

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| Descripción del Modelo. | 1 |
| Descripción de la configuración para el caso de estudio | 2 |
| Preparación de archivos de entrada | 2 |
| Ejecución del modelo | 20 |
| Resultados. | 20 |
| Conversión de salidas a NetCDF | 21 |
| Análisis de datos | 24 |

Modelado y simulación de corrientes mediante el uso del software especializado libre HYCOM. Estudio de caso: Frente frío #4 de la temporada 2007 sobre México

1. Introducción

Los frentes fríos o nortes son masas de aire provenientes de latitudes medias. Estas masas de aire frío y sus respectivos sistemas frontales ocurren principalmente de octubre a mayo. Se caracterizan por generar vientos intensos en el Golfo de México (GoM) de hasta 110 km/h, descensos en la temperatura desde 2 a 15 °C en 24 horas, nubosidad baja y precipitación sobre la zona este de México (Acevedo-Rosas F. y Luna Díaz-Peón A., 2005).

Debido a sus características físicas, los sistemas frontales y nortes en el GoM, ocasionan tormentas intensas que generan problemas a las actividades marítimas y aéreas principalmente.

El frente frío número 4 (FF4) de la temporada de 2007 se desarrolló entre el 22 de octubre y 2 de noviembre de 2007. Por sus características dinámicas se puede dividir en tres etapas:

La primera etapa comenzó el día 22 de octubre con la entrada del sistema de alta presión al GoM, su avance a través del GoM, entre el 22 y el 25 de octubre, generó vientos intensos, gran precipitación en los estados de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Campeche, fuerte oleaje y corrientes intensas en el GoM, quedando en estado estacionario el día 25 de octubre sobre el mar Caribe.

La segunda etapa se desarrolló entre los días 25 y 28 de octubre, en la cual el frente continúa en estado estacionario sobre el mar Caribe.

La tercera etapa, se desarrolló del 28 de octubre al 2 de noviembre, donde el frente estacionario evolucionó a frente cálido desplazándose hacia el oeste, quedando en estado estacionario sobre el Golfo de México, generando precipitación muy intensa en las zonas altas en los estados del sureste mexicano, principalmente Tabasco y Chiapas. Esta intensa precipitación provocó la inundación de Villahermosa, Tabasco.

2. Descripción del Modelo.

El HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) es resultado de un esfuerzo de diversas instituciones (HYCOM Consortium), patrocinadas por el *National Ocean Partnership Program* (NOPP), como parte del *U.S. Global Ocean Data Assimilation Experiment* (GODAE) para desarrollar y evaluar un modelo de circulación oceánica.

El nombre de este modelo obedece al uso de diferentes sistemas de coordenadas verticales según la región del océano que resuelve: usa coordenadas isopícnas en el océano abierto estratificado, cambia a coordenadas sigma en regiones someras y, finalmente, a coordenadas Z en la capa mezclada superficial o en regiones no estratificadas. Esta combinación de coordenadas permite

que: a) el modelo retenga las características de las masas de agua durante largos períodos de simulación; b) que tenga una alta resolución vertical en la capa mezclada superficial para representar adecuadamente los procesos termodinámicos y bioquímicos; y c) que mantenga suficiente resolución vertical en regiones poco estratificadas del océano así como en regiones costeras.

El código fuente del modelo es distribuido a través de la página del consorcio (<https://www.hycom.org/>) y junto con él, se pone a disposición de los usuarios un conjunto de herramientas de pre y post-procesamiento de datos, conocidas colectivamente como HYCOM ALL, así como configuraciones ejemplo para algún dominio. En este tutorial se usará la versión 2.2.98 del modelo, que se distribuye con una configuración de ejemplo para una región del océano Atlántico contenida en una carpeta identificada como ATLb2.0, así como la versión 2.2.72 de HYCOM ALL.

2.1. Descripción de la configuración para el caso de estudio

Este tutorial está desarrollado para el caso de estudio del Frente Frío Número 4 del año 2007. El dominio considerado es el Golfo de México, 98.00° W a 76.40° W y de 18.09° N a 31.96° N, con una resolución horizontal de 1/25° y una configuración de 27 niveles verticales híbridos referidos a sigma 0. Se usa la versión de la ecuación de estado de 7 componentes. Los forzantes atmosféricos se toman de las salidas del WRF (estudio de caso atmosférico).

2.2. Preparación de archivos de entrada

La ejecución de una simulación de HYCOM requiere la preparación de múltiples archivos de entrada que describan el dominio de estudio, sus condiciones atmosféricas y oceanográficas y la configuración del modelo con la que se hará la simulación (parametrizaciones a utilizar, frecuencia de la generación de salidas, número de procesadores a utilizar, etc). Para este tutorial, los archivos de entrada necesarios son los siguientes:

1. Archivo blkdat.input
2. Archivos regional.grid.[ab]
3. Archivos regional.depth.[ab]
4. Archivos relax.[ab]
5. Archivos forcing.[ab]
6. Archivo restart_in.[ab]
7. Archivo ports.input
8. Archivo patch.input
9. Archivos nest
10. Archivo limits

Cada uno de los archivos anteriores puede ser generado con las herramientas contenidas en HYCOM ALL. Dichas herramientas son rutinas de FORTRAN que permiten crear todos los archivos de entrada que el modelo necesita para ejecutarse, o bien, que permiten convertir las

salidas del modelo a diferentes formatos o incluso graficarlas. El uso de estas rutinas generalmente requiere de scripts auxiliares que las llamen y les den los parámetros de entrada que necesitan para ejecutarse. Muchos ejemplos de scripts se encuentran disponibles en el directorio ATLb2.0 y aquí se hará uso de ellos para describir la generación de los archivos de entrada del modelo. En caso de no contar con ejemplos adecuados de scripts, se puede consultar el código fuente de la rutina que se quiere ejecutar y allí se describen los parámetros de entrada que se requieren. Además, en el foro de HYCOM (forum.hycom.org) a menudo se comparten variaciones de los ejemplos de scripts.

A continuación se describe la generación de los archivos de entrada enlistados más arriba usando las herramientas de HYCOM ALL.

Archivo blkdat.input Este archivo contiene la configuración de toda la simulación: describe la estructura horizontal y vertical del dominio, contiene las banderas para elegir las parametrizaciones a usar, controla el paso del tiempo, la frecuencia en la que se escriben salidas, etc. La generación de un nuevo archivo blkdat.input requiere básicamente dos cosas: elegir las banderas de configuración adecuadas y describir la estructura vertical del dominio. Las opciones de banderas para el archivo blkdat.input se describen el Apéndice B de la Guía de usuario del modelo (https://www.hycom.org/attachments/063_hycom_users_guide.pdf)

Ahora, la descripción de la estructura vertical puede ser complicada de elaborar, por lo que lo más recomendable es partir de una configuración previa e ir haciendo las modificaciones necesarias. En el directorio `~ATLb2.0/expt` se encuentra el archivo blkdat.input correspondiente a ese ejemplo y se puede usar como base para generar un archivo adecuado a la configuración que se desee. Sin embargo, lo mejor es utilizar como ejemplo la configuración de alguno de los experimentos publicados en la página de HYCOM que se asemeje a las características de estructura vertical con las que nos interesa trabajar. Para este caso de estudio se siguió exactamente la configuración del experimento HYCOM + NCODA Gulf of Mexico 1/25° Analysis GOMl0.04/expt_32.5 (<https://www.hycom.org/data/goml0pt04/expt-32pt5>).

NOTA: *todos los archivos de entrada/salida en HYCOM se presentan como un par de archivos .a y .b. El archivo .a contiene los datos de forma binaria y el archivo .b describe que hay en el archivo .a y cómo está almacenado. De aquí en adelante, la notación *[ab] corresponderá al par de archivos *.a y *.b.*

Archivos regional.grid.[ab] Contienen la malla horizontal que se utilizará en la simulación. Para generarlos se pueden utilizar las subrutinas que se encuentran bajo el directorio de `~ALL/topo/src`. De forma general, la información que se requiere son las coordenadas extremas que definen al dominio y el número de puntos de malla en la horizontal (idm) y en la vertical (jdm) del dominio (que está en función de la resolución que se quiera). Para una malla con proyección Mercator, se utiliza el ejecutable `~ALL/topo/src/grid_mercator` que puede ser llamado con un script como `ATLb2.0/topo/ regional.grid.com:`

```
#!/bin/csh
set echo
# Script para crear los archivos regional.grid.[ab] usando grid_mercator de HYCOM ALL.
cd ruta_del_directorio_de_trabajo
#
touch fort.61
/bin/rm -f fort.61*
#
cat >! regional.grid.b <<'E-o-D'
541 'idm ' = longitudinal array size
385 'jdm ' = latitudinal array size
'E-o-D'
setenv FOR061A fort.61A
# Le damos al binario la información que necesita
ruta_a_hycom_all/ALL/topo/src/grid_mercator<<'E-o-D'
541 'idm ' = longitudinal array size
385 'jdm ' = latitudinal array size
0 'mapflg' = map flag (0=mercator,2=uniform,4=f-plane)
1.0 'pntlon' = longitudinal reference grid point on pressure grid
-98.0 'reflon' = longitude of reference grid point on pressure grid
0.04 'grdlon' = longitudinal grid size (degrees)
-459 'pntlat' = latitudinal reference grid point on pressure grid
0 'reflat' = latitude of reference grid point on pressure grid
0.04 'grdlat' = latitudinal grid size at the equator (degrees)
'E-o-D'
mv fort.61 regional.grid.b
mv fort.61A regional.grid.a
#
#Fin
#
```

El parámetro *pntlat* puede resultar confuso. Pero en el caso de una malla Mercator, que siempre está referida al ecuador (*reflat*=0), es el número de punto de malla que ocuparía *reflat* si la malla se extendiera hasta allí. En nuestro ejemplo, ya que queremos un dominio que inicia en el hemisferio norte (~18°N), el índice es negativo. De forma general, podemos aproximar *pntlat* = -lat_inicio/*grdlon*. Sin embargo, ya que la proyección Mercator genera deformaciones de distancia conforme se acerca a los polos (tanto entre paralelos como entre meridianos), el *pntlat* obtenido de esa forma puede no dar exactamente las coordenadas de interés, de modo que será necesario variar ligeramente su valor hasta encontrar el necesario. Las coordenadas extremas del dominio generado con el script anterior se pueden ver en el archivo **regional.grid.b** que se presenta a continuación, dadas por el intervalo presentado como *plon* y *plat*.

```
541 'idm ' = longitudinal array size
385 'jdm ' = latitudinal array size
0 'mapflg' = map flag (-1=unknown,0=mercator,2=uniform,4=f-plane)
plon: min,max = -98.00000 -76.40000
plat: min,max = 18.09165 31.96065
qlon: min,max = -98.02000 -76.42000
qlat: min,max = 18.07264 31.94368
ulon: min,max = -98.02000 -76.42000
ulat: min,max = 18.09165 31.96065
vlon: min,max = -98.00000 -76.40000
vlat: min,max = 18.07264 31.94368
pang: min,max = 0.00000 0.00000
pscx: min,max = 3773.65063 4227.99951
pscy: min,max = 3773.76343 4227.96484
qsxc: min,max = 3774.34766 4228.45801
qscy: min,max = 3774.30957 4228.45752
```

```

uscx: min,max = 3773.65063      4227.99951
uscy: min,max = 3773.76343      4227.96484
vscx: min,max = 3774.34766      4228.45801
vscy: min,max = 3774.30957      4228.45752
cori: min,max = 0.0000452436 0.0000771631
pasp: min,max = 0.99997        1.00007

```

Archivos regional.depth.[ab] Contienen la batimetría y para generarlos se requiere que ya existan los archivos regional.grid.[ab]. En este caso también se utilizan las subrutinas que se encuentran bajo el directorio de ~ALL/topo/src. Hay varias opciones de rutinas, dependiendo del formato y la resolución de la batimetría de entrada. Por ejemplo, para crear los archivos a partir de los datos de ETOPO1 que se encuentran en formato NetCDF (disponibles en https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/data/bedrock/cell_registered/netcdf/) y que tienen resolución de 1 arcominuto, se utiliza el ejecutable ~ALL/topo/src/bathy_01min, el cual necesita la ruta al archivo de batimetría y algunas variables que describen parámetros de interpolación:

```

#!/bin/csh
set echo
set time=1
#
# Script para crear los archivos regional.depth.[ab] a partir de la batimetría de ETOPO1 en
# formato NetCDF usando bathy_01min de HYCOM ALL.
#
setenv FOR061 fort.61
setenv FOR061A fort.61A
#
/bin/rm -f $FOR061 $FOR061A
#
# Se indica donde está el archivo de batimetría
#
setenv CDF_ETOPO ruta_al_archivo_de_batimetria/ETOPO1_Bed_g_gmt4.nc
#
# Le damos al binario la información que necesita
#
ruta_a_hycom_all/ALL/topo/src/bathy_01min << 'E-o-D'
&TOPOG
    CTITLE = 'Bathymetry from ETOPO1 dataset',
    COAST = 0.1, ! DEPTH OF MODEL COASTLINE (-ve keeps orography)
    INTERP = -1, ! INTERPOLATION FLAG =0 LINEAR;
    ! =N; AVERAGE OVER (2*N+1)x(2*N+1) GRID PATCH
    MTYPE = 0, ! REGION TYPE = 0; CLOSED DOMAIN. = 1; NEAR GLOBAL. = 2; FULLY
GLOBAL.
/
'E-o-D'
mv fort.61 regional.depth.b
mv fort.61A regional.depth.a
#
# Fin
#

```

Archivos relax.[ab] Contienen **datos** de temperatura, salinidad y densidad para todo el dominio y se utilizan como condiciones iniciales y, si se habilitan, como campos a los cuales se

relaja la simulación. Es muy común utilizar la climatología LEVITUS, la cual está disponible en (<ftp://ftp.hycom.org/pub/awall/>). La conversión de estos datos a archivos relax se lleva en dos etapas: primero se interpolan al dominio horizontal y luego son llevados de coordenadas z a coordenadas híbridas. Por eso, generar estos archivos requiere que ya se hayan hecho los archivos regional.grid.[ab] y regional.depth.[ab], así como el archivo de configuración blkdat.input, pues es el que contiene la descripción de la estructura vertical del dominio. Para la primera etapa se utiliza el ejecutable **~ALL/relax/src/z_levitus**, el cual puede ser llamado con **~ATLb2.0/relax/levitus/z_levitus_sig0.com**:

```
#!/bin/csh
set echo
set time = 1
setenv pget cp
setenv pput cp
# Se definen las rutas con los archivos de entrada y la ruta para escribir las salidas
setenv S ruta_al_directorio_de_trabajo
setenv L ruta_al_directorio_con_climatologia_levitus
setenv D ruta_al_directorio_con_archivos_de_malla
mkdir -p $$
cd $$
touch z_levitus
/bin/rm z_levitus
# 12 months
foreach MM ( 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 )
touch fort.71 fort.73
/bin/rm -f fort.71 fort.73
${pget} $L/r_m${MM}.d fort.71 &
${pget} $L/s_m${MM}.d fort.73 &
touch regional.grid.a regional.grid.b
if (-z regional.grid.b) then
  ${pget} ${D}/regional.grid.b regional.grid.b &
endif
if (-z regional.grid.a) then
  ${pget} ${D}/regional.grid.a regional.grid.a &
endif
touch z_levitus
if (-z z_levitus) then
  ${pget} ruta_a_hycom_all/ALL/relax/src/z_levitus . &
endif
wait
chmod a+rx z_levitus

/bin/rm -f core
touch core

setenv FOR010A fort.10A
setenv FOR011A fort.11A
setenv FOR012A fort.12A
/bin/rm -f fort.10 fort.10A fort.11 fort.11A fort.12 fort.12A
./z_levitus <<E-o-D
&AFTITL
CTITLE = '1234567890123456789012345678901234567890',
CTITLE = 'Levitus monthly',
/
&AFFLAG
ICTYPE = 2,
KSIGMA = 0,
INTERP = 1,
ITEST = 40,
JTEST = 17,
MONTH = $MM,
```

```

/
E-o-D
# --- Required Output, potential density and temperature.
${pput} fort.10 ${S}/temp_sig0_m${MM}.b
${pput} fort.10A ${S}/temp_sig0_m${MM}.a
${pput} fort.12 ${S}/dens_sig0_m${MM}.b
${pput} fort.12A ${S}/dens_sig0_m${MM}.a
# --- Optional Output.
${pput} fort.11 ${S}/saln_sig0_m${MM}.b
${pput} fort.11A ${S}/saln_sig0_m${MM}.a
# --- end of month foreach loop
/bin/rm fort.7[123]
end
#

```

Los detalles de las variables que requiere el ejecutable **z_levitus** se pueden consultar en su código fuente **z_levitus.f**. En general, el script de lanzamiento anterior contiene las rutas a los archivos de la climatología, a los archivos de batimetría y a los archivos de malla. Además, en este script se declaran variables que describen los tipos de datos de entrada y salida (como ICTYPE y KSIGMA), así como detalles de la interpolación (como INTERP).

Para la segunda etapa de generación de archivos relax, se requiere una versión modificada del archivo de configuración **blkdat.input**, del cual sólo se tomará la información relacionada con la descripción de la configuración vertical del experimento, lo cual se puede hacer con un script como el siguiente:

```

#!/bin/csh
#
set echo
#
# Crea el archivo blkdat.input necesario para las rutinas ~ALL/relax/src a partir del
# blkdat.input global
# --- 'vsigma' is required when using relaxi
# --- 'sigver' is required when using relaxi
# --- 'levtop' is optional
# --- 'isotop' is out of order (before dp00), also optional.
#
setenv P ruta_al_archivo_blkdat_global
echo "Levitus Climatology" >| blkdat.input
echo " 00      'month' = month of climatology (01 to 12)" >> blkdat.input
echo " 1      'sigver' = version of the equation of state" >> blkdat.input
echo " 2      'levtop' = top level of input clim. to use" >> blkdat.input
egrep "'iversn'|'iexpt'|'yrflag'" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'idm '|'jdm '" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
echo " 0      'jdw ' = width of zonal average" >> blkdat.input
egrep "'itest'|'jtest'|'kdm '" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'nhybrd'|'nsigma'" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'isotop'" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'d[ps]0k '" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'d[ps]00[ xfi] '" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'thflag'|'thbase'" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'vsigma'" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'sigma '" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input
egrep "'thkmin'" ${P}/blkdat.input >> blkdat.input

```

Una vez que se generó el archivo **blkdat.input** versión relax, se hace la segunda etapa de generación de archivos relax. En esta etapa se utiliza el ejecutable **~ALL/relax/src/relaxi**, que

puede ser llamado con el script **relax.com**:

```
#!/bin/csh
##
set echo
set time = 1
setenv pget cp
setenv pput cp
setenv P ruta_al_archivo_blkdat_global
setenv S ruta_al_directorio_de_trabajo
setenv L ruta_al_directorio_con_archivos_generados_por_z_levitus
setenv D ruta_al_directorio_con_archivos_de_malla
mkdir -p $$
cd      $$

touch relaxi blkdat.input fort.51 fort.51A fort.52 fort.52A
/bin/rm relaxi blkdat.input fort.51 fort.51A fort.52 fort.52A
#
foreach MM ( 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 )
#
/bin/rm -f fort.73 fort.73A fort.72 fort.72A
ln -s ${L}/saln_sig0_m${MM}.b fort.73
ln -s ${L}/saln_sig0_m${MM}.a fort.73A
ln -s ${L}/temp_sig0_m${MM}.b fort.72
ln -s ${L}/temp_sig0_m${MM}.a fort.72A

touch fort.51 fort.51A
if (-z fort.51) then
    ${pget} ${D}/regional.depth.b fort.51 &
endif
if (-z fort.51A) then
    ${pget} ${D}/regional.depth.a fort.51A &
endif
#
touch regional.grid.a regional.grid.b
if (-z regional.grid.b) then
    ${pget} ${D}/regional.grid.b regional.grid.b &
endif
if (-z regional.grid.a) then
    ${pget} ${D}/regional.grid.a regional.grid.a &
endif
#
touch blkdat.input
if (-z blkdat.input) then
    /bin/cp ${P}/blkdat.input blkdat.input &
endif
#
touch relaxi
if (-z relaxi) then
    ${pget} ruta_a_hycom_all/ALL/relax/src/relaxi . &
endif
wait
chmod a+rx relaxi

sed -e "s/^[0-9]*'month ' =/ ${MM} 'month ' =/" blkdat.input >| fort.99

/bin/rm -f core
touch core

setenv FOR010A fort.10A
setenv FOR011A fort.11A
setenv FOR012A fort.12A
setenv FOR021A fort.21A
setenv FOR051A fort.51A
setenv FOR052A fort.52A
```

```

setenv FOR073A fort.73A
setenv FOR072A fort.72A
/bin/rm -f fort.10 fort.11 fort.12 fort.21
/bin/rm -f fort.10A fort.11A fort.12A fort.21A

./relaxi
#Output
/bin/mv fort.10 relax_tem_m${MM}.b
/bin/mv fort.10A relax_tem_m${MM}.a
/bin/mv fort.11 relax_sal_m${MM}.b
/bin/mv fort.11A relax_sal_m${MM}.a
/bin/mv fort.12 relax_int_m${MM}.b
/bin/mv fort.12A relax_int_m${MM}.a
#
setenv DAYM `echo ${MM} | awk '{printf("0000_%3d_00\n",30*($1-1)+16)}'`
/bin/mv fort.21 relax.${DAYM}.b
/bin/mv fort.21A relax.${DAYM}.a
/bin/rm fort.7[12]
#
end
#
#Merge monthly climatologies into one file.
#
cp relax_int_m01.b relax_int.b
cp relax_sal_m01.b relax_sal.b
cp relax_tem_m01.b relax_tem.b
#
foreach MM ( 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 )
tail -n +6 relax_int_m${MM}.b >> relax_int.b
tail -n +6 relax_sal_m${MM}.b >> relax_sal.b
tail -n +6 relax_tem_m${MM}.b >> relax_tem.b
end
#
cp relax_int_m01.a relax_int.a
cp relax_sal_m01.a relax_sal.a
cp relax_tem_m01.a relax_tem.a
#
foreach MM ( 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 )
cat relax_int_m${MM}.a >> relax_int.a
cat relax_sal_m${MM}.a >> relax_sal.a
cat relax_tem_m${MM}.a >> relax_tem.a
end
#
bin/rm -f core relaxi fort.* regional.grid.? blkdat.input
#

```

Este script se encarga de copiar los datos generados en el paso anterior a las unidades (archivos *fort.unit*) que requiere el ejecutable **relaxi** y renombrarlos con las fechas correspondientes a nuestro experimento.

Cuando los archivos *relax* se van a usar para hacer relajación en las fronteras (o para la máscara de relajación de la condiciones de frontera de los archivos nest) se requiere una máscara de pesos (archivos **rmu.[ab]**). Es decir, una matriz de tamaño $idm*jdm$ con coeficientes que indican el peso de la relajación en cada punto. Para generar esta máscara, se utiliza el ejecutable **~ALL/relax/src/rmu**, que puede ser llamado con el script ejemplo **relax_rmu.com** que se encuentra en el directorio **~/ATLb2.00/relax/010**:

```
#!/bin/csh
```

```

set echo
set time = 1
setenv OS `uname`
setenv pget cp
setenv pput cp

setenv C ruta_al_directorio_de_trabajo
setenv D ruta_al_directorio_con_archivos_de_malla
setenv P ruta_a_hycom_all

mkdir -p $C
cd      $C

touch  rmu fort.51 fort.51A regional.grid.a regional.grid.b
/bin/rm rmu fort.51 fort.51A regional.grid.a regional.grid.b

# --- Input.

touch fort.51 fort.51A
if (-z fort.51) then
  ${pget} ${D}/regional.depth.b fort.51 &
endif
if (-z fort.51A) then
  ${pget} ${D}/regional.depth.a fort.51A &
endif

touch regional.grid.a regional.grid.b
if (-z regional.grid.b) then
  ${pget} ${D}/regional.grid.b regional.grid.b &
endif
if (-z regional.grid.a) then
  ${pget} ${D}/regional.grid.a regional.grid.a &
endif

touch rmu
if (-z rmu) then
  /bin/cp ${P}/ALL/relax/src/rmu . &
endif
wait
chmod a+rx rmu

/bin/rm -f core
touch core
/bin/rm -f fort.21 fort.21A

setenv FOR021A fort.21A
setenv FOR051A fort.51A

setenv NO_STOP_MESSAGE
./rmu <<'E-o-D'
&MASK
CTITLE = 'S,E,N boundaries: 20 grid pts with .1-6 day e-folding time',

IF =    253, 253, 253, 253, 253, 253, 253, 253, 253, 253,
        253, 253, 253, 253, 253, 253, 253, 253, 253, 253,

        540, 539, 538, 537, 536, 535, 534, 533, 532, 531,
        530, 529, 528, 527, 526, 525, 524, 523, 522, 521,

        419, 419, 419, 419, 419, 419, 419, 419, 419, 419,
        419, 419, 419, 419, 419, 419, 419, 419, 419, 419,

IL =    540, 539, 538, 537, 536, 535, 534, 533, 532, 531,
        530, 529, 528, 527, 526, 525, 524, 523, 522, 521,

        540, 539, 538, 537, 536, 535, 534, 533, 532, 531,

```

```

530, 529, 528, 527, 526, 525, 524, 523, 522, 521,

540, 539, 538, 537, 536, 535, 534, 533, 532, 531,
530, 529, 528, 527, 526, 525, 524, 523, 522, 521,

JF = 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10,
      11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,

      01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10,
      11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,

      384, 383, 382, 382, 380, 379, 378, 377, 376, 375,
      374, 373, 372, 371, 370, 369, 368, 367, 366, 365,

JL = 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10,
      11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,

      384, 384, 384, 384, 384, 384, 384, 384, 384, 384,
      384, 384, 384, 384, 384, 384, 384, 384, 384, 384,

      384, 383, 382, 382, 380, 379, 378, 377, 376, 375,
      374, 373, 372, 371, 370, 369, 368, 367, 366, 365,

EFOLD = 0.10, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70,
         0.85, 1.00, 1.25, 1.50, 1.90, 2.40, 3.00, 4.00, 5.00 6.00,

         0.10, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70,
         0.85, 1.00, 1.25, 1.50, 1.90, 2.40, 3.00, 4.00, 5.00 6.00,

         0.10, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70,
         0.85, 1.00, 1.25, 1.50, 1.90, 2.40, 3.00, 4.00, 5.00 6.00,

/
'E-o-D'
${pput} fort.21 ~/$C/rmu.b
${pput} fort.21A ~/$C/rmu.a

```

En el ejemplo anterior se están relajando 20 puntos en las fronteras sur, este y norte con tiempo de relajación entre 1 y 6 días.

Archivos *forcing.force.[ab]* Contienen los forzantes atmosféricos. Los campos requeridos se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Archivos de forzantes atmosféricos para HYCOM.

| Nombre de archivo | Descripción |
|--------------------|---|
| airtmp.[ab] | Temperatura del aire en °C. |
| surtmp.[ab] | Temperatura superficial en °C. Se usa para calcular la radiación de onda larga. |
| wndewd.[ab] | Componente zonal del viento a 10 metros (m/s). |
| wndnwd.[ab] | Componente meridional del viento a 10 metros (m/s). |
| shwflx.[ab] | Radiación de onda corta en W/m ² . |
| radflx.[ab] | Radiación larga hacia el océano en W/m ² . |
| precip.[ab] | Precipitación (m/s). |
| vapmix.[ab] | Tasa de mezcla de vapor en kg/kg. |

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| mslprs.[ab] | Presión en superficie (Pa). |
|--------------------|-----------------------------|

En este tutorial se emplean las salidas del modelo WRF (obtenidas a partir del tutorial para el caso de estudio atmosférico), las cuáles están en formato NetCDF con resolución horaria. Para la elaboración de estos archivos *forcing.force.[ab]* a partir de NetCDF, se pueden utilizar los ejecutables *~ALL/force/src/ap_nc* y *~ALL/force/src/wi_nc*. Sin embargo, para este caso en específico, los scripts auxiliares para llamar a estas rutinas pueden ser muy tediosos de elaborar, ya que requieren bastantes especificaciones sobre los atributos del archivo y la variable de entrada. Por lo anterior, recomendamos la creación de scripts propios en un lenguaje que pueda manejar cómodamente archivos NetCDF.

Para crear los archivos *forcing*, es importante recordar que la Guía de usuario de HYCOM (https://www.hycom.org/attachments/063_hycom_users_guide.pdf) indica que los archivos **.a* deben contener *idm*jdm* valores en formato IEEE de 32 bits, ordenados por fila y en formato *big-endian*. Cada registro debe estar separado por 16Kb de ceros. Por su lado, los archivos **.b* deben contener un encabezado de cinco líneas con información general, incluyendo en la línea cinco la información del tamaño de la malla:

i/jdm = 541 385

Las líneas restantes tienen información del forzante para cada paso de tiempo, adoptando la estructura siguiente:

airtmp: day,span,range = 43381.0000 0.041667 1.144715E+01 3.024958E+01

variable: day,span,range = fecha delta_t val_min val_max

donde *fecha* está dada en días desde el 31 de diciembre de 1900, *delta_t* indica el intervalo de tiempo entre los datos de entrada (en nuestro ejemplo, son cada hora por lo que *delta_t=1/24*), *val_min* es el mínimo de los datos en ese intervalo de tiempo y *val_max* es el máximo.

Con las consideraciones anteriores, a continuación se muestra un ejemplo programado en MATLAB para crear los archivos *forcing.airtmp.[ab]*:

```
% Script para preparar archivos de entrada para HYCOM a partir de datos del modelo WRF que
% han sido guardados en un archivo .mat
close all
clear all
% Hora de inicio usada en el archivo .b
hrsInit = 38960;
% Paso de tiempo de los datos
DeltaHr = 1/24;

variable='airtmp';

%Suponemos que los datos ya estan en una matriz en un archivo mat. Su
%tamaño seria de idm*jdm*tiempo.

arch_datos='ruta_a_datos_en_formato_mat';
load([arch_datos]); %Suponemos que carga una matriz con nombre "datos"
```

```

XYT=size(datos);

dim_X=XYT(1); %idm
dim_Y=XYT(2); %jdm
dim_T=XYT(3);

% Se define las cadenas del encabezado

rutaAB0='ruta_para_archivos_de_salida';

renglon1='Surface air temperature field in degrees C';
renglon2='WRF(INEGI) : T2 [TEMP at 2 M], 1hrly, [°C]';
renglon3='IOA-CCA-UNAM';
renglon4='';
renglon5=['i/jdm = ',dim_X,' ', dim_Y];

%Nombres de los archivos
filenameA=[rutaAB0,'forcing.','variableArch','a'];
filenameB=[rutaAB0,'forcing.','variableArch','b'];

%%% Se crean los archivos .ab
fid = fopen(filenameA, 'w');
fid2= fopen(filenameB, 'w');

%%% Se escribe el encabezado del archivo .b
fprintf(fid2,[renglon1,'\n']);
fprintf(fid2,[renglon2,'\n']);
fprintf(fid2,[renglon3,'\n']);
fprintf(fid2,[renglon4,'\n']);
fprintf(fid2,[renglon5,'\n']);

cadena1 =([' ',variable,': day,span,range = ']);
formatSpec =[cadena1,'%10.4f %8.6f %9.6E %9.6E\n'];

for iDT=1:dim_T
    clear VarHr
    VarHr=squeeze((airtmp(:,iDT)));

    % Llena forcing.a
    % Matlab escribe por columna, por lo que se usa la matriz transpuesta.
    VarHr2=(VarHr');
    VarHr3=reshape(VarHr2,[dim_X*dim_Y,1]);
    VarHr4=single(VarHr3);

    VarHrMax=max(max(VarHr4));
    VarHrMin=min(min(VarHr4));

    % Se cambian los datos a big-endian
    VarHr5=swapbytes(VarHr4);
    fwrite(fid,VarHr5,'*single');

    %Se pone la separacion entre registros
    lastwords=single(zeros(61,1));
    fwrite(fid,lastwords,'*single');

    % Llena forcing.b
    fprintf(fid2,formatSpec,hrsInit,DeltaHr,VarHrMin,VarHrMax);

    hrsInit = hrsInit + DeltaHr;
end

fclose(fid);
fclose(fid2);

```

En este script ejemplo suponemos que los datos ya se encuentran en las unidades que requiere HYCOM (°C, para el caso del ejemplo) y que se encuentran guardados en un archivo .mat (binario de MATLAB) que contiene una matriz llamada *datos* de tamaño *idm*jdm*tiempo*.

Además de los forzantes que se pueden extraer de las salidas del modelo WRF, se requiere información de la atenuación de la radiación fotosintéticamente activa (kPAR). Una climatología mensual (1997-2001) obtenida a partir de la misión satelital SeaWifis está disponible para HYCOM en <ftp://ftp.hycom.org/awall/>. Junto con los archivos de climatología hay un script que permite generar los archivos *.ab] a partir de ella, los cuales necesitan el ejecutable ~/ALL/force/src/kp.

Archivo restart_in.ab] Contiene las condiciones **dinámicas** con las que se comenzará la simulación, es decir, el estado del océano a partir del cual, una vez iniciada la corrida, el modelo evolucionará dinámicamente. Otro de los propósitos principales del uso de este archivo es también evitar que el modelo consuma tiempo para llegar a un estado de **equilibrio estadístico** o “**spin up**”. Debido a que el estudio de caso descrito en este tutorial cubre un periodo de tiempo relativamente corto (orden de semanas), se hace uso de un archivo de restart. Es importante mencionar que este archivo solo suministra las condiciones de velocidad iniciales de la simulación, los archivos de relax (descritos arriba) son los que suministran las condiciones termodinámicas. Comúnmente se utiliza alguna salida de un experimento previo que cubre el periodo de interés y que corresponda a la fecha de inicio de la simulación actual. Para generar este archivo se puede utilizar la subrutina *archv2restart.f* que se encuentra bajo el directorio de ~/ALL/archive/src. La información que se requiere es el tipo de fecha con la que se está corriendo la simulación '**yrflag**', las dimensiones de la malla '**idm**' y '**jdm**', el número de capas verticales '**kdm**', la densidad de referencia '**thbase**', y el paso de tiempo '**baclin**', así como haber creado ya los archivos regional.grid.ab] y regional.depth.ab]. Se puede utilizar un script como **arch2res.com**:

```
#!/bin/csh
#
set echo
#
# --- Form a HYCOM restart file from a HYCOM archive file.
# --- Defined in the same grid
#
touch regional.depth.a regional.depth.b
if (-z regional.depth.a) then
  /bin/rm regional.depth.a
  /bin/ln -s ruta_al_archivo_de_batimetria/regional.depth.a regional.depth.a
endif
if (-z regional.depth.b) then
  /bin/rm regional.depth.b
  /bin/ln -s ruta_al_archivo_de_batimetria/regional.depth.b regional.depth.b
endif
#
touch regional.grid.a regional.grid.b
if (-z regional.grid.a) then
  /bin/rm regional.grid.a
  /bin/ln -s ruta_al_archivo_de_malla/regional.grid.a regional.grid.a
```

```

endif
if (-z regional.grid.b) then
  /bin/rm regional.grid.b
  /bin/ln -s ruta_al_archivo_de_malla/regional.grid.b regional.grid.b
endif
#
# --- data directory
#
setenv D ruta_para_archivos_de_salida/SCRATCH
setenv R SCRATCH
#
# --- input archive file
# --- input restart file
# --- output restart file
#
ruta_a_hycom_all/ALL/archive/src/archv2restart <<E-o-D
${D}/102_archv.2004_305_00.a (nombre archivo de entrada)
${R}/restart_093.a (nombre archivo de salida)
${R}/restart_092.a
101 'iexpt' = experiment number x10 (000=from archive file)
3 'yrflag' = days in year flag (0=360J16,1=366J16,2=366J01,3-actual)
271 'idm' = longitudinal array size
193 'jdm' = latitudinal array size
0 'kapref' = thermobaric reference state (-1 to 3, optional, default 0)
20 'kdm' = number of layers
25.0 'thbase' = reference density (sigma units)
240.0 'baclin' = baroclinic time step (seconds), int. divisor of 86400
E-o-D

```

Archivo ports.input Contiene las ubicaciones a las cuales se aplican las condiciones de frontera Browning & Kreiss al flujo barotrópico. La mejor forma de crear este archivo es modificando uno muestra ya existente como el que se encuentra disponible en el directorio ATLb2.0. El archivo se compone de un parámetro global '**nports**', que indica el número de “puertos” o fronteras abiertas que hay en el dominio. Después, por cada uno de los puertos se definen 5 parámetros: '**kdport**', define la frontera en la que se ubica el puerto (N, S, E y O); '**ifport**', indica el índice en la dirección x del primer punto de malla que contiene la frontera abierta; '**ilport**', indica el índice en la dirección x del último punto de malla que contiene la frontera abierta (=ifport para puertos ubicados en este/oeste); '**jfport**', indica el índice en la dirección y del primer punto de malla que contiene la frontera abierta; '**jlport**', indica el índice en la dirección del último punto de malla que contiene la frontera abierta (=jfport para puertos ubicados en norte/sur). En el caso de una configuración para el GdM, el archivo tiene la siguiente estructura:

```

5      'nports' = number of boundary port sections
2      'kdport' = port orientation (1=N, 2=S, 3=E, 4=W)
253    'ifport' = first i-index
501    'ilport' = last i-index (=ifport for east/west port)
1      'jfport' = first j-index
1      'jlport' = last j-index (=jfport for north/south port)
3      'kdport' = port orientation (1=N, 2=S, 3=E, 4=W)
541    'ifport' = first i-index
541    'ilport' = last i-index (=ifport for east/west port)
7      'jfport' = first j-index
51     'jlport' = last j-index (=jfport for north/south port)

```



```

3      'kdport' = port orientation (1=N, 2=S, 3=E, 4=W)
541    'ifport' = first i-index
541    'ilport' = last i-index (=ifport for east/west port)
89     'jfport' = first j-index
113    'jlport' = last j-index (=jfport for north/south port)
3      'kdport' = port orientation (1=N, 2=S, 3=E, 4=W)
541    'ifport' = first i-index
541    'ilport' = last i-index (=ifport for east/west port)
206    'jfport' = first j-index
384    'jlport' = last j-index (=jfport for north/south port)
1      'kdport' = port orientation (1=N, 2=S, 3=E, 4=W)
437    'ifport' = first i-index
540    'ilport' = last i-index (=ifport for east/west port)
385    'jfport' = first j-index
385    'jlport' = last j-index (=jfport for north/south port)

```

Sin embargo, ya que es un archivo cuya configuración es muy sensible, tratando de identificar de manera muy cuidadosa las fronteras abiertas, es recomendable utilizar la subrutina **topo_ports.f** que se encuentra bajo el directorio de `~ALL/topo/src`, para verificar que las fronteras estén definidas correctamente y así tener una corrida exitosa. La generación de esta subrutina se hace mediante un script como **ATLb2.0/topo/ports_map.csh**:

```

#
set echo
#
# --- Map Open Boundaries
#
source EXPT.src
#
/bin/rm -f ports.input
ln -s 'ruta_a_archivos_de_puertos'/ports.input .
#
setenv FOR051A fort.51A
/bin/rm -f fort.51 fort.51A
ln -s ruta_al_archivo_de_batimetria/regional.depth.b fort.51
ln -s ruta_al_archivo_de_batimetria/regional.depth.a fort.51A
#
if (! -e regional.grid.a) then
  /bin/ln -s ruta_al_archivo_de_malla/regional.grid.a .
  /bin/ln -s ruta_al_archivo_de_malla/regional.grid.b .
endif
#
ruta_a_hycom_all/ALL/topo/src/topo_ports
#
/bin/rm -f fort.51 fort.51A
/bin/rm -f regional.grid.a regional.grid.b

```

Archivo patch.input Contiene la distribución espacial, en el dominio, a la cual se asignan los procesadores, por lo que es necesario tener definido el número de procesadores que se utilizarán en la simulación antes de crear este archivo. Para generarlo se puede utilizar la subrutina **partit.f** que se encuentra bajo el directorio de `~ALL/topo/src`. La información que se requiere es el número de columnas y filas en el cual se dividirá el dominio así como haber creado

ya los archivos `regional.grid.[ab]` y `regional.depth.[ab]`. Para una partición asociada a una corrida utilizando 32 procesadores, se puede utilizar un script como **ATLb2.0/topo/depth_GOMI0.04_2d.com**:

```
#!/bin/csh
set echo
#
# --- generate 2-d equal ocean processor partitions
#
cd ruta_del_directorio_de_trabajo
#
ln -s ruta_al_archivo_de_batimetria/regional.grid.a regional.grid.a
ln -s ruta_al_archivo_de_batimetria/regional.grid.b regional.grid.b

setenv T 71
#
setenv FOR051 ruta_al_archivo_de_malla/regional.depth.b
setenv FOR051A ruta_al_archivo_de_malla/regional.depth.a
#
# --- 032:
#
setenv n 8
setenv m 4
setenv nm `echo $n $m | awk '{printf("%3.3d\n",$1*$2)}'`
echo "$n $m 0.75" | ruta_a_hycom_all/ALL/topo/src/partit
mv fort.21 depth_GOMI0.04_${T}d.$nm
```

En este ejemplo, la subrutina lee un archivo de batimetría de HYCOM estándar y escribe en el archivo ***depth_GOMI0.04_\${T}d.\$nm*** la distribución espacial para un número de **npe** = 8 y **mpe** = 4 y cuya extensión es **\$nm**: 32. Este archivo a su vez, es llamado por el script que ejecuta la corrida y cambia su nombre a ***patch.input***. Es recomendable utilizar un número de procesadores igual a un factor de 2^n ($n = 1, 2, 3$, etc.) de no ser así, el archivo creado podrá contener sub-dominios a los que no se les asigne un procesador. La figura 1 muestra la distribución en la que se dividió el dominio original en sub-dominios. Es importante notar que el tamaño de cada sub-dominio dependerá del número de puntos de agua y tierra, por lo que la distribución no será uniforme como se observa en la figura. Para obtener una distribución de sub-dominios de tamaño uniforme, los valores en **npe** y **mpe** deben asignarse con un signo negativo, aunque dicha opción no es recomendable.

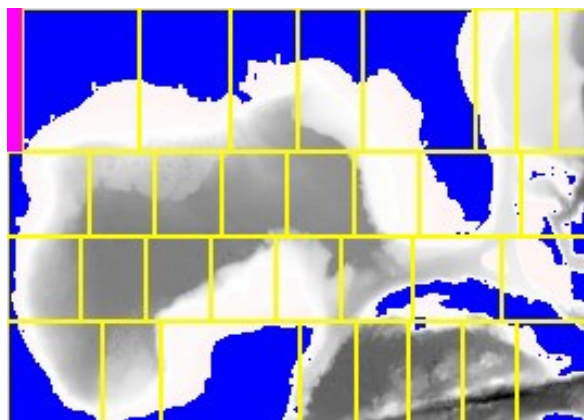


Figura 1 Partición del dominio del modelo en sub-dominios a los que se les asigna un procesador.

Archivos nest Contienen las condiciones de frontera que se utilizarán en la simulación. La generación de estos archivos depende principalmente del experimento cuyas salidas (resultados) se deseen obtener para las condiciones de frontera. En el caso de un estudio de caso real (como en el que se enfoca el presente tutorial), una práctica común es utilizar condiciones de frontera provenientes de un experimento de *reanálisis*, es decir, un experimento que tome en cuenta toda la información en tiempo real como sea posible mediante la asimilación de datos observacionales. También es deseable que el dominio del reanálisis cubra una extensión espacial más grande y que contenga el GdM, como por ejemplo un experimento del océano Atlántico Norte o uno global, los cuales normalmente tienen una resolución espacial menor.

Una vez que se tenga identificado el reanálisis, es necesario interpolar las salidas en la malla del modelo global a la del modelo regional (GoM), esto se puede hacer utilizando la subrutina *isubregion.f* que se encuentra bajo el directorio de `~ALL/subregion/src`. La información que se requiere es: el tamaño de la malla '*idm*' y '*jdm*', los índices de la ubicación de referencia '*irefi*' y '*jrefi*' que indican la posición en la malla del dominio de entrada (global) que corresponden a '*irefo*' = 1 y '*jrefo*' = 1 del dominio de salida (regional), el factor de escala entre el archivo de salida y el de entrada como entero '*ijgrd*', y definir si se desea que las interfaces de capa sean suavizadas mediante el parámetro '*smooth*', así como haber creado ya los archivos regional.grid.[ab] y regional.depth.[ab]. Para la conversión de un archivo de entrada a uno de salida se puede utilizar un script como **ATLb2.0/nest/script/subregion_glb2gom.com**:

```
#!/bin/csh
#
set echo
set time=1
#
# --- form interpolated subregion archive files, GLB0.08 to GOMI0.04.
#
# --- script includes logic to reduce the number of layers,
# --- but it is inactivated here by setting L to "".
```

```
#
# --- ALL/bin/hycom_ij2lonlat can be used to find co-located points
# --- on the two grids. Since subregion p(1,1) must be on the
# --- original grid, this is usually the point to reference.
# --- USE: hycom_ij2lonlat 1 1 regional.grid.a
#
setenv D ruta_del_directorio_de_entrada
setenv DT ruta_del_directorio_de_entrada_de_malla
setenv R ruta_del_directorio_de_salida
setenv RT ruta_del_directorio_de_salida_de_malla
setenv E 101
setenv Y 100
#setenv A hi
#
# --- single model segment, potentially across two calendar years.
# --- configured for 30-day surface and 30-day 3-d archives.
#
setenv YRFLAG 0
setenv BNSTFQ 1.0
setenv NESTFQ 1.0

#foreach A ( a ab b bc c cd d de e ef f fg g gh h hi i ij j k kl l la )
foreach A ( la )

## Original Grid
touch regional.grid.a
/bin/rm regional.grid.[ab]
/bin/ln -s ${DT}/regional.grid.a regional.grid.a
/bin/ln -s ${DT}/regional.grid.b regional.grid.b
#

## Results files, nombre archivo de salida
touch ${R}/archv.100-103_${A}.b
/bin/rm ${R}/archv.100-103_${A}.[ab]

ruta_a_hycom_all/ALL/subregion/src/isubregion <<E-o-D
${D}/537_archm.2011_352_12.b (nombre archivo de entrada)
${DT}/depth_GLBb0.08_11.b (nombre archivo de batimetria de entrada)
${R}/archv.100-103_${A}_L26.b (nombre archivo de salida)
${RT}/regional.depth.b (nombre archivo de batimetria de salida)
GLBb0.08 interpolated to GOM10.04
541 'idm ' = longitudinal array size
385 'jdm ' = latitudinal array size
2349 'irefi ' = longitudinal input reference location
1735 'jrefi ' = latitudinal input reference location
1 'irefo ' = longitudinal output reference location
1 'jrefo ' = latitudinal output reference location
2 'ijgrd ' = integer scale factor between input and output grids
1 'iceflg' = ice in output archive flag (0=none,1=energy loan model)
1 'smooth' = smooth interface depths (0=F,1=T)
E-o-D

#touch ${R}/archv.100-103_${A}_L26.b

end
```

Archivo limits Archivo que contiene los límites temporales de la simulación en días referidos al 31 de diciembre de 1900. El primer número corresponde al día de inicio y el segundo al día final del experimento. Un signo negativo en el día inicial corresponde a una corrida sin archivo restart, sin signo corresponde a un experimento usando un archivo de restart.

2.3. Ejecución del modelo

Una vez que se tienen todos los archivos necesarios en una carpeta de trabajo, se copia en ella el archivo ejecutable y se lanza con:

```
mpirun -np 24 --mca mpi_cuda_support 0 hycom > archivo_hycom.log
```

para una compilación con PGI. La bandera *-np* indica el número de procesadores a usar, el cual debe coincidir con el que se determinó al compilar el ejecutable. Para una compilación con Intel, se lanza con:

```
mpiexec -np 24 ./hycom > archivo_hycom.log
```

3. Resultados.

3.1. Conversión de salidas a NetCDF

Las salidas del modelo están en el formato binario **.[ab]*, pero HYCOM-ALL también cuenta con rutinas que permiten la conversión a formato NetCDF, las cuales se encuentran en *~/ALL/archive/src*. Hay dos ejecutables que se necesitan: **archv2ncdf2d**, que genera archivos únicamente con la información de campos superficiales (como SST o SSH), así como de la capa de mezcla; y **archv2ncdf3z** que genera los archivos con la información para las tres dimensiones del dominio. Cuando se llama a este último ejecutable, se describen las profundidades (en metros) a las que se quieren las salidas, de modo que la información de las capas híbridas contenida en los archivos **.a* es procesada por **archv2ncdf3z** para ser llevada a coordenadas *z*.

En la página de HYCOM hay una sección de documentación generada por usuarios. Allí se encuentran disponibles varios ejemplos de scripts para tratar los archivos **.[ab]* hechos por Alexandra Bozec. Entre estos ejemplos se encuentran dos para llamar a los ejecutables que convierten las salidas a formato NetCDF. Para llamar a **archv2ncdf2d** se puede utilizar el script **ncdf2d.com**:

```
#!/bin/csh
#
setenv CDF_TITLE "UNAM-CCA-HYCOM"
setenv CDF_INST "UNAM-CCA Grupo IOA"
#
set BIN=ruta_a_hycom_all/ALL/archive/src
set dir=ruta_a_archivos_ab_y_regional
cd $dir
pwd
foreach f(`ls -lF archv*.a`)
set y = `echo $f | cut -c 7-17`
echo $y
```

```

setenv CDF051 archv.${y}_2d.nc
echo $CDF051
/bin/rm $CDF051
$BIN/archv2ncdf2d <<E-o-D
archv.${y}.a
netCDF
10      'iexpt' = experiment number x10 (000=from archive file)
3       'yrflag' = days in year flag (0=360J16,1=366J16,2=366J01,3-actual)
541     'idm'  = longitudinal array size
385     'jdm'  = latitudinal array size
27      'kdm'  = number of layers
25.0    'thbase' = reference density (sigma units)
0       'smooth' = smooth fields before plotting (0=F,1=T)
1       'mthin' = mask thin layers from plots (0=F,1=T)
1       'iorign' = i-origin of plotted subregion
1       'jorign' = j-origin of plotted subregion
0       'idmp'  = i-extent of plotted subregion (<=idm; 0 implies idm)
0       'jdmp'  = j-extent of plotted subregion (<=jdm; 0 implies jdm)
0       'botio' = bathymetry I/O unit (0 no I/O)
0       'flxio' = surf. heat flux I/O unit (0 no I/O)
0       'empio' = surf. evap-pcip I/O unit (0 no I/O)
0       'ttrio' = surf. temp trend I/O unit (0 no I/O)
0       'strio' = surf. saln trend I/O unit (0 no I/O)
0       'icvio' = ice coverage I/O unit (0 no I/O)
0       'ithio' = ice thickness I/O unit (0 no I/O)
0       'ictio' = ice temperature I/O unit (0 no I/O)
51      'sshio' = sea surf. height I/O unit (0 no I/O)
0       'bsfio' = baro. strmf. I/O unit (0 no I/O)
51      'uvmio' = mix. lay. u-vel. I/O unit (0 no I/O)
51      'vvmio' = mix. lay. v-vel. I/O unit (0 no I/O)
0       'spmio' = mix. lay. speed I/O unit (0 no I/O)
0       'bltio' = bnd. lay. thick. I/O unit (0 no I/O)
51      'mltio' = mix. lay. thick. I/O unit (0 no I/O)
51      'sstio' = mix. lay. temp. I/O unit (0 no I/O)
51      'ssio'  = mix. lay. saln. I/O unit (0 no I/O)
51      'ssdio' = mix. lay. dens. I/O unit (0 no I/O)
0       'kf'    = first output layer (=0 end output; <0 label with layer #)
87      'kl'    = last output layer
0       'uvlio' = layer k u-vel. I/O unit (0 no I/O)
0       'vvlio' = layer k v-vel. I/O unit (0 no I/O)
0       'splio' = layer k speed. I/O unit (0 no I/O)
0       'infio' = layer k i.dep. I/O unit (0 no I/O)
0       'thkio' = layer k thick. I/O unit (0 no I/O)
0       'temio' = layer k temp I/O unit (0 no I/O)
0       'salio' = layer k saln. I/O unit (0 no I/O)
0       'tthio' = layer k dens. I/O unit (0 no I/O)
0       'sfnio' = layer k strmf. I/O unit (0 no I/O)
0       'kf'    = first output layer (=0 end output; <0 label with layer #)
E-o-D
end

```

Este script itera sobre las salidas en formato *.a, para pasarlos como argumento al ejecutable. Pero además requiere una lista que indique las variables que se desean guardar, así como las unidades en las que se guardarán (primera columna). Es importante notar que la variable CDF051 contiene el nombre del archivo NetCDF que se va a generar, pero sus últimos dos dígitos también sirven como identificador de la unidad en la que el ejecutable va a escribir la información que genere. Por lo que (en este ejemplo) el número junto a las variables que se desean guardar en este archivo debe ser el 51. Poner a la unidad el valor de 0 indica que esa variable no se desea guardar. Si se desea guardar las variables en archivos distintos, se tienen que declarar más variables CDF0XX, donde el

XX corresponde el número de unidad. Este script es una versión modificada del original de Alexandra Bozec, disponible en https://github.com/abozec/hycom_example_scripts/blob/master/archive/, en el cual se puede revisar la separación de salidas en varios NetCDF.

Para llamar al ejecutable **archv2ncdf3z**, se puede utilizar el script **ncdf3z.com** de Alexandra Bozec. Aquí se presenta una versión modificada:

```
#!/bin/csh
#
setenv CDF_TITLE "UNAM-CCA-HYCOM"
setenv CDF_INST "UNAM-CCA Grupo IOA"
#
set BIN=ruta_a_hycom_all/ALL/archive/src
set dir=ruta_a_archivos_ab_y_regional
cd $dir
pwd
foreach f(`ls -lF archv*.a`)
set y=`echo $f| cut -c 7-17`
echo $y
setenv CDF052 archv.${y}_3z.nc
/bin/rm $CDF052
$BIN/archv2ncdf3z <<E-o-D
archv.${y}.a
netCDF
10      'iexpt' = experiment number x10 (000=from archive file)
3       'yrflag' = days in year flag (0=360J16,1=366J16,2=366J01,3-actual)
541     'idm'  = longitudinal array size
385     'jdm'  = latitudinal array size
27      'kdm'  = number of layers
25.0    'thbase' = reference density (sigma units)
0       'smooth' = smooth the layered fields (0=F,1=T)
1       'iorign' = i-origin of plotted subregion
1       'jorign' = j-origin of plotted subregion
0       'idmp'  = i-extent of plotted subregion (<=idm; 0 implies idm)
0       'jdmp'  = j-extent of plotted subregion (<=jdm; 0 implies jdm)
1       'itype' = interpolation type (0=sample,1=linear)
10      'kz'    = number of depths to sample
0.0 'z'  = sample depth 1
10.0 'z' = sample depth 2
20.0 'z' = sample depth 3
30.0 'z' = sample depth 4
40.0 'z' = sample depth 5
50.0 'z' = sample depth 6
60.0 'z' = sample depth 7
70.0 'z' = sample depth 8
75.0 'z' = sample depth 9
80.0 'z' = sample depth 10

52      'botio' = bathymetry I/O unit (0 no I/O)
0       'mltio' = mix.l.thk. I/O unit (0 no I/O)
0       'tempml' = temperature jump across mixed-layer (degC, 0 no I/O)
0       'densml' = density jump across mixed-layer (kg/m3, 0 no I/O)
0       'infio' = intf. depth I/O unit (0 no I/O, <0 label with layer #)
0       'wvlio' = w-velocity I/O unit (0 no I/O)
52      'uvlio' = u-velocity I/O unit (0 no I/O)
52      'vvlio' = v-velocity I/O unit (0 no I/O)
0       'splio' = speed I/O unit (0 no I/O)
52      'temio' = temperature I/O unit (0 no I/O)
52      'salio' = salinity I/O unit (0 no I/O)
52      'thio' = density I/O unit (0 no I/O)
```

```
E-o-D
end
```

Se puede observar que la estructura es muy similar a la del script anterior. Las primeras líneas del archivo de entrada que se le da al ejecutable son una descripción del dominio y de la interpolación que se quiere hacer. Después viene la variable kz que indica el número de profundidades para las que se quiere generar el NetCDF y justo después se indican dichas profundidades (en metros). En este ejemplo, tenemos $kz=10$, por lo que los archivos .nc de salida contendrán las 10 profundidades (entre 0 y 80 m) que se enumeran como *sample depth*. El valor de kz se puede cambiar según las necesidades, siendo la única condición, que posteriormente se especifiquen las kz profundidades requeridas. Cuando se terminan de enlistar las profundidades, entonces empieza la lista de variables a guardar y se indica el número de unidad, tal como en el script anterior.

Cabe resaltar que la conversión a formato NetCDF requiere la presencia de los archivos **regional.grid.[ab]** y **regional.depth.[ab]** en el mismo directorio en el que están las salidas *. [ab].

3.2. Análisis de datos

Para analizar el caso de estudio del FF4, se usaron las salidas de los modelos WRF y HYCOM. En el caso del modelo WRF únicamente se usaron las salidas de viento para observar el frente frío. En el caso de HYCOM se usaron datos del nivel del mar, velocidad superficial de la corriente, se calculó la profundidad de la capa de mezcla, se calcularon y graficaron ondas inerciales resultado del FF4, y finalmente se calculó también el contenido de calor en el océano.

WRF

Las salidas del modelo WRF se usaron para graficar las variables atmosféricas, en el caso del FF4 únicamente se usaron los datos de viento. A continuación se muestra un ejemplo de las características y variables de los archivos NETCDF de las salidas del modelo WRF.

```
Source:
    /DATOS3/Reanalysis/INEGI/a2007/wrfout_c1h_d01_2007-10-22_00:00:00.2007
Format:
    64bit
Global Attributes:
    TITLE = ' OUTPUT FROM WRF V3.8.1 MODEL'
Dimensions:
    Time = 24 (UNLIMITED)
    DateStrLen = 19
    west_east = 617
    south_north = 348
    bottom_top = 29
```



```

soil_layers_stag = 4
Variables:
Times
Size:      19x24
Dimensions: DateStrLen,Time
Datatype:  char
Q2
Size:      617x348x24
Dimensions: west_east,south_north,Time
Datatype:  single
Attributes:
    FieldType = 104
    MemoryOrder = 'XY '
    description = 'QV at 2 M'
    units = 'kg kg-1'
    stagger = "
    coordinates = 'XLONG XLAT XTIME'

T2
Size:      617x348x24
Dimensions: west_east,south_north,Time
Datatype:  single
Attributes:
    FieldType = 104
    MemoryOrder = 'XY '
    description = 'TEMP at 2 M'
    units = 'K'
    stagger = "
    coordinates = 'XLONG XLAT XTIME'

PSFC
Size:      617x348x24
Dimensions: west_east,south_north,Time
Datatype:  single
Attributes:
    FieldType = 104
    MemoryOrder = 'XY '
    description = 'SFC PRESSURE'
    units = 'Pa'
    stagger = "
    coordinates = 'XLONG XLAT XTIME'

U10
Size:      617x348x24
Dimensions: west_east,south_north,Time
Datatype:  single
Attributes:
    FieldType = 104
    MemoryOrder = 'XY '
    description = 'U at 10 M'
    units = 'm s-1'
    stagger = "
    coordinates = 'XLONG XLAT XTIME'

V10
Size:      617x348x24
Dimensions: west_east,south_north,Time
Datatype:  single
Attributes:
    FieldType = 104
    MemoryOrder = 'XY '
    description = 'V at 10 M'
    units = 'm s-1'
    stagger = "
    coordinates = 'XLONG XLAT XTIME'

XTIME
Size:      24x1
Dimensions: Time
Datatype:  single

```

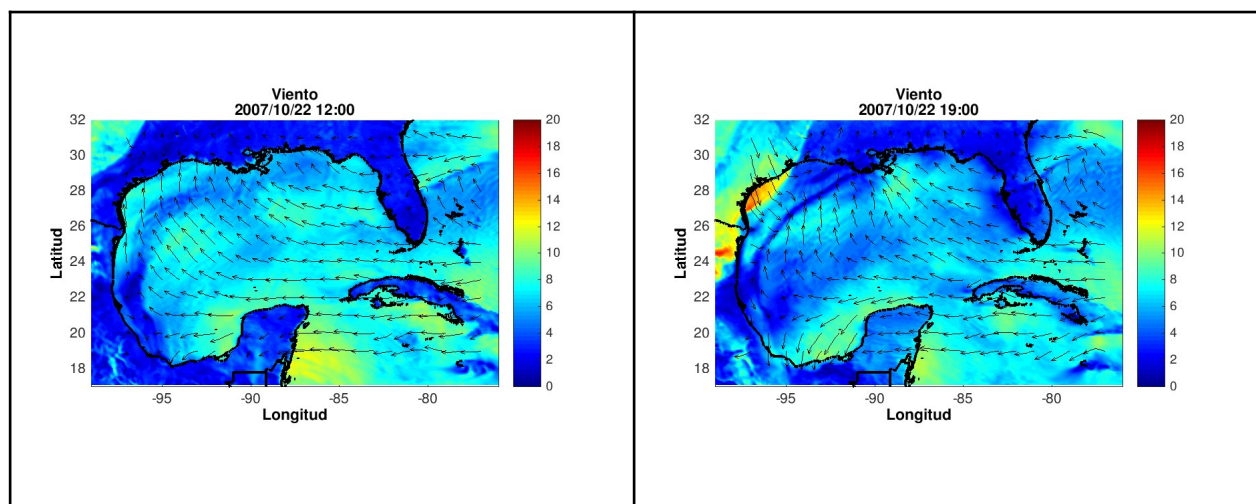
Attributes:

FieldType = 104
MemoryOrder = '0 '
description = 'minutes since 0000-01-01 00:00:00'
units = 'minutes since 0000-01-01 00:00:00'
stagger = ''

Viento

Para visualizar el frente frío se graficó el campo viento cada hora desde el 22 de octubre a las 00:00 horas. En estos mapas se puede ver la magnitud del viento en color y los vectores de viento indican la dirección.

El viento asociado a la alta presión atravesó prácticamente todo el GoM. La velocidad varía entre 15 y 20 m/s con dirección predominante del norte y nor-noroeste principalmente, la rapidez máxima ocurrió el día 23 de octubre entre las 10Z a las 12Z horas con valores de 27.5 m/s (99 km/h) en una zona del GoM localizada al norte de la región comprendida entre Coatzacoalcos, Veracruz y los pantanos de Centla, Tabasco (Figura 2).



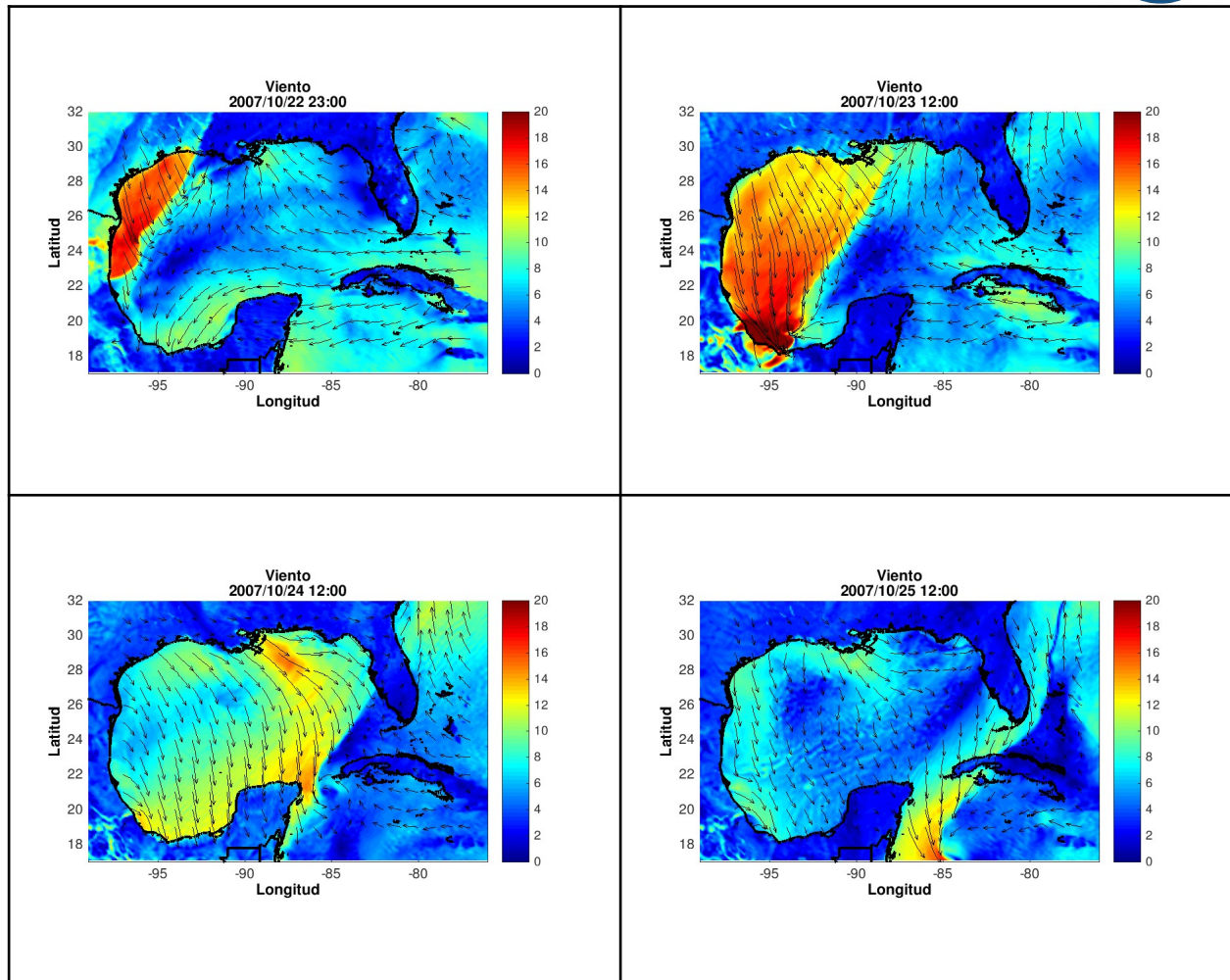


Figura 2. Rapidez del viento en el GoM durante el paso del frente frío #4 de la temporada 2007. Datos a partir de una simulación numérica con el modelo WRF.

HYCOM

Las salidas del modelo HYCOM tienen dos tipos de archivos, 2d y 3z, en los archivos con nombre 2d se encuentran las variables de 2 dimensiones, a continuación se muestra un ejemplo de las variables y características de un archivo de 2 dimensiones. Para el caso de estudio del frente frío se usa la fecha (MT), Latitud (Latitude), Longitud (Longitude), y elevación del nivel del mar (ssh).

```
Source:
    /home/alín/HYCOM/ff4_2007/2d/archv.2007_304_23_2d.nc
Format:
    classic
Global Attributes:
    Conventions = 'CF-1.0'
    title       = 'UNAM-HYCOM expt 0.1'
    institution = 'UNAM FrenteFrio 4 del 2007'
    source      = 'HYCOM archive file'
    experiment  = '01.0'
```

```

history = 'archv2ncdf2d'
Dimensions:
  MT = 1 (UNLIMITED)
  Latitude = 385
  Longitude = 541
Variables:
  MT
    Size: 1x1
    Dimensions: MT
    Datatype: double
    Attributes:
      long_name = 'time'
      units = 'days since 1900-12-31 00:00:00'
      calendar = 'gregorian'
      axis = 'T'
  Date
    Size: 1x1
    Dimensions: MT
    Datatype: double
    Attributes:
      long_name = 'date'
      units = 'day as %Y%m%d.%f'
      C_format = '%13.4f'
      FORTRAN_format = '(f13.4)'
  Latitude
    Size: 385x1
    Dimensions: Latitude
    Datatype: single
    Attributes:
      standard_name = 'latitude'
      units = 'degrees_north'
      axis = 'Y'
  Longitude
    Size: 541x1
    Dimensions: Longitude
    Datatype: single
    Attributes:
      standard_name = 'longitude'
      units = 'degrees_east'
      point_spacing = 'even'
      axis = 'X'
  qtot
    Size: 541x385x1
    Dimensions: Longitude, Latitude, MT
    Datatype: single
    Attributes:
      coordinates = 'Date'
      standard_name = 'surface_downward_heat_flux_in_air'
      units = 'w/m2'
      _FillValue = 1.267650600228229e+30
      valid_range = [-392.8365 849.6139]
      long_name = 'surf. heat flux [01.0H]'
  ssh
    Size: 541x385x1
    Dimensions: Longitude, Latitude, MT
    Datatype: single
    Attributes:
      coordinates = 'Date'
      standard_name = 'sea_surface_elevation'
      units = 'm'
      _FillValue = 1.267650600228229e+30
      valid_range = [-0.57781 1.2419]
      long_name = 'sea surf. height [01.0H]'

```

En los archivos de salida de HYCOM con terminación 3z se encuentran las variables en 3 dimensiones, es decir, que también muestran variabilidad con la profundidad. Se muestra un ejemplo de las variables y características de un archivo de 3z. Para el caso de estudio del frente frío se usa la fecha (MT), Latitud(Latitude), Longitud (Longitude), densidad potencial (pot_dens), componente u de la velocidad (u), componente v de la velocidad (v) y profundidad (depth) .

```

Source:
/home/alin/HYCOM/ff4_2007/3z/archv.2007_244_01_3z.nc

Format:
classic

Global Attributes:
Conventions = 'CF-1.0'
title       = 'UNAM-HYCOM expt 0.1'
institution = 'UNAM FrenteFrio 4 del 2007'
source      = 'HYCOM archive file'
experiment  = '01.0'
history     = 'archv2ncdf3z'

Dimensions:
MT          = 1          (UNLIMITED)
Latitude    = 385
Longitude   = 541
Depth       = 28

Variables:

MT
Size:      1x1
Dimensions: MT
Datatype:  double
Attributes:
    long_name = 'time'
    units     = 'days since 1900-12-31 00:00:00'
    calendar  = 'gregorian'
    axis      = 'T'

Date
Size:      1x1
Dimensions: MT
Datatype:  double
Attributes:
    long_name      = 'date'
    units          = 'day as %Y%m%d.%f'
    C_format       = '%13.4f'
    FORTRAN_format = '(f13.4)'

Depth
Size:      28x1
Dimensions: Depth
Datatype:  single
Attributes:
    standard_name = 'depth'
    units         = 'm'
    positive      = 'down'
    axis          = 'Z'

Latitude
Size:      385x1
Dimensions: Latitude
Datatype:  single
Attributes:
    standard_name = 'latitude'
    units         = 'degrees_north'

```

```

axis      = 'Y'

Longitude
Size:      541x1
Dimensions: Longitude
Datatype:  single
Attributes:
    standard_name = 'longitude'
    units         = 'degrees_east'
    point_spacing = 'even'
    axis          = 'X'

u
Size:      541x385x28x1
Dimensions: Longitude, Latitude, Depth, MT
Datatype:  single
Attributes:
    coordinates = 'Date'
    standard_name = 'eastward_sea_water_velocity'
    units        = 'm/s'
    _FillValue = 1.267650600228229e+30
    valid_range = [-1.3722      2.0853]
    long_name   = ' u-veloc. [01.0H]'

v
Size:      541x385x28x1
Dimensions: Longitude, Latitude, Depth, MT
Datatype:  single
Attributes:
    coordinates = 'Date'
    standard_name = 'northward_sea_water_velocity'
    units        = 'm/s'
    _FillValue = 1.267650600228229e+30
    valid_range = [-1.4755      2.3364]
    long_name   = ' v-veloc. [01.0H]'

pot_temp
Size:      541x385x28x1
Dimensions: Longitude, Latitude, Depth, MT
Datatype:  single
Attributes:
    coordinates = 'Date'
    standard_name = 'sea_water_potential_temperature'
    units        = 'degC'
    _FillValue = 1.267650600228229e+30
    valid_range = [5.42619      34.3352]
    long_name   = ' potT [01.0H]'

salinity
Size:      541x385x28x1
Dimensions: Longitude, Latitude, Depth, MT
Datatype:  single
Attributes:
    coordinates = 'Date'
    standard_name = 'sea_water_salinity'
    units        = 'psu'
    _FillValue = 1.267650600228229e+30
    valid_range = [0.878399      38.1022]
    long_name   = ' salinity [01.0H]'

pot_density
Size:      541x385x28x1
Dimensions: Longitude, Latitude, Depth, MT
Datatype:  single
Attributes:
    coordinates = 'Date'
    standard_name = 'sea_water_potential_density'
    units        = 'sigma'
    _FillValue = 1.267650600228229e+30
    valid_range = [-4.92457      28.4708]
    long_name   = ' p.dens [01.0H]'

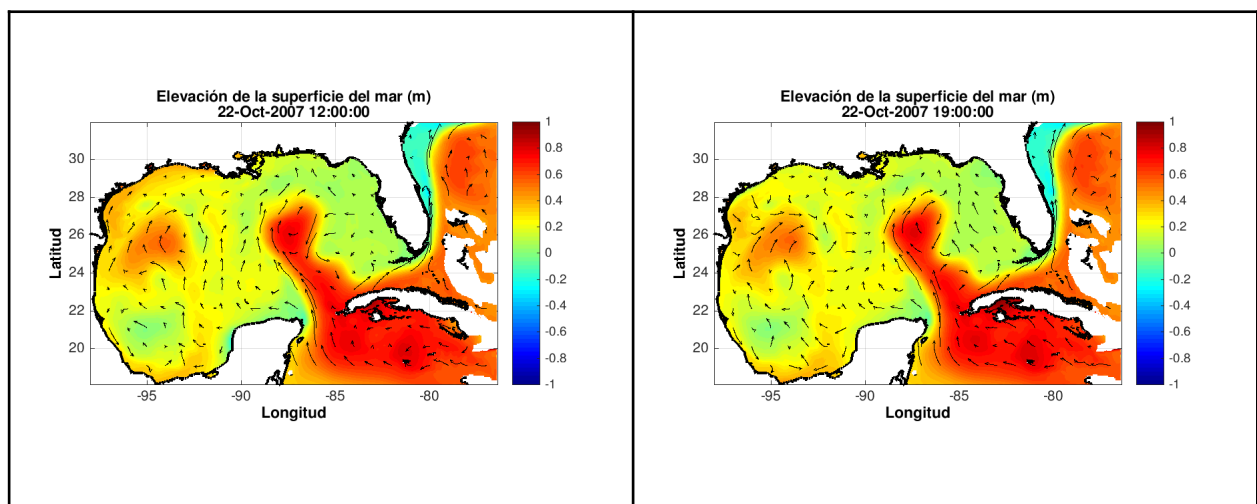
```

Nivel del mar y velocidad superficial

El nivel del mar (SNM o SSH por sus siglas en inglés Sea-surface height) en la región costera es la primera en responder, se destaca la formación de una anomalía negativa sobre la región norte del GoM.

El paso del frente frío a través del GoM intensifica las corrientes desde la superficie hasta las primeras capas en profundidad, tanto en regiones de aguas someras como en regiones de aguas profundas, afectando especialmente la circulación sobre la plataforma continental, la Bahía de Campeche, a los eddies (remolinos ciclónicos y anticiclónicos) y en menor escala a la Corriente del Lazo.

Para hacer estas gráficas primero se hizo el cálculo de la rapidez de la corriente superficial, se grafica el nivel del mar en color y se sobrepone la rapidez de la corriente con vectores. Igual que en el caso del viento se hacen gráficas horarias para analizar todo el proceso del frente frío (Figura 3).



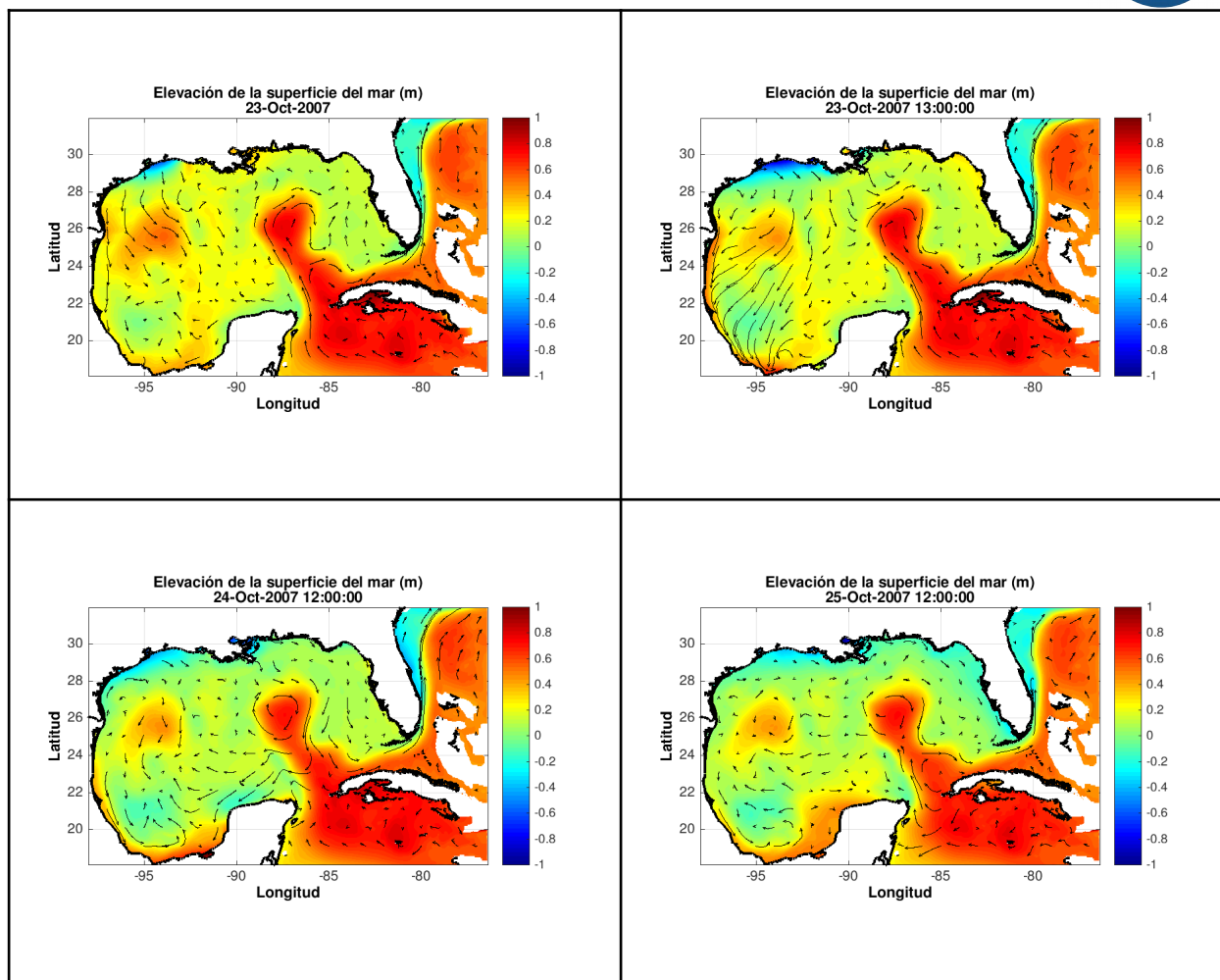


Figura 3. Altura de la superficial del mar en el GoM durante el paso del frente frío #4 de la temporada 2007, datos a partir de una simulación numérica con el modelo HYCOM. Imágenes del 22 de octubre a las 12:00, 22 de octubre a las 19:00, 23 de octubre a las 00:00, 23 de octubre a las 12:00, 24 de octubre a las 12:00 y 25 de octubre a las 12:00, horas en GMT.

Profundidad de la capa de mezcla

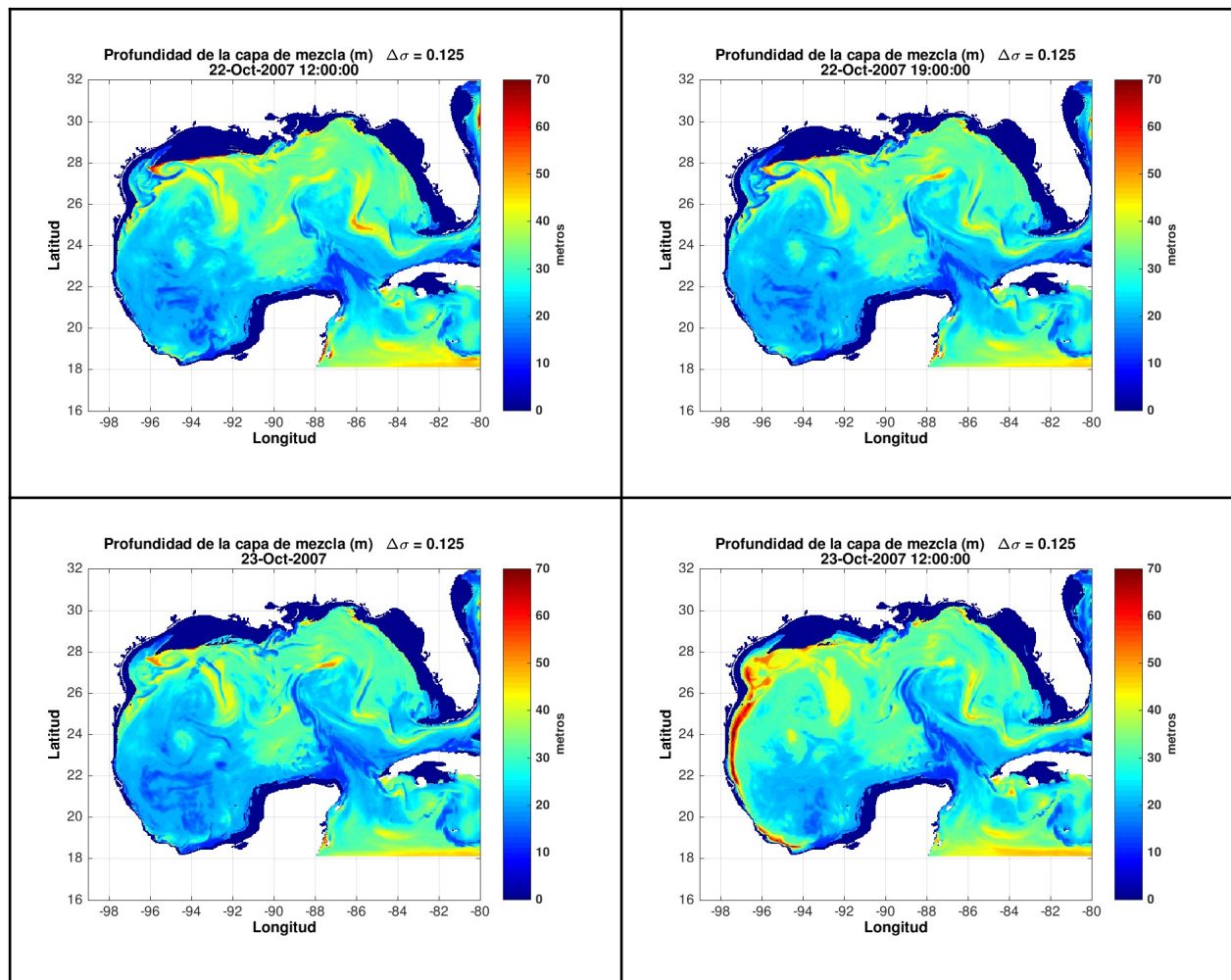
La capa de mezcla (mixed layer, ML) es una región del océano cuyas propiedades físicas (temperatura, densidad y salinidad) se mantienen quasi-homogéneas en la vertical. Puede variar desde unos pocos metros hasta varios cientos de metros a profundidad y es creada por la mezcla turbulenta, forzada por el viento, ondas de gravedad superficiales y enfriamiento convectivo. Dicha capa varía en el tiempo, con cambios diurnos, estacionales y anuales y espaciales.

Existen diversos criterios para calcular la profundidad de la capa de mezcla, en este caso consiste en elegir un criterio límite donde la densidad potencial cambia con la profundidad.

El cálculo es realizado en una dimensión para cada punto de malla, haciendo un incremento ($\Delta\sigma$). Este incremento sólo se realiza sobre el valor de referencia del perfil de densidad ($\Delta\sigma =$

$\sigma_{ref} + \Delta$) entonces los valores adyacentes a una profundidad de referencia actualizada (σ_n) son buscados, es decir, los valores inferior y superior del $\Delta \sigma$ en σ_n que es el punto de intersección del incremento con el perfil vertical de densidad. Estos valores son interpolados linealmente al valor de profundidad correspondiente. El criterio límite que se usó es $\Delta \sigma = 0.125 \text{ kg/m}^3$.

La profundidad de la capa de mezcla también se ve afectada por el paso de estos frentes fríos, la cual se incrementa como resultado de la mezcla debida al esfuerzo del viento sobre la superficie del océano. La profundidad de la capa de mezcla aumenta principalmente en la plataforma continental, aunque también en las zonas más profundas del GoM (Figura 4).



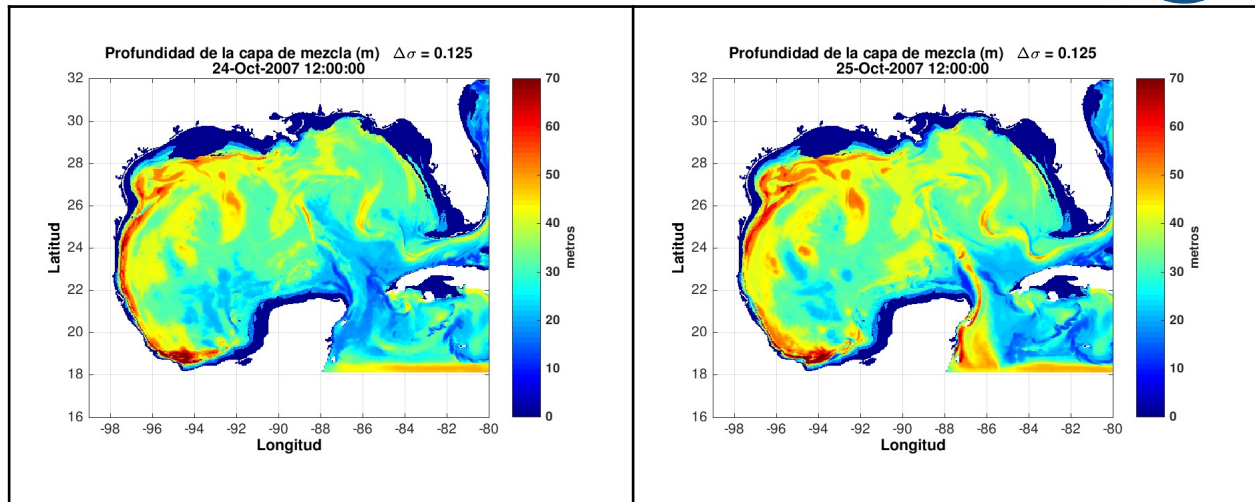


Figura 4. Mapas de la profundidad de la capa de Mezcla en el Golfo de México durante el paso del frente frío #4 de la temporada 2007, datos a partir de una simulación numérica con el modelo HYCOM. Imágenes del 22 de octubre a las 12:00, 22 de octubre a las 19:00, 23 de octubre a las 00:00, 23 de octubre a las 12:00, 24 de octubre a las 12:00 y 25 de octubre a las 12:00, horas en GMT.

Ondas inerciales

A partir de las corrientes superficiales del GoM para todo el periodo de la simulación, se observan oscilaciones anticiclónicas en algunas regiones como el sur del Golfo en la Bahía de Campeche o al noreste del golfo. El paso del frente frío a través del GoM suministra un impulso en su superficie y atrás de este los vientos asociados van disminuyendo en intensidad lo que es propicio para la generación de oscilaciones inerciales, las cuales se observan claramente en gran parte del GoM, en diferente amplitud siendo la mayor en la región de la Bahía de Campeche. Estas oscilaciones tienen un sentido anticiclónico y su amplitud es mayor en la parte sur del GoM.

Para ajustar una curva a las oscilaciones inerciales se utiliza el método de mínimos cuadrados de la forma:

$$u = A_0 + A_1 \sin(\omega t) + A_2 \cos(\omega t)$$

las variables a determinar son A_0 , A_1 y A_2 , de tal forma que la curva se ajuste mejor a los valores de la oscilación inercial.

Se comienza considerando que el conjunto de los valores observado se puede representar como

$$u_1 = A_0 + A_1 \sin(\omega t_1) + A_2 \cos(\omega t_1)$$

$$u_2 = A_0 + A_1 \sin(\omega t_2) + A_2 \cos(\omega t_2)$$

...

$$u_n = A_0 + A_1 \sin(\omega t_n) + A_2 \cos(\omega t_n)$$

representando la ecuación en forma matricial

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) \\ 1 & \sin(\omega t_2) & \cos(\omega t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin(\omega t_n) & \cos(\omega t_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \dots \\ A_n \end{bmatrix}$$

$$u, v = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega t_1) & \cos(\omega t_1) \\ 1 & \sin(\omega t_2) & \cos(\omega t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin(\omega t_n) & \cos(\omega t_n) \end{bmatrix} A_{u,v}$$

entonces llegamos a la forma:

$$U_{u,v} = H A_{u,v}$$

donde $U_{u,v}$ representa los valores u, v de la oscilación inercial, el producto matricial $H A_{u,v}$ representa un valor aproximado de y utilizando un ajuste de mínimos cuadrados, por lo que tenemos:

$$U_{u,v} - H A_{u,v} \neq 0$$

entonces tenemos que encontrar el valor de $A_{u,v}$ para que esta diferencia entre el valor real $U_{u,v}$ y el valor aproximado sean mínimas: para cumplir con esto $A_{u,v}$ tiene la forma:

$$A_{u,v} = (H^t H)^{-1} H^t U_{u,v} \quad \square$$

la ecuación anterior es el ajuste de mínimos cuadrados para datos matriciales.

$U_{u,v}$ es la matriz de velocidad, se tiene una matriz U_{\square} para la componente u y una matriz V para la componente v .

H está dada por

$$H = [(t/t)' \quad \sin(\omega_{inc}) \quad \cos(\omega_{inct})]$$

donde el argumento ω_{inc} es la frecuencia inercial en función de la latitud y t es el vector de tiempo.

La solución de la ecuación del ajuste de mínimos cuadrados tiene la forma:

$$A'_u = [A'_{u1} \quad A'_{u2} \quad A'_{u3}]$$

$$A'_v = [A'_{v1} \quad A'_{v2} \quad A'_{v3}]$$

Estas matrices representan los términos $A_{(u,v)1}$, $A_{(u,v)2}$, $A_{(u,v)3}$ que minimiza la diferencia entre el valor U y el valor aproximado $HA_{u,v}$. Una vez encontrados los valores $A_{u,v}$ se combinan para representar diferentes procesos oceanográficos, por ejemplo en la siguiente ecuación, que representa la velocidad total U' incluye los procesos presentes en todas las frecuencias, tanto la oscilación inercial como la Corriente de Lazo, remolinos anticiclónicos en regiones del GoM de aguas profundas y procesos en aguas someras como ondas atrapadas a la costa y corrientes paralelas a la costa.

$$\begin{aligned} u' &= A_{u1} + A_{u2} \sin(\omega_{inct}) + A_{u3} \cos(\omega_{inct}) \\ v' &= A_{v1} + A_{v2} \sin(\omega_{inct}) + A_{v3} \cos(\omega_{inct}) \\ U' &= \sqrt{(u'^2 + v'^2)} \end{aligned}$$

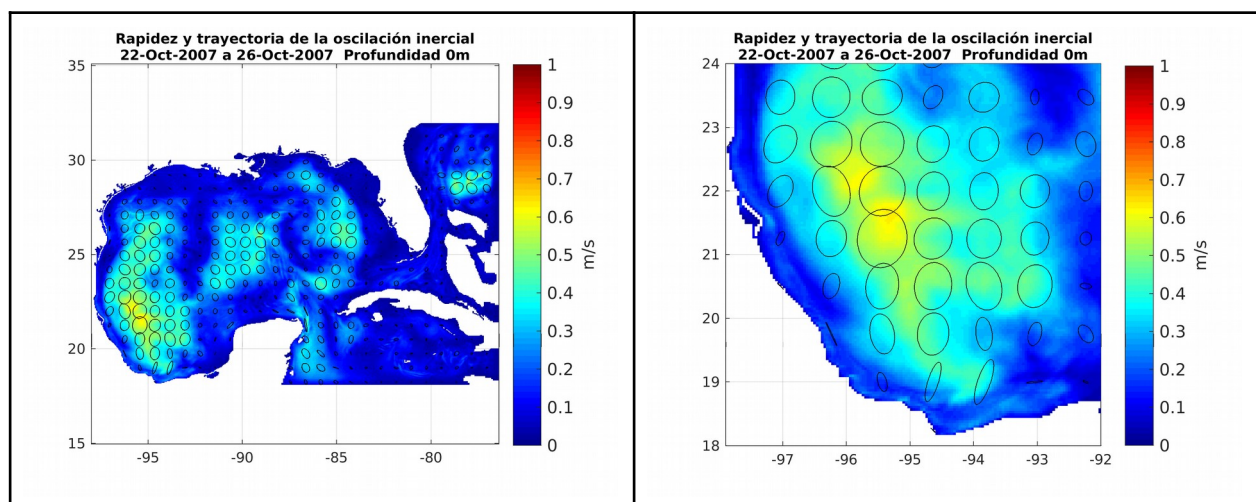
Sí solo se toma los elementos $A_{(u,v)1}$ de la ecuación:

$$\begin{aligned} u' &= A_{u1} \\ v' &= A_{v1} \end{aligned}$$

representan solo los procesos distintos a la oscilación inercial (todos los procesos en todas las frecuencias diferentes a la de las oscilaciones inerciales), los llamaremos flujo medio o corriente media. Y finalmente las oscilaciones inerciales se representan por:

$$\begin{aligned} u' &= A_{u2} \sin(\omega_{inct}) + A_{u3} \cos(\omega_{inct}) \\ v' &= A_{v2} \sin(\omega_{inct}) + A_{v3} \cos(\omega_{inct}) \end{aligned}$$

En la región oceánica del oeste del GoM se localizan las oscilaciones inerciales con mayor amplitud y velocidad, de éstas regiones, en la Bahía de Campeche es donde la amplitud y la velocidad de las oscilaciones inerciales son mayores, llegando a una rapidez de 0.7 m/s en los primeros 20 metros de profundidad, la cual disminuye a 0.2 m/s a los 50 metros de profundidad.



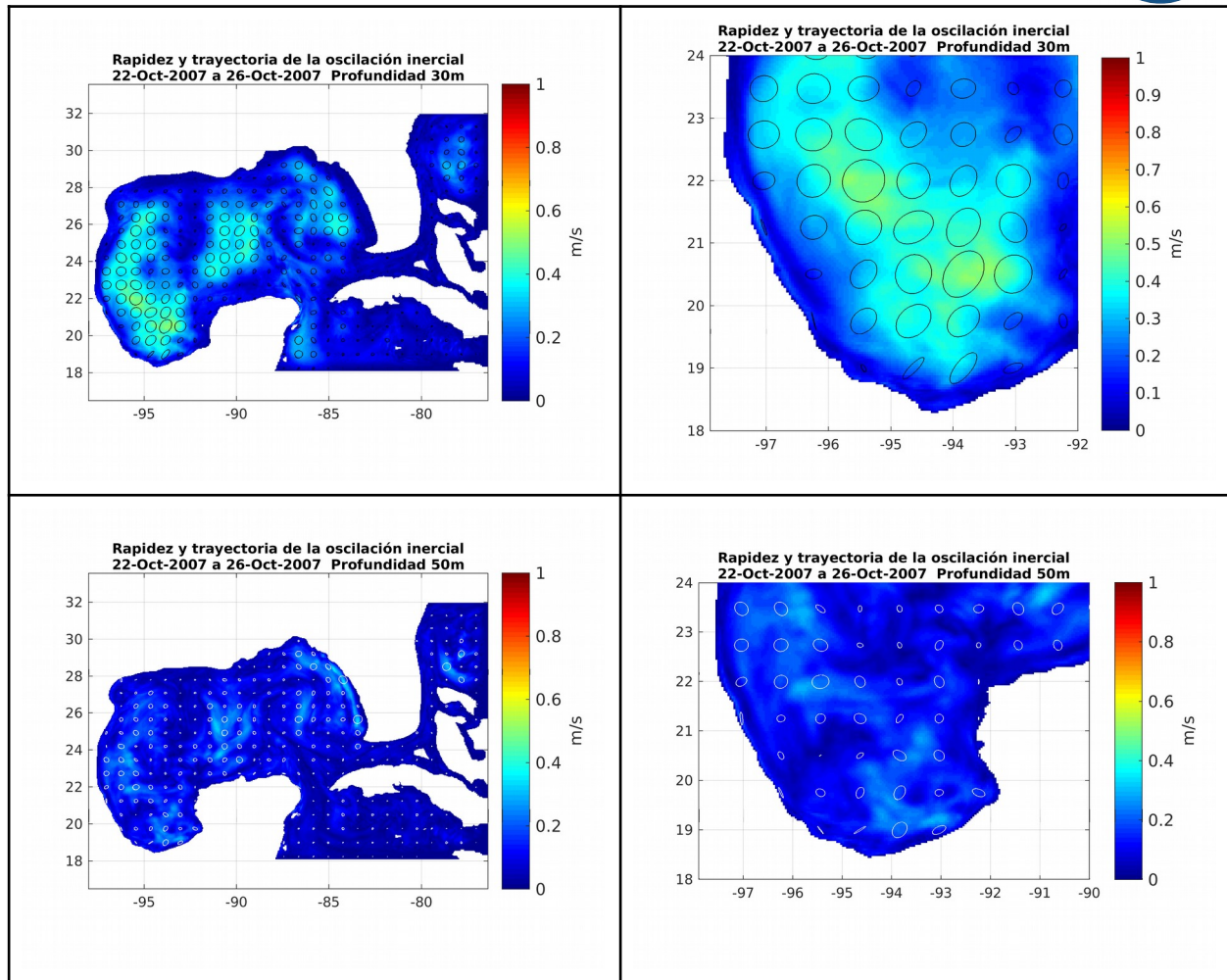


Figura 5. Rapidez de la oscilación total del GoM. Promedios del 22 al 26 de Octubre del 2007 a profundidades de 0, 30 y 50 m y el acercamiento en el Golfo de Campeche.

Contenido de calor

El contenido de calor oceánico (OHC) se refiere al calor absorbido por el océano, que luego se almacena como una forma de energía interna. Los cambios en el contenido de calor del océano juegan un papel importante en el aumento del nivel del mar, debido a la expansión térmica.

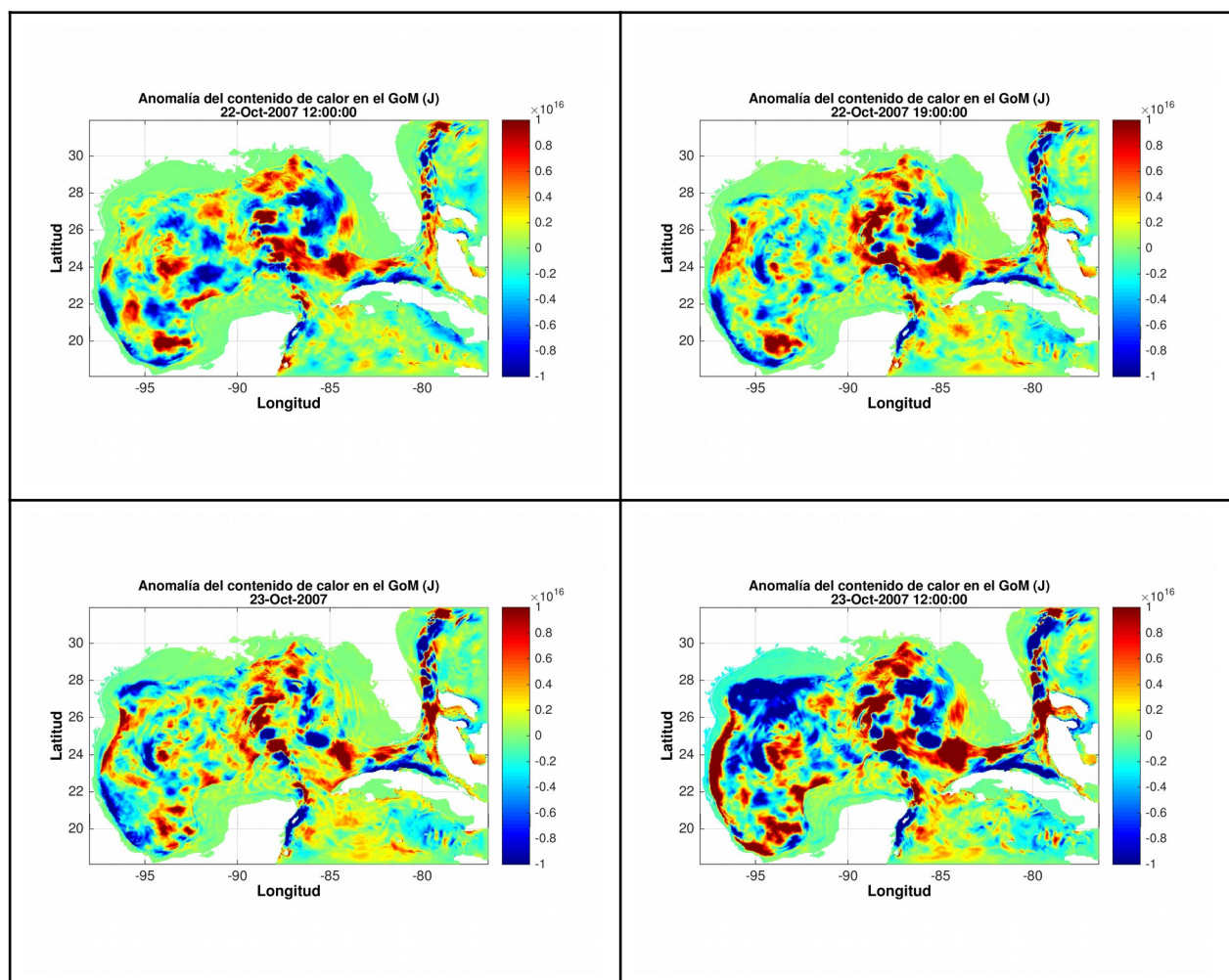
La densidad de área del contenido de calor del océano entre dos niveles de profundidad se define usando una integral definida:

$$H = \rho c_p \int_{h_2}^{h_1} T(z) dz$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, C_p el calor específico del agua de mar, h_2 es la profundidad más baja, h_1 es la profundidad más alta y $T(z)$ es el perfil de temperatura. En unidades SI, H tiene unidades de $J \cdot m^{-2}$. Al integrar esta densidad sobre una cuenca oceánica,

o en todo el océano, se obtiene el contenido de calor total. Por lo tanto, el contenido de calor total es el producto de la densidad, la capacidad de calor específica y el volumen integral de la temperatura en la región tridimensional del océano en cuestión.

Al paso del frente frío el contenido de calor disminuye en el GoM, se observa en los mapas de anomalía que se presentan a continuación (Figura 6). Aunque hay mucha variabilidad en las zonas costeras la anomalía en el contenido de calor, la cual es negativa, es decir que el Golfo está perdiendo calor, se observa que en la zona de la Bahía de Campeche, pero fuera de la plataforma, el Golfo gana calor, esto es debido a que en esa zona la termoclina se hace más profunda, por lo que aunque se pierda calor en la superficie, en la columna integrada en realidad se gana calor.



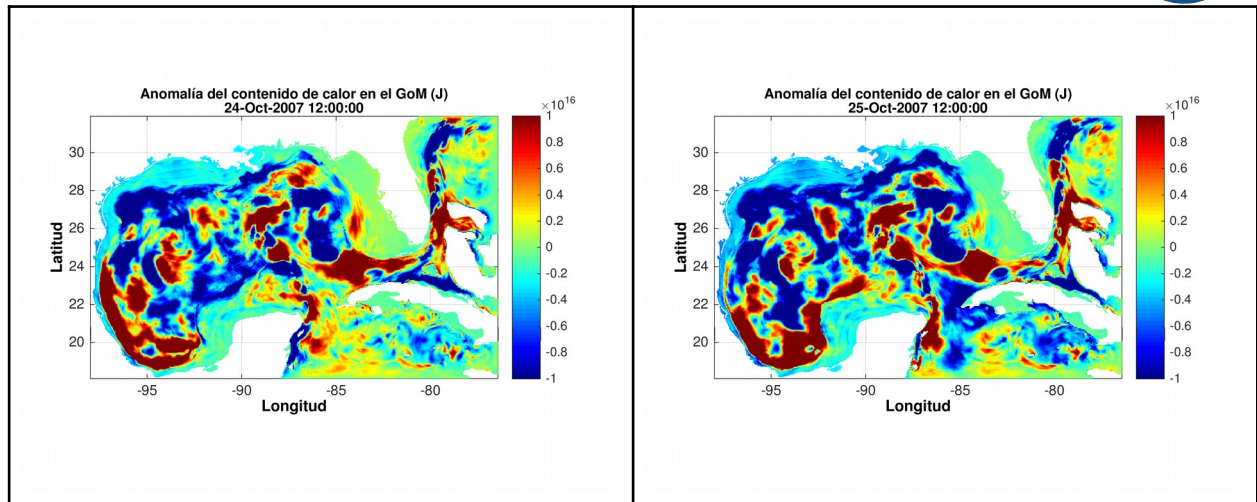


Figura 6. Anomalia del contenido de calor en el Golfo de México los días 22 a las 12:00Z y 19:00, el día 23 a las 00:00 y 12:00 y el día 24 a las 12:00 y 25 de octubre del 2007 a las 12:00.