

Modelo operacional acoplado Océano - Atmósfera WRF-CROCO

A continuación se describen los scripts desarrollados para la ejecución operacional del modelo acoplado WRF-CROCO. El documento está organizado de la siguiente manera: i) Descripción del acoplador OASIS, ii) Esquema de ejecución, iii) Esquema de directorios, iv) requisitos para la ejecución del modelo de pronóstico operacional, v) Esquema de clases desarrolladas para la ejecución operacional del modelo acoplado y vi) Resultados obtenidos del pronóstico de los huracanes Earl y Fiona.

OASIS-Coupler

El acoplador OASIS es un software que permite intercambios sincronizados de información de acoplamiento entre modelos numéricos que representan diferentes procesos del sistema climático, fue creado por **CERFACS** y **Centre National de la Recherche Scientifique**. OASIS permite el acoplamiento de campos 2D y 3D, además de campos en mallas no estructuradas, las nuevas versiones de OASIS permiten la ejecución en paralelo de todas las transformaciones realizadas en los campos de origen y destino sean ejecutadas en paralelo, es compatible con openMPI/MPI.

OASIS permite definir las variables de acople y el tiempo de acoplamiento o frecuencia de acoplamiento, específicamente se utilizó para acoplar el modelo atmosférico WRF y el modelo oceánico CROCO, cada 600 segundos (debe ser múltiplo de los pasos de tiempo del modelo WRF y CROCO). CROCO le entrega el campo 2D de temperatura superficial del océano al modelo atmosférico (condición de frontera de WRF), de manera análoga el modelo WRF entrega campos 2D: evaporación, precipitación, radiación neta, flujo de calor latente, flujo de calor sensible y las componentes meridional y zonal del estrés del viento, dichos campos son llamados variables de acoplamiento. Cabe resaltar que es posible acoplar otras variables oceánicas, corrientes superficiales y altura del nivel del mar. Las variables y el tiempo de acoplamiento y otros parámetros se deben definir en el archivo de configuración de OASIS llamado **namcouple**. Se debe generar un archivo de condiciones iniciales para las variables de acoplamiento oceánicas y atmosféricas, llamados `oce.nc` y `atm.nc`, existen dos opciones para generar dichos archivos i) condiciones de calma, todas las variables toman el valor de cero al inicio, ii) condiciones reales, donde todas las variables toman valores reales a la hora del inicio del modelo. Posteriormente en la descripción de la ejecución del modelo acoplado océano-atmósfera se describe la creación de los archivos `oce.nc` y `atm.nc`. En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de acoplamiento de los modelos CROCO y WRF.

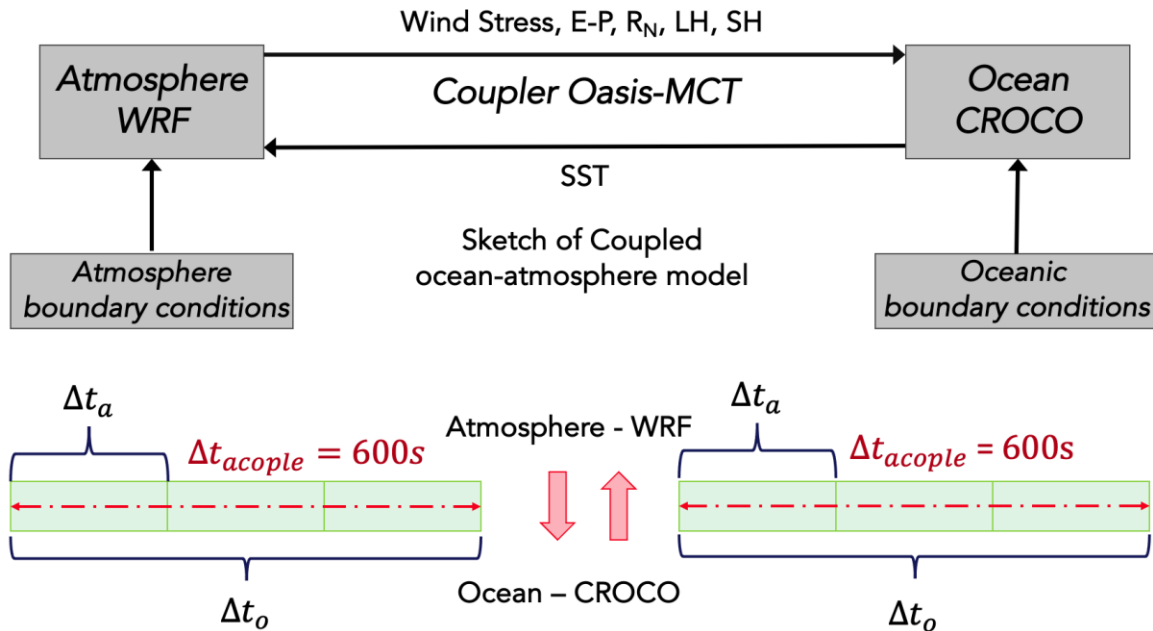


Figura 1 Esquema de funcionamiento del acoplador OASIS para el acople del modelo atmosférico WRF y oceánico CROCO.

