





MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



## *Workshop Interno da DIMNT - Trabalhos com o MONAN*

**Produção de dados e inicialização**

**Dr. Enver Ramírez**

**DIMNT/CGCT/INPE**

**02/10/2023**



## Motivação: Inicialização

- Condição Inicial: GSI + BAM
- Previsão: MPAS



## Geração de Condições Iniciais:

- ***Casos idealizados e Casos Realistas;***  
Requerem campos invariantes (static files)  
Interpolação de dados  
Geração de condições de contorno

Casos idealizados: Ondas baroclinicas, super-célula e ondas de montanha

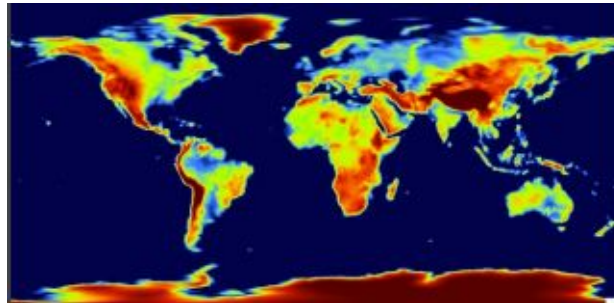


**Mpas\_static.tar.bz2 (> 1Gb)**

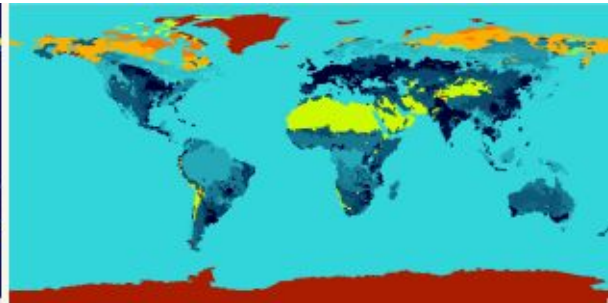
MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



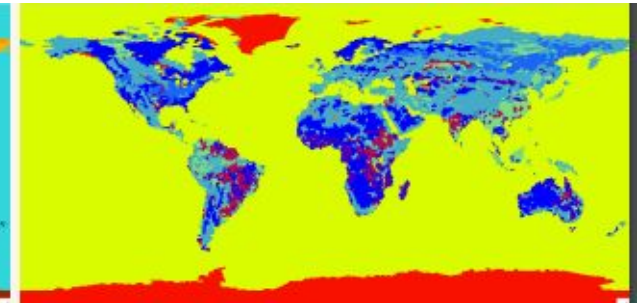
## Geração de Condições Iniciais: “Static Files”



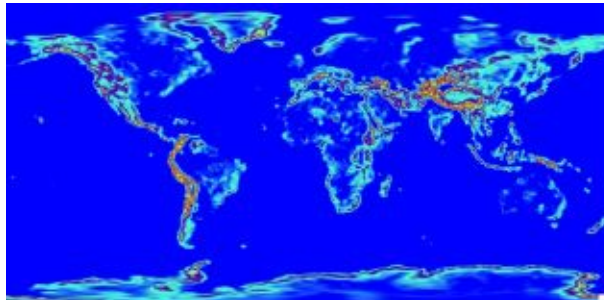
**Elevação**



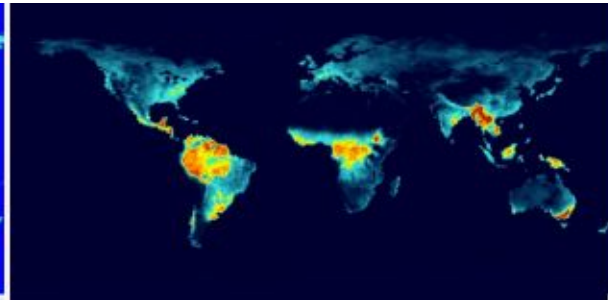
**Uso do solo**



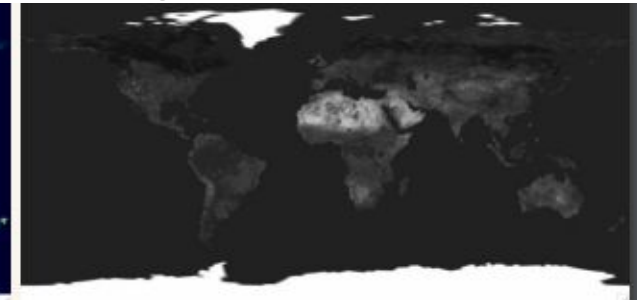
**Categoria do solo dominante**



**Variância**



**Fração da vegetação**



**Albedo**



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES

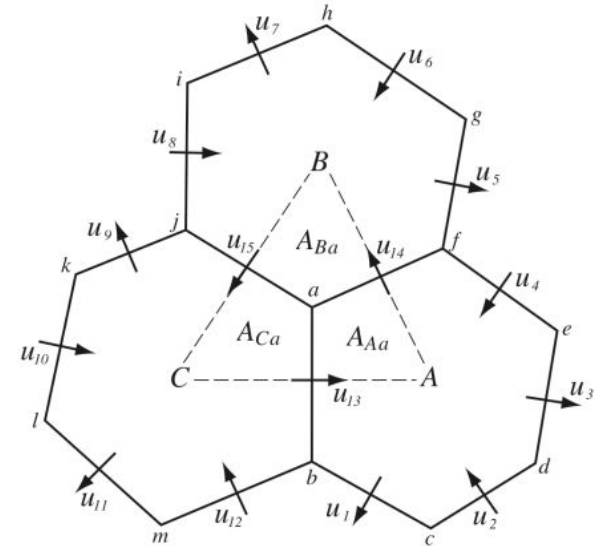


# Interpolação



## Grade utilizada **CVT-Centroidal Voronoi Tessellation**:

- **CVTs**: construídas num processo iterativo (A,B,C,...) são centróides das células; Arestas das células bissectam distâncias entre centróides; Polígonos de entre 5 a 7 lados. 6 lados é o tipo mais abundante.
- **Grade - C**: Gradiente e Divergência acurados na 2da ordem. Precisa cuidado na reconstrução das velocidades.





# Grade utilizada **CVT-Centroidal Voronoi Tessellation:**

## Quasi-uniform meshes and static files

### 480-km mesh (2562 horizontal grid cells)

[Download the 480-km mesh](#) (1.5 MB)  
[Download the 480-km static file](#) (1.0 MB)

### 384-km mesh (4002 horizontal grid cells)

[Download the 384-km mesh](#) (2.4 MB)  
[Download the 384-km static file](#) (2.3 MB)

### 240-km mesh (10242 horizontal grid cells)

[Download the 240-km mesh](#) (6.3 MB)  
[Download the 240-km static file](#) (4.0 MB)

### 120-km mesh (40962 horizontal grid cells)

[Download the 120-km mesh](#) (25.7 MB)  
[Download the 120-km static file](#) (16.2 MB)

### 60-km mesh (163842 horizontal grid cells)

[Download the 60-km mesh](#) (106 MB)  
[Download the 60-km static file](#) (69.6 MB)

### 48-km mesh (256002 horizontal grid cells)

[Download the 48-km mesh](#) (182 MB)  
[Download the 48-km static file](#) (174 MB)

### 30-km mesh (655362 horizontal grid cells)

[Download the 30-km mesh](#) (436 MB)  
[Download the 30-km static file](#) (296 MB)

### 24-km mesh (1024002 horizontal grid cells)

[Download the 24-km mesh](#) (685 MB)  
[Download the 24-km static file](#) (525 MB)

### 15-km mesh (2621442 horizontal grid cells)

[Download the 15-km mesh](#) (1659 MB)  
[Download the 15-km static file](#) (1366 MB)

### 12-km mesh (4096002 horizontal grid cells)

(Download link below following *Important notes*).

### 10-km mesh (5898242 horizontal grid cells)

(Download link below following *Important notes*).

