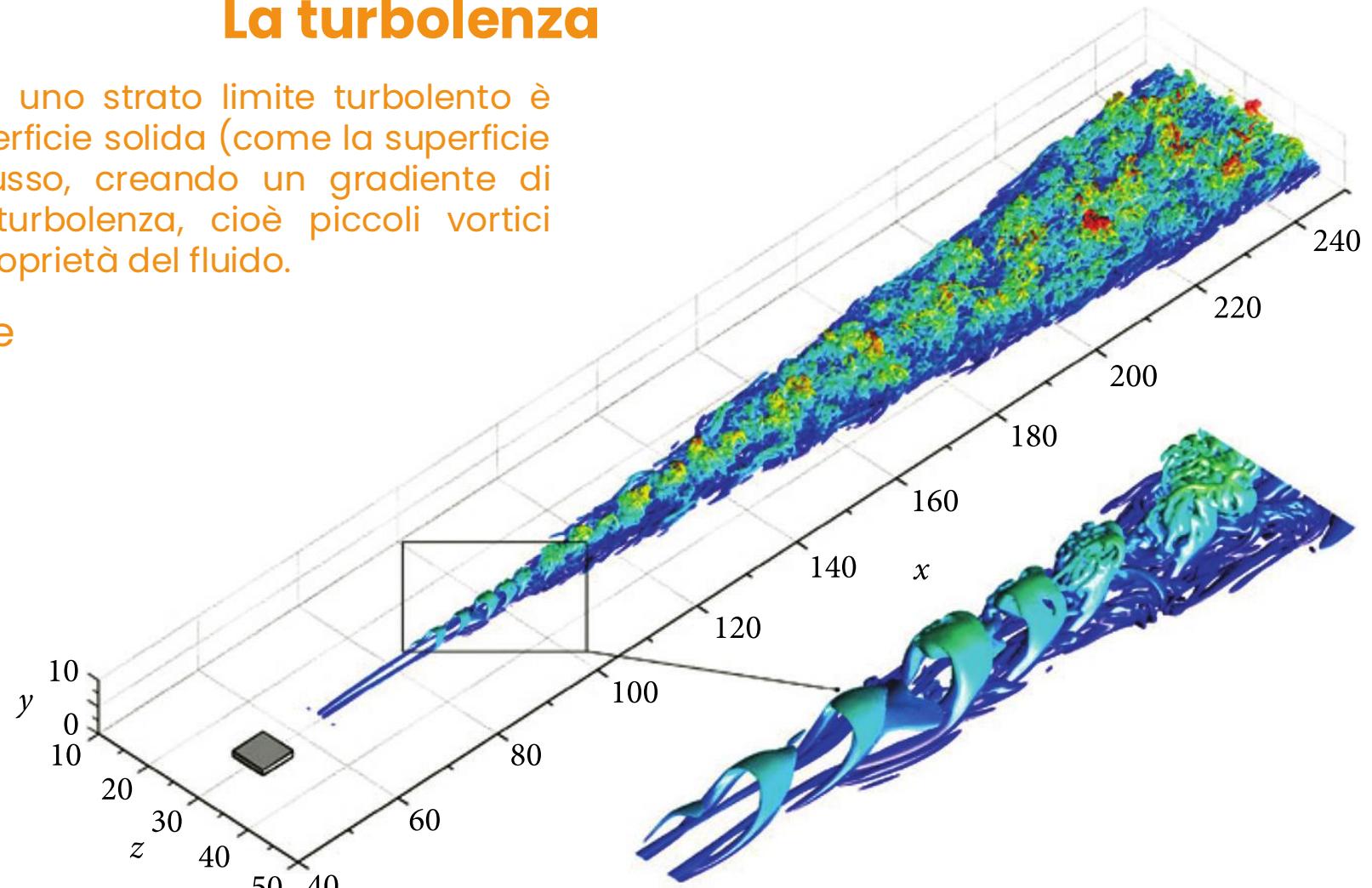
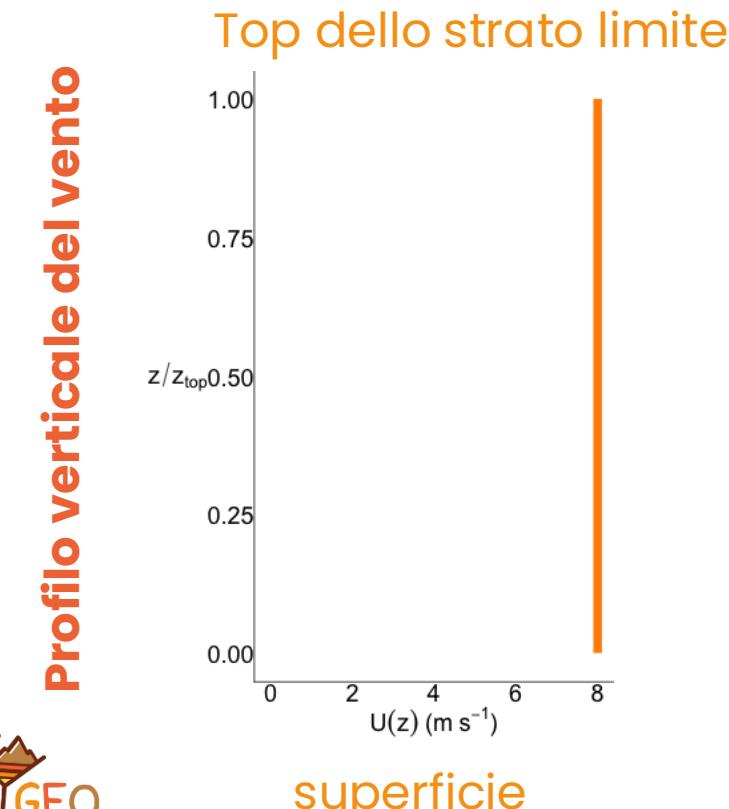
Adattato da Combe et alii (2015)

Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# Fisicamente, cosa è uno strato limite?

## La turbolenza

Escludendo i processi termodinamici, uno strato limite turbolento è una regione di fluido vicina a una superficie solida (come la superficie terrestre) dove l'attrito rallenta il flusso, creando un gradiente di velocità. Questo gradiente genera turbolenza, cioè piccoli vortici caotici che mescolano l'energia e le proprietà del fluido.

