

Escuela de Verano 2022

Curso Básico de CROCO

Clase 09: Encadenamiento (anidación offline)


Presentación por: Marcela Contreras
marcela.contreras@legos.obs-mip.fr

12 de enero de 2022

Informaciones: Andrés Sepúlveda (asepulveda@dgeo.udec.cl)

Introducción

- La anidación genera una simulación de mayor resolución ("*child simulation*", sim. hijo) a partir de una simulación de más baja resolución ("*parent simulation*", sim. padre) a un costo computacional limitado.
- La simulación hijo es un *zoom* de una zona en particular de la simulación padre.
- El incremento de la resolución permite (Debreu et al., 2012)
 - Reducir errores de truncamiento local de esquemas numéricos discretos
 - Mejorar la reproducción de procesos de pequeñas escala.

 r/base.png

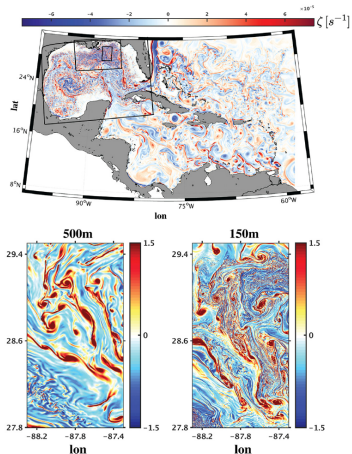


Figura: Ejemplo de dominio padre y dominios hijos. Barkan et al., (2017)

Métodos de anidados

Existen dos métodos de anidamiento:

- Online: Simulación padre e hijo son estimados simultáneamente.
 - *one-way interaction*: transferencia solo de la simulación padre hacia simulación hijo
 - *two-way interaction*: transferencia de información desde simulación padre hacia simulación hijo y viceversa.
- Offline (o **encadenamiento**): Simulación hijo es estimado posteriormente a la simulación padre

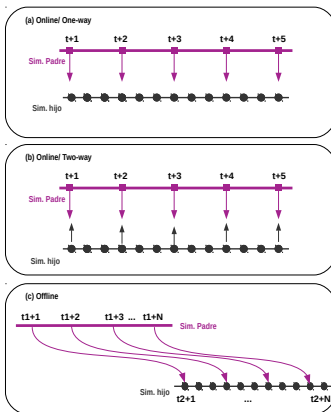


Figura: Diagrama de los diferentes métodos de anidamiento

Offline vs/ Online

Offline

- Baja frecuencia de actualización de datos de los bordes
- Tiene mayor flexibilidad en términos de la dimensión de la grilla y orientación.
- Es más sencillo su aplicación
- Proporcionar una representación física adecuada de un problema
- Sin el tratamiento adecuado de las condiciones de bordes, iniciales y grilla puede generar errores como *rim currents*.

Online

- Alta frecuencia de actualización de datos de los bordes.
- Permite analizar una misma estructura pero con diferentes resolución.
- En particular *two-way* es excesivamente laborioso.
- Se evita algunos errores numéricos

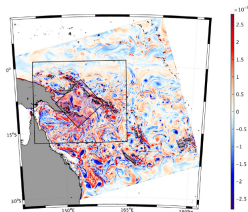


Figura: Campo de vorticidad de una simulación offline. Srinivasan et al., (2017)

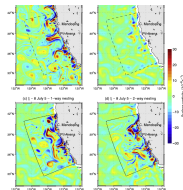


Figura: Campo de vorticidad de una simulación online. Debreau et al., (2012)

Preparación de los datos

Offline

- ROMS2ROMS es un conjunto de rutina descrito y propuesto por Mason et al., (2010)
- Existen versiones para
 - Python (https://data-croco.ifremer.fr/EXTERNAL_TOOLS/croco_pytools_E.Mason.tar)
 - Fortran (<http://people.atmos.ucla.edu/alex/ROMS/tools.tar>)
 - MATLAB (ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/users/sjullien/CROCO/Ucla_tools_June2017.tar)

Online

- Nestgui (rutina parte de croco_tools) es una rutina para MATLAB que permite la generacion de los archivos de entrada para la simulación hijo.