### 7.5-km mesh (10485762 horizontal grid cells)

(Download link below following *Important notes*).

### 5-km mesh (23592962 horizontal grid cells)

(Download link below following *Important notes*).

### 4-km mesh (36864002 horizontal grid cells)

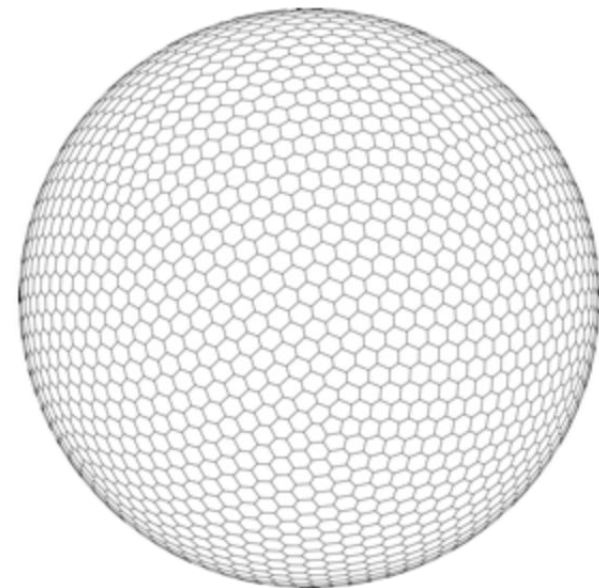
(Download link below following *Important notes*).

### 3.75-km mesh (41943042 horizontal grid cells)

(Download link below following *Important notes*).

### 3-km mesh (65536002 horizontal grid cells)

(Download link below following *Important notes*).



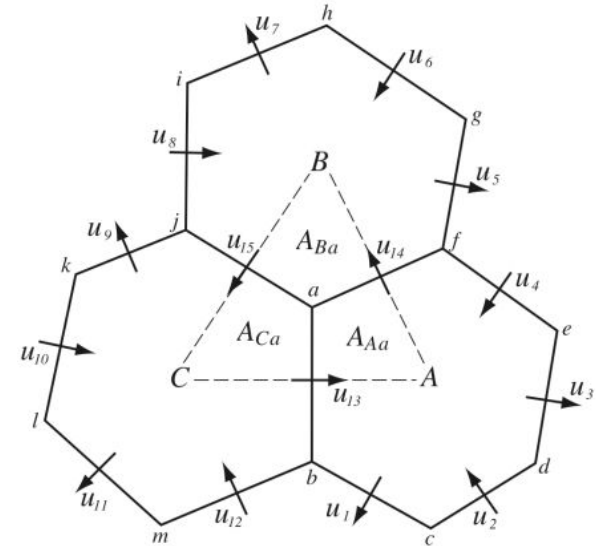
**S-CVT**

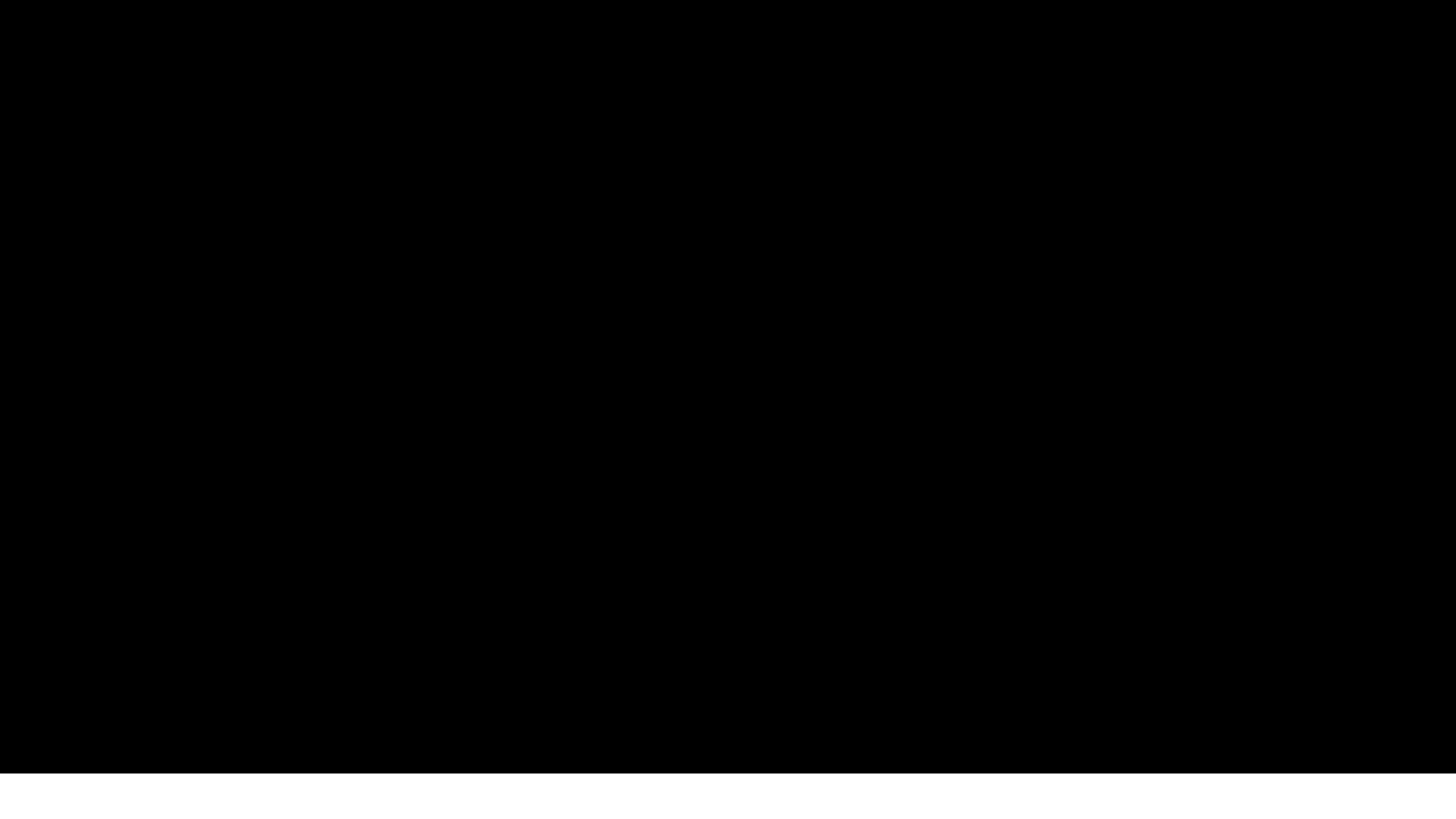




# Método iterativo permite gerar todas as grades

- **S-CVTs**: construídas num processo iterativo:
  - (A,B,C,..) são centróides das células;
  - Arestas das células bissectam distâncias entre centróides;
  - Polígonos de entre 5 a 7 lados. 6 lados é o tipo mais abundante.







## Grade utilizada **Nomenclatura**

```
x1.40962.grid.nc  
x1.163842.grid.nc  
x1.655362.grid.nc  
x1.2621442.grid.nc  
x1.5898242.grid.nc  
x4.163842.grid.nc  
x4.535554.grid.nc  
x5.6488066.grid.nc
```

$$(\Delta x)^2 \sim 1.15 * 4\pi R^2 / (\#points)$$

$$1.15 \sim \text{sqrt}(3)*2/3$$

**Quase-uniforme**

X1 = sem refinamento

**Grade variável**

X4 = refinamento fator 4

X5 = refinamento fator 5

**40962**

**( $\Delta x$ ) ~ 119.6 km**

**5898242**

**( $\Delta x$ ) ~ 9.97 km**



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



# Integração no tempo



# Integração no tempo **Runge-Kutta RK3 e RK32**

- **Runge-Kutta:** combinam a informação de vários sub-steps para obter a informação como uma série de Taylor até alguma aproximação de ordem superior (Numerical Recipes).
- É um método seguro, mas não necessariamente é o método mais rápido!

