

# IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ACOPLADO WRF-HYDRO EN UNA CUENCA PILOTO DE MÉXICO

Proyecto TH1613.1

Informe final

**Dr. René Lobato Sánchez**

Subcoordinación de Hidrología Superficial

**M.C. Indalecio Mendoza Uribe**

Subcoordinación de Hidrometeorología

Julio de 2016

## **CONTENIDO**

- 1. Introducción**
  - 2. Bases físicas y conceptuales del sistema WRF-Hydro**
    - 2.1. Modelo de superficie del terreno NOAH**
    - 2.2. Tránsito de flujo sub-subperificial**
    - 2.3. Tránsito de flujo superficial**
    - 2.4. Tránsito de flujo por una red de canales**
    - 2.5. Tránsito de flujo en lagos y embalses**
  - 3. Instalación del WRF-Hydro en equipos de cómputo del IMTA**
    - 3.1. Configuración, compilación y corrida del sistema Hidrológico WRF-Hydro en modo desacoplado**
    - 3.2. Configuración, compilación y corrida del sistema hidrológico WRF-Hydro en modo desacoplado**
  - 4. Descripción del caso piloto**
    - 4.1. Zona de estudio: Subcuenca de los ríos de la Sierra**
    - 4.2. Estaciones climáticas e hidrométricas**
    - 4.3. Fechas para la simulación del caso piloto**
  - 5. Resultados de la simulación del modelo WRF-Hydro en las subcuencas de los ríos de la Sierra**
    - 5.1. Descripción de los experimentos**
    - 5.2. Análisis de la precipitación del WRF respecto a la observada**
    - 5.3. Análisis del gasto del WRF-Hydro respecto al observado**
    - 5.4. Análisis de la humedad del suelo simulada con el WRF-Hydro**
  - 6. Conclusiones y recomendaciones**
  - 7. Referencias**
- Anexo I Guía para correr el modelo WRF-Hydro**
- Anexo 2 Guía para el procesamiento de la malla fina**

Tabla de acrónimos y siglas

ArcGIS	ArcGIS Geographic Information System
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CEM	Continuo de Elevaciones Mexicano
Centos	Community ENTERprise Operating System
CESM	Community Earth System Model
COSMO	Consortium for Small-scale Modeling
CPC	Climate Prediction Center
CPS	Esquemas de parametrización de cúmulus
CT	Ciclón tropical
Cu	Parametrización de cúmulus
DHSVM	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model
DTRT	Paso de tiempo para calcular el tránsito
ECMWF	European Centre for Medium- Range Weather Forecasts
HRLDAS	High Resolution Land Data Assimilation System
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INFXS	Exceso de infiltración
LIS	Land Information System
LKSAT	Conductividad saturada lateral para cada tipo de suelo.
LSM	Modelo de superficie del terreno
NAM	North American Model
NetCDF	Network Common Data Format
MDE	Modelo digital de elevación
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PGI	The Portland Group, Inc.
QSUB	Flujo subterráneo
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SFHEAD	Profundidad de agua estancada.
SIU	Sistema Internacional de unidades
SMC	Contenido de humedad del suelo para cada capa del suelo.
SMCMAX	Máximo contenido de humedad del suelo para cada tipo de suelo.
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SO	Sistema operativo
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
WPS	Sistema de pre-procesamiento del WRF
WRF	Weather Research and Forecasting

ZWATTABL	Nivel freático
----------	----------------

## I. Introducción

La interacción lluvia-escurrimiento es uno de los procesos naturales más complejos de representar de forma numérica. La lluvia por su parte, requiere de conceptos de termodinámica atmosférica así como fuentes externas de humedad para poder producirse, sin embargo su alta no linealidad puede determinar su errática aparición e intensidad.

Un modelo lluvia-escurrimiento es un insumo muy relevante para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT), este tipo de modelos tienen algunas variantes pero dentro de los que mayor potencial tienen son los de tipo distribuidos que no es otra cosa más que resuelve explícitamente las ecuaciones dinámicas y de continuidad en cada nodo de malla de la resolución espacial lo más fina posible, capacidades de cómputo es un aspecto importante a considerar.