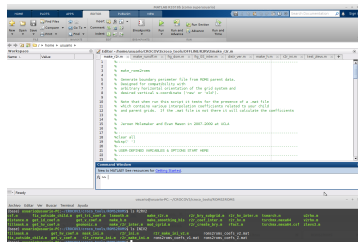


Figura: ROMS2ROMS

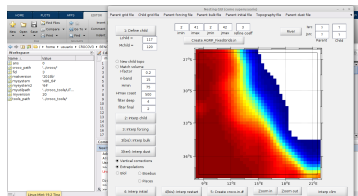


Figura: NESTGUI

Estudios previos

- En los últimos años, diversos estudios han sido realizados utilizando el método de encadenamiento en sus simulaciones. Uno de los objetivos de estudios de estos trabajo ha sido describir y comprender procesos asociado a la dinámica de submesoescala.
- Gracias a la flexibilidad de este procedimiento se ha podido simular regiones con una resolución horizontal de 100 metros y más de 100 niveles verticales.

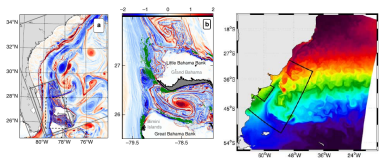


Figura: Gula et al., (2016)

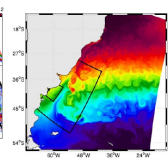


Figura: Capet et al., (2008)

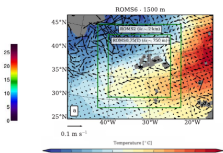


Figura: Vic et al., (2018)

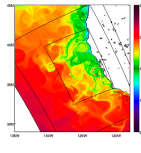


Figura: Molemaker et al., (2015)

Corriendo una simulación encadenada

Archivos y Modificaciones

Se debe modificar:

- `cppdefs.h`
- `param.h`
- `croco.in`

Archivos de entrada requeridos;

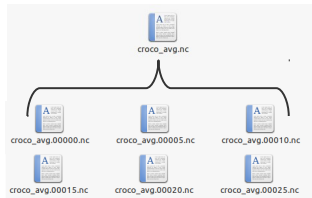
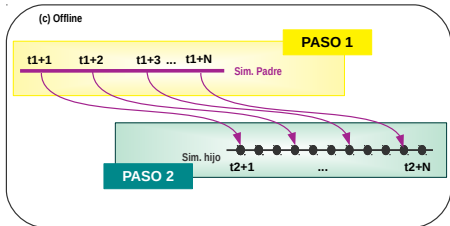
- Grilla (`croco_grd.nc`)
- Condiciones iniciales (`croco_ini.nc`)
- Condiciones de borde (`croco_bry.nc`)
- Forzantes (`croco_frc.nc`)

Los tres primeros archivos son manipulados con las rutinas **ROMS2ROMS**.

Creación de archivos de entrada: Simulación Padre

Antes de todo: Simulación Padre

- Para la creación de los archivos de entrada necesitamos de una *simulación padre*: Por lo tanto, primero debemos correr una simulación en un dominio de área mayor que la región donde estamos interesado en simular a alta resolución.
- A partir de la simulación padre se genera los archivos de la simulación encadenada (o hijo) a través de ROMS2ROMS



Si se va a utilizar ROMS2ROMS, se recomienda guardar las salidas de la simulación padre en varios archivos, es decir, `croco_avg/his.00000.nc`, `croco_avg/his.0000X.nc`, `croco_avg/his.000X.nc`, etc.

Creación de archivos de entrada: Simulación Hijo

Grilla

- Una opción para crear la grilla es a través de la rutina *make_grid.m* (*croco_tools*) y posteriormente aplicar la rutina *make_h.m* (*ROMS2ROMS*)
 - Recuerde en *crocotools_param.m* define dominio y resolución.
 - *make_h.m* tiene por función hacer que los bordes de la topografía hijo coincida con la topografía padre en una delgada zona de transición
- Al igual que la grilla padre, la topografía debe ser suavizada.

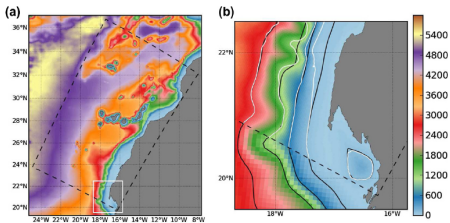


Figura: Ejemplo de topografía padre e hijo. Mason et al., (2010)

Al momento de seleccionar el dominio de la simulación hijo, considerar:

- El dominio hijo no debe formar parte de la capa esponja de la simulación padre
- Evite en los accidentes importantes topográficos, o procesos dinámicos significativos en los bordes del dominio hijo.