· Runge-Kutta time integration

$$\phi^* = \phi^t + \frac{\Delta t}{3} RHS(\phi^t)$$

$$\phi^{**} = \phi^t + \frac{\Delta t}{2} RHS(\phi^*)$$

$$\phi^{t+\Delta t} = \phi^t + \Delta t RHS(\phi^{**})$$

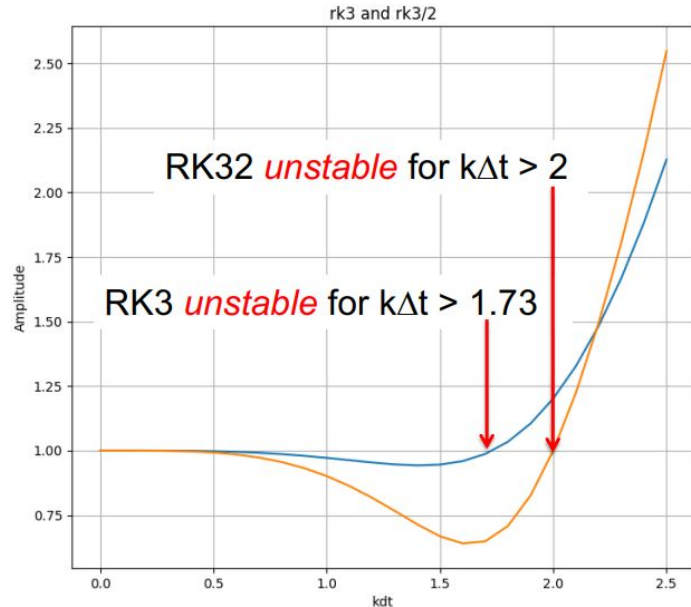
---

$$\phi_t = ik\phi; \quad \phi^{n+1} = A\phi^n; \quad |A| = 1 - \frac{(k\Delta t)^4}{24} + \text{H.O.T}$$

---



# Integração no tempo **Runge-Kutta RK3 e RK32**



$$\phi_t = ik\phi; \quad \phi^{n+1} = A\phi^n; \quad |A| = 1 - \frac{(k\Delta t)^4}{24} + \text{H.O.T}$$

Default in MPAS RK32: **Menos acurado, mas mais estável**

$$\phi_t = ik\phi; \quad \phi^{n+1} = A\phi^n; \quad |A| = 1 - \frac{(k\Delta t)^3}{12} + \text{H.O.T}$$



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



# Integração no tempo (Multi-timescale Approach)



# Integração no tempo **Controle de modos acústicos**

- Equações são não hidrostáticas;
- Em adição aos IG, R tempos os IA waves;
- Rápidas requerem  $\Delta t$  pequeno
- Multiescala:  $t_s$ ,  $t_i$ ,  $t_f$ ,  $t_{sf}$





# Integração no tempo **Multiescala temporal** ( $\Delta t_{(s,i,f,sf)}$ )

Default time integration

Call physics

Do dynamics\_split\_steps

Do rk3\_step = 1, 3

compute large-time-step tendency

acústicos  $\Delta t_{sf}$

Do acoustic\_steps

update u

update rho, theta and w

End acoustic\_steps

End rk3\_step

End dynamics\_split\_steps

Do scalar\_rk3\_step = 1, 3

scalar RK3 transport

End scalar\_rk3\_step

Dinâmica  $\Delta t_i$

RK  $\Delta t_f$

Escalares  $\Delta t_s$

&nhyd\_model

config\_dt = 90

config\_start\_time = "2010-10-23\_00:00:00"

config\_run\_duration = "5\_00:00:00"

config\_split\_dynamics\_transport = true

config\_dynamics\_split\_steps = 3

config\_number\_of\_sub\_steps = 2

Default time integration

$$\Delta t (\text{dynamics}) = \frac{\text{config\_dt}}{\text{config\_dynamics\_split\_steps}}$$

$$\Delta t (\text{acoustic}) = \frac{\Delta t (\text{dynamics})}{\text{config\_number\_of\_sub\_steps}}$$

$$\Delta t (\text{scalar transport}) = \text{config\_dt}$$



# Integração no tempo **Multiescala temporal** ( $\Delta t_{(s,i,f,sf)}$ )

Runge-Kutta scheme:

Wicker, L. J., and W. C. Skamarock, 2002: Time Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2088-2097.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2088:TSMFEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2088:TSMFEM>2.0.CO;2)

Detailed presentation on the acoustic time splitting:

Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and J. Dudhia, 2007: Conservative Split-Explicit Time Integration Methods for the Compressible Nonhydrostatic Equations. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2897-2913,  
doi:10.1175/MWR3440.1

(specifically section 2 and Appendix section (a) which deal with height-coordinate models, i.e. MPAS)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



# Operadores e Invariantes



## CVT-Generalização da

- **Grade Primal- C:** Ponto de vista da e Divergência ou densidade.
- **Grade Dual- D:** Ponto de vista da Vorticidade.

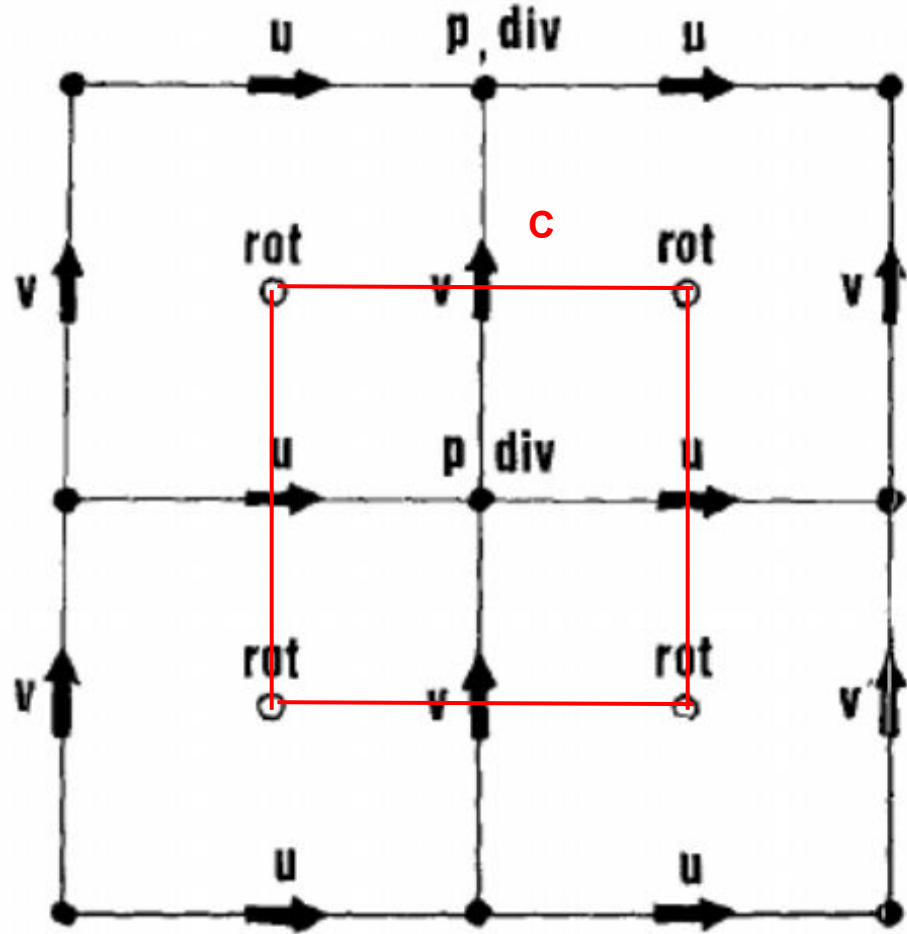


FIG. 1. Staggered arrays for the finite-difference models.