Es por ello que como un proyecto de investigación, se planteó la posibilidad de utilizar a un modelo meteorológico y otro hidrológico acoplado y analizar sus capacidades para fines de uso en un SAT. En este proceso de uso de los mejores modelos, se encontró a la dupla de modelos WRF-Hydro donde existe un amplio número de publicaciones científicas que hacen referencia a las diversas aplicaciones donde ya sea en forma aislada o acoplada cada uno de estos modelos muestra el amplio uso y soporte.

De la misma manera, se consideró como una cuenca piloto para su estudio a una cuenca relativamente pequeña con nula instrumentación o equipamiento hidráulico como una presa hidroeléctrica o presas derivadoras, la cuenca de los ríos de la Sierra fue considerada para tal propósito.

En el informe se describe el caso de estudio en la cuenca piloto así como la descripción de los ajustes en los parámetros y en las opciones utilizadas para realizar los experimentos numéricos.

El proyecto muestra que el modelo WRF-Hydro puede ser una herramienta poderosa para simular el caudal en la cuenca de los ríos de La Sierra, como se identifica a partir del análisis de los resultados modelados, y puede consolidar el pronóstico operativo de condiciones extremas del gasto que apoye en la gestión oportuna del riesgo relacionada con inundaciones.

El modelo WRF-Hydro es un sistema hidrológico distribuido (Gochis, *et al.*, 2015), con bases físicas, desarrollado desde el 2003 en el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Cuenta con la capacidad de mejorar la simulación de la hidrología terrestre y de flujos de energía y humedad del terreno representado en mallas regulares finas (de cientos a decenas de metros). Se instala y ejecuta en equipos de cómputo básicos y de alto desempeño que cuenten con sistema operativo GNU/Linux. Corre en modalidad acoplada y desacoplada a un modelo atmosférico o terrestre.

Cuando se corre en modo desacoplado ('independiente' u '*offline*'), el WRF-Hydro activa el modelo de superficie del terreno Noah (Ek *et al.*, 2003), inducido por el *High Resolution Land Data Assimilation System* (HRLDAS), para calcular las variables de estado que requiere el WRF-Hydro para realizar el cálculo de los tránsitos de flujo sub-superficial, superficial y en la red de canales. Los datos

meteorológicos de entrada, pre-procesados en el formato que utiliza el modelo, pueden provenir de datos medidos o generados con modelos atmosféricos, como por ejemplo el *European Centre for Medium- Range Weather Forecasts (ECMWF)*, el *Weather Research and Forecasting (WRF)* o el *Consortium for Small-scale Modeling (COSMO)*.

El WRF-Hydro cuando se corre en modo acoplado al modelo atmosférico WRF, toma los resultados de las variables calculadas con el modelo de superficie del terreno Noah que es parte de las opciones de los modelos de superficie del terreno activadas directamente por el WRF. El WRF-Hydro se puede acoplar a otros modelos atmosféricos y/o a sistemas de modelación de la Tierra como el *Community Earth System Model (CESM)* de NCAR o el *Land Information System (LIS)* de la NASA.

El sistema WRF-Hydro ha sido aplicado principalmente con fines de investigación para simular condiciones de caudal durante eventos de inundación en cuencas endorreicas y/o exorreicas con características áridas, semiáridas, mediterráneas y de altiplanicies en países como Estados Unidos de América (Gochis *et al.*, 2014), Burkina Faso – Ghana (Arnault *et al.*, 2014), Italia (Senatore y Mendicino, 2014), Israel (Givati *et al.*, 2014), los Himalaya (Li *et al.*, 2014) y en México (Altamirano, 2014).

El objetivo es instalar el sistema hidrológico WRF-Hydro y realizar corridas para simular el gasto en las subcuencas de los ríos de la Sierra, en Tabasco, de un periodo histórico donde un evento significativo se haya presentado y bajo diferentes configuraciones del sistema y de parámetros de entrada con el fin de evaluar los resultados en comparación con el gasto medido en estaciones hidrométricas que se encuentren en la cuenca de la Sierra. A partir del cálculo de métricas y la correspondiente verificación objetiva se determina la capacidad del sistema para simular el gasto medido en estaciones hidrométricas y la configuración más efectiva para ello.

