

**Manual de usuario de asimilación de datos con Filtro  
Kalman de Transformación de Ensamble Local (LETKF)  
aplicado al modelo global SPEEDY.**

**Daniel Veloso – Rocío Ormazábal**

**Problemas Inversos en Geofísica (513503)**

→ Preguntar

Universidad de Concepción

Septiembre, 2016

## **Tabla de Contenidos**

<b>1.- Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2.- Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1.- Modelo SPEEDY	4
2.2.- Filtro Kalman	7
<b>3.- Manual de usuario</b>	<b>9</b>
3.1.- Cómo usar modelo SPEEDY	9
3.2.- Cómo asimilar datos utilizando Filtro Kalman	13
3.3.- Cómo graficar salidas en GrADS	19
<b>4.- Resultados</b>	<b>21</b>
4.1.- Caso de ejemplo #1	21
4.2.- Caso de ejemplo #2	22
4.3.- Caso de ejemplo #3	24
<b>5.-Discusiones</b>	<b>25</b>
<b>6.- Referencias</b>	<b>25</b>

## 1.- Introducción

El uso de los modelos numéricos como herramienta para el estudio de la atmósfera ha sido fuertemente aceptado en los últimos años, pues los resultados que se han obtenido han sido cada vez más cercanos a la realidad, permitiendo incluso obtener pronósticos de variables meteorológicas con alta precisión.

El modelo SPEEDY se caracteriza por ser **eficiente en el uso de recursos computacionales**, pues resuelve las ecuaciones primitivas de la atmósfera a una resolución gruesa y además **no necesita de condiciones de borde laterales** (sólo en superficie y el tope de la atmósfera), lo que implica una menor cantidad de datos para forzar el modelo. Esto también significa que las salidas serán solamente de escala global.

↳ No locales

El uso de la asimilación de datos sobre este modelo resulta interesante para los investigadores pues al ser un modelo sencillo y liviano, permite asimilar de una forma eficiente con un conjunto de observaciones. Al independizarnos de la capacidad del modelo para realizar la asimilación nos **enfocamos netamente en la calidad / cantidad de observaciones disponibles para la asimilación**. Una red temporal y espacialmente densa de observaciones puede lograr que el modelo ajuste sus parámetros de manera frecuente y así mantener sus resultados siempre cercanos a la realidad.

Con respecto a la calidad de las observaciones, éstas pueden venir con un error desde la medición misma, es por esto que es conveniente considerar el error desde un principio y estimar su propagación al momento de utilizar los datos, para así asegurar el buen funcionamiento de la asimilación generada.

El principal objetivo de este trabajo es caracterizar y lograr familiarizarse con el modelo SPEEDY y relacionarlo (ejecutarlo) con una asimilación de datos utilizando el método de LETKF (Filtro Kalman de Transformación de Ensemble Local). Todo esto con el objeto de poder transmitir los conocimientos aprendidos a través de un manual de usuario.

Control de  
velocidad

## 2.- Marco Teórico

En este trabajo se pueden identificar dos herramientas numéricas cada vez más utilizadas en el estudio de las ciencias atmosféricas, el modelo atmosférico global SPEEDY y el método de asimilación de datos “**Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF)**”. Cada una de ellas posee sus propias características y funciones, y en este estudio es de gran importancia conocerlas para llevar a cabo el proceso de acoplación de ambas.

### 2.1.- Modelo Speedy

El uso de modelos numéricos ha permitido a través de la computación poder representar de una manera idealizada los procesos que ocurren en la atmósfera. El funcionamiento básico de los modelos proviene de la discretización de las ecuaciones primitivas que gobiernan la atmósfera.

El avance de esta herramienta ha sido rápido en los últimos 50 años, ligado principalmente al fuerte desarrollo computacional que ha ocurrido, pues las bases teóricas de la modelación fueron desarrolladas en los años 50’.

Los avances de los modelos numéricos se han restringido principalmente al aumento de la resolución espacial a la que se discretizan las ecuaciones, lo que conlleva una mejor caracterización del comportamiento de la atmósfera, pues al aumentar la resolución, entran en juego fenómenos de pequeña escala que son parte de la meteorología y que afectan directamente a la población.

La principal restricción de los modelos es definir con precisión las condiciones iniciales que lo fuerzan, **para el caso de un modelo global, esta es la única condición del modelo** y se puede trabajar perfectamente con resoluciones espaciales bajas (cientos de kilómetros), en cambio cuando se trata de modelos regionales, además de las condiciones iniciales, se deben determinar con precisión **condiciones de borde que limiten geográficamente el modelo**, esto permite (y exige) trabajar con resoluciones más altas, pues se deben resolver fenómenos de pequeña escala.

El modelo **SPEEDY** (que significa “**Simplified Parametrizations, primitive-Equation DYNamics**”) se clasifica dentro de los modelos **globales**, es decir, resuelve las ecuaciones primitivas para resoluciones gruesas y a escala global, sin condiciones de borde. Entre los modelos globales que existen, el SPEEDY se considera como un modelo climático que simula fenómenos en un ambiente simplificado y fácil de controlar [Molteni, 2003], lo que se traduce en un uso eficiente de los recursos computacionales.

Técnicamente, el modelo está hecho en base a un núcleo dinámico espectral desarrollado en el “Geophysics Fluid Dynamics Laboratory” [Held and Suarez, 1994]. Es **hidrostático**, posee una resolución horizontal espectral definida en T30L7 que significa una truncación triangular espectral de **30 números de onda en la horizontal y 7 niveles verticales definidos en coordenadas  $\sigma$**  (incluyendo el tope y la superficie).



### 2.1.1 Parametrizaciones Físicas (Molteni, 2003)

Las ecuaciones primitivas de la atmósfera no son suficientes para describir algunos fenómenos meteorológicos importantes para circulación global. Para el uso del modelo SPEEDY se ha desarrollado un conjunto de esquemas pensados en la simplicidad del modelo (pocos niveles verticales) y que describen los siguientes procesos:

- Convección: Esquema simplificado de flujo de masa se activa cuando la inestabilidad condicional está presente y cuando la humedad en la capa límite planetaria supera un umbral.
- Condensación de gran escala: Cuando la humedad relativa excede un umbral que depende de los niveles  $\sigma$ , la humedad específica es relajada hasta un cierto umbral en una escala de tiempo de 4 horas, y el contenido de calor latente removido de la atmósfera es convertido en energía estática seca.
- Nubes: La cubierta de nubes y espesor se define **a partir de valores de humedad relativa y absoluta en la columna de aire (excluyendo la capa límite).**
- Radiación de onda corta: Usa dos bandas espectrales, una de ellas representa la porción del infrarrojo cercano. La radiación es reflejada en el tope de la nube y en la superficie, el albedo es proporcional a la cubierta total de nubes. La transmitividad de la radiación de onda corta **es función de la masa de la capa, de la humedad específica y de la cubierta de nubes.**
- Radiación de onda larga: Usa cuatro bandas espectrales, una para la “ventana” atmosférica y las otras para las regiones espectrales que absorben el vapor de agua y el dióxido de carbono. La transmitividad en las cuatro bandas es definida **en función de la masa y la humedad de cada capa.** El efecto de las nubes es representado en la disminución de la transmisividad en la ventana atmosférica.
- Flujos superficiales de momento y energía: Son definidos con fórmulas empíricas aerodinámicas con diferentes coeficientes de intercambio entre tierra y océano. Un índice de estabilidad simple define los coeficientes de los flujos de calor sensible y latente. El flujo de momento sobre la tierra depende de la altura topográfica.
- Difusión vertical: Redistribuye la energía estática seca y humedad entre los dos niveles más bajos para simular la convección superficial en zonas de inestabilidad condicional; difunde el vapor de agua en condiciones estables que actúa en la troposfera baja, dependiente del perfil vertical de humedad relativa y finalmente difunde la energía estática seca en caso de que la tasa de enfriamiento se acerque (o exceda) el límite adiabático-seco.