## CVT-Generalização da

- **Grade Primal- C:** Ponto de vista da e Divergência ou densidade.
- **Grade Dual- D:** Ponto de vista da Vorticidade.

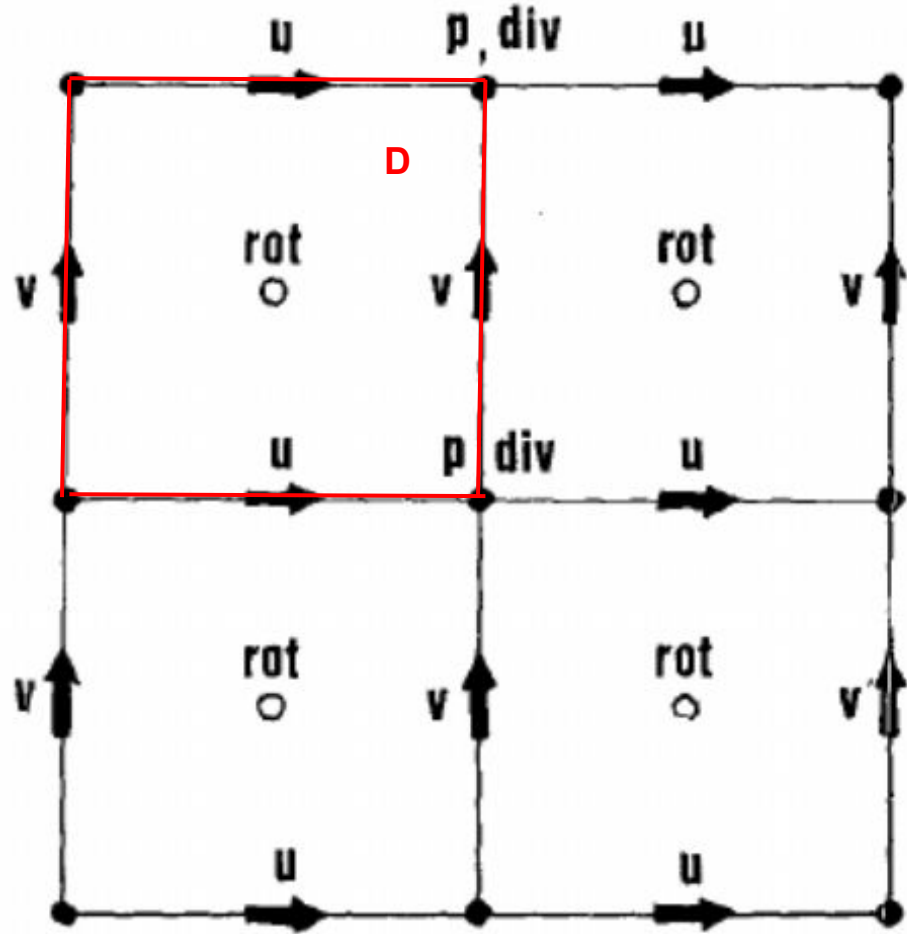


FIG. 1. Staggered arrays for the finite-difference models.

# Discretization of Sadourny's shallow water equations

Enver Ramírez

$$\partial_t \vec{v} + \eta \hat{k} \times (P \vec{v}) + \nabla \left( P + \frac{1}{2} \vec{v} \cdot \vec{v} \right) = 0 \quad (1a)$$

$$\partial_t P + \nabla \cdot (P \vec{v}) = 0 \quad (1b)$$

where  $\vec{v}$  is the bi-dimensional velocity vector,  $\hat{k}$  the vertical unit vector,  $P$  density or pressure,  $\eta$  the potential vorticity

$$\eta = \frac{\nabla \times \vec{v}}{P} \quad (2)$$

$$\text{Total mass: } M = \int_s P ds \quad (3a)$$

$$\text{Total energy: } E = \int_s \frac{1}{2} (P + \vec{v} \cdot \vec{v}) P ds \quad (3b)$$

$$\text{Absolute potential enstrophy: } Z = \int_s \frac{1}{2} \eta^2 P ds \quad (3c)$$

## 1.1 Energy conserving shallow water discretization using Sadourny's grid

Special treatment is given to the nonlinear terms, the other terms are shared between energy and enstrophy conserving versions. Thus

$$\begin{aligned}\overline{\eta V^{xy}}|_{u_{ij}} &\approx \frac{1}{2} \left[ \eta_{ij} \left( \frac{V_{ij} + V_{i+1j}}{2} \right) + \eta_{ij-1} \left( \frac{V_{ij-1} + V_{i+1j-1}}{2} \right) \right] \\ &= \frac{1}{8} \left[ \eta_{ij} \{ (P_{ij} + P_{ij+1})v_{ij} + (P_{i+1j} + P_{i+1j+1})v_{i+1j} \} + \right. \\ &\quad \left. + \eta_{ij-1} \{ (P_{ij-1} + P_{ij})v_{ij-1} + (P_{i+1j-1} + P_{i+1j})v_{i+1j-1} \} \right] \quad (9a)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{\eta U^{yx}}|_{v_{ij}} &\approx \frac{1}{2} \left[ \eta_{ij} \left( \frac{U_{ij} + U_{ij+1}}{2} \right) + \eta_{i-1j} \left( \frac{U_{i-1j} + U_{i-1j+1}}{2} \right) \right] \\ &= \frac{1}{8} \left[ \eta_{ij} \{ (P_{ij} + P_{i+1j})u_{ij} + (P_{ij+1} + P_{i+1j+1})u_{ij+1} \} + \right. \\ &\quad \left. + \eta_{i-1j} \{ (P_{ij} + P_{i-1j})u_{i-1j} + (P_{ij+1} + P_{i-1j+1})u_{i-1j+1} \} \right] \quad (9b)\end{aligned}$$

## 1.2 Potential enstrophy conserving shallow water discretization using Sadourny's grid

$$\begin{aligned}\overline{\eta^y \overline{V^x}}^y|_{u_{ij}} &\approx \left[ \frac{\eta_{ij} + \eta_{ij-1}}{2} \right] \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{V_{ij} + V_{i+1j}}{2} \right) + \left( \frac{V_{ij-1} + V_{i+1j-1}}{2} \right) \right] \\ &= \frac{1}{16} \left[ \eta_{ij} + \eta_{ij-1} \right] \left[ (P_{ij} + P_{ij+1})v_{ij} + (P_{i+1j} + P_{i+1j+1})v_{i+1j} + \right. \\ &\quad \left. + (P_{ij-1} + P_{ij})v_{ij-1} + (P_{i+1j-1} + P_{i+1j})v_{i+1j-1} \right] \quad (10a)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{\eta^x \overline{U^y}}^x|_{v_{ij}} &\approx \left[ \frac{\eta_{ij} + \eta_{i-1j}}{2} \right] \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{U_{ij} + U_{ij+1}}{2} \right) + \left( \frac{U_{i-1j} + U_{i-1j+1}}{2} \right) \right] \\ &= \frac{1}{16} \left[ \eta_{ij} + \eta_{i-1j} \right] \left[ (P_{ij} + P_{i+1j})u_{ij} + (P_{ij+1} + P_{i+1j+1})u_{ij+1} + \right. \\ &\quad \left. + (P_{ij} + P_{i-1j})u_{i-1j} + (P_{ij+1} + P_{i-1j+1})u_{i-1j+1} \right] \quad (10b)\end{aligned}$$





MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



# Dinâmica não-hidrostática e grade utilizada



# Atmosfera não hidrostática do **MPAS**

Escalonamento

$$(U, V, \Omega, \Theta, Q_j) = \tilde{\rho}_d (u, v, \omega, \theta, q_j) \quad \tilde{\rho}_d = \rho_d / \zeta_z$$