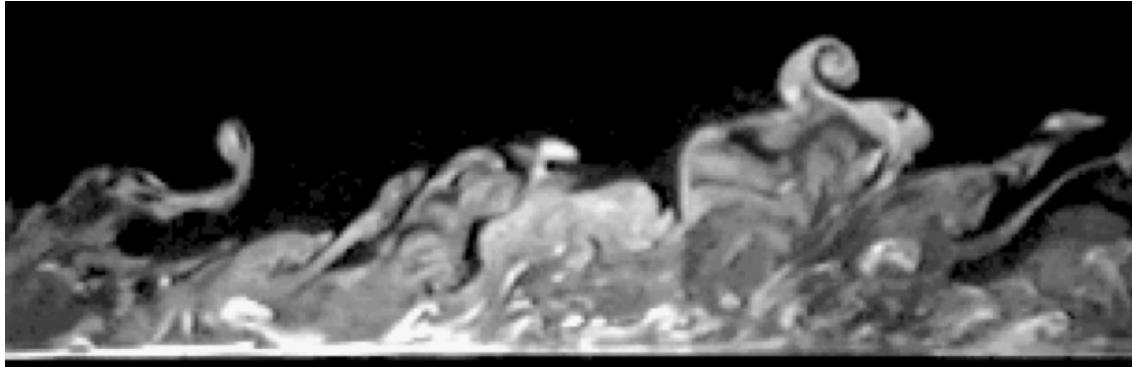


Davidson (2017)

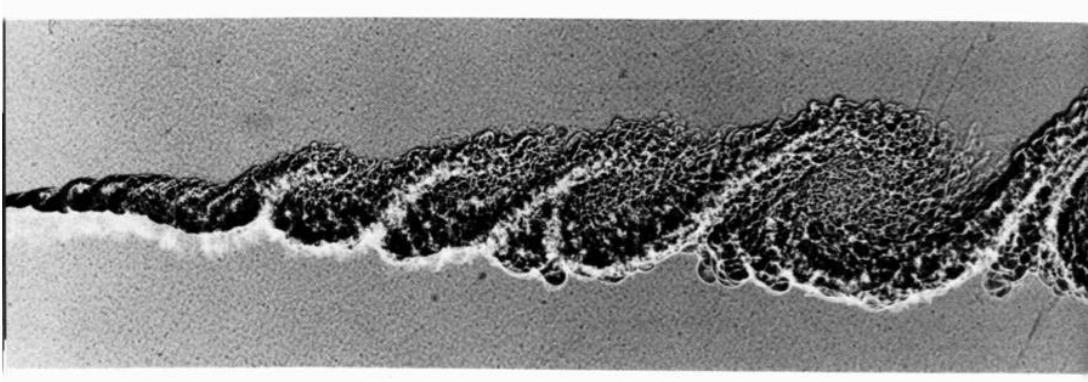
Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# Come la foresta influenza la turbolenza: Il mixing layer

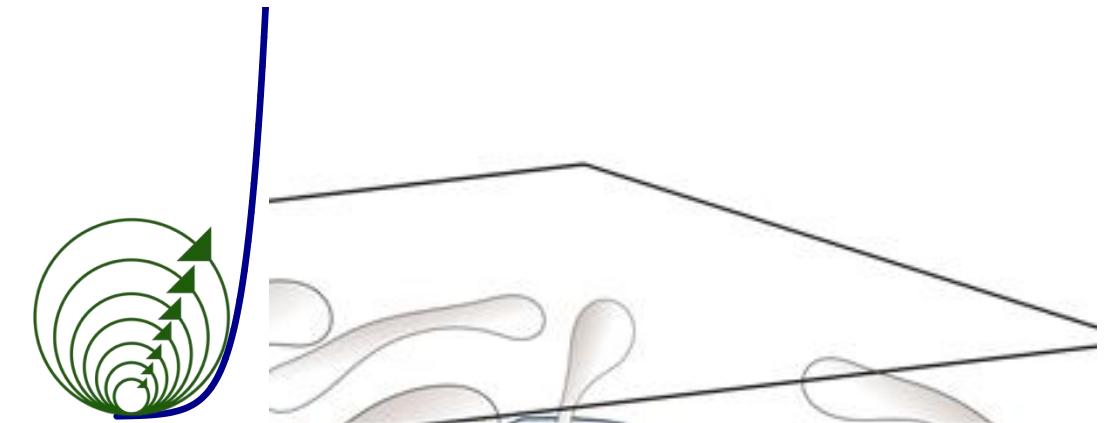
Boundary layer



Mixing layer



Profilo della  
Velocità del vento



struttura dei  
vortici turbolenti



Van Dyke (1982)

Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.



# Il progetto ATTO

## Amazon Tall Tower Observatory

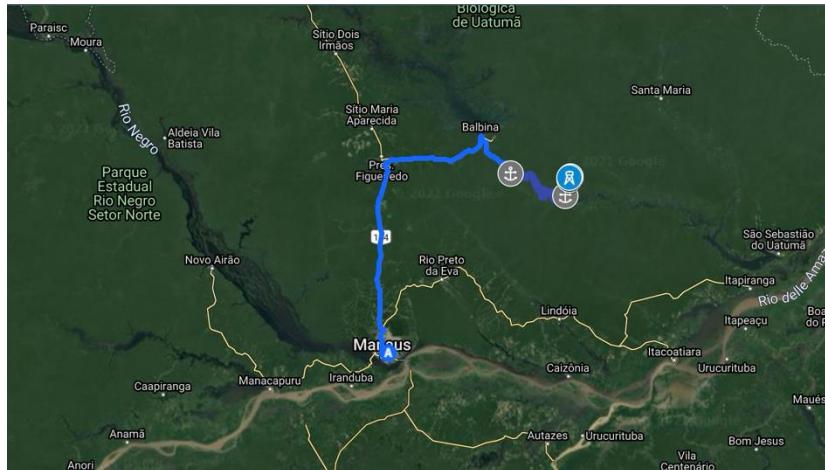


Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.



# Il progetto ATTO

## Amazon Tall Tower Observatory



ATTO si trova all'interno della Riserva di Sviluppo Sostenibile dello Uatumã, un affluente del Rio delle Amazzoni, in un'area incontaminata, finora per lo più non interessata dalla deforestazione o da altre interferenze umane. Questo garantisce che rimarrà indisturbata ancora per alcuni anni. Il progetto verrà infatti finanziato per 30 anni, permettendo misure che vanno dalla scala turbolenta a quella climatica.



**Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.**



# Il progetto ATTO

## Amazon Tall Tower Observatory

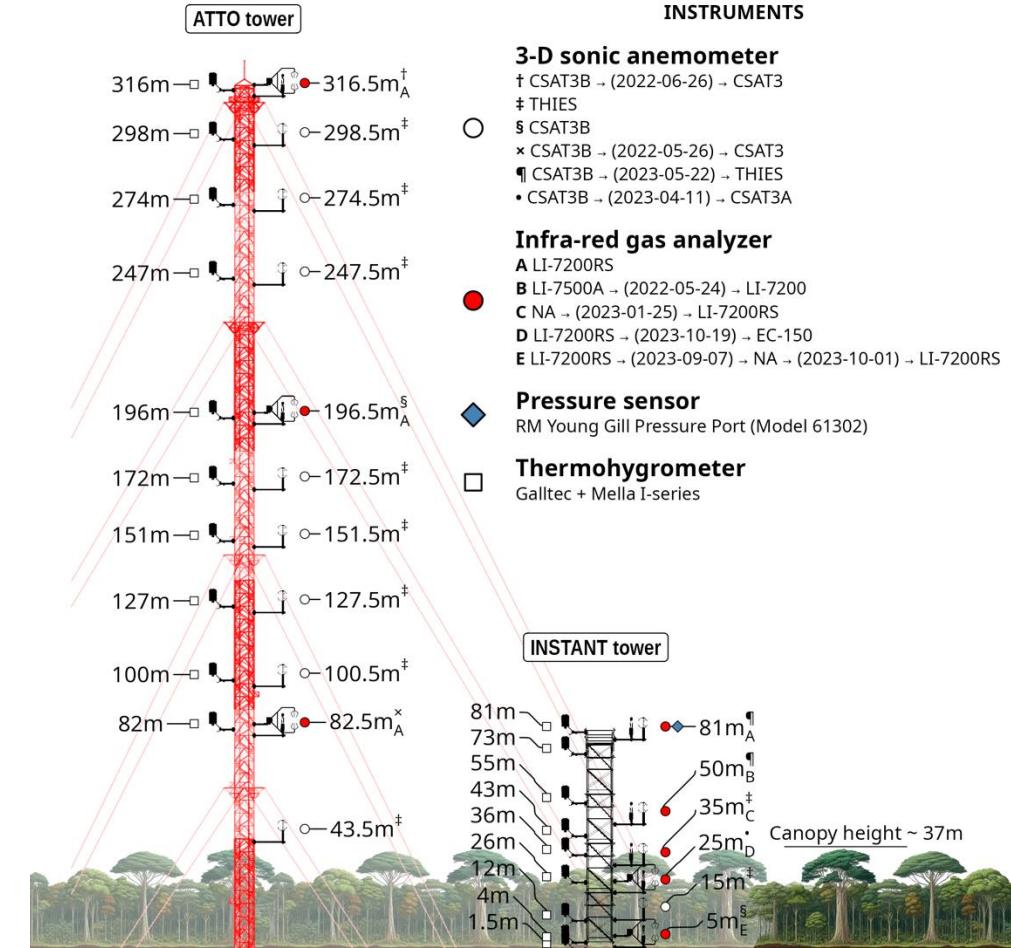
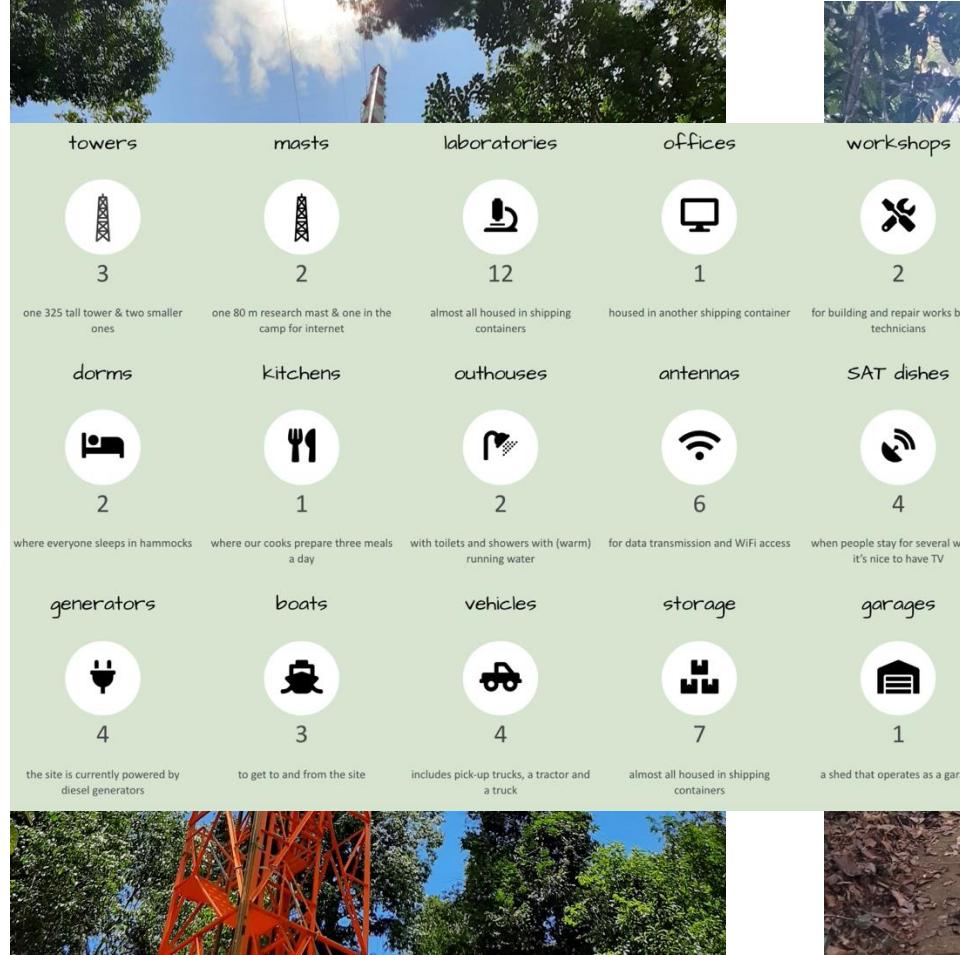


Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.



# Il progetto ATTO

## Amazon Tall Tower Observatory



Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# L'anemometro sonico



# L'anemometro sonico

Un **anemometro ultrasonico** misura le componenti della velocità del vento usando impulsi sonori.

Tre coppie di trasduttori disposti lungo tre assi emettono e ricevono ultrasuoni e calcolano il tempo di volo degli impulsi tra le varie coppie.