En una segunda etapa del proyecto y posterior a la instalación del sistema de modelos WRF-Hydro y WRF se corrieron seis experimentos con el modelo atmosférico WRF en modo desacoplado y uno en modo acoplado, en el *Cluster Turing* del IMTA, en los que se varió la parametrización de cúmulos con el fin de evaluar y determinar la precipitación que mejor representara la observada en doce estaciones climáticas distribuidas en la subcuenca de La Sierra y sus cuatro tributarias, para el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010, fechas en que se tuvo la influencia del ciclón tropical *Matthew* en la región. Se identificó que el esquema de *Betts-Miller-Janjic (Cu2)* y el de *Tiedke (Cu6)* modificado presentan los mejores resultados para la precipitación en la región de estudio, la cual mejora con la simulación en modo acoplado, no obstante es pobre la representación de la precipitación simulada con respecto a los picos máximos medidos en las estaciones entre los días 26 al 29 de septiembre de 2010.

Se evaluó la simulación del gasto y la humedad del suelo generada con diez experimentos numéricos realizados con el WRF-Hydro en modo desacoplado y uno en modo acoplado al WRF. En los experimentos se modificaron parámetros relacionados con la rugosidad y el ancho del fondo de la red de canales, la conductividad hidráulica saturada y el paso de tiempo para la simulación. Se identifica que la mejor combinación para simular el gasto corresponde a un paso de tiempo entre 3 y 4 segundos, con valores de conductividad hidráulica saturada ajustados a partir de los propuestos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

El gasto es mejor representado en la estación 30031 con los experimentos que consideran Cu6 en modo desacoplado y es subestimado en modo acoplado. En la estación 30016 el gasto simulado con Cu2 representa en mejor medida el gasto medido en el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010 y es pobremente representado en modo acoplado con Cu6.

Dado los tiempos de cómputo que toma realizar una corrida del WRF-Hydro en modo desacoplado y en modo acoplado al WRF, se recomienda que éstas se realicen en modo desacoplado.

## 2. Bases físicas y conceptuales del sistema WRF-Hydro

El sistema hidrológico WRF-Hydro utiliza aproximaciones físicas y conceptuales para resolver tanto en las componentes atmosféricas como los tránsitos del flujo superficial, sub-superficial, profundo, a través de canales y en embalses/lagos en una malla regular fina del terreno (del orden de decenas a cientos de metros dependiendo de las capacidades de cómputo e información disponibles).

El WRF-Hydro resuelve los tránsitos en los módulos listados a continuación, éstos se activan/desactivan en el archivo "*hydro.namelist*", descrito en el apéndice 2 del "Anexo 1. *Guía para correr el WRF-Hydro*" en el presente informe.

- Modelo de superficie del terreno Noah
- Tránsito de flujo sub-superficial
- Tránsito de flujo superficial
- Tránsito de flujo en la red de canales
- Tránsito de flujo en lagos y embalses

### 2.1 Modelo de superficie del terreno Noah

El WRF-Hydro utiliza el modelo comunitario unidimensional (en la vertical) de superficie del terreno (LSM) Noah (figura 1, Ek *et al.*, 2003) para calcular variables hídricas en una malla con una resolución espacial mayor o igual a la de la malla fina del terreno sobre la que el WRF-Hydro posteriormente calcula el tránsito sub-superficial y superficial.

Los datos generados por el LSM Noah que el WRF-Hydro utiliza como entrada son:

- SMCMAX. Máximo contenido de humedad del suelo para cada tipo de suelo.
- INFXS. Exceso de infiltración.

- LKSAT. Conductividad saturada lateral para cada tipo de suelo.
- SMC. Contenido de humedad del suelo para cada capa del suelo.
- SFHEAD. Profundidad del agua estancada.