Coordenada Vertical  
(híbrida na altura)

$$z = \zeta + A(\zeta)h_s(x, y, \zeta)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_H}{\partial t} = - \frac{\rho_d}{\rho_m} \left[ \nabla_\zeta \left( \frac{p}{\zeta_z} \right) - \frac{\partial \mathbf{z}_{HP}}{\partial \zeta} \right] - \eta \mathbf{k} \times \mathbf{V}_H$$

$$- \mathbf{v}_H \nabla_\zeta \cdot \mathbf{V} - \frac{\partial \Omega \mathbf{v}_H}{\partial \zeta} - \rho_d \nabla_\zeta K + \mathbf{F}_{V_H}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{\rho_d}{\rho_m} \left[ \frac{\partial p}{\partial \zeta} + g \tilde{\rho}_m \right] - (\nabla \cdot \mathbf{v} W)_\zeta + F_W$$

$$\frac{\partial \Theta_m}{\partial t} = - (\nabla \cdot \mathbf{V} \theta_m)_\zeta + F_{\Theta_m}$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_d}{\partial t} = - (\nabla \cdot \mathbf{V})_\zeta$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial t} = - (\nabla \cdot \mathbf{V} q_j)_\zeta + F_{Q_j}$$

Gradient operators

Nonlinear Coriolis term

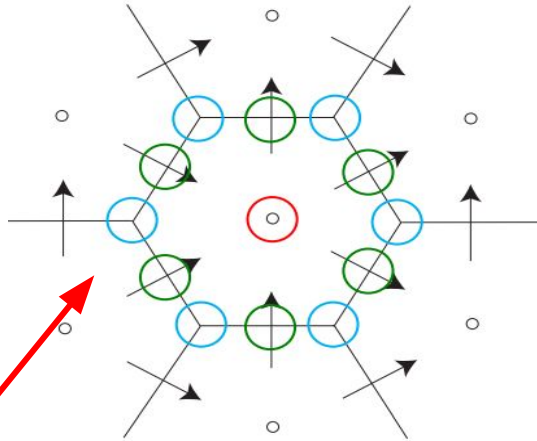
$$\frac{\rho_m}{\rho_d} = 1 + q_v + q_c + q_r + \dots$$

$$p = p_0 \left( \frac{R_d \zeta_z \Theta_m}{p_0} \right)^\gamma$$

$$\theta_m = \theta [1 + (R_v/R_d)q_v]$$



# Atmosfera não hidrostática do **MPAS**



Cell center kinetic energy:  $KE_i$

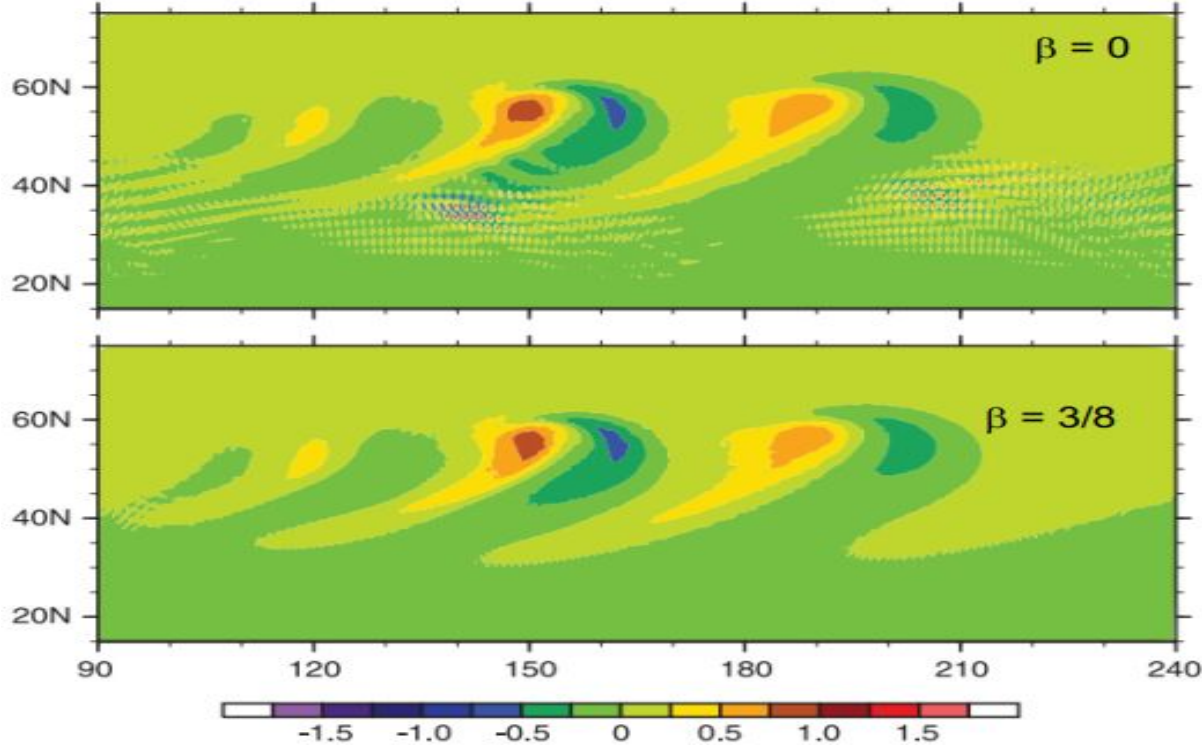
$$KE_i = (1 - \beta) \sum_{e_i} w_{e_i} u_{e_i}^2 + \beta \sum_{v_j} w_{v_j} KE_{v_j}$$

Vertex kinetic energy:  $KE_v$

$$KE_v = \sum_{e_v=1}^3 w_{e_v} u_{e_v}^2$$

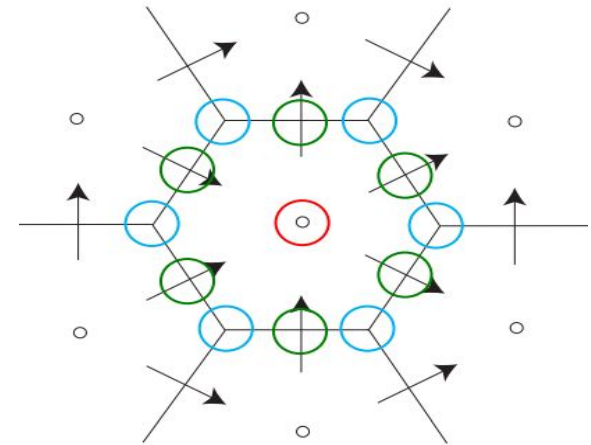


Vorticity at day 8 on model level 5 (~ 850 hPa)



Cell center kinetic energy:  $KE_i$

$$KE_i = (1 - \beta) \sum_{e_i} w_{e_i} u_{e_i}^2 + \beta \sum_{v_j} w_{v_j} KE_{v_j}$$





# Atmosfera não hidrostática do **MPAS**

Escalonamento

$$(U, V, \Omega, \Theta, Q_j) = \tilde{\rho}_d (u, v, \omega, \theta, q_j) \quad \tilde{\rho}_d = \rho_d / \zeta_z$$