Esquema de ejecución

El esquema de pronóstico operacional propuesto consta de cinco etapas: i) descarga de los resultados de modelos globales (Global Forecast System ó GFS y MERCATOR) para generar las condiciones iniciales de los modelos regionales, ii) preprocesamiento de los modelos desacoplados, iii) ejecución de los modelos desacoplados, iv) ejecución del modelo océano-atmósfera acoplado y v) post procesamiento de los resultados. El esquema de pronóstico operacional está diseñado para empezar todos los días a las 12 UTC (ver Figura 2).

El pronóstico operacional comienza a las 11:00 en hora local con la descarga de las condiciones de frontera de GFS y Mercator, el número de archivos descargados depende del horizonte de pronóstico (es un argumento de entrada para la ejecución del modelo operacional, es posible cambiarlo para cada ejecución, por defecto se usa 72 horas) el cual debe ser múltiplo de tres horas, luego se ejecuta el preprocesamiento de los modelos, se generan los archivos de condiciones iniciales y de frontera de los modelos WRF y CROCO desacoplados. Aproximadamente a las 14:00 (el tiempo depende de los recursos computacionales disponibles) comienza la ejecución de los modelos desacoplados, las 72 horas de pronóstico se demoran entre 4 y 6 horas para el modelo WRF, dependiendo de el número de procesadores disponibles, la ejecución de CROCO se demora 2 horas, debido a la forma de compilación de este modelo siempre se deben usar 8 procesadores (esté valor puede cambiar según el número de procesadores escogidos en el cppdefs.h). Luego de la primera hora de ejecución (debe estar disponible el primer wrfst del modelo WRF desacoplados), a las 15:00 se hace el preprocesamiento del modelo acoplado, para el cual es necesario el wrfst y el croco_his de la corrida del día anterior del modelo WRF y CROCO desacoplado, dado que se utilizan para generar los archivos oce.nc y atm.nc (condiciones iniciales de las variables de acople), el tiempo de ejecución es similar al del modelo WRF

desacoplado, cabe aclarar que el número de procesadores disponibles deben repartirse para cada uno de los modelos acoplados, por ejemplo, para el caso del cluster BOCHICA (cluster de la facultad de minas) se tienen 64 procesadores, 8 de deben usar para CROCO y los 56 restantes para WRF.