Notar que rtarget=rmax

```

make_h_m x
1 %
2 % This script takes hraw from the child grid file and applies log-based smoothing
3 % to satisfy the max r-factor criterium (rmax) and sets a minimum depth (hmin)
4 %
5 % Afterwards it matches child topography with that of the parent on each of its
6 % boundaries taking into account land masked areas.
7 %
8 %-----
9
10
11 % ROMS parent and child grid directories
12 pdir = '/home/usuario/CROCOV3/BENGUELA_L0/CROCO_FILES/';
13 cdir = '/home/usuario/CROCOV3/BENGUELA_L1R/CROCO_FILES/';
14 pgrid = 'croco_grd.nc';
15 cgrid = 'croco_grd.nc';
16
17 % When matching boundary topo: Only match to parent topography on open boundaries
18 obcflag = [1 0 1 1]; % open boundaries flag (1=open, [S E N W])
19
20 rmax = 0.25;
21 hmin = 75;
22
23 pgrid = [pdir pgrid]
24 cgrid = [cdir cgrid]
25
26 gridfile = cgrid;
27 lsmooth
28
29 if exist('pgrid')
30     mod_cgrid
31 end
32
33
34
49 % CROCO title names and directories
50 %
51 CROCO title = 'Benguela Model';
52 CROCO config = 'Benguela_LR';
53
54 % Grid dimensions:
55 %
56 lonmin = 12; % Minimum longitude [degree east]
57 lonmax = 19; % Maximum longitude [degree east]
58 latmin = -29.5; % Minimum latitude [degree north]
59 latmax = -29; % Maximum latitude [degree north]
60 %
61 % Grid resolution [degree]
62 %
63 dt = 1/3;
64 %
65 % Number of vertical Levels (! should be the same in param.h )
66 %
67 N = 32;
68 %
69 % Vertical grid parameters (! should be the same in croco.in )
70 %
71 theta_s = 7.;
72 theta_b = 2.;
73 hc = 200.;
74 vtransform = 2.; % s-coordinate type (1: old- ; 2: new- coordinates)
75 % ! take care to define NEW_S_COORD cpp-key in cppdefs.h
76 %
77 % Topography: choice of filter
78 %
79 topo_smooth = 1; % 1: old ; 2: new filter (better but slower)
80 %
81 % Minimum depth at the shore [m] (depends on the resolution,
82 % rule of thumb: d=1, hmin=300, d=1/4, hmin=150, ...)
83 % This affect the filtering since it works on grad(h)/h.
84 %
85 hmin = 75;
86 %
87 % Maximum depth at the shore [m] (to prevent the generation
88 % of too big walls along the coast)
89 %
90 hmax coast = 500;
91 %
92 % Maximum depth [m] (cut the topography to prevent
93 % extrapolations below WDA data)
94 %
95 hmax = 5000;
96 %
97 % Slope parameter (r=grad(h)/h) maximum value for topography smoothing
98 %
99 rtarget = 0.25;
100

```

Figura: make_h_m

Figura: crocotools_param.m

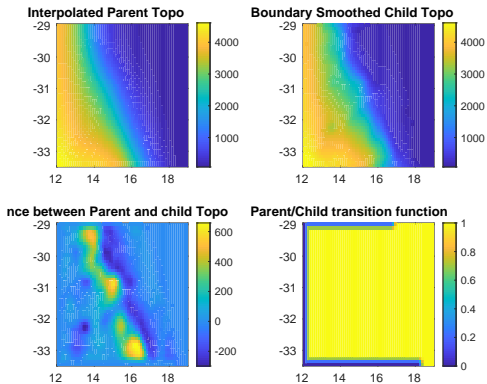


Figura: Figura resultante de make_h.m

Condiciones de borde

- En CROCO, los archivos que pueden entregar esta información son los archivos **BRY** y **CLIM**.
- Para realizar un encadenamiento, necesitamos usar archivos del tipo **BRY**

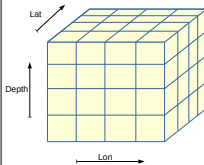
¿Cuáles son las diferencias entre BRY y CLIM?