Coordenada Vertical  
(híbrida na altura)

$$z = \zeta + A(\zeta)h_s(x, y, \zeta)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_H}{\partial t} = - \frac{\rho_d}{\rho_m} \left[ \nabla_\zeta \left( \frac{p}{\zeta_z} \right) - \frac{\partial \mathbf{z}_{HP}}{\partial \zeta} \right] - \eta \mathbf{k} \times \mathbf{V}_H$$

$$- \mathbf{v}_H \nabla_\zeta \cdot \mathbf{V} - \frac{\partial \Omega \mathbf{v}_H}{\partial \zeta} - \rho_d \nabla_\zeta K + \mathbf{F}_{V_H}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{\rho_d}{\rho_m} \left[ \frac{\partial p}{\partial \zeta} + g \tilde{\rho}_m \right] - (\nabla \cdot \mathbf{v} W)_\zeta + F_W$$

$$\frac{\partial \Theta_m}{\partial t} = - (\nabla \cdot \mathbf{V} \theta_m)_\zeta + F_{\Theta_m}$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_d}{\partial t} = - (\nabla \cdot \mathbf{V})_\zeta$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial t} = - (\nabla \cdot \mathbf{V} q_j)_\zeta + F_{Q_j}$$

$$\frac{\rho_m}{\rho_d} = 1 + q_v + q_c + q_r + \dots$$

$$p = p_0 \left( \frac{R_d \zeta_z \Theta_m}{p_0} \right)^\gamma$$

Gradient operators

Nonlinear Coriolis term

$$\theta_m = \theta [1 + (R_v/R_d)q_v]$$

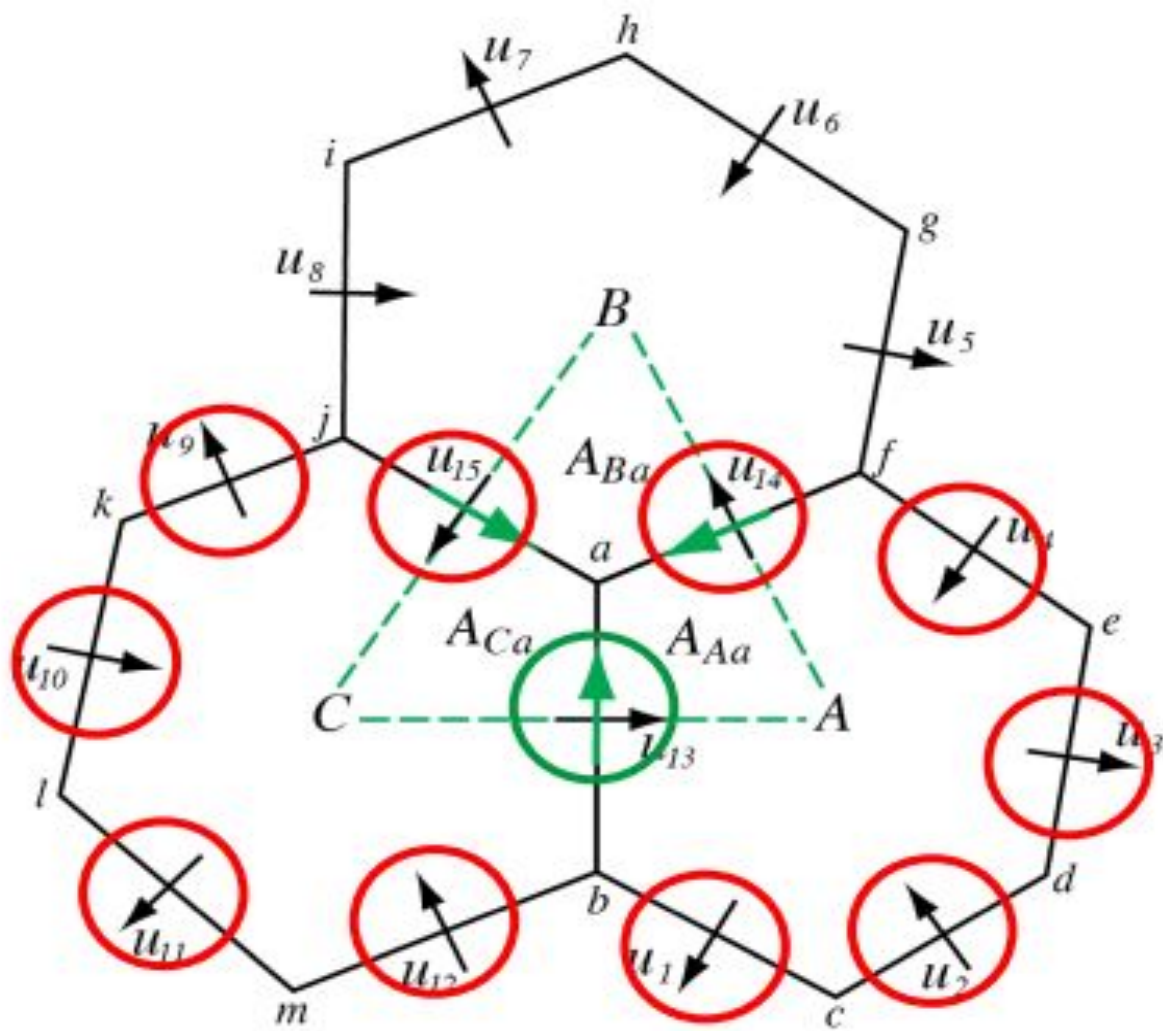


# Cálculo da vorticidade **MPAS Operadores na malha Voronoi**

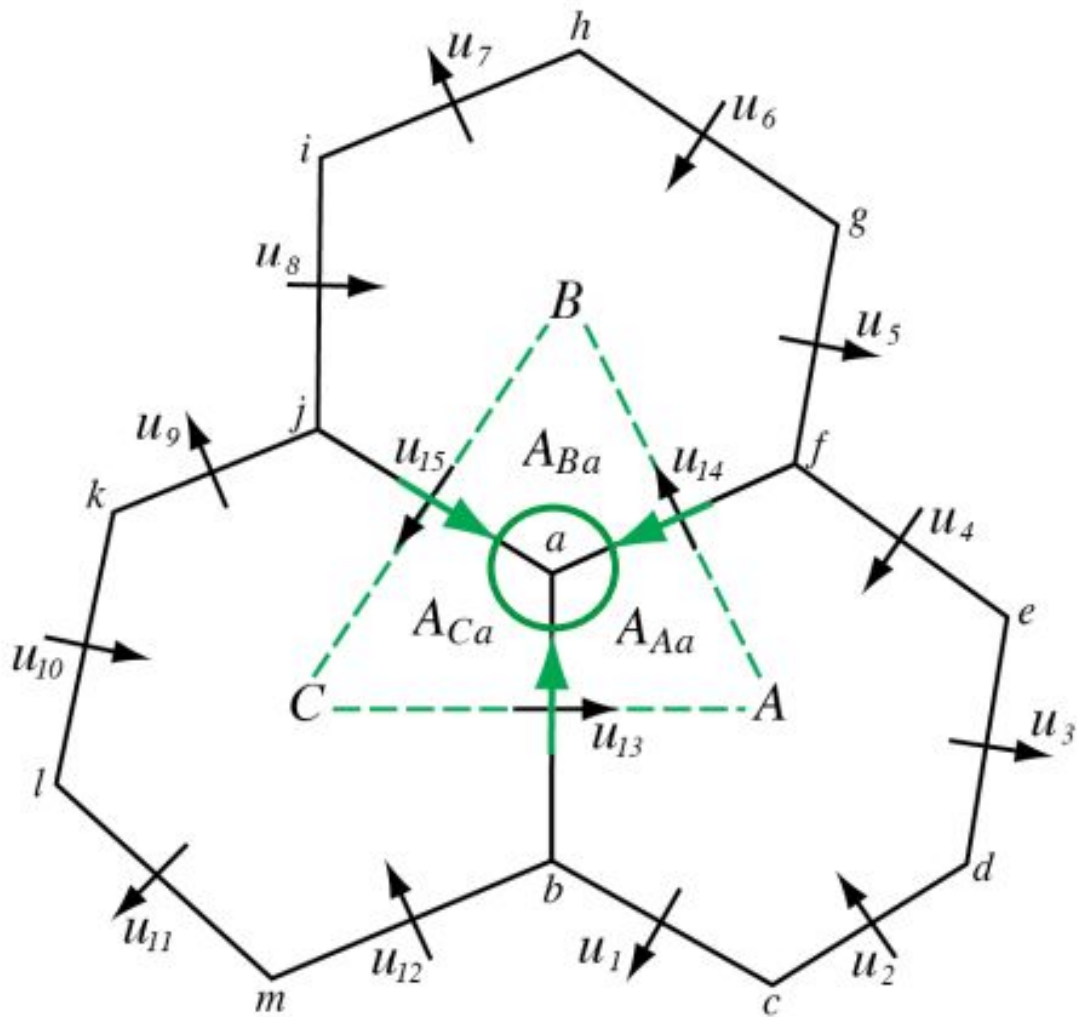
$$\frac{\partial \mathbf{V}_H}{\partial t} = - \frac{\rho_d}{\rho_m} \left[ \nabla_\zeta \left( \frac{p}{\zeta_z} \right) - \frac{\partial \mathbf{z}_{HP}}{\partial \zeta} \right] - \eta \mathbf{k} \times \mathbf{V}_H$$
$$- \mathbf{v}_H \nabla_\zeta \cdot \mathbf{V} - \frac{\partial \Omega \mathbf{v}_H}{\partial \zeta} - \rho_d \nabla_\zeta K + \mathbf{F}_{V_H}$$