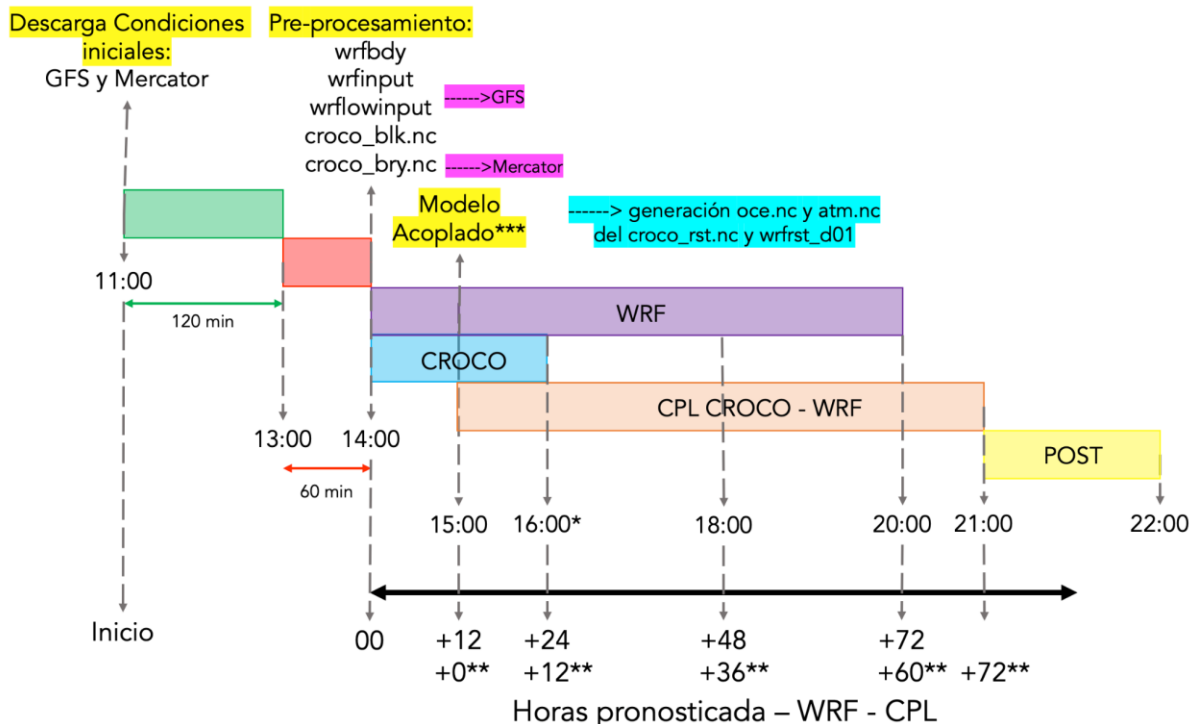


Figura 2 Esquema de ejecución del modelo de pronóstico acoplado y desacoplado. En verde descarga de resultados de modelos globales, en rojo el preprocesamiento, en morado y azul la ejecución de los modelos desacoplados, en naranjala ejecución del modelo acoplado y en amarillo el post-procesamiento.

Finalmente, se realiza un post procesamiento para generar los productos asociados al pronóstico operacional, en esté caso figuras de variables de interés y tracking de eventos extremos (ciclones tropicales). La secuencia de ejecución descrita anteriormente se muestra en la Figura y la cual es una línea de tiempo de una ejecución típica del modelo de pronóstico operacional, los tiempos mostrados fueron calculados a partir de los resultados obtenidos en el cluster BOCHICA.

Esquema de directorios

Para la correcta ejecución del sistema de pronóstico operacional de los modelos acoplados y desacoplados se debe garantizar que el esquema de directorios mostrado en la Figura 3. Inicialmente en la **ruta_raíz** (parámetro necesario para la ejecución del modelo) es necesario crear las carpetas y copiar las información mencionada en cada una, cada nivel de indentación representa el mismo nivel en el esquema de directorios.

- **info:** Directorio donde se encuentran los archivos de configuración de cada uno de los modelos y de su versión acoplada, además de los archivos necesarios para la correcta ejecución de los modelos
 - **cpl:**
 - **croco:**
 - **croco.in:** Archivo de configuración de CROCO acoplado
 - **crocox:** Ejecutable de CROCO acoplado, resultado de la compilación del modelo con las opciones del acople definidas, se debe cambiar el nombre de croco a crocox.
 - **croco_grd.nc:** Malla de CROCO, se genera utilizando las herramientas de preprocesamiento croco_tools
 - **oasis:**
 - **namcouple:** Archivo de configuración del acople
 - **areas.nc:** Archivo necesario para el acople, se generan utilizando el script **create_oasis_grids_for_wrf.sh**.
 - **grids.nc:** Archivo necesario para el acople, se generan utilizando el script **create_oasis_grids_for_wrf.sh**.
 - **masks.nc:** Archivo necesario para el acople, se generan utilizando el script **create_oasis_grids_for_wrf.sh**.
 - **wrf**
 - Archivos necesarios para la ejecución de WRF acoplado, los cuales se encuentran en el código fuente del modelo, se debe tener en cuenta que puede cambiar con la versión del modelo.
 - **wrfexe:** Ejecutable de WRF acoplado, resultado de la compilación del modelo con las librerías modificadas para realizar el acople, se debe cambiar el nombre de wrf.exe a wrfexe.
 - **croco:**
 - **croco.in:** Archivo de configuración de CROCO desacoplado
 - **param.h:** Archivo de configuración de CROCO desacoplado
 - **cppdefs.h:** Archivo de configuración de CROCO desacoplado
 - **wrf:**
 - **arw:** Archivos necesarios para la ejecución de WRF acoplado, los cuales se encuentran en el código fuente del modelo, se debe tener en cuenta que puede cambiar con la versión del modelo.
 - **wps:**
 - **METGRID.TBL:** Archivo necesario para la ejecución de metgrid.exe, se encuentra en el código fuente del modelo, se debe tener en cuenta que puede cambiar con la versión del modelo
 - **GEOGRID.TBL:** Archivo necesario para la ejecución de geogrid.exe, se encuentra en el código fuente del modelo, se debe tener en cuenta que puede cambiar con la versión del modelo
 - **Vtable:** Archivo necesario para la ejecución de ungrib.exe, depende de la base de datos que se va a utilizar para generar las condicionens de frontera del modelo WRF.
 - **name**