**Il tempo che il suono impiega a viaggiare da un sensore all'altro dipende dalla velocità del vento.**

Confrontando il tempo di andata e ritorno lungo ogni asse, lo strumento calcola:

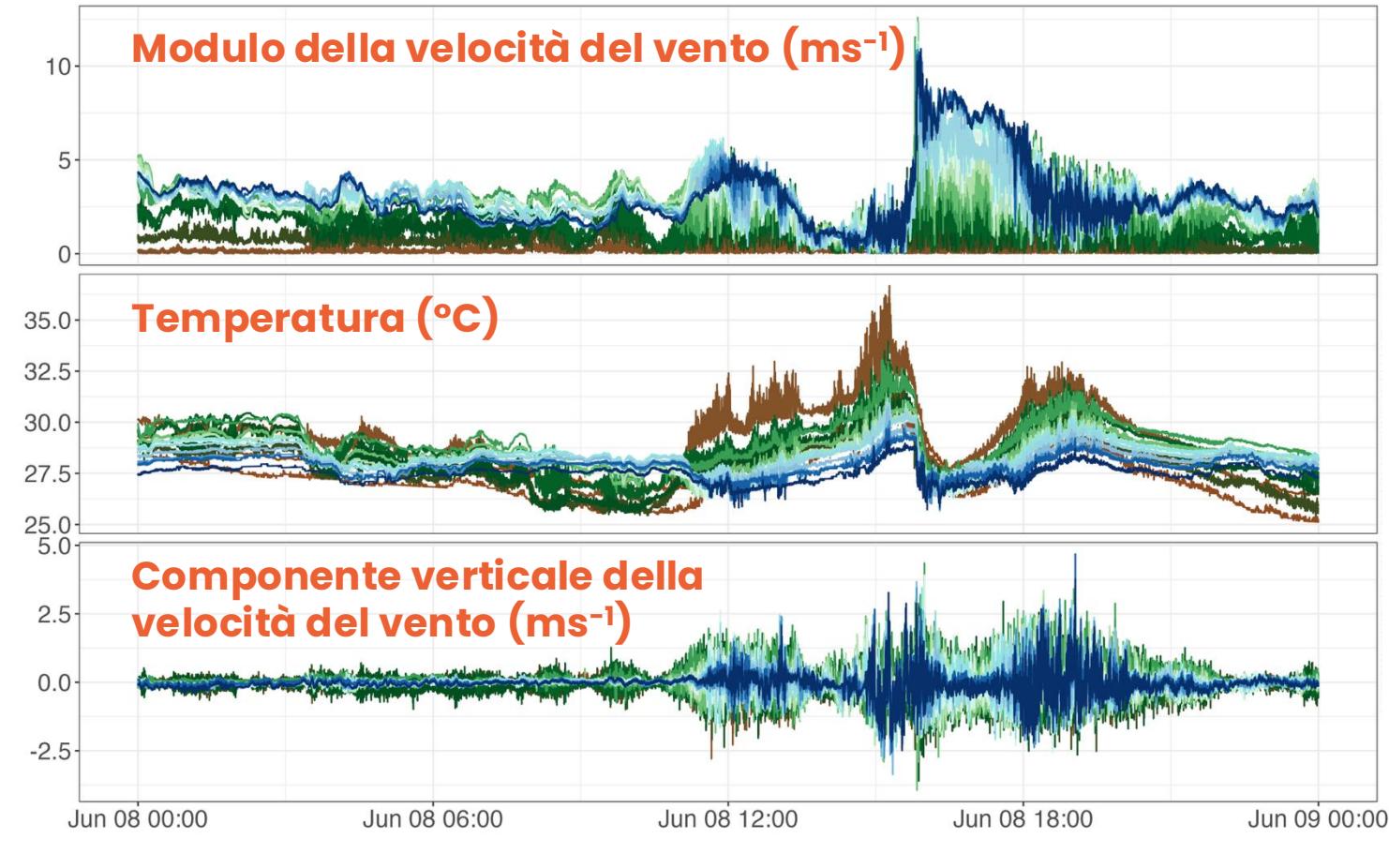
la **velocità del vento** in ogni direzione,

la **temperatura dell'aria** (la velocità del suono dipende, infatti, dalla temperatura).

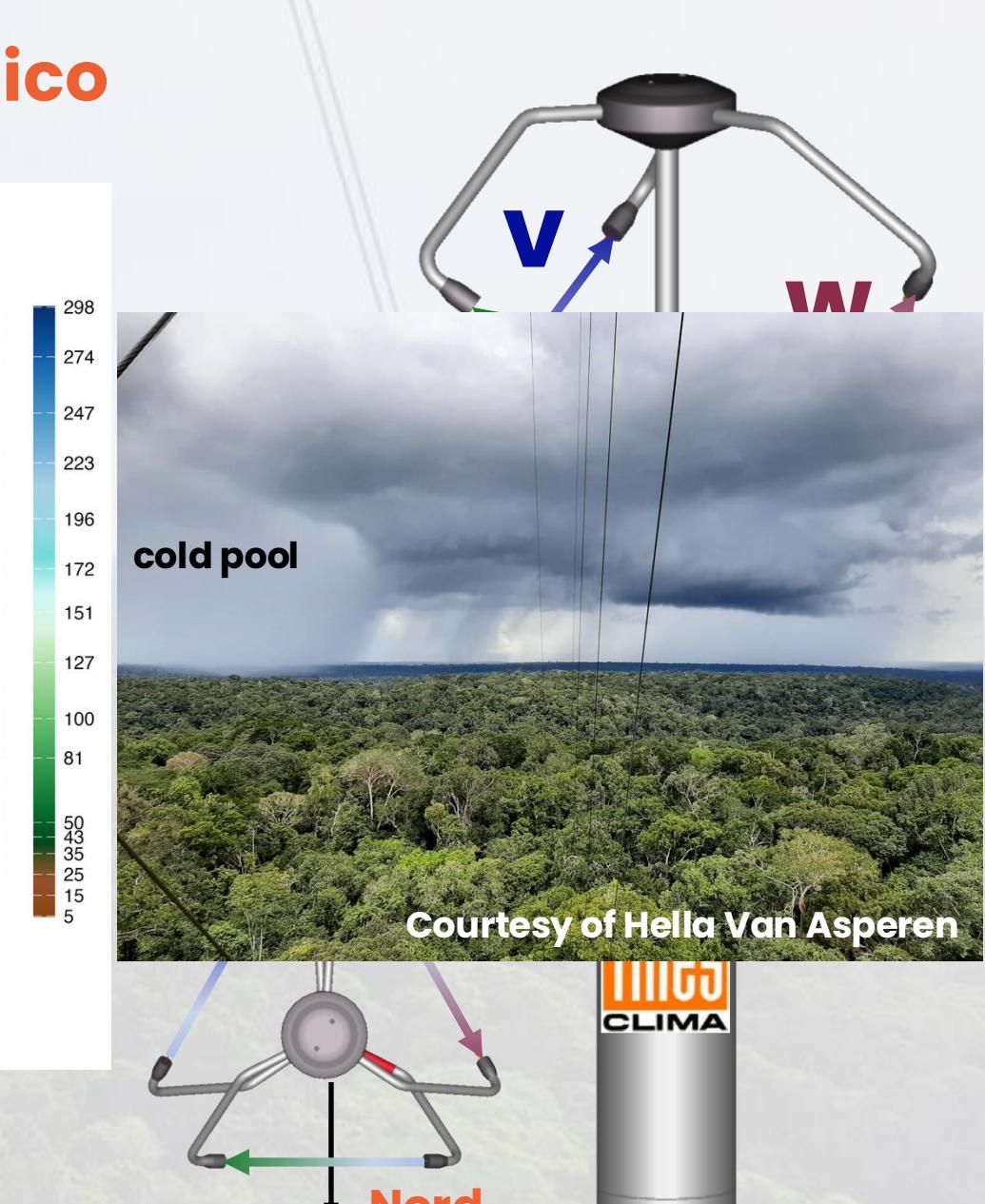


**Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.**

# L'anemometro sonico



Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.