Ambos archivos contienen la información de las variables principales necesarias para correr la simulación (U,V,UBAR,VBAR,TEMP,SALT y ZETA). Sin embargo se diferencian en

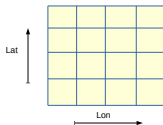
- Archivos BRY solo contienen la información de los bordes del dominio de la simulación
- Archivos CLIM contienen la información para todo el dominio de la simulación.

Archivos CLIM

3D Var (u,v,salt,temp)
[time,depth,lon,lat]

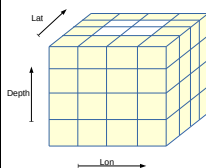


2D Var (ubar,vbar,zeta)
[time,lon,lat]

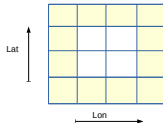


Archivos BRY

3D Var (u,v,salt,temp)
[time,depth,lon] o [time,depth,lat]



2D Var (ubar,vbar,zeta)
[time,lon] o [time,lat]



```

double temp(tcml time, s_rho, eta_rho, xi_rho) ;
temp:long_name = "potential temperature" ;
temp:units = "Celsius" ;
temp:time = "temp_time" ;
temp:coordinates = "lon_rho lat_rho s_rho temp_time" ;
double salt(scml time, s_rho, eta_rho, xi_rho) ;
salt:long_name = "salinity" ;
salt:units = "PSU" ;
salt:time = "salt_time" ;
salt:coordinates = "lon_rho lat_rho s_rho salt_time" ;
double u(ucml time, s_rho, eta_u, xi_u) ;
u:long_name = "u-momentum component" ;
u:units = "meter second-1" ;
u:time = "uclm_time" ;
u:coordinates = "lon_u lat_u s_rho u_time" ;
double v(vclm time, s_rho, eta_v, xi_v) ;
v:long_name = "v-momentum component" ;
v:units = "meter second-1" ;
v:time = "vcml_time" ;
v:coordinates = "lon_v lat_v s_rho vclm_time" ;
double ubar(ucml time, eta_u, xi_u) ;
ubar:long_name = "vertically integrated u-momentum component" ;
ubar:units = "meter second-1" ;
ubar:time = "uclm_time" ;
ubar:coordinates = "lon_u lat_u uclm_time" ;
double vbar(vclm time, eta_v, xi_v) ;
vbar:long_name = "vertically integrated v-momentum component" ;
vbar:units = "meter second-1" ;
vbar:time = "vcml_time" ;
vbar:coordinates = "lon_v lat_v vclm_time" ;
double SSH(ssh time, eta_rho, xi_rho) ;
SSH:long_name = "sea surface height" ;
SSH:units = "meter" ;
SSH:time = "zeta_time" ;
SSH:coordinates = "lon_rho lat_rho zeta_time" ;
double zeta(zeta time, eta_rho, xi_rho) ;
zeta:long_name = "sea surface height" ;
zeta:units = "meter" ;