- **namelist.input_code**: Plantilla del archivo de configuración del modelo WRF, editado para que funciones las funciones llamadas editar namelist (para ver el detalle se recomienda revisar el archivo disponible en la Carpeta de Material Complementario Anexos 3).
 - **namelist.wps_code**: Plantilla del archivo de configuración del pre-procesamiento del modelo WRF ó WPS, editado para que funciones las funciones llamadas editar namelist (para ver el detalle se recomienda revisar el archivo disponible en la Carpeta de Material Complementario Anexos 3).
- **pros**: Directorio donde se encuentran los scripts necesarios para ejecución del modelo de pronóstico operacional, los archivos en formato .sh están disponibles en los **croco_tools/Coupling_tools/oasis_in** del modelo CROCO, los archivos en formato .py fueron los desarrollados en el presente proyecto.
 - **create_oasis_grids_for_wrf.sh**
 - **create_oasis_restart_from_calm_conditions.sh**
 - **create_oasis_restart_from_preexisting_output_files.sh**
 - **create_oasis_toy_files.sh**
 - **from_croco.sh**
 - **from_wrf.sh**
 - **from_ww3.sh**
 - **to_wrf_stag_grid.sh**
 - **clases_cpl.py**
 - **clases_wrf.py**
 - **operacional_cpl.py**
 - **operacional_wrf.py**
- **run**: Directorio de ejecución de los modelos, en la Figura 3 la carpeta llamada fecha (YYYYmmDDHH, formato del nombre de la carpeta) se genera por el script **operacional_wrf.py** con la clase **oper_carpetas**, al final de la ejecución se borran todas carpetas creadas en este directorio. Las carpetas al interior de este directorio se generan de forma automática con el nombre de la fecha de inicio de cada simulación (ver Figura 3).
- **data**: Directorio de almacenamiento de los resultados de cada modelo, al finalizar la ejecución de cada modelo los resultados se copian de run /YYYYmmDDHH a data /YYYYmmDDHH, en la Figura 3 la carpeta llamada fecha (YYYYmmDDHH, formato del nombre de la carpeta) se genera por el script **operacional_wrf.py** con la clase **oper_carpetas**. Las carpetas al interior de este directorio se generan de forma automática con el nombre de la fecha de inicio de cada simulación (ver Figura 3).

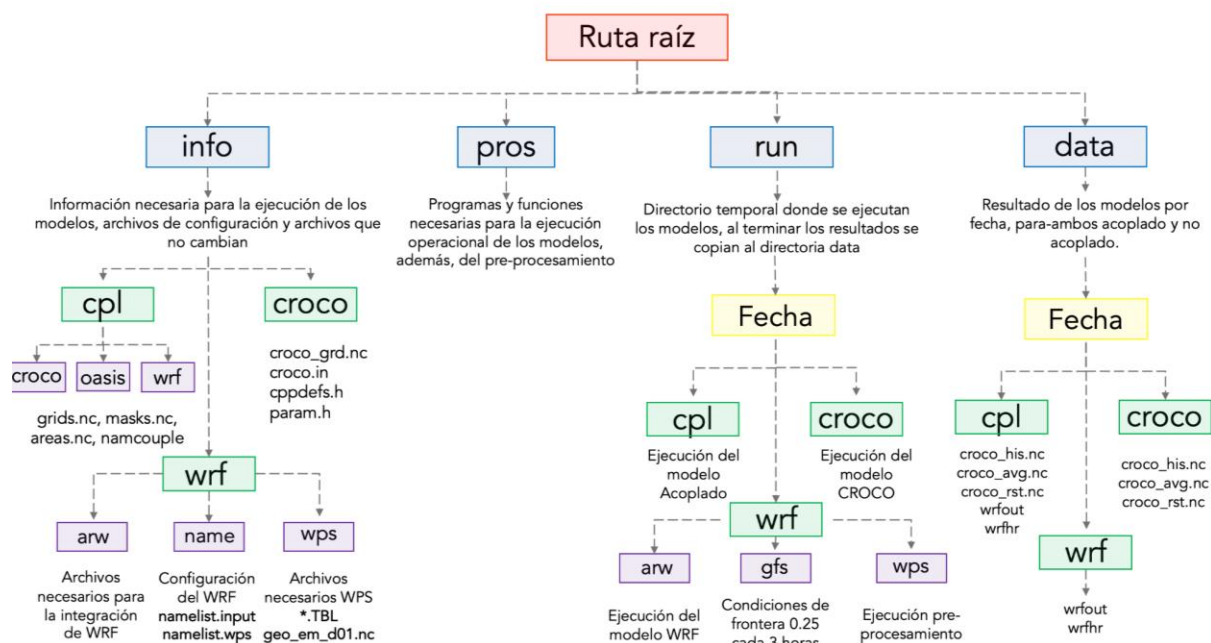


Figura 3 Esquema de directorios del modelo de pronóstico operacional.

Las rutinas de preprocesamiento, ejecución y posprocesamiento de los resultados estan indicadas en el material complementario 3.