El LSM Noah fue desarrollado en la academia y ha sido utilizado y mejorado por los usuarios desde mediados de 1980's. La versión más reciente del Noah es operacional en el *Land Data Assimilation System* (Gochis *et al.*, 2015; Ek *et al.*, 2003) de la inter-agencia *National Aeronautics and Space Administration - National Centers for Environmental Prediction* (NASA-NCEP). Versiones en malla del modelo LSM Noah se acoplan actualmente a modelos operativos de pronóstico del tiempo como el *North American Model* (NAM) en NCEP, y el modelo comunitario WRF.

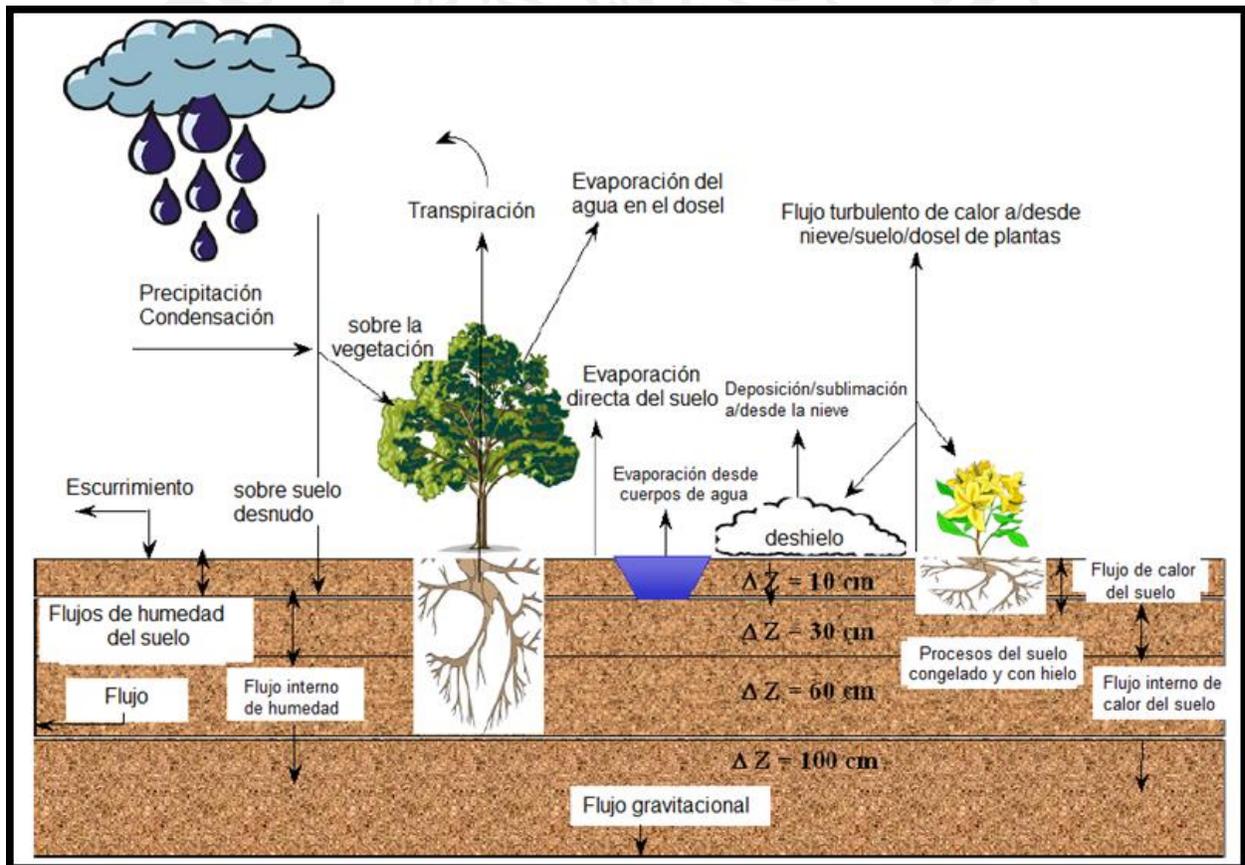


Figura 1. Componentes incorporados en el modelo de superficie del terreno Noah.