### 2.1.2 Condiciones de Borde (Superficie y Tope de la Atmósfera)

Como cualquier modelo numérico atmosférico, se requiere de condiciones de borde para determinar los flujos radiativos y turbulentos. Como ya hemos visto, el modelo SPEEDY al ser global no necesita datos de condiciones de borde laterales, pero **sí necesita para los límites superiores (tope de la atmósfera) e inferiores (superficie).**

Para el caso de la superficie, adicionalmente a la topografía y la máscara tierra – océano, se requieren campos climatológicos de las siguientes variables:

- Temperatura superficial del mar (TSM)
- Fracción de hielo en el océano
- Temperatura superficial sobre la primera capa de suelo (10 cm)
- Humedad en la primera capa del suelo
- Profundidad de la capa de nieve
- Albedo en superficie libre de vegetación o nieve.
- Fracción de tierra cubierta por vegetación



→ duda: preguntar

Para los últimos dos campos se utilizan valores promedios anuales, mientras que los otros campos se encuentran en forma mensual (con una **interpolación** se llega a valores diarios). Todos estos campos fueron obtenidos promediando los datos del reanálisis “European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (**ECMWF**) también conocidos como **ERA** [Gibson et al., 1997], para el período 1981 – 1990 para tener un mejor balance entre los eventos cálidos y fríos del ENSO en los campos de TSM.

Para el tope de la atmósfera (límite superior), el flujo entrante de radiación solar se calcula diariamente a partir de fórmulas astronómicas (el modelo no incluye ciclo diario). Se utilizan funciones empíricas que varían estacionalmente para estimar la radiación absorbida por la capa de ozono en la estratósfera.

## 2.2.- Filtro Kalman

Como se ha mencionado en la descripción del modelo SPEEDY, las condiciones iniciales son un factor importante al momento de definir el pre-procesamiento de la simulación, pues gran parte del desempeño de la simulación dependerá de la densidad y calidad de la red observacional con que se inicialice.

La **asimilación de datos** es un acercamiento iterativo al problema de estimar el estado de un sistema dinámico utilizando observaciones del estado actual y pasado del sistema, junto con un modelo para la evolución en el tiempo del sistema. Esto se realiza de forma continua, alternando iterativamente entre un paso de pronóstico y un estado de estimación del estado; el último paso se denomina comúnmente el “análisis”. El paso de análisis combina información de los datos actuales y de un pronóstico de corto plazo (a priori), produciendo una estimación del estado actual. Esta estimación es usada para inicializar el próximo pronóstico de corto plazo, el cual es más tarde usado en el próximo análisis, y así.

La asimilación de datos es ampliamente usada para estudiar y pronosticar sistemas geofísicos. El paso de análisis es generalmente un procedimiento estadístico que implica una estimación a priori (“background”) del estado actual basándose en datos del pasado, y datos actuales (“observaciones”) que son usados para mejorar la estimación del estado. Uno de los **métodos de análisis** que ha sido implementado exitosamente en un amplio rango de aplicaciones y que ha sido por mucho tiempo considerado para la asimilación de datos atmosféricos es el **Filtro Kalman** [Kalman, 1960]. Sin embargo, a pesar de su popularidad, el costo computacional que éste método involucra no permite su implementación operacional para pronósticos del tiempo en el futuro pronosticable. Una forma de reducir este costo es utilizar un ensamble de pronósticos (en vez de solo uno); en los esquemas de asimilación de ensamble de datos, el ensamble de pronósticos (background) es generado por la evolución de un conjunto de condiciones iniciales distribuidas de acuerdo al resultado del análisis previo. Usar esta información en el procedimiento de asimilación de datos tiene el potencial de proporcionar mejores condiciones iniciales, para el pronóstico principal y para el ensamble o conjunto de pronósticos. Esto corresponde a una variante del Filtro Kalman (KF) y se conoce como **Filtro Kalman de Ensamble** (EKF). La meta de un EKF es generar, en intervalos regulares de tiempo, un análisis de ensamble, es decir, un conjunto de estados del modelo que refleje una estimación del estado real de la atmósfera (a través del promedio del ensamble) y la incerteza de su estimación (a través de la dispersión del ensamble) [Harlim & Hunt, 2005].

Un tipo de esquema de Filtro Kalman de Ensamble es el **Filtro Kalman de Ensamble Local** (LEKF). En el LEKF el estado de análisis se obtiene desarrollando un “análisis local” en cada punto de grilla del modelo. Cada análisis local considera sólo las observaciones dentro de una región local en torno al punto de grilla, y por lo tanto la elección del tamaño de las regiones locales deberían reflejar la distancia sobre la cual las correlaciones dinámicas representadas por el ensamble son significativas. La localización mejora la eficiencia del esquema, ya que cada análisis local involucra



muchos menos datos que un análisis global, y el análisis local puede calcularse de forma independiente en paralelo. De esta forma, para ensambles de dimensión  $k$ , el LEKF desarrolla un análisis en un espacio  $E$  de dimensión  $k-1$ , usando una base ortonormal compuesta de vectores propios de la matriz de covarianza del background. Ahora, si se desarrolla el análisis en un espacio  $S$  de dimensión  $k$  con las perturbaciones del ensamble del background como la “base”, el LEKF se vuelve más eficiente. Este método de análisis más eficiente se denomina **Filtro Kalman de Transformación de Ensamble Local** (LETKF).

El LETKF es utilizado en el modelo SPEEDY como un método de asimilación de datos, junto con el método de 3DVar. En este trabajo se mostrará el procedimiento a seguir para realizar una asimilación de datos utilizando el método de Filtro Kalman mencionado.



### 3.- Manual de usuario

#### 3.1.- Cómo usar modelo SPEEDY

El modelo SPEEDY viene en un archivo comprimido llamado *02\_SPEEDY.zip*, el cual contiene en su interior todas las carpetas necesarias para llevar a cabo la simulación numérica con SPEEDY y también dos métodos de asimilación. En el siguiente esquema se puede visualizar las rutas de las carpetas que contienen el archivo comprimido y sus respectivas características (y funciones).