Requisitos

La versión del modelo WRF desacoplado es **3.7.1** y la del WPS (WRF pre-processing system) es la **3.7**, conservando las librerías y sus versiones mencionadas en la sección de requisitos de los modelos WRF y CROCO desacoplados. Cabe aclarar que para la compilación del modelo WRF acoplado es necesario actualizar las librerías disponibles en la carpeta **modified_routines** disponible en la carpeta **source/source_oa/**, adjunta en la Carpeta de Material Complementario Anexos 3. Teniendo en cuenta que la ejecución operacional del modelo se realiza desde python es necesario instalar los siguientes paquetes de python3:

- numpy
- os
- pandas
- datetime
- shutil
- fileinput
- subprocess
- wget

Además se debe compilar el acoplador de los modelos, en este caso se utiliza **OASIS-MCT 3.0**, disponible en la la carpeta **source/source_oa/**, adjunta en la Carpeta de Material Complementario Anexos 3, para su correcta compilación se debe indicar el directorio de compilación de las librería NetCDF4.

Esquema de clases

El piloto operacional para el modelo acoplado WRF-CROCO está basado en dos scripts: i) **clases_cpl.py**, donde se encuentran todas las clases asociadas a la ejecución automática del modelo WRF; ii) **operacional_cpl.py**, donde se definen los parámetros de cada ejecución y se hace un llamado de las clases definidas en **clases_cpl.py**. Inicialmente se debe definir la fecha de inicio del modelo (fecha_ini, en el formato de datetime), el horizonte de pronóstico (nhora, entero en horas), la fecha de inicio de los resultados del modelo croco desacoplado (base_croco, en el formato de datetime) y los siguientes directorios:

- **ruta_main**: ruta donde se raiz del modelo operacional (string)
- **ruta_croco_his**: ruta donde se encuentran los resultados del modelo CROCO desacoplado
- **ruta_mpir**: ruta de los ejecutables de mpich (string)
- **ruta_wrst**: ruta del wrfst para la generación de las condiciones iniciales del acople, generalmente se utiliza el archivo generado en la simulación del modelo WRF desacoplado del día anterior.
- **ruta_gfs**: ruta de las condiciones de frontera del Global Forecast System, descargado en la ejecución del modelo WRF desacoplado.

A continuación se describen los argumentos de entrada de cada una de las clases desarrolladas (**clases_cpl.py**) para la ejecución operacional del modelo WRF.

Nombre	Argumentos	Funciones	Descripción
oper_copiar	ruta_raiz (str) fecha_ini (datetime)	copia_wrf copia_croco copia_oasis	Copia los archivos invariantes de los modelos CROCO y WRF, además, de los archivos utilizados por el acoplador disponibles en el directorio info
pre_wrf	ruta_raiz (str) fecha_ini (datetime) fecha_fin (datetime)	copia_wrf_archivos editar_namelist modifica_wrfinput grafica_mascara	Copia los archivos de condiciones iniciales y de frontera generados en la simulación desacoplada, edita el archivo de configuración (namelist.wps). Además, se modifica y grafica la variable CPL_MASK del wrfinput.
pre_oasis	ruta_raiz (str) fecha_ini (datetime) ruta_croco_his base_croco ruta_wrst ruta_gfs	crear_oce grafica_sst crear_atm grafica_tau	Genera las condiciones iniciales de la variables de acople utilizando información del wrfst, croco_his y GFS. Además realiza gráficas para verificar los archivos generados.

	gfs_file		
pre_croco	ruta_raiz (str) fecha_ini (datetime) ruta_croco_his base_croco	crear_ini grafica_ini crear_bry grafica_bry	Genera las condiciones iniciales y de frontera para el modelo CROCO acoplado utilizando los resultados del modelo CROCO desacoplado, además realiza gráficas para verificar los archivos generados
ncversion	ruta_raiz (str) fecha_ini (datetime)	mover_nc netcdf3	Modifica la versión de los archivos NetCDF4 a NetCDF3, es necesario debido a la forma en la cual se compiló el modelo WRF acoplado en el clúster BOCHICA.
cpl_wrf	ruta_raiz (str) fecha_ini (datetime) nprocw (int) nprocc (int)	ejecutar_wrf	Ejecuta el modelo acoplado, se deben definir el número de procesadores para cada uno de los modelos.
oper_copiar	ruta_raiz fecha_ini	copia_wrfout copia_wrfhr copia_croco copia_config	Copia los resultados de los modelos y archivos de configuración del modelo, del directorio temporal de ejecución al directorio de almacenamiento

Resultados

Con el objetivo de probar los scripts desarrollados y la metodología de ejecución del modelo operacional, se realizaron pronósticos durante 5 días para los huracanes Earl y Fiona ocurridos durante la temporada de huracanes de 2022. La evaluación de los resultados está basada en la trayectoria en intensidad de los huracanes simulados. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

Huracán Earl 2022

La onda tropical reportada el 25 de agosto cerca de la costa occidental de África se convierte en tormenta tropical el 3 de septiembre luego de atravesar el océano atlántico, durante los próximos cinco días aproximadamente Earl continúa siendo una tormenta tropical pasando cerca de Puerto Rico y cambiando su dirección hacia el norte. El 5 de septiembre comienza la intensificación de la convección fluctuando su intensidad hasta alcanzar la categoría 1 de huracán, el 8 de septiembre alcanzó la categoría 2 mientras continuaba su desplazamiento hacia el norte. Luego del 9 de septiembre comienza a debilitarse mientras se desplaza nor-este sobre aguas más frías, finalmente Earl se convierte en un ciclón extratropical en la noche del 10 de septiembre. La trayectoria del huracán Earl se puede observar en la Figura 10

representado por círculos, desde el 4 hasta el 9 de septiembre, periodo de mayor intensidad del huracán.