$\eta$  Vorticidade Absoluta - Termo não linear

$\eta$  = Vorticidade planetária + vorticidade relativa



$$v_{ei} = \sum_{j=1}^{n_{ei}} w_{ei,j} u_{ei,j}$$



Example: absolute vorticity at vertex  $a$

$$\eta_a = f_a + \frac{(u_{13}|\overline{CA}| + u_{14}|\overline{AB}| + u_{15}|\overline{BC}|)}{\text{Area}(ABC)}$$





# Cálculo da vorticidade **MPAS Operadores na malha Voronoi**

Tangential  
velocity  
reconstruction:

$$v_{e_i} = \sum_{j=1}^{n_{e_i}} w_{e_{i,j}} u_{e_{i,j}}$$

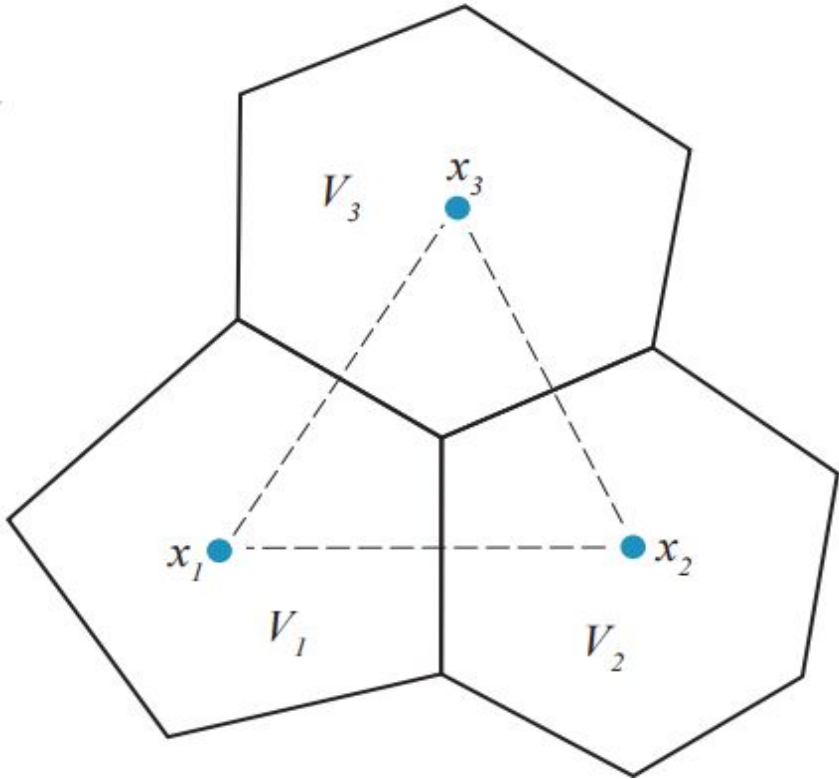
Coriolis

$$[\eta \mathbf{k} \times \mathbf{V}_H]_{e_i} = \sum_{j=1}^{n_{e_i}} \frac{1}{2} (\eta_{e_i} + \eta_{e_{i,j}}) w_{e_{i,j}} \rho_{e_{i,j}} u_{e_{i,j}}$$

A reconstrução da velocidade tangencial produz divergência consistente na grade primal e dual, e permite conservação da energia e enstrofia no solver da água rasa não lineal.

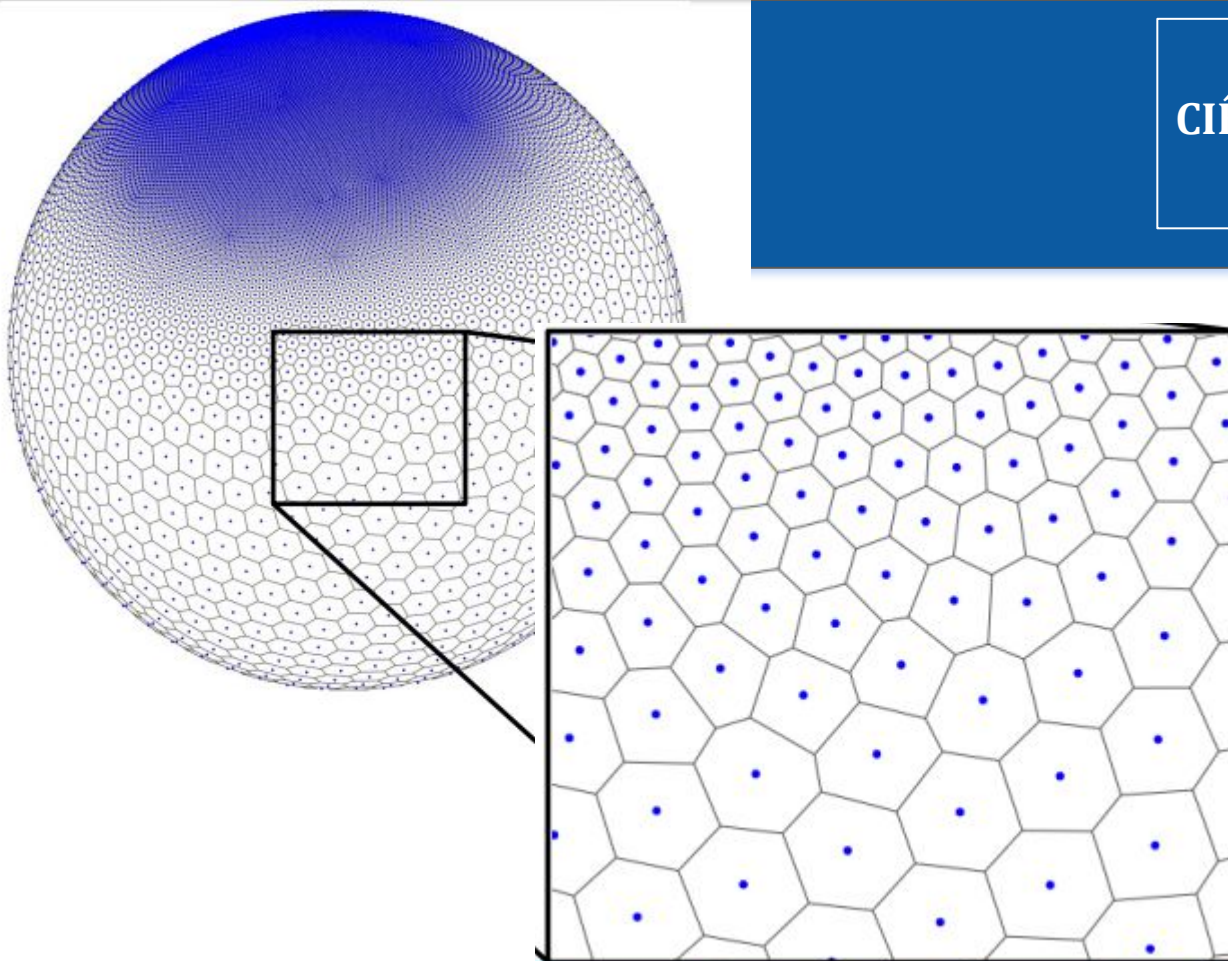


## Voronoi - MPAS



Cada ponto dentro de  $V_i$  é mais próximo de  $x_i$  do que de qualquer ponto  $x_j$  ( $j \neq i$ )