	Carpetas	Componentes	Características
SPEEDY	model	data	Condiciones de borde
		run	Componentes de ejecución del modelo
		source	Código de fuente del modelo
		update	Código de fuente modificable por el usuario
		tmp	Directorio donde se ejecuta el modelo (se copian archivos desde source, update y ver32.input)
		ver32.input	Componentes que fijan las constantes y parámetros de paso de tiempo
	obs	-	Observaciones utilizadas tanto para condiciones iniciales como para asimilación de datos. Pueden ser creadas u obtenidas.
	truth	-	Resultados de las simulaciones
ASIMILACIÓN	DAS_RESULT	letkf	Resultados asimilación LETKF
		3dvar	Resultados asimilación 3DVAR
	LETKF	-	Comandos ejecutables y funciones para realizar la asimilación con LETKF
	TDVAR	-	Comandos ejecutables y funciones para realizar la asimilación con 3DVAR

Esquema 1: Carpetas que componen el archivo 02\_SPEEDY.zip, su respectiva ruta, características y funciones.

Este archivo se puede descomprimir en cualquier lugar del computador, pero éste debe cumplir con una serie de requisitos en términos de software para dar un correcto funcionamiento al modelo. Por otro lado, se debe tener especial cuidado al momento de definir en el pre-procesamiento del modelo la ruta de los archivos de la carpeta del modelo.

### 3.1.1 Requerimientos computacionales

Para poder utilizar el modelo se requiere tener un sistema operativo de tipo **UNIX** (software libre) y además alguno de los siguientes compiladores integrados, pues el modelo funciona principalmente con funciones fortran (77, 90 o 95):

- ifort
- gfortran
- gp

Para saber si es que se tiene o no alguno de estos compiladores se puede utilizar el comando *which* en la consola de Linux, el cual indicará, en caso de que exista, la ubicación del compilador en el sistema. El que usamos en este trabajo fue gfortran, pues es un software libre (de no pago).

Para graficar las salidas del modelo se utiliza el software GrADS (Grid Analysis and Display System), pues se encuentran en un formato **.grd**, los que a su vez dependen de archivos **.ctl** también integrados en el modelo. Este programa también es un software libre. Finalmente, para las salidas se deben considerar por lo menos unos 10GB de espacio disponible, para evitar cualquier inconveniente en su almacenamiento.

### 3.2.2 Uso del modelo SPEEDY

Luego de descomponer la carpeta del modelo en nuestro computador, se puede lanzar la primera simulación siguiendo los siguientes pasos:

>> Abrir consola UNIX

```
usuario@ubuntu:~$ cd SPEEDY/model/run  
#donde se encuentran los ejecutables del modelo
```

```
usuario@ubuntu:~$ ls  
run_cycle.sh run_nature.sh  
#están los ejecutables para correr el modelo, se deben modificar para los requerimientos del  
#usuario
```

```
usuario@ubuntu:~$ chmod a+x run_cycle.sh  
usuario@ubuntu:~$ chmod a+x run_nature.sh  
#además se les debe dar permiso de ejecución
```

>> Modificación archivo run\_cycle.sh

**usuario@ubuntu:~\$ gedit run\_cycle.sh**

→ Modificación de la ruta

SPEEDY=/home/\${USER}/02\_SPEEDY/SPEEDY\_DA  
DIR=/home/\${USER}/02\_SPEEDY/SPEEDY\_DA/truth

→ Modificación del compilador

#Compiler 1) ifort 2) gfortran 3)pg  
compiler=2 (depende del compilador que tenga en su computador)

→ Modificación de la fecha (se muestran valores por default)

# Initial date	# Final date
IYYYY=1982	EYYYY=1982
IMM=01	EMM=02
IDD=01	EDD=28
IHH=00	EHH=18

→ Modificación del archivo cls\_instep.h

**usuario@ubuntu:~\$ gedit ../update/cls\_instep\_nature.h**

#En este archivo se definen las constantes de integración y de pasos de tiempo del modelo.

NMONTS = 1  
NDAYSL = 0  
NSTEPS = 36

>> Modificación archivo run\_nature.sh

**usuario@ubuntu:~\$ gedit run\_nature.sh**

La diferencia de este archivo con run\_cycle.sh es que realiza la simulación de un período de tiempo completo sin realizar ciclos. Se le aplican los mismos cambios, con la diferencia que la modificación de la fecha sólo se puede realizar sobre la fecha inicial.

Ambas formas de ejecutar el modelo (cycle y nature) utilizan una carpeta llamada tmp (*SPEEDY/model/tmp*) para funcionar, es ahí donde se copian todos los ejecutables del modelo desde las carpetas ver32.input, source y update.

#define el directorio /tmp e ingresa a este para realizar todos los procesos de construcción del modelo



```
TMPDIR=$SPEEDY/model/tmp
cd $TMPDIR
#BUILD SPEEDY MODEL
```

#copia los códigos de fuente a la carpeta /tmp



```
cp $SPEEDY/model/source/*.h ./
cp $SPEEDY/model/source/*.f ./
cp $SPEEDY/model/source/*.s ./
```

#copia parámetros necesarios para la ejecución del modelo.



```
mv par_horres_t30.h atparam.h
mv par_verres.h atparam1.h
```

#copia los códigos para considerar las condiciones iniciales y condiciones de borde.



```
cp $SPEEDY/model/ver32.input/cls_*.h ./
cp $SPEEDY/model/ver32.input/infiles.s ./
```

#copia los códigos de fuente modificables del modelo, por ejemplo el cls\_instep.h



```
cp $SPEEDY/model/update/*.h ./
cp -f ./cls_instep_nature.h cls_instep.h
cp $SPEEDY/model/update/*.f ./
```

#copia compiladores fortran dependiendo del tipo de compilador que se tenga en el computador.



```
case $compiler in
1) cp ${model}/update/makefile.ifort ./makefile;;
2) cp ${model}/update/makefile.gfortran ./makefile;;
3) cp ${model}/update/makefile.pg ./makefile;;
*) echo "Bad Compiler number !!!";exit ;;
esac
```

Para los archivos de entrada (CI y CB) se utiliza el comando sh infiles.s t30, donde se define que las observaciones utilizadas para las CI y CB tienen una resolución t30. Finalmente, para ejecutar ambos casos el ejecutable utiliza el comando time ./imp.exe, y los detalles de su ejecución quedan guardados en un archivo llamado **out.lis**.

Todos los archivos de salida vienen en el formato \$YYYY\$MM\$DD\$HH.grd. pero para no recargar la carpeta tmp éstos valores se mueven a la carpeta truth ubicada en la carpeta principal del modelo.

### 3.2.- Cómo asimilar datos utilizando FK

El modelo SPEEDY tiene implementados dos métodos para la asimilación de datos. Uno de ellos es el método 3DVar, el cual no fue utilizado para efectos de este trabajo. El otro método es una variante del Filtro Kalman: El Filtro Kalman de Transformación de Ensamble Local (LETKF). Nosotros trabajamos con este último.