El modelo de pronóstico operacional fue ejecutado desde el 4 de septiembre hasta el 8 de septiembre de 2022 a las 12 UTC con un horizonte de pronóstico de 36 horas. La simulación incluye la ejecución de los modelos WRF y CROCO desacoplados desde el 3 de septiembre y la ejecución del modelo océano-atmósfera acoplado. Para cada uno de los días en los cuales se realizó la ejecución del modelo operacional se aplicó la técnica de rastreo del centro del huracán descrita en informes previos, para obtener la posición pronosticada de la tormenta cada 6 horas. Las trayectorias pronosticadas del huracán Earl se muestran en la Figura 4, a la izquierda para WRF desacoplado y a la derecha para el modelo acoplado.

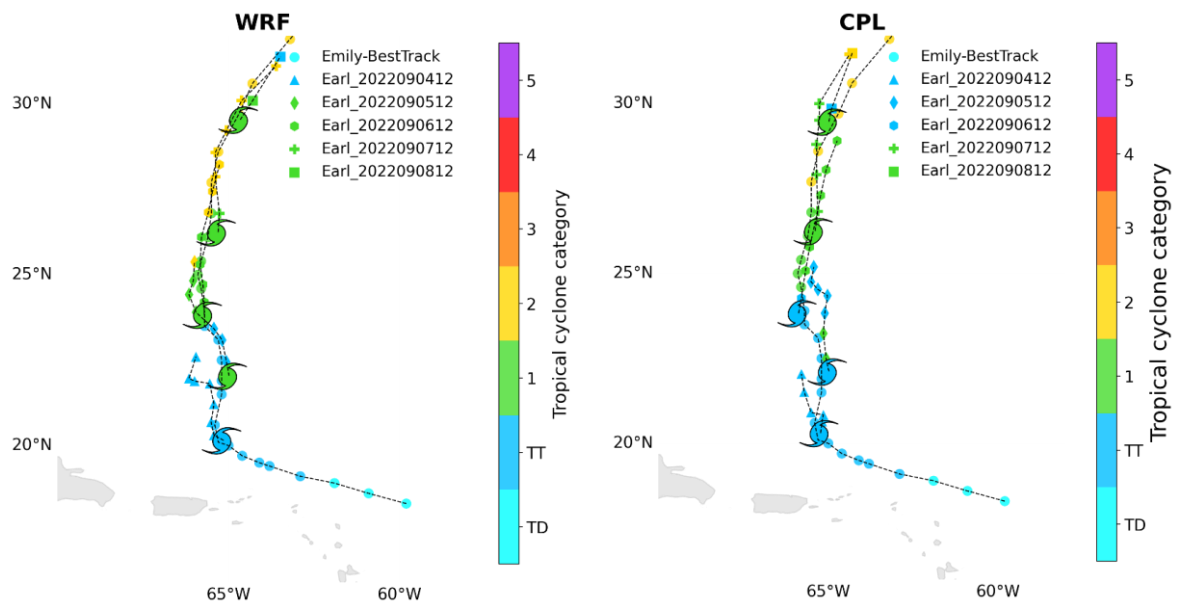


Figura 4 Trayectoria del huracán Earl obtenida del Best Track del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos. A la izquierda las trayectorias obtenidas utilizando el modelo operacional de pronóstico con el modelo WRF desacoplado y a la derecha con el modelo WRF-CROCO acoplado.

Se observa que en ambos casos el desempeño de los modelos se ajusta adecuadamente al Best-Track (representado por círculos en la Figura 4) proporcionado por el National Hurricane Center ó NHC por sus siglas en inglés. En ambos casos el peor pronóstico es el realizado el 4 de Septiembre, en el cual la tormenta se desplaza más al oeste que las observaciones, sin embargo, este error puede ser atribuido a la metodología de rastreo de huracanes, ya que al ser más débiles las tormentas aún no tienen la estructura de huracan bien definida, lo cual genera una mayor incertidumbre en la ubicación del centro de la tormenta. El pronóstico realizado con el modelo WRF desacoplado es ligeramente mejor que los resultados del modelo acoplado.

Además de evaluar las trayectorias se realizó una evaluación a los cambios de intensidad del huracán Earl. En la Figura 5 se muestra la intensidad representada por la velocidad máxima alrededor del ojo y la presión a nivel del mar mínima en el ojo del huracán para cada una de las simulaciones del modelo operacional y comparada con la información del Best-Track. Al igual que con la trayectoria, la intensidad del huracán fue pronosticada de forma más acertada

por el modelo WRF desacoplado, lo cual se puede observar en la velocidad del viento y la presión mínima. Los mayores errores se presentaron para el 4 y 5 en el modelo acoplado de septiembre donde el huracán Earl pierde intensidad luego de 12 horas de pronóstico, mientras que las observaciones muestran una intensificación constante hasta el 8 de septiembre, sin embargo, los resultados del modelo WRF desacoplado continúa con la intensificación del huracán Earl hasta el 9 de septiembre.

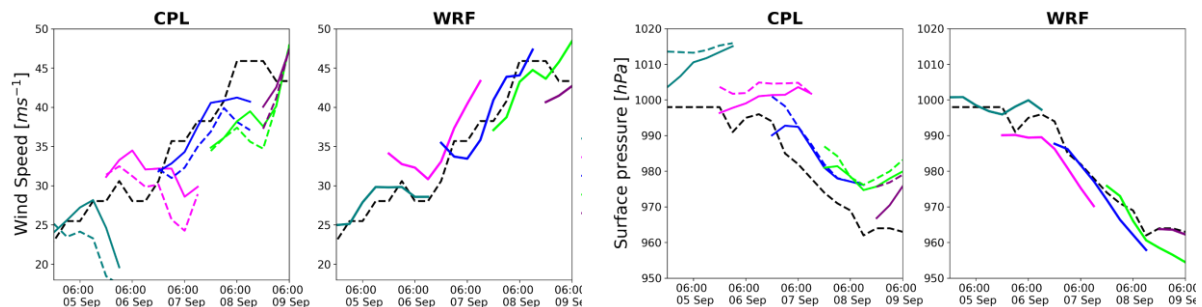


Figura 5 series de tiempo de la intensidad del huracán Earl observadas (negro) y simulados con el modelo WRF desacoplado y el modelo WRF-CROCO acoplado (cpl). A la izquierda la velocidad de vientos máxima y a la derecha la presión mínima en el ojo del huracán.

En resumen, los resultados obtenidos con el modelo WRF desacoplado son ligeramente más acertados que los obtenidos con el modelo acoplado, sin embargo, es posible decir que se obtuvo un buen desempeño de ambos modelos al pronosticar el Huracán Earl.

Huracán Fiona 2022

La onda tropical reportada el 12 de septiembre en el océano atlántico central comenzó a ser monitoreada por el centro nacional de huracanes, se desplazaba hacia el oeste. En la madrugada del 14 de septiembre se convirtió en depresión tropical. Hasta el 17 de septiembre no se observaron cambios significativos en la intensidad de la depresión tropical. En la mañana del 18 de septiembre se convirtió en huracán categoría 1 sobre aguas cálidas del mar Caribe al sur de Puerto Rico. El 19 de septiembre Fiona adquiere una estructura más organizada y es posible identificar el ojo, durante este mismo día luego de tocar tierra se debilita mínimamente, luego, el 20 de septiembre Fiona continúa intensificando y alcanza la categoría 3 aproximadamente en los 22 N. Finalmente alcanza la categoría 4 el 21 de septiembre a las 00 UTC con velocidades de viento de 215 km/h y una presión mínima de 932 hPa al oeste sur-oeste de Bermudas. El huracán Fiona continúa desplazándose hacia el norte perdiendo intensidad y finalmente convirtiéndose en tormenta extratropical.

El modelo de pronóstico operacional fue ejecutado desde el 17 de septiembre hasta el 21 de septiembre de 2022 a las 12 UTC con un horizonte de pronóstico de 48 horas. La simulación incluye la ejecución de los modelos WRF y CROCO desacoplados desde el 16 de septiembre y la ejecución del modelo océano-atmósfera acoplado. Para cada uno de los días en los cuales se realizó la ejecución del modelo operacional se aplicó la técnica de rastreo del centro del huracán descrita en informes previos, para obtener la posición pronosticada de la tormenta cada 6 horas. Las trayectorias pronosticadas del huracán Earl se muestran en la Figura 6, a la izquierda para WRF desacoplado y a la derecha para el modelo acoplado.

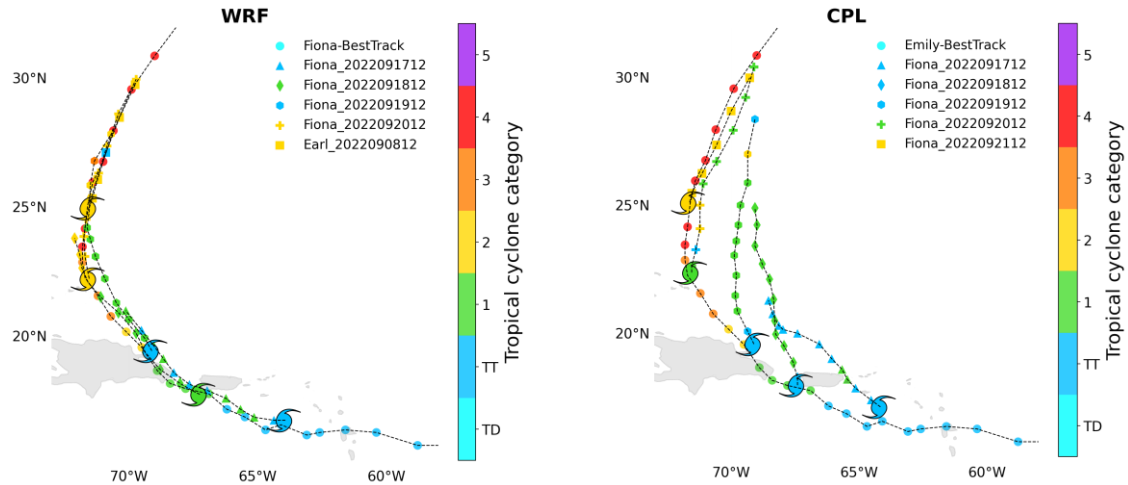


Figura 6. Trayectoria del huracán Fiona obtenida del Best Track del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos. A la izquierda las trayectorias obtenidas utilizando el modelo operacional de pronóstico con el modelo WRF desacoplado y a la derecha con el modelo WRF-CROCO acoplado.

En la Figura 6 se observa que las trayectorias obtenidas del modelo WRF acoplado tienen un menor error respecto a las trayectorias obtenidas con el modelo acoplado, específicamente para las simulaciones que comenzaron el 17, 18 y 19 de septiembre. Dichas diferencias están asociadas a la presencia de Puerto Rico y República Dominicana, el cual genera que el huracán simulado comience a dirigirse al norte aproximadamente 5 grados al oeste menos que las observaciones. Para las simulaciones del 20 y 21 la trayectoria del huracán Fiona es muy cercana al Best-Track.

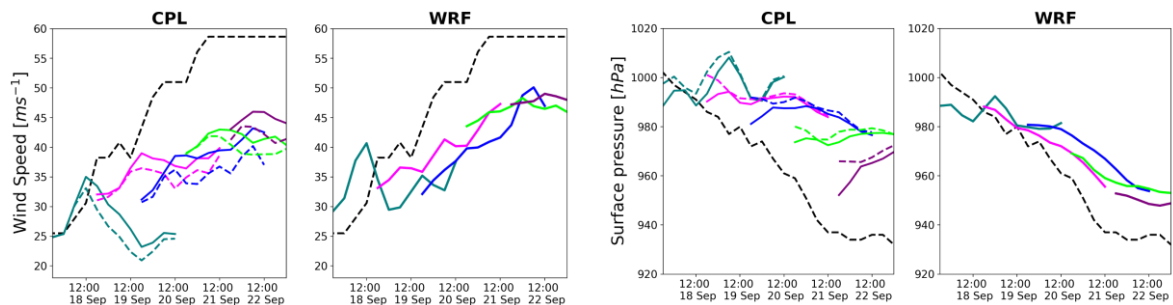


Figura 7. Series de tiempo de la intensidad del huracán Earl observadas (negro) y simulados con el modelo WRF desacoplado y el modelo WRF-CROCO acoplado (cpl). A la izquierda la velocidad de vientos máxima y a la derecha la presión mínima en el ojo del huracán.

Además de evaluar las trayectorias se realizó una evaluación a los cambios de intensidad del huracán Fiona. En la Figura 7 se muestra la intensidad representada por la velocidad máxima alrededor del ojo y la presión a nivel del mar mínima en el ojo del huracán para cada una de las simulaciones del modelo operacional y comparada con la información del Best-Track. Los resultados de ambos modelos subestiman la intensidad del huracán Fiona, siendo más evidente en el modelo acoplado con una diferencia de 15 m/s, mientras que los resultados del modelo WRF desacoplado se obtiene una diferencia de 10 m/s en el momento de mayor intensidad. La simulación del 17 de septiembre para ambos modelos se observa una pérdida

de intensidad luego de las primeras 12 horas de pronóstico, este comportamiento es observado en la velocidad del viento y la presión mínima en el centro de la tormenta.

En resumen, los resultados obtenidos con el modelo WRF desacoplado son más acertados que los obtenidos con el modelo acoplado, debido al control ejercido de las zonas de tierra en el modelo acoplado, el modelo oceanico tiene enmascaradas estas regiones, por lo tanto no es posible obtener resultados en estas zonas. Además el método utilizado para rastrear huracanes solo se aplica sobre el océano. A pesar de las diferencias observadas ambos modelos realizan pronósticos del huracán Fiona con un buen desempeño para el modelo WRF desacoplado y aceptables para el modelo WRF-CROCO acoplado.