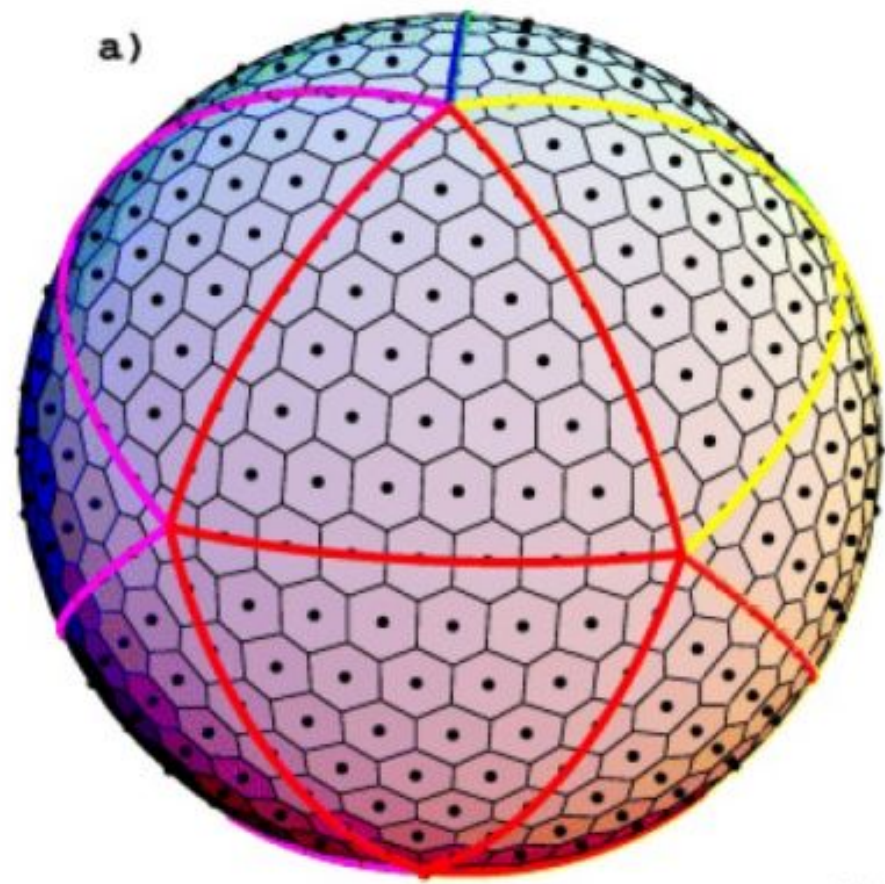
( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) geram as células Voronoi-Tessellations e essa é a grade primal;



Caso mais geral é uma  
grade não estruturada!



*A quasi-uniform MPAS mesh*



*An icosahedral mesh*

**A grade quase-uniforme RELEMBRA o Icosahedro!**



## Ondas no MPAS:

- As equações de estrutura vertical (EV) e horizontal (EH) estão acopladas;
- Os parâmetros  $(c,H)$  presentes em  $EV(c,H)$  e  $EH(c,H)$  - Método iterativo;
- Nas eq. Primitivas (hidrostáticas) os modos são: (IG,R) + Lamb waves + External R
- Nas eq. Não hidrostáticas: (IG,R,AG) + Lamb waves + External R
- Efeitos da não hidrostática afetam os modos IG (alta resolução e nos mov. de escala vertical profunda..



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



**Muito Obrigado!**



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



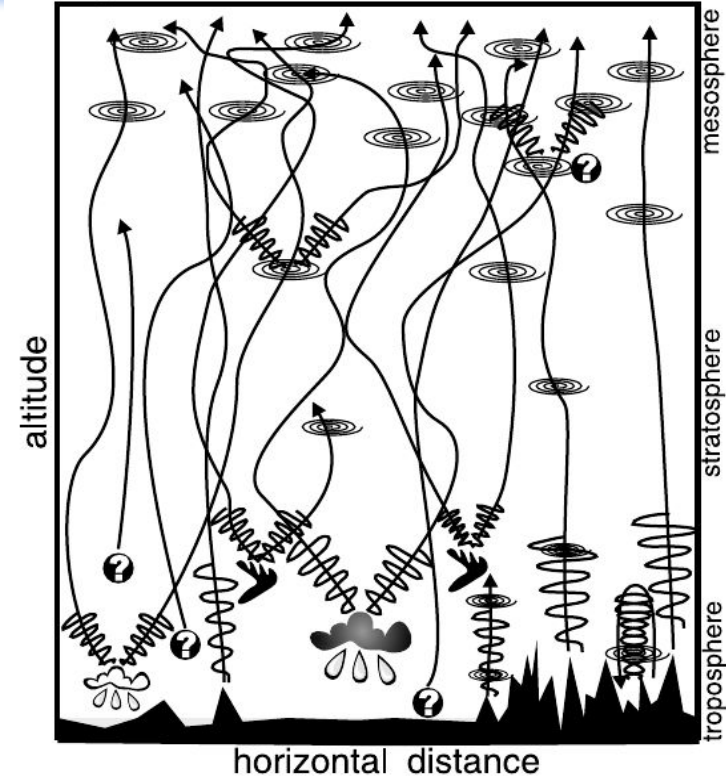
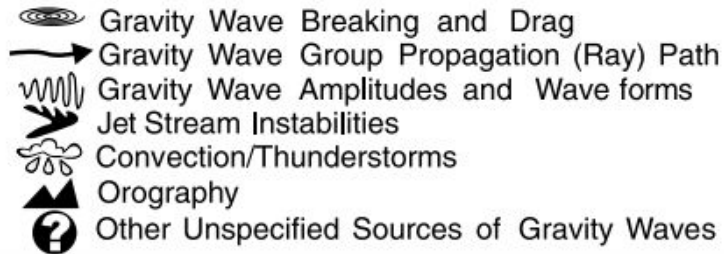
**Slides adicionais**



# Excitação de Ondas de Gravidade:

- OG Orograficas;
- OG convectivas;
- OG devido a instabilidade baroclínica úmida;
- Quebra de ondas de gravidade;
- OG instabilidade de Kelvin-Helmholtz;
- Outras fontes.

Gravity-Wave Drag Parametrization for Climate and NWP Models / 87







## Impactos da modelagem de **Ondas de Gravidade:**

- **Hines, 72:** transporte de momento linear **GW** => Circulação média @atmosfera;
- **Lindzen 81:**  $L(\text{GW}) \sim 10^3 \text{km}$  responsáveis pela Interação **GW-fluxo médio**;
- **Vincent & Reid 83, Meeck et al. 85:**  $L(\text{GW}) \sim 10^2 \text{km}$  são mais importantes na transferência de momento para atmosfera;
- **Weinstock 86:** **GW**  $\Leftrightarrow$  **GW** poderia explicar **quebra&GWD**;
- **Fritts&Dunkerton 85, Fritts&Tastogi 85:** Instabilidades convectivas  $\gg$  **GW**  $\Leftrightarrow$  **GW**
- **Fritts 85, Fritts et al. 94:** Instabilidades dinâmicas muito importantes na quebra de GW