Para poder realizar una asimilación de datos utilizando el método de LETKF se debe entrar al directorio `\letkf` (ver esquema 1). Dentro de este directorio hay diversos archivos que son importantes:

- `letkf.sh`
- `letkf_response.sh`
- `common_speedy.f90`
- `ex_obs.f90`
- `obsmark.gs`

En todos estos archivos se modificó alguna línea que permitió la realización de la asimilación.

#### 3.2.1 Iniciar ciclo de asimilación

Hay 2 archivos que se pueden ejecutar para iniciar la asimilación. Si se desea realizar solo una asimilación se debe ejecutar el archivo `letkf_response.sh`, mientras que si se desea realizar un ciclo de asimilación se ejecutará `letkf.sh`. En nuestro caso, se realizó un ciclo de asimilación. A continuación se detallan los pasos que se deben seguir para poder ejecutar un ciclo de asimilación utilizando el método de LETKF:

- Lo primero que se debe hacer es entrar a la carpeta `\letkf` que contiene todos los archivos importantes mencionados.

```
>> usuario@ubuntu:~/SPEEDY_DA/letkf$ ls
```

```

danveloso@danveloso-Inspiron-3437: ~/SPEEDY_DA/letkf
danveloso@ubuntu:~/SPEEDY_DA/letkf$ ls
2
analysis.ctl      ensmean.o        fort.22.sup      mt19937ar.o
cls_instep.h      ensmean.sh       gridmark.gs      netlib.f
common.f90        ens_mean_spread.sh gues.ctl         netlib.o
common_letkf.f90  ens_mean_spread.sh~ gues_spread.ctl  nohup.out
common_letkf.o    ex_obs2.sh       help.gfortran    obsmark.gs
common_mtx.f90    ex_obs_expfull.f90 help.ifort        out.lis
common_mtx.o      ex_obs_expnoq.f90 initial          out_p.ctl
common.o          ex_obs_expnot.f90 letkf            out_sigma.ctl
common_speedy.f90 ex_obs_expnouv.f90 letkf.f90        parm.txt
common_speedy.o   ex_obs.f90       letkf.o          rmse_energy.f90
cp_ini.sh         ex_obs.f90~      letkf_response.sh rmse_energy.sh
create_obs        ex_obs_full.f90  letkf.sh         rmse_zm.ctl
create_obs.f90    ex_obs.sh        letkf.sh~        rmse_zm.f90
create_obs.sh     ex_obs_sup.f90   letkf_tools.f90  rmse_zm.sh
create_obs.sh~    exp.sh           letkf_tools.f90~ timeinc.sh
ensmean           fort.21          letkf_tools.o    log.txt
ensmean.f90       fort.22          mt19937ar.f90   mt19937ar.o
ensmean.o         fort.22.full     mt19937ar.o

```

Figura 1: “Pantallazo” del contenido del directorio \letkf.

- Luego se deben asignar los permisos de ejecución al archivo *letkf.sh*

>> **usuario@ubuntu:~/SPEEDY\_DA/letkf\$** *chmod a+x letkf.sh*

- Antes de ejecutar el archivo, se debe abrir con algún editor de textos (*gedit*, por ejemplo) y se deben definir algunos parámetros importantes, entre ellos el periodo de tiempo que se va a asimilar, y el compilador (ver mayores detalles en la sección 3.1.1 sobre el compilador).
- Para ejecutar el archivo e iniciar la asimilación se debe escribir

>> **usuario@ubuntu:~/SPEEDY\_DA/letkf\$** *./letkf.sh nombre\_experimento*

Donde *nombre\_experimento* es un argumento que se ingresa para *letkf.sh*, correspondiente al nombre de la carpeta donde se guardarán las salidas que se obtengan de la asimilación. Esta carpeta se creará en la ruta *~/SPEEDY\_DA/DAS\_result/letkf/nombre\_experimento*

En este caso, el archivo *letkf.sh* utiliza un interpretador de comandos shell *sh* (Bourne shell). Esto puede provocar que se obtenga el siguiente error al ejecutarlo.

*/letkf.sh: 18: ./letkf.sh: source: not found*

Si esto ocurre, se debe cambiar el shell *sh* en el encabezado del archivo por otro interpretador de comandos, por ejemplo, el shell *bash*

`#!/bin/sh → #!/bin/bash`

- Al ejecutar nuevamente `letkf.sh` luego de los cambios realizados, es posible que se produzcan un par de errores relacionados con los permisos de ejecución de algunos ejecutables que son llamados por el archivo y con el interpretador de comandos. Para solucionarlo se deben repetir algunos de los pasos anteriormente mencionados sobre aquellos archivos.
- Así, si se ejecuta nuevamente el archivo `letkf.sh` se iniciará el ciclo de asimilación, y se podrá observar en pantalla su progreso

```
>>>END BUILDING SPEEDY MODEL
>>>BEGIN COMPUTATION OF 1982/01/01/00
finish forecast of ensemble number, 01
finish forecast of ensemble number, 02
finish forecast of ensemble number, 03
finish forecast of ensemble number, 04
finish forecast of ensemble number, 05
finish forecast of ensemble number, 06
finish forecast of ensemble number, 07
finish forecast of ensemble number, 08
finish forecast of ensemble number, 09
finish forecast of ensemble number, 10
finish forecast of ensemble number, 11
finish forecast of ensemble number, 12
finish forecast of ensemble number, 13
finish forecast of ensemble number, 14
finish forecast of ensemble number, 15
finish forecast of ensemble number, 16
finish forecast of ensemble number, 17
finish forecast of ensemble number, 18
finish forecast of ensemble number, 19
finish forecast of ensemble number, 20
finish forecast of ensemble number, 21
finish forecast of ensemble number, 22
finish forecast of ensemble number, 23
finish forecast of ensemble number, 24
finish forecast of ensemble number, 25
finish forecast of ensemble number, 26
finish forecast of ensemble number, 27
finish forecast of ensemble number, 28
finish forecast of ensemble number, 29
finish forecast of ensemble number, 30
calculate mean state and spread for
1982010100
calculate mean state and spread for
1982010106
LETKF assimilation...
real    3m34.064s
user    3m33.457s
sys     0m0.275s
NORMAL END
```

Figura 2: Progreso del ciclo de asimilación del método de asimilación de LETKF del modelo SPEEDY.

### 3.2.2 Cambios en la red observacional

El desempeño de una asimilación de datos en mejorar las condiciones iniciales en un determinado lugar depende en parte de la red observacional asimilada, es decir, depende de la densidad de observaciones (distribución en el espacio), y del muestreo temporal.

En el caso del modelo SPEEDY y su método de asimilación LETKF, es posible modificar la red observacional que se desea utilizar para la asimilación. Para ello se debe recurrir al archivo *ex\_obs.f90* (mencionado al inicio de esta sección).

```
1 PROGRAM ex_obs
2   IMPLICIT NONE
3
4   LOGICAL,PARAMETER :: msw_test=.FALSE.
5   LOGICAL,PARAMETER :: msw_real=.FALSE.
6   LOGICAL,PARAMETER :: msw_dnsobs=.TRUE.
7   INTEGER,PARAMETER :: nlon=96
8   INTEGER,PARAMETER :: nlat=48
9   INTEGER,PARAMETER :: nlev=7
10
11  INTEGER :: ilon,ilat,ios
12  CHARACTER(10) :: ctmp1,ctmp2
13  INTEGER :: i,j,k
14
15  INTEGER :: ex_u(nlon,nlat,nlev) = 0
16  INTEGER :: ex_v(nlon,nlat,nlev) = 0
17  INTEGER :: ex_t(nlon,nlat,nlev) = 0
18  INTEGER :: ex_q(nlon,nlat,nlev) = 0
19  INTEGER :: ex_ps(nlon,nlat) = 0
20  INTEGER :: ex_prec(nlon,nlat) = 0
21
22  IF (msw_test) THEN
23    ex_u(71,12,4) = 1
24  ELSE IF (msw_real) THEN
25    OPEN(10,file='obsmark.gs')
26    READ(10,'(A)')
27    READ(10,'(A)')
28    READ(10,'(A)')
29    READ(10,'(A)')
30    READ(10,'(A)')
31    READ(10,'(A)')
32    DO
33      READ(10,'(A10,I2,A1,I2)',IOSTAT=ios) ctmp1,ilon,ctmp2,ilat
34      IF( ios /= 0 ) EXIT
35    !   PRINT *,ilon,ilat,ios
36    ex_u(ilon,ilat,1:nlev) = 1
```

Figura 3: Contenido del archivo *ex\_obs.sh*

El modelo permite crear una red observacional de 3 formas diferentes, según el valor lógico que se le asigne a los primeros 3 parámetros del script de fortran *ex\_obs.f90* (Figura 3, líneas 4-6):



- I. Una observación de una variable individual en un nivel de altura y en un punto de grilla (observación puntual).

Para poder realizar la asimilación de una observación en un punto se debe modificar el valor lógico de los parámetros mencionados, de la siguiente manera:

```
msw_test = .TRUE.
```

```
msw_real = .FALSE.
```

```
msw_dnsobs = .FALSE.
```

La posición espacial de la variable que se asimilará (en longitud, latitud, y nivel de altura) se puede indicar en la línea 23 del script *ex\_obs.f90* (Figura 3).

- II. Una red de observaciones de radiosonda (una variedad de variables atmosféricas, con distintos puntos de observaciones, con mediciones a distintos niveles de altura).

Para asimilar una red de observaciones de radiosonda, en distintos puntos del planeta distribuidos de manera no uniforme, se necesita de otro archivo más (mencionado dentro de los archivos importantes al inicio de la sección): el *obsmark.gs*. Este archivo contiene una red realística de estaciones de observación, correspondiente a los puntos desde donde se realizan lanzamientos de radiosonda de forma regular (1-2 veces al día). En total son 415 estaciones, las que están fundamentalmente sobre tierra. Los puntos ingresados en este archivo están indicados respecto a la posición dentro de un vector de latitud y longitud (considerando que van de -90 a 90 y de 0 a 360, respectivamente). Para poder saber a qué valor de latitud y longitud corresponde cada una de las posiciones, se debe revisar el archivo *common\_speedy.f90*, en donde están indicados los valores en cada posición de los vectores de latitud y longitud (figura 4).

De esta forma uno puede correr un ciclo de asimilación de una red de estaciones en distintos puntos si define de la siguiente forma los parámetros lógicos del archivo *ex\_obs.sh*:

```
msw_test = .FALSE.
```

```
msw_real = .TRUE.
```

```
msw_dnsobs = .FALSE.
```

Además, se debe modificar el parámetro *test* en la línea 18 del script de *letkf\_tools.f90* (no mostrado en figura), escribiendo:

```
test = .FALSE.
```

```

34  INTEGER,SAVE :: ex_obs_t(nlon,nlat,nlev)
35  INTEGER,SAVE :: ex_obs_q(nlon,nlat,nlev)
36  INTEGER,SAVE :: ex_obs_ps(nlon,nlat)
37  REAL(r_size),PARAMETER :: obs_err_u = 1.0d0
38  REAL(r_size),PARAMETER :: obs_err_v = 1.0d0
39  REAL(r_size),PARAMETER :: obs_err_t = 1.0d0
40  REAL(r_size),PARAMETER :: obs_err_q = 1.0d-4
41  REAL(r_size),PARAMETER :: obs_err_ps = 1.0d2
42
43  REAL(r_size),ALLOCATABLE,SAVE :: obs_err(:)
44
45  CONTAINS
46  !-----
47  ! Set the parameters
48  !-----
49  SUBROUTINE set_common_speedy
50  IMPLICIT NONE
51  INTEGER :: i,j,k,iobs
52  !
53  ! Lon, Lat, Sigma
54  !
55  lon(1) = 0.0d0
56  DO i=2,nlon
57    lon(i) = lon(i-1) + 3.75d0
58  END DO
59
60  lat(1) = -87.159d0
61  lat(2) = -83.479d0
62  lat(3) = -79.777d0
63  lat(4) = -76.070d0
64  lat(5) = -72.362d0
65  lat(6) = -68.652d0

```

Figura 4: Extracto del contenido del archivo *common\_speedy.f90*. Se pueden apreciar los errores en las variables observadas (líneas 37-41), y parte de los valores de los vectores de latitud y longitud (desde línea 54 hacia abajo).

III. Una red densa de observaciones de radiosonda, con cobertura regular en todo el planeta.

Si se ingresan como opciones de parámetros lógicos del archivo

msw\_test = .FALSE.

msw\_real = .FALSE.

msw\_dnsobs = .TRUE.

Entonces se escoge la opción de asimilar observaciones regulares de radiosonda cada 2 puntos de grilla del modelo, lo que corresponde a una mayor cantidad de estaciones que el caso 2.

En este caso también se debe modificar el parámetro *test* en la línea 18 del script de *letkf\_tools.f90* (no mostrado en figura), escribiendo simplemente

test = .FALSE.

### 3.3.- Cómo graficar salidas en GrADS

Las salidas del modelo SPEEDY son en formato .grd, el cual puede por el software GrADS acompañado de un archivo en formato .ctl que contiene las características y las variables contenidas en los archivos de salida.

Las salidas de la simulación asimilada con observaciones se encuentran en la carpeta (para el caso del promedio):

```
/home/$USER/SPEEDY_DA/DAS_result/letkf/nombreproyecto/analf/mean/
```

En esa carpeta se abre GrADS

```
usuario@ubuntu:~/SPEEDY_DA/DAS_result/letkf/nombreproyecto/analf/mean/$ grads
```

```
gs -> open 1982010100_p.ctl      # abrir el archivo que contiene la información para leer los .grd
```

```
Scanning description file: 1982010100_p.ctl
Data file %y4%m2%d2%h2_p.grd is open as file 1
LON set to 0 360
LAT set to -87.159 87.159
LEV set to 925 925
Time values set: 1982:1:1:0 1982:1:1:0
E set to 1 1
```

```
gs -> q file                      # ver características del archivo
```

```
File 1 : SPEEDY MODEL OUTPUT
Descriptor: 1982010100_p.ctl
Binary: %y4%m2%d2%h2_p.grd
Type = Gridded
Xsize = 96 Ysize = 48 Zsize = 7 Tsize = 370 Esize = 1
Number of Variables = 6
  u 7 99 U-wind [m/s]
  v 7 99 V-wind [m/s]
  t 7 99 Temperature [K]
  q 7 99 Specific Humidity [kg/kg]
  z 7 99 Geopotential Height [m]
  ps 0 99 Surface Pressure [Pa]
```

```
ga-> set z 4                      # fijar la altura del campo en el cuarto nivel de altura (500 hPa)
```

```
LEV set to 500 500
```

```
ga-> set t 5                      # fijar el tiempo en el 5to paso de tiempo (02/01/1982 00:00hrs)
```

```
Time values set: 1982:1:2:0 1982:1:2:0
```

```

ga-> set gxout shaded           # rellena el campo de contornos en la figura

ga-> d t                        # muestra el campo de temperatura

Contouring: 230 to 270 interval 5

ga-> cbarn                     # agrega barra de escala de colores

ga-> draw title Temperatura - 500 hPa - 02/01/1982  # agrega titulo en la figura

ga-> printim temperatura.gif gif white  # guarda el archivo como archivo gif

```

Esta serie de comandos resulta en la figura 5, que es un campo de temperatura a 500 hPa para el tiempo 5 de la simulación, es decir para el 02/01/1982 a las 00:00 hrs.

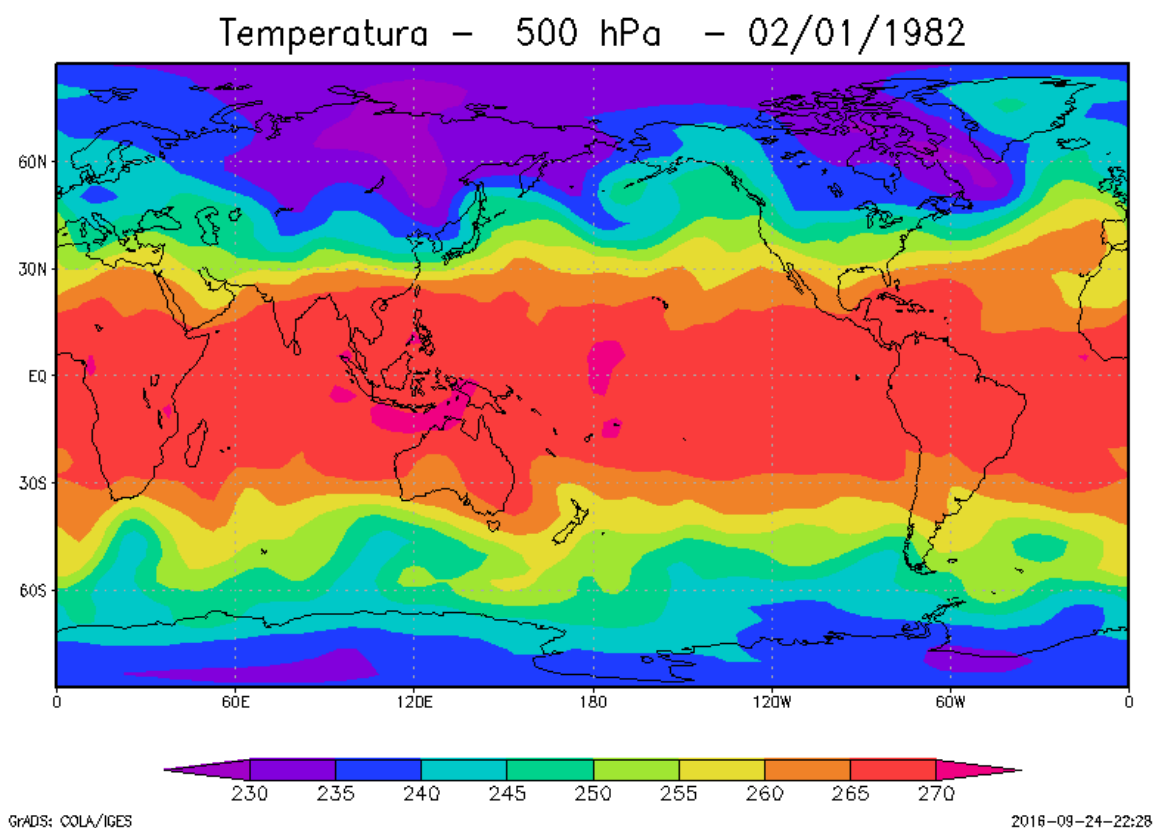


Figura 5: Campo global de temperatura a 500 hPa para el día 02/01/1982 a las 00:00 hrs.

## 4.- Resultados

Se realizaron algunas pruebas de asimilación, para distintas redes observacionales (en base a lo descrito en la sección 3.2.2), con el fin de analizar el efecto y la importancia que puede tener la red observacional en el incremento del análisis, obtenido a partir del modelo SPEEDY y del método de LETKF. Esto es lo que se llama incremento observacional o innovación, el cual se puede estimar como la diferencia entre el análisis y el pronóstico (“first guess” o “background” )

### 4.1.- Caso de ejemplo #1

Se realizó una asimilación de datos considerando una observación puntual de viento zonal a 500 hPa, en el punto de coordenadas 277.50°W, -35.55°S, como se puede ver en la figura 6.

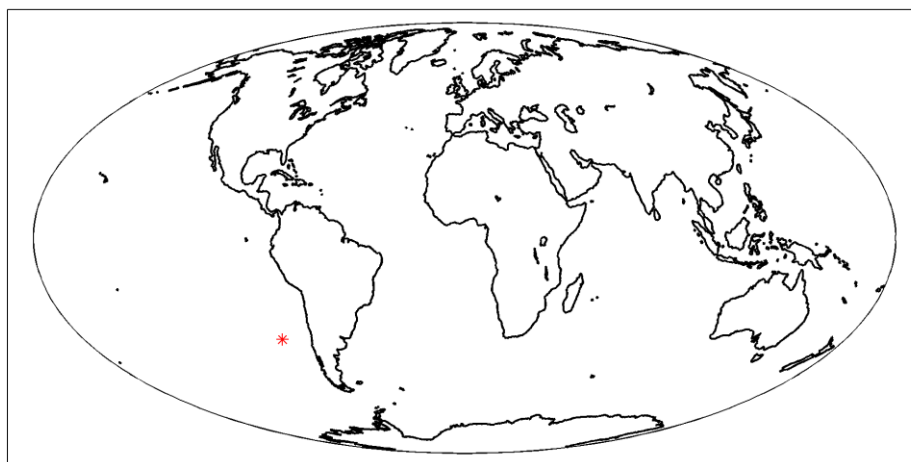


Figura 6: Ubicación geográfica de la observación de viento zonal a 500 hPa asimilada en el ejemplo #1 (asterisco rojo).

De esta manera, al finalizar la asimilación se obtienen los campos de análisis del promedio del ensamble generado por el método LETKF y el promedio del ensamble de los campos de “background”. En este caso graficamos la diferencia entre el análisis y el “background”, obteniéndose una estimación del incremento observacional.

Podemos ver de la figura 7 los contornos que indican la estimación del incremento observacional producto de la asimilación de la observación de viento. Además, el efecto de asimilar viento zonal en un punto tiene repercusiones en otra variables, independiente de si se asimilaron datos de esa variable o no. Es lo que se puede observar en la figura 7 con la temperatura a 500 hPa, donde se puede ver el incremento observacional en sombreado, siendo los colores más rojos valores positivos y los colores más azules valores negativos.

LETKF OBS LOC X:71 Y:15

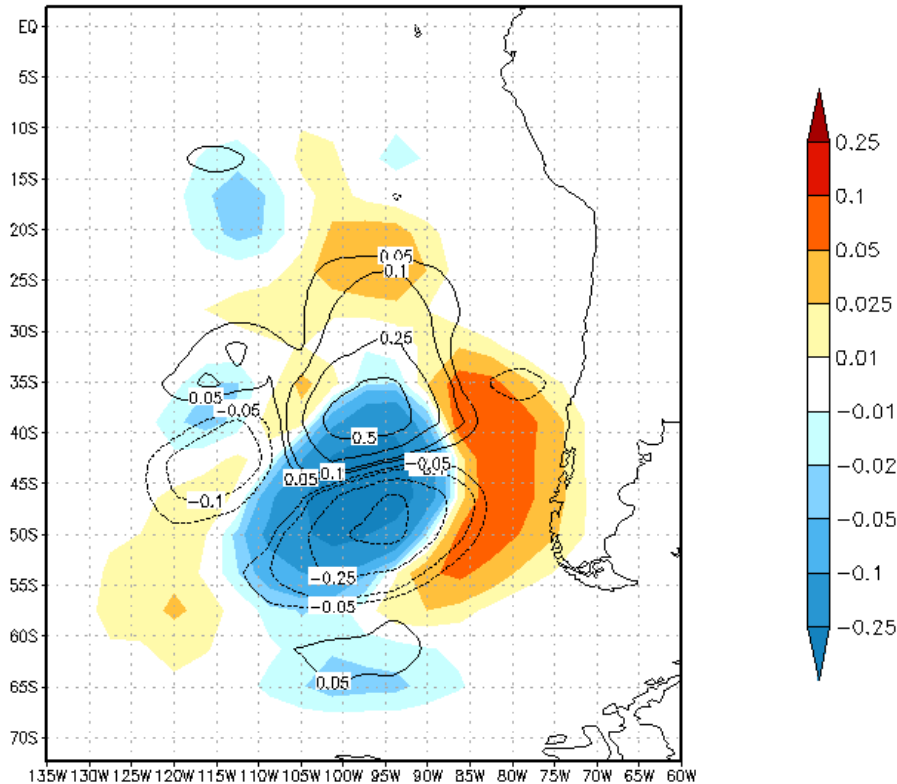


Figura 7: Campo de diferencia entre el promedio del ensamble de análisis y el promedio del ensamble de pronóstico del viento zonal a 500 hPa (observación asimilada en punto 277.50°W, -35.55°S, 500hPa) en contornos, y de la temperatura a 500 hPa en sombreado.

La innovación también puede verse en otras variables como el viento meridional y la humedad específica a 500 hPa, pero estos resultados no serán mostrados.

#### 4.2.- Caso de ejemplo #2

Como se mencionó en la sección 3.2.2, también se pueden asimilar redes de observaciones, para más de una variable, en más de un punto sobre la Tierra y para los diferentes niveles de presión que considera el modelo. Por ejemplo, se puede asimilar una red de observaciones de radiosonda en distintos puntos de la Tierra. En este caso se considera una red realística de estaciones, correspondiente a los puntos de lanzamiento regular de radiosonda de parte de los centros meteorológicos de distintos países. Esta distribución de estaciones se muestra en la figura 8.

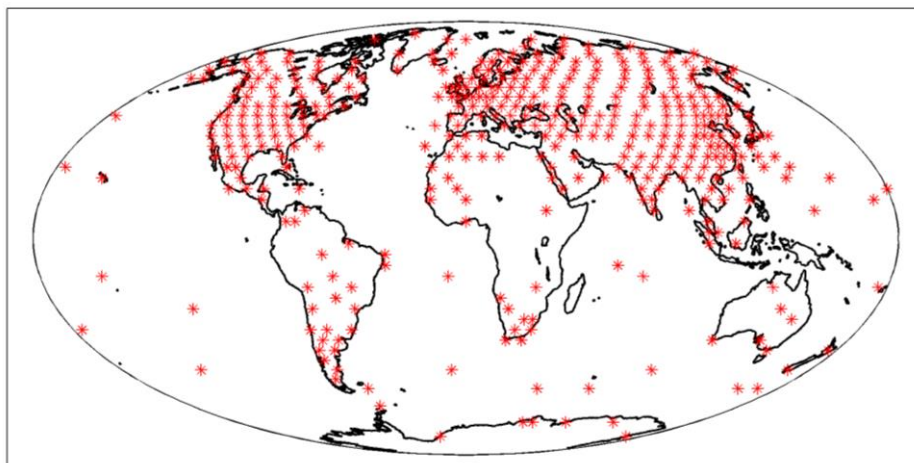


Figura 8: Ubicación geográfica de la red (realística) de estaciones de lanzamiento de radiosonda considerada para la asimilación (asteriscos rojos).

Para analizar los resultados de esta asimilación se repite el procedimiento realizado en el caso #1, haciendo la diferencia entre el promedio del ensamble del análisis y el del pronóstico. Estos resultados pueden verse para el campo de altura geopotencial a 500 hPa mostrado en la figura 9.

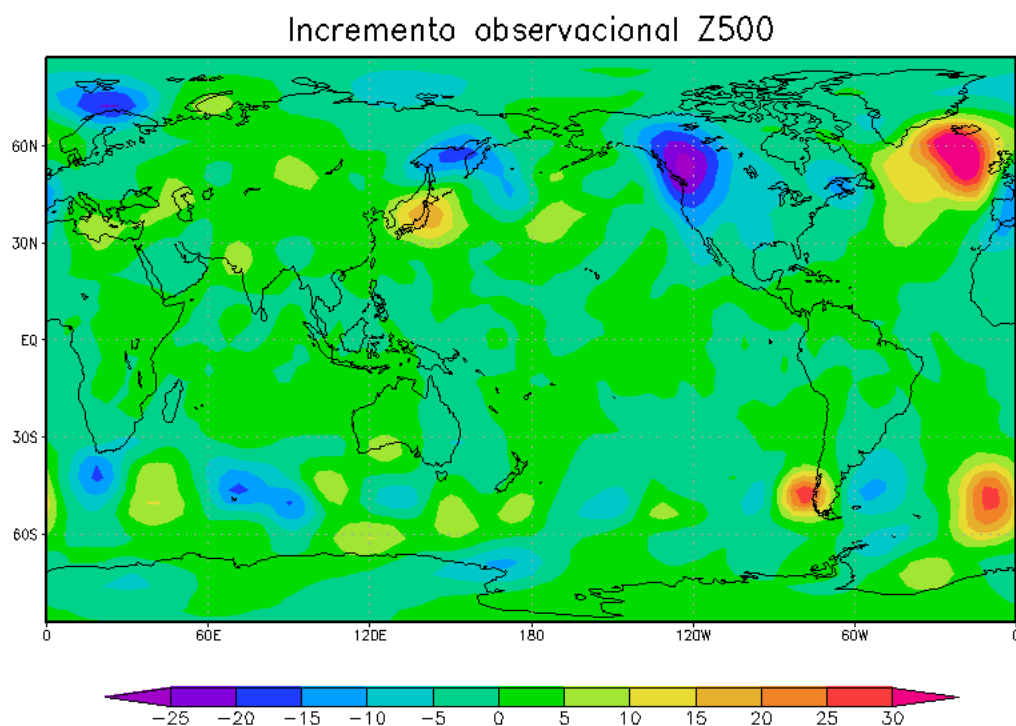


Figura 9: Campo de diferencia entre el promedio del ensamble de análisis y el de pronóstico para la altura geopotencial a 500 hPa, en el caso de la asimilación de la red observacional mostrada en la figura 8.

#### 4.3.- Caso de ejemplo #3

Se realiza también una prueba de asimilación para observaciones regulares de radiosonda cada 2 puntos de grilla del modelo, que corresponden a una red observacional más densa y homogénea que en el caso anterior. Como se ha visto, para llevar esto a cabo se debe cambiar en el archivo *ex\_obs.sh* el valor lógico del parámetro *msw\_dnsobs*.

En la figura 10 se observa la nueva red observacional con la que se asimiló la simulación. Para ver si es que existe alguna diferencia sobre la asimilación al cambiar la red observacional se calculó la diferencia entre las salidas con la red vista en el caso de ejemplo #2 y la red vista en este caso. Las salidas resultaron ser las mismas para ambas asimilaciones, el campo de diferencias fue cero. Al revisar ambos incrementos de observaciones se concluye la misma historia, no existe diferencia alguna entre ambas asimilaciones realizadas, esto indica que nuestro proceder en este experimento no fue del todo correcto, pues el cambio realizado no hizo efecto alguno.

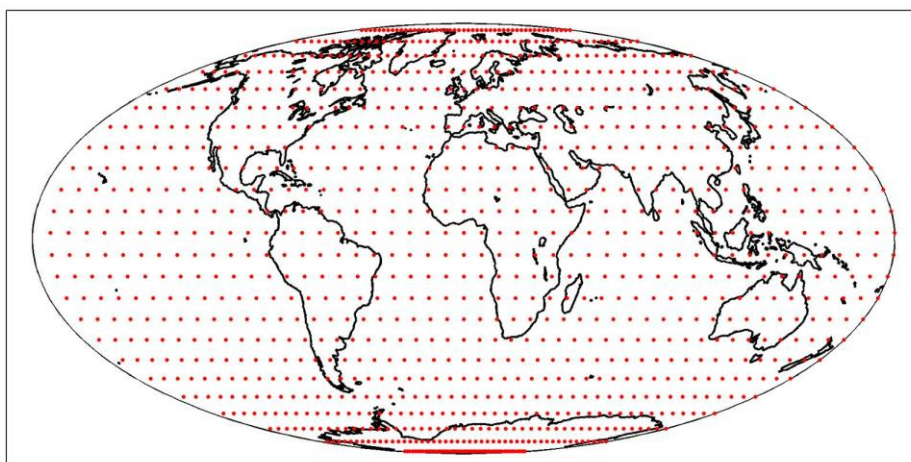


Figura 10: Ubicación geográfica de la red (generada) de estaciones de lanzamiento de radiosonda considerada para la asimilación (puntos rojos).



## 5.- Discusión

Mejorar las salidas de un modelo numérico ha sido una de las principales metas de las ciencias atmosféricas en los últimos años, es por esto que los métodos de asimilación también han tomado relevancia en este período. Hemos verificado la simpleza del uso del modelo SPEEDY en este estudio, lo que ha resultado ser oportuno para poder realizar una serie de pruebas de asimilación sin tener problemas de espacio o de alta demanda computacional. Modelos regionales como WRF son ampliamente usados para pronósticos del tiempo, sin embargo se necesita de mucho tiempo de cómputo dependiendo de la resolución utilizada y del tamaño del dominio. El modelo SPEEDY también es válido para poder realizar pronósticos, sin embargo no es el mejor modelo para realizar pronósticos operacionales debido a su resolución muy gruesa. Sin embargo, que el modelo sea de resolución gruesa le otorga ciertas ventajas, entre ellas un tiempo de cómputo más corto para poder simular. Por ejemplo, una simulación de 1 año se tarda unos 6 minutos en realizarse. De esta forma, el modelo SPEEDY podría ser bastante útil para la realización de **simulaciones climáticas**.

Se ha mostrado en los experimentos que existe un incremento observacional entre los pronósticos sin asimilar y las salidas asimiladas, pero sin saber si las salidas son mejores o peores que los pronósticos, pues ese aspecto no ha sido analizado en este trabajo. Este último punto depende de muchos factores asociados principalmente al error que posea el modelo y los datos.

Con respecto a los manuales de usuario generados para la utilización del modelo SPEEDY, la asimilación con LETKF y el software de generación de figuras GrADS, los resultados son bastante satisfactorios, pues al revisar la bibliografía disponible en la red no se ha encontrado manual alguno que explique de manera detallada los pasos para lograr una simulación asimilada en su totalidad. Cada uno de ellos se especializa en una parte del proceso total. **Se espera que este trabajo sea de gran ayuda para las personas que están empezando en el área de la asimilación con LETKF.**

## 6.- Referencias

Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Hernandez, A. Nomura, and E. Serrano, 1997: ECMWF Re\_Analysis Project Report Series. 1. ERA description. ECMWF.

Harlim, J. and Hunt, B., 2005: Local Ensemble Transform Kalman Filter: An Efficient Scheme for Assimilating Atmospheric Data, Preprint.

Held, I. M., and M. J. Suarez, 1994: A proposal for the intercomparison of the dry dynamical cores of atmospheric general circulation models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 1825–1830.

Kalman, R. 1960.: A new approach to linear filtering and prediction problems. Trans. ASME, Ser. D, J. Basic Eng. 82, 35–45.

Molteni F., 2003: Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I. Model climatology and variability in multi-decadal experiments. *Clim. Dyn.* 20: 175-191.