```

Figura: Archivo CLIM

```

double temp_south(temp time, s_rho, xi_rho) ;
temp_south:long_name = "southern boundary potential temperature" ;
temp_south:units = "Celsius" ;
temp_south:coordinates = "lon_rho s_rho temp_time" ;
double salt_south(salt time, s_rho, xi_rho) ;
salt_south:long_name = "southern boundary salinity" ;
salt_south:units = "PSU" ;
salt_south:coordinates = "lon_rho s_rho salt_time" ;
double u_south(v3d time, s_rho, xi_u) ;
u_south:long_name = "southern boundary u-momentum component" ;
u_south:units = "meter second-1" ;
u_south:coordinates = "lon_u s_rho u_time" ;
double v_south(v3d time, s_rho, xi_rho) ;
v_south:long_name = "southern boundary v-momentum component" ;
v_south:units = "meter second-1" ;
v_south:coordinates = "lon_v s_rho vclm_time" ;
double ubar_south(v2d time, xi_u) ;
ubar_south:long_name = "southern boundary vertically integrated u-momentum component" ;
ubar_south:units = "meter second-1" ;
ubar_south:coordinates = "lon_u uclm_time" ;
double vbar_south(v2d time, xi_rho) ;
vbar_south:long_name = "southern boundary vertically integrated v-momentum component" ;
vbar_south:units = "meter second-1" ;
vbar_south:coordinates = "lon_v vclm_time" ;
double zeta_south(zeta time, xi_rho) ;
zeta_south:long_name = "southern boundary sea surface height" ;
zeta_south:units = "meter" ;
zeta_south:coordinates = "lon_rho zeta_time" ;
double temp_east(temp time, s_rho, eta_rho) ;
temp_east:long_name = "eastern boundary potential temperature" ;
temp_east:units = "Celsius" ;
temp_east:coordinates = "lat_rho s_rho temp_time" ;
double salt_east(salt time, s_rho, eta_rho) ;
salt_east:long_name = "eastern boundary salinity" ;
salt_east:units = "PSU" ;
salt_east:coordinates = "lat_rho s_rho salt_time" ;
double u_east(v3d time, s_rho, eta_rho) ;
u_east:long_name = "eastern boundary u-momentum component" ;
u_east:units = "meter second-1" ;
u_east:coordinates = "lat_u s_rho u_time" ;
double v_east(v3d time, s_rho, eta_v) ;
v_east:long_name = "eastern boundary v-momentum component" ;
v_east:units = "meter second-1" ;
v_east:coordinates = "lat_v s_rho vclm_time" ;
double ubar_east(v2d time, eta_rho) ;
ubar_east:long_name = "eastern boundary vertically integrated u-momentum component" ;
ubar_east:units = "meter second-1" ;
ubar_east:coordinates = "lat_u uclm_time" ;
double vbar_east(v2d time, eta_v) ;
vbar_east:long_name = "eastern boundary vertically integrated v-momentum component" ;
vbar_east:units = "meter second-1" ;
vbar_east:coordinates = "lat_v vclm_time" ;
double zeta_east(zeta time, eta_rho) ;
zeta_east:long_name = "eastern boundary sea surface height" ;
zeta_east:units = "meter" ;
zeta_east:coordinates = "lat_rho zeta_time" ;
double temp_ports(temp time, s_rho, xi_rho) ;

```

Figura: Archivo BRY

Condiciones de borde

- Es posible usar los archivos BRY porque solo se necesita la información de los bordes del dominio para estimar la simulación. Esto permite reducir el tamaño del archivo de las condiciones de bordes
- Archivos CLIM, permite que las variables del modelo se restauran hacia los valores de forzamiento de borde (nudging). En principio, esto permite la reducción del reflejo de falsas ondas, o de errores como "rim currents" (corrientes de bordes) (Marchiesiello et al., 2001)
- En la actualidad, el tratamiento de las condiciones de borde a mejorado, reduciendo los errores en las fronteras cuando se usar archivos bry

Rim Currents

- Se producen por un desajuste entre las condiciones de borde y la evolución de la simulación hijo (Mason et al., 2010).

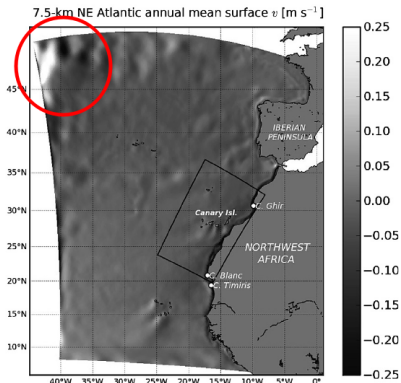


Figura: Ejemplo Rim Current. Mason et al., (2010)

Creando archivos BRY

Para crear los archivos BRY se utiliza la rutina para MATLAB *make_r2r.m*. La versión de *make_r2r.m* que se presentará en el practico realiza los siguientes procesos:

- Variables básica de la simulación padre (U,V,UBAR,VBAR, TEMP,SALT y ZETA) son interpoladas a las coordendas horizontales del dominio hijo.
- Si el nivel sigma de mayor profundidad de la simulación padre es menor a la profundidad del último nivel sigma de la simulación hijo, se extrapola para crear un nuevo punto.
- Puntos de la grilla hijo que se encuentra fuera del dominio padre deben ser parte de la máscara de la grilla.

Si $vtransform = 2$ (1), entonces parcoord/chdscoord es = *new2008* (*old1994*)

```

make_h.m x  make_r2r.m x
-----
20 %
21 % USER-DEFINED VARIABLES & OPTIONS START HERE
22 %
23 %
24 %
25 % 1. GENERAL
26 %
27
28
29 % Parent...
30 par_dir = '/home/usuario/CROCOV3/BENUELA_LB/CROCO_FILES/';
31 par_grd = 'croco_grd.nc';
32 par_file = 'croco';
33 par_tind = 1; % frame number in parent file
34 par_thetaa = 7;
35 par_thetaab = 2;
36 par_hc = 200.0;
37 par_N = 32;
38 parscord = 'new2008'; % parent 'new' or 'old' type scoord
39
40
41 % Child...
42 chd_dir = '/home/usuario/CROCOV3/BENUELA_LR/CROCO_FILES/';
43 chd_grd = 'croco_grd.nc';
44 chd_file = 'croco_ini.nc'; % name of new ini file
45 chd_thetaa = 7;
46 chd_thetaab = 2;
47 chd_hc = 200.0;
48 chd_N = 42;
49 chdscoord = 'new2008'; % child 'new' or 'old' type scoord
50
51
52 % 2. BOUNDARY FILE
53
54 abcflag = [ 1 0 1 1 ]; % open boundaries flag (1=open, [5 E N W])
55 bry_cycle = 0; % 0 means no cycle
56 bry_fname = 'croco_bry.nc'; % bry filename
57 bry_type = 'avg'; % 'avg', 'his' or 'rst'
58 total_num_files = 41; % number of files to read
59 first_file = 0040; % first avg/his file, eg rows_avg.0282.nc gives 282
60 first_record = 1; % desired record no. from first avg/his file
61 last_record = 5; % desired record no. from last avg/his file
62 num_records_per_file = 1; % number of records per parent output file
63 fourdigit=
64
65
66 % USER-DEFINED VARIABLES & OPTIONS END HERE
67 %

```

Figura: make_r2r.m

```

49 % CROCO title names and directories
50 %
51 CROCO_title = 'Benguela Model';
52 CROCO_config = 'Benguela_LR';
53 %
54 % Grid dimensions:
55 %
56 lonmin = 12; % Minimum longitude [degree east]
57 lonmax = 19; % Maximum longitude [degree east]
58 latmin = -33.5; % Minimum latitudeF [degree north]
59 latmax = -29; % Maximum latitude [degree north]
60 %
61 % Grid resolution [degree]
62 %
63 dl = 1/5;
64 %
65 % Number of vertical levels (! should be the same in param.h !)
66 %
67 N = 32;
68 %
69 % Vertical grid parameters (! should be the same in croco.in !)
70 %
71 theta_s = 7.;
72 theta_b = 2.;
73 hc = 200.;
74 vtransform = 2.; % s-coordinate type (1: old- ; 2: new- coordinates)
75 % ! take care to define NEW_S_COORD cpp-key in cppdefs.h
76 %
77 % Topography: choice of filter
78 %
79 topo_smooth = 1; % 1: old ; 2: new filter (better but slower)
80 %
81 % Minimum depth at the shore [m] (depends on the resolution,
82 % rule of thumb: d=1, hmin=300, d=1/4, hmin=150, ...)
83 % This affect the filtering since it works on grad(h)/h.
84 %
85 hmin = 75;
86 %
87 % Maximum depth at the shore [m] (to prevent the generation
88 % of too big walls along the coast)
89 %
90 hmax_coast = 500;
91 %
92 % Maximum depth [m] (cut the topography to prevent
93 % extrapolations below MDA data)
94 %
95 hmax = 5000;
96 %
97 % Slope parameter (r=grad(h)/h) maximum value for topography smoothing
98 %
99 rtarget = 0.25;
100 %

```

Figura: crocotools_param.m

Condiciones Iniciales

La creación del archivo con las condiciones iniciales es realizada con la rutina para MATLAB *r2r_ini.m* presente en las herramientas ROMS2ROMS. Al igual que la rutina *make_r2r.m*, esta versión de *r2r_ini.m* (que se presentará en el practico) realiza los siguientes pasos.

- Variables básica de la simulación padre (U,V,UBAR,VBAR, TEMP,SALT y ZETA) son interpoladas a las coordendas horizontales del dominio hijo.
- Si el nivel sigma de mayor profundidad de la simulación padre es menor a la profundidad del último nivel sigma de la simulación hijo, se extrapola para crear un nuevo punto.
- Puntos de la grilla hijo que se encuentra fuera del dominio padre deben ser parte de la máscara de la grilla.

```

make_h.m x  make_r2r.m x  r2r_ini.m x
5 % Generate initial file from ROMS parent data.
6 %
7 %-----
8 % USER-DEFINED VARIABLES & OPTIONS START HERE
9 %-----
10 %
11 # R1KM_r2r
12 % Parent...
13 % Parent...
14 par_dir = '/home/usuario/CROCOV3/BENGUELA_L8/CROCO_FILES/';
15 par_grd = 'croco_grd.nc';
16 par_ini = 'croco_avg.00040.nc';
17 par_tind = 2; % frame number in parent file
18 par_thetas = 7;
19 par_thetab = 2;
20 par_hc = 200.0;
21 par_N = 32;
22 parscoord = 'new2008'; % parent 'new' or 'old' type scoord
23
24
25 % Child...
26 chd_dir = '/home/usuario/CROCOV3/BENGUELA_L1R/CROCO_FILES/';
27 chd_grd = 'croco_grd.nc';
28 chd_file = 'croco_ini.nc'; % name of new ini file
29 chd_thetas = 7;
30 chd_thetab = 2;
31 chd_hc = 200.0;
32 chd_N = 42;
33 chdscoord = 'new2008'; % child 'new' or 'old' type scoord
34
35
36 % USER-DEFINED VARIABLES & OPTIONS END HERE
37 %-----
38 %

```

Figura: r2r_ini.m

Cuidado al escoger el paso de tiempo para las condiciones iniciales. Debe ser una fecha posterior al primer dato disponible de las condiciones de borde y forzantes.

Forzantes

Los archivos que contienen la información de los forzantes (`croco_frc.nc`) no requieren un procesamiento en particular. Por lo tanto, una opción para ser realizado con la rutina de `make_forcing.nc` de `croco_tools`.

Configuración

cppdefs.h

En la sección "*Lateral Forcing*" debe estar configurado como:

```
/* Lateral Forcing */  
# undef CLIMATOLOGY  
...  
..  
.  
# define FRC_BRY
```

param.h

Modificar las dimensiones del dominio acorde al dominio hijo

croco.in

Recuerde modificar dt , ya que a medida que aumenta la resolución, dt disminuye.

Conclusiones

- La anidación offline o encadenamiento es un procedimiento sencillo para realizar simulaciones de mayor resolución.
- Es un método flexible, lo cual puede ser útil para diversos objetivos de estudio.

Referencias

- Srinivasan, K., McWilliams, J. C., Renault, L., Hristova, H. G., Molemaker, J., & Kessler, W. S. (2017). Topographic and mixed layer submesoscale currents in the near-surface southwestern tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 47(6), 1221-1242.
- Capet, X., Campos, E. J., & Paiva, A. M. (2008). Submesoscale activity over the Argentinian shelf. *Geophysical Research Letters*, 35(15).
- Vic, C., Gula, J., Roulet, G., & Pradillon, F. (2018). Dispersion of deep-sea hydrothermal vent effluents and larvae by submesoscale and tidal currents. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 133, 1-18.
- Molemaker, M. J., McWilliams, J. C., & Dewar, W. K. (2015). Submesoscale instability and generation of mesoscale anticyclones near a separation of the California Undercurrent. *Journal of Physical Oceanography*, 45(3), 613-629.
- Mason, E., Molemaker, J., Shchepetkin, A. F., Colas, F., McWilliams, J. C., & Sangrà, P. (2010). Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean modelling*, 35(1-2), 1-15.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., & Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1-21.
- Barkan, R., McWilliams, J. C., Shchepetkin, A. F., Molemaker, M. J., Renault, L., Bracco, A., & Choi, J. (2017). Submesoscale dynamics in the northern Gulf of Mexico. Part I: Regional and seasonal characterization and the role of river outflow. *Journal of Physical Oceanography*, 47(9), 2325-2346.