# L'analizzatore di gas: LICOR 7200RS



Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

# L'analizzatore di gas: LICOR 7200RS

Attraverso spettroscopia infrarossa non dispersiva, il **LI-COR 7200 RS** misura la concentrazione di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e di vapore acqueo ( $\text{H}_2\text{O}$ ) nell'aria, in tempo reale.

L'aria viene aspirata in una camera chiusa dove viene attraversata da una radiazione infrarossa. Le molecole di  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  assorbono la radiazione infrarossa a lunghezze d'onda specifiche e, attraverso l'assorbimento della radiazione infrarossa, lo strumento misura la concentrazione (in  $\mu\text{mol/mol}$  o  $\text{ppm}$ , per esempio) ad alta risoluzione temporale (fino a 20 Hz).



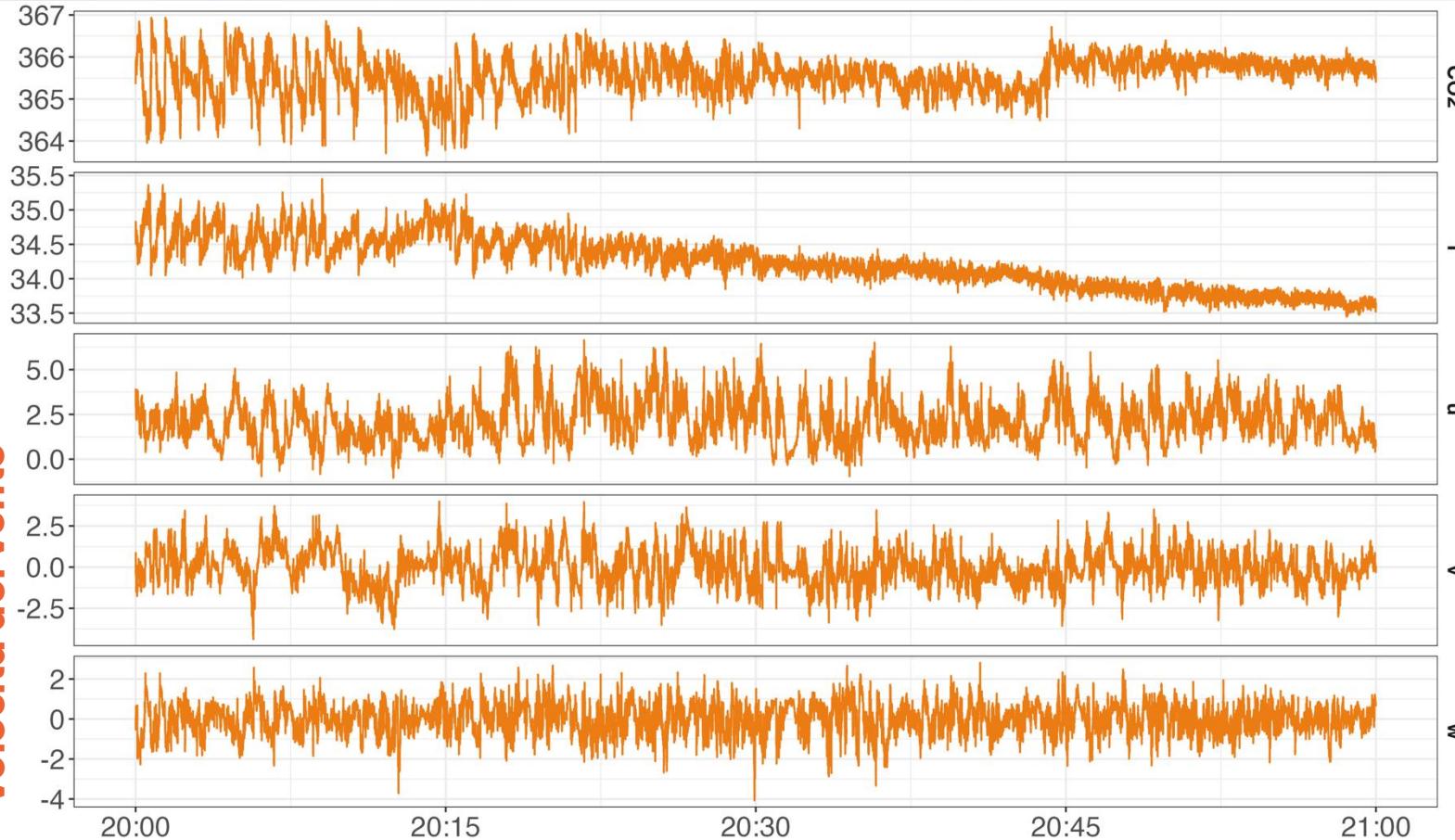
Per calcolare il flusso di  $\text{CO}_2$  è necessario accoppiare il LICOR ad un anemometro sonico. L'insieme di anemometro e analizzatore di gas costituisce un sistema di **eddy covariance**.



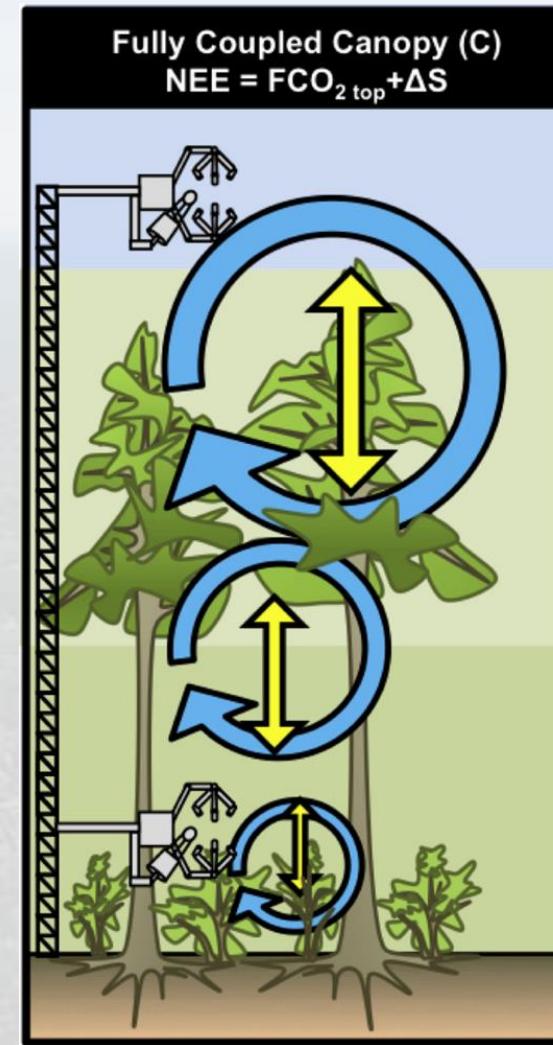
**Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.**

# L'analizzatore di gas: LICOR 7200RS

Componenti della  
velocità del vento



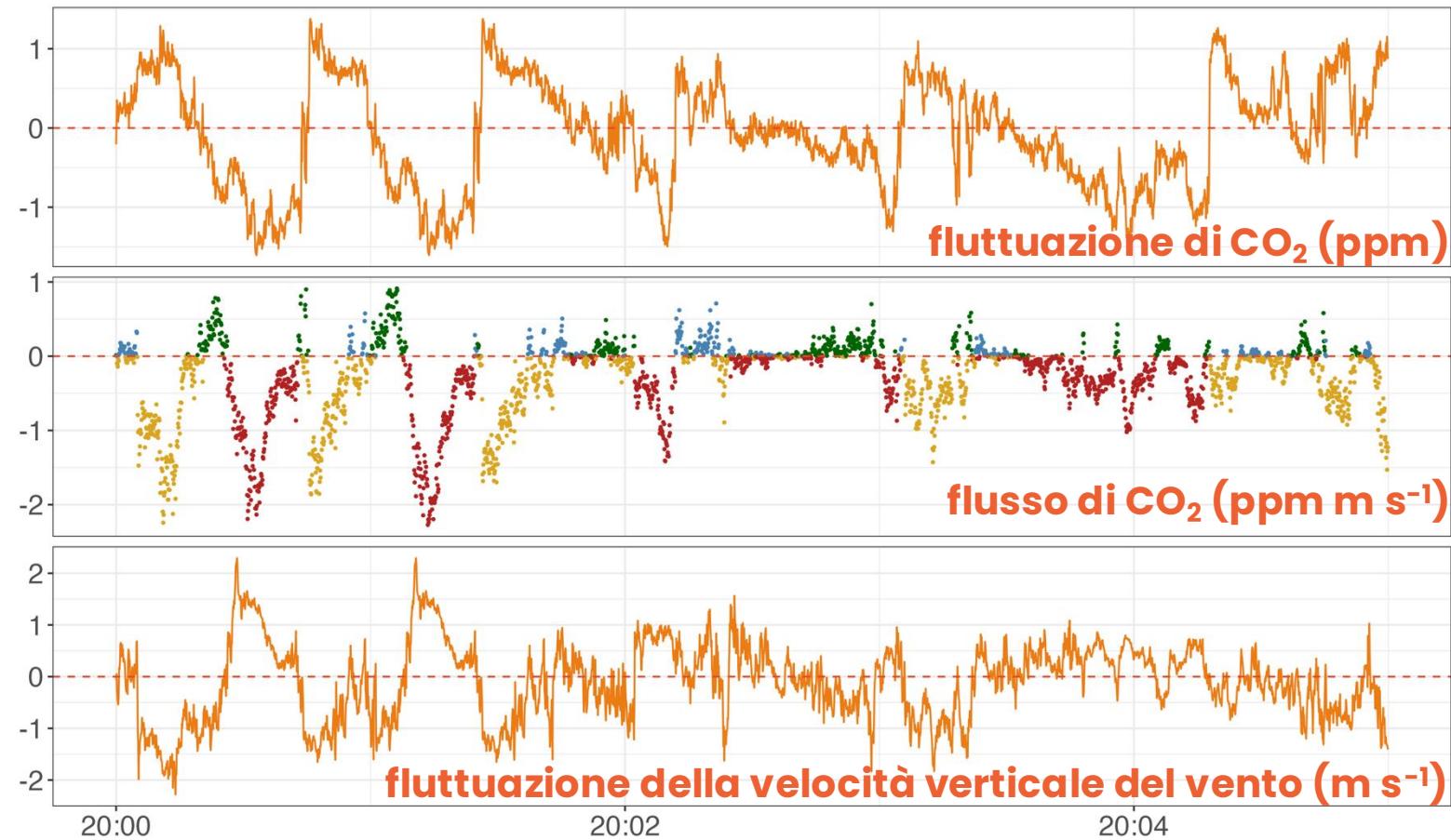
# The Net Ecosystem Exchange



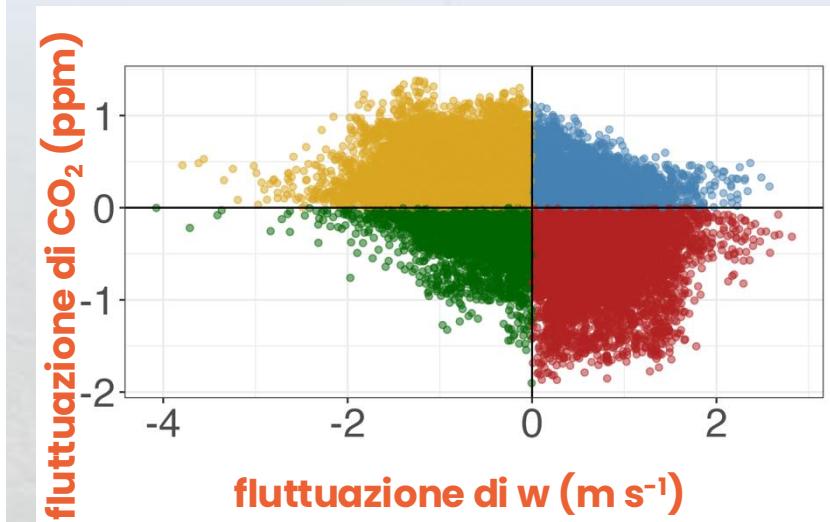
Thomas et alii (2013)

Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.

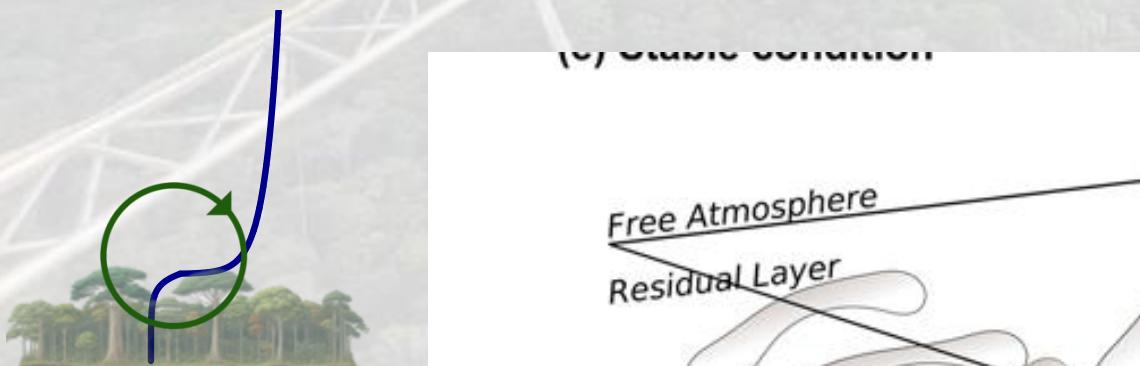
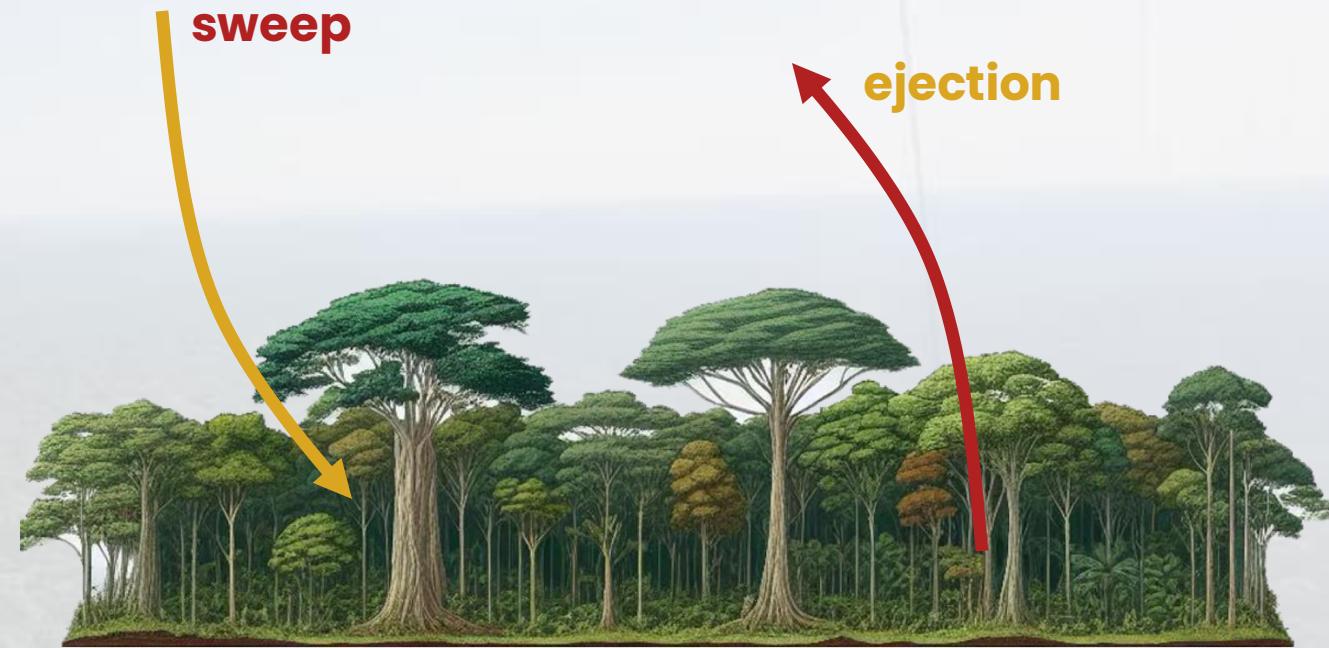
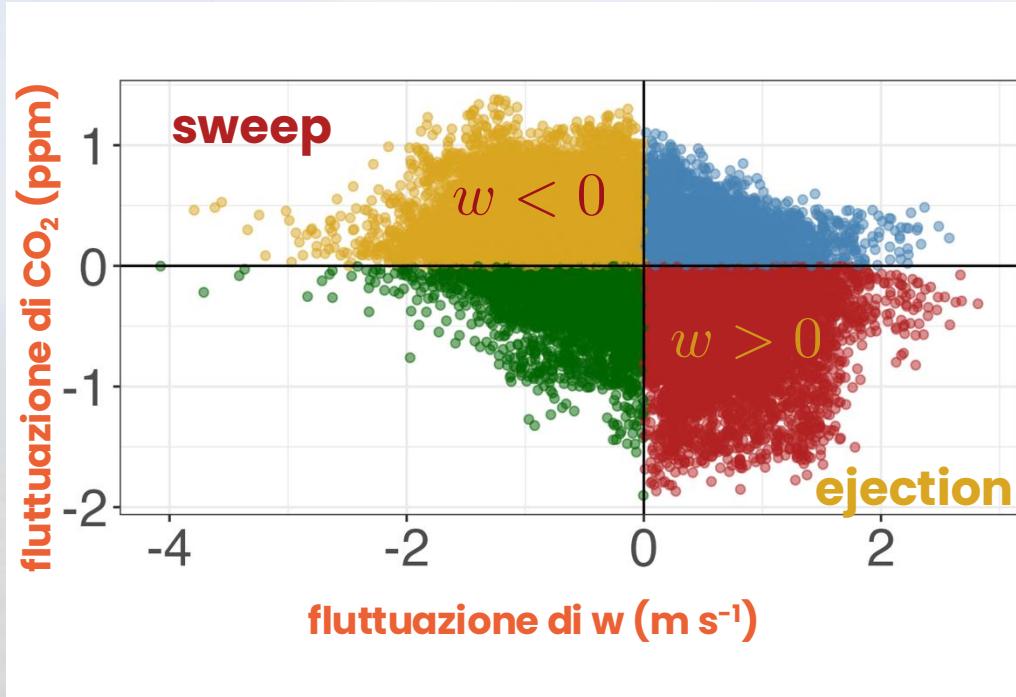
# I flussi di CO<sub>2</sub>, la tecnica eddy-covariance



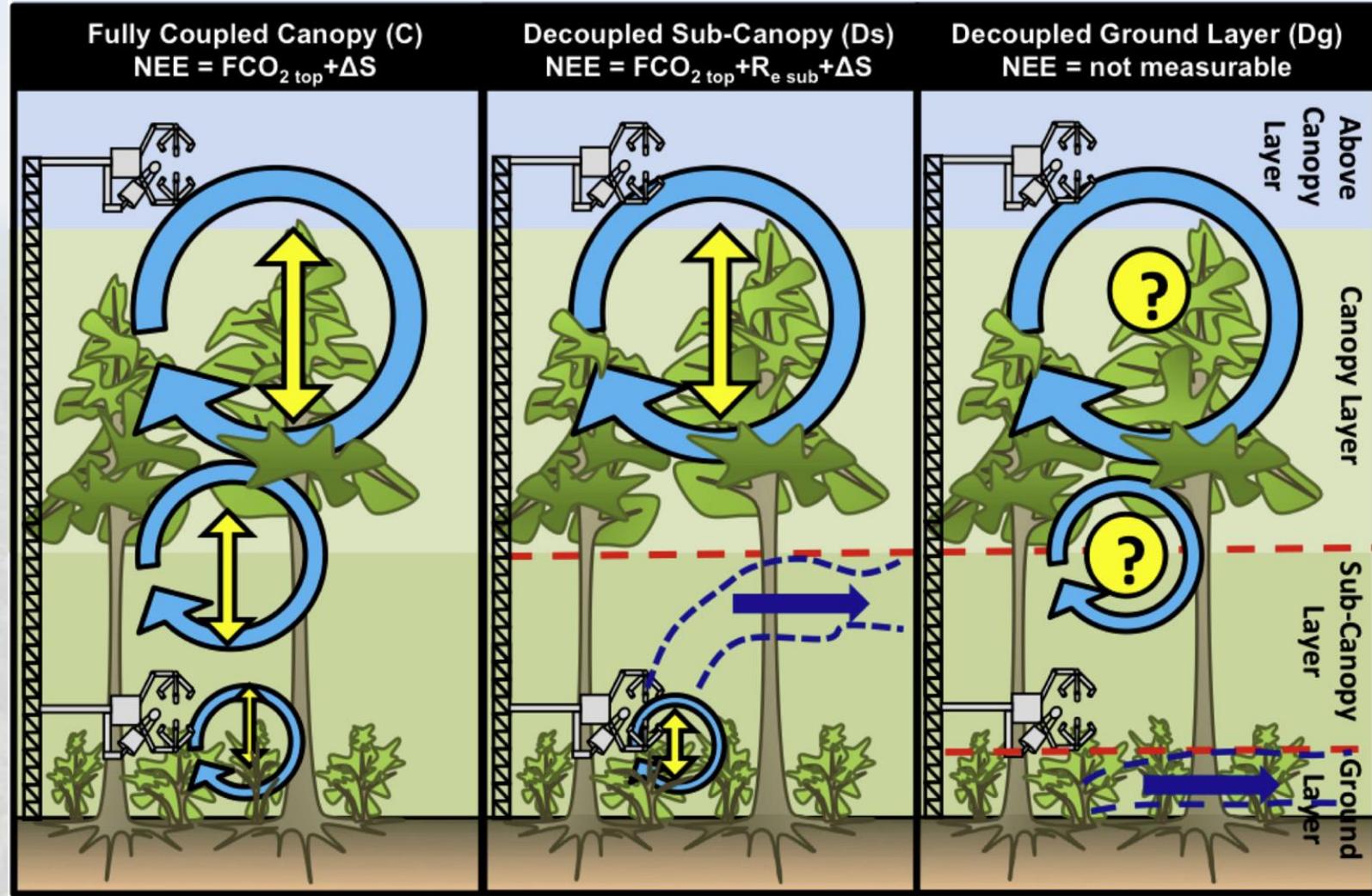
$$F_{CO_2} = \overline{w'c'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})(c_i - \bar{c})$$



# I flussi di CO<sub>2</sub>, la tecnica eddy-covariance



# The Net Ecosystem Exchange





# Espirazione



Per studiare una foresta serve conoscere la fisica dell'atmosfera.

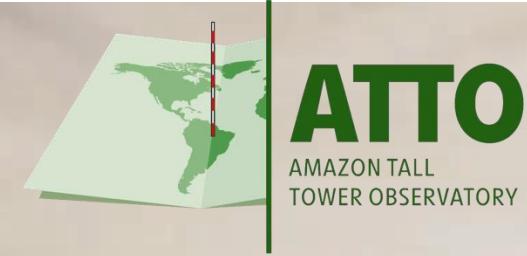
Ma non è sufficiente.

Servono la biologia, la chimica, l'ecologia, l'antropologia.

Come la biodiversità è la forza del bioma amazzonico, la diversità delle discipline è la forza della scienza che cerca di comprenderlo.

Solo attraverso uno sguardo integrato possiamo davvero cogliere il respiro complesso e profondo della foresta.

**Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.**  
[luca.mortarini@unimi.it](mailto:luca.mortarini@unimi.it)



**Il respiro della Foresta. La sfida di misurare l'atmosfera in Amazzonia.**  
[luca.mortarini@unimi.it](mailto:luca.mortarini@unimi.it)

# Bibliography

## webpages

<https://www.attoproject.org/>

<https://data.globalforestwatch.org/datasets/gfw::tropical-tree-cover/about>

<https://www.weforum.org/stories/2024/07/amazon-water-flying-rivers-latin-america/#:~:text=What%20are%20flying%20rivers?,evaporation%20of%20the%20Atlantic%20Ocean.>

<https://riosvoadores.com.br/>

<https://www.youtube.com/watch?v=ZIV2K4JRtOA>

<https://www.worldwildlife.org/publications/2024-living-planet-report>

<https://courses.lumenlearning.com/suny-geophysical/chapter/layers-of-the-atmosphere/#:~:text=Once%20in%20the%20stratosphere%2C%20it,Earth%20would%20not%20survive%20long.>

<https://resources.eumetrain.org/satmanu/CM4SH/Argentina/Sallj/index.htm>

<https://www.sciencehistory.org/stories/magazine/manufacturing-the-weather/>



# Bibliography

## Scientific Publications

Combe, M., Vilà-Guerau de Arellano, J., Ouwersloot, H. G., Jacobs, C. M. J., and Peters, W.: Two perspectives on the coupled carbon, water and energy exchange in the planetary boundary layer, *Biogeosciences*, 12, 103–123, <https://doi.org/10.5194/bg-12-103-2015>, 2015

Davidson, P.A. *Turbulence*, 2017, Oxford University Press.

Harris, N.L., Gibbs, D.A., Baccini, A. *et al.* Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 234–240 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>

C.F. Kormos, B. Mackey, D.A. DellaSala, N. Kumpe, T. Jaeger, R.A. Mittermeier, C. Filardi, Primary Forests: Definition, Status and Future Prospects for Global Conservation, *Encyclopedia of the Anthropocene*, Elsevier, 2018,

Thomas C.K, Martin J.G., Law B.E., Davis K., Toward biologically meaningful net carbon exchange estimates for tall, dense canopies: Multi-level eddy covariance observations and canopy coupling regimes in a mature Douglas-fir forest in Oregon, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.001>.

Van Dyke, *An Album of Fluid Motion*. The Parabolic Press, Stanford, CA, 1982.

The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review (2021)