Fuente: Gochis, D. J., y Chen, F. 2003. Hydrological Enhancements to the Community North Land Surface Model. p. 16. NCAR/TN- 454+STR, NCAR Technical Note[M]. Research Applications Program, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. Estados Unidos de América: NCAR.

- WRF-Hydro en modo desacoplado

El WRF-Hydro cuando se corre en modo desacoplado activa directamente el LSM Noah que viene como parte de la instalación del sistema (Gochis, *et al.*, 2015).

- WRF-Hydro en modo acoplado al WRF

Si el WRF-Hydro se corre en modo acoplado al WRF, el LSM Noah es activado y forzado directamente como parte de las opciones y configuración del modelo atmosférico WRF y los resultados son pasados o proporcionados al WRF-Hydro para el cálculo de los tránsitos (Gochis, *et al.*, 2015).

Para la desagregación-agregación de datos del LSM NOAH de entrada al WRF-Hydro, el WRF-Hydro tiene implementado el esquema “*interfaz de malla fina del modelo*” (Gochis y Chen, 2003) para remallar o desagregar las variables de entrada que utiliza para calcular los tránsitos y el gasto, y que son calculadas con el LSM Noah, cuando es diferente la resolución espacial entre la malla del LSM Noah (de cientos a miles de metros) y la malla fina del terreno (de decenas a cientos de metros) que utiliza el WRF-Hydro.

El esquema aplica un peso uniforme para la desagregación, en el que el valor calculado en la celda de la malla fina es forzado únicamente por el dato en la celda de la malla del LSM Noah en la cual reside:

$$f_{i,j} = F_{I,J} \quad (1)$$

Aquí  $f_{i,j}$  es el forzante en la malla fina y  $F_{I,J}$  representa la variable en la malla del LSM Noah  $I,J$  es la celda del LSM Noah en la cual están contenidas las celdas de la malla fina  $i,j$ .

Posterior a la desagregación se ejecutan los esquemas de tránsito del WRF-Hydro en la malla fina del terreno y los resultados de las variables hídricas son agregados o re-mapeados y actualizados de regreso a la resolución de la malla del LSM Noah.

El procedimiento de agregación utilizado es un promedio lineal simple de los componentes de la malla (Gochis *et al.*, 2015). Por ejemplo, la agregación del agua estancada (SFHEAD) de la malla fina del WRF-Hydro a la malla del LSM Noah es:

$$SFHEAD_{i,j} = \frac{\sum \sum SFHEADR_{ir,jr}}{AGGFACTR^2} \quad (2)$$

Aquí  $ir,jr$  representan los índices de las celdas de la malla fina del terreno que se encuentran dentro de la celda de la malla  $i,j$  del LSM Noah.

AGGFACTR es la relación entre la resolución de la malla fina y de la malla del LSM Noah. Si  $AGGFACTR=1$  los esquemas de agregación/desagregación se activarán pero no realizarán cambios efectivos entre la resolución del LSM Noah y la malla fina del terreno. Con  $AGGFACTR \neq 1$  se realizarán cambios efectivos en la resolución del WRF-Hydro.

Las variables actualizadas se utilizan en la siguiente iteración del LSM Noah y así sucesivamente se repite el ciclo hasta concluir con la simulación.

La agregación y desagregación de las variables se realiza entre la malla fina del WRF-Hydro sobrepuesta a la malla del LSM Noah por lo que se debe asegurar que sea idéntica la extensión espacial de la malla del LSM Noah y la de la malla fina del terreno y que la proporción (AGGFACTR) entre el tamaño de las celdas de la malla fina y de la malla del LSM Noah sea un múltiplo entero (figura 2). Este anidamiento interno permite al LSM Noah correr en una resolución espacial mientras que las rutinas de tránsito son resueltas en una malla más fina. Aunque el modelo puede operar cuando las dos mallas tienen una misma resolución espacial (1000 mts o más fina) esta capacidad de anidamiento de sub-malla es útil para reducir el requerimiento computacional cuando WRF-Hydro está acoplado al modelo atmosférico WRF.

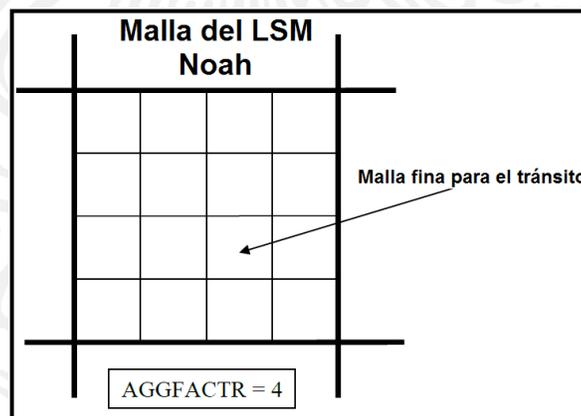


Figura 2. Ejemplo de relación 4 a 1 entre celdas de la malla fina del terreno y una celda de la malla del LSM Noah.

Fuente: Gochis *et al.*, 2015. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Technical Document. p. 34. Estados Unidos de América: NCAR.

En el archivo “*hydro.namelist*” el usuario indica el tamaño de las celdas de la malla fina con la variable *DXRT*, el divisor entero (*AGGFACTR*) y el paso de tiempo para calcular el tránsito (*DTRT*). *DXRT* y *DTRT* deben ser especificados para la malla fina aunque sean las mismas que para la malla del LSM Noah.

El LSM Noah, al igual que la mayoría de los modelos de superficie del terreno, utiliza como forzantes de entrada datos atmosféricos. En el caso del LSM Noah son:

- Radiación de onda larga (Watts/m<sup>2</sup>)
- Radiación de onda corta (Watts/m<sup>2</sup>)
- Humedad específica a 2 m (kg/kg)
- Temperatura del aire a 2 m (grados Kelvin)
- Presión en superficie (Pascal)
- Rapidez del viento a 10 m (componentes u y v) (m/s)
- Razón de precipitación (mm/s)

Cuando el WRF-Hydro se corre en modo desacoplado, los forzantes meteorológicos de entrada al LSM Noah deben ser proporcionados por el usuario en archivos individuales con formato netCDF para cada paso en el tiempo, con una estructura similar a los archivos atmosféricos que genera el modelo WRF. Los datos se pueden obtener de observaciones, re-análisis o de cualquier modelo atmosférico, como por ejemplo de los modelos ECMWF, el WRF o el COSMO.

En el caso del WRF-Hydro acoplado al WRF, los datos atmosféricos son proporcionados directamente por el WRF al LSM-Noah.

Además de las variables atmosféricas el LSM Noah utiliza archivos de parámetros del suelo y vegetación que son proporcionados por default durante la instalación del WRF-Hydro:

- VEGPARAM.TBL: Incluye parámetros de vegetación indexados por categoría de uso/cubierta del suelo.
- SOILPARAM.TBL: Incluye parámetros físicos del suelo indexados por clases de textura del suelo.
- GENPARAM.TBL: Incluye parámetros del modelo que son aplicados globalmente.

Los resultados del LSM Noah, cuando el WRF-Hydro se corre en modo desacoplado, se guardan en archivos multidimensionales de datos con formato netCDF (Gochis *et al.*, 2015) usando la convención ‘YYYYMMDDHH.LDASOUT\_DOMAINx’ para el nombre de los archivos.

La nomenclatura del nombre se refiere a:

- YYYY – año
- MM – mes
- DD – día
- HH – hora

DOMAINx. El indicador “x” del dominio que es especificado en el archivo “*hydro.namelist*”. El nombre y definición de cada variable del archivo de salida del LSM Noah, que es activado por el WRF-Hydro en

modo desacoplado, generalmente son consistentes con los que resultan del LSM Noah que es activado directamente por el modelo atmosférico WRF en modo desacoplado.

Las salidas del LSM Noah cuando el WRF-Hydro corre acoplado al WRF se encuentran en el archivo **wrfoutDOMAINx.YYYYMMDDHH**

## 2.2 Tránsito de flujo sub-superficial

El tránsito sub-superficial lateral es calculado previo al tránsito superficial para permitir que la exfiltración de las celdas con columnas de suelo completamente (o super<sup>1</sup>) saturado se sume al exceso de infiltración calculada por el LSM Noah, lo cual actualiza el valor del agua estancada en la malla fina antes de calcular el tránsito superficial (figura 3).

El WRF-Hydro calcula el tránsito sub-superficial lateral cuasi 3-dimensional de la humedad saturada del suelo pendiente abajo en forma explícita (celda por celda), incluye los efectos de la topografía, profundidad del suelo saturado (en el caso del WRF-Hydro son capas) y la conductividad hidráulica saturada, variable con la profundidad. Utiliza una adaptación al método de Wigmosta y Lettenmaier (1999) y Wigmosta *et al.* (1994), citados en Gochis *et al.*, (2015), implementado en el *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM). El flujo sub-superficial domina en un clima húmedo/templado.

---

<sup>1</sup> Una columna super-saturada se define como aquella que posee un flujo subterráneo positivo que al sumarse al contenido de agua existente en el suelo resulta en un exceso de la capacidad total del suelo de mantener agua en toda la columna.

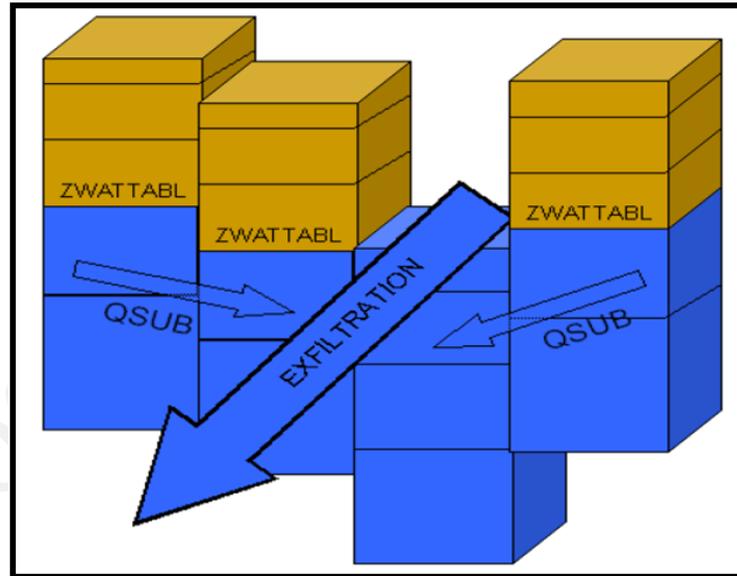


Figura 3. Representación del tránsito sub-superficial y la exfiltración, ZWATTABL: Nivel freático. QSUB: Flujo subterráneo.

Fuente: Gochis *et al.*, 2015. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Technical Document. p. 37. Estados Unidos de América: NCAR.

Los gradientes hidráulicos son aproximados como pendientes del nivel freático entre celdas de malla adyacentes en las direcciones  $x, y$ . El flujo de agua de una celda a su vecina con bajo gradiente es aproximado como una solución estable de estado estacionario en cada paso del tiempo.

La razón de tránsito saturado sub-superficial de la celda  $i, j$  a su vecina con menor gradiente de elevación en la dirección  $x$ , en el tiempo  $t$ , se puede calcular vía diferencia finita de la suposición *Dupuit-Forcheimer* como:

$$q_{i,j} = \begin{cases} -T_{i,j} \tan \beta_{i,j} w_{i,j} & \beta_{i,j} < 0 \\ 0 & \beta_{i,j} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Aquí  $q_{i,j}$  es la razón de flujo desde la celda  $i, j$  en la dirección de flujo,  $T_{i,j}$  es la transmisividad de la celda  $i, j$ ,  $\beta_{i,j}$  es la pendiente del nivel freático en la dirección de flujo (se calcula como la diferencia en las profundidades del nivel freático entre dos celdas adyacentes dividido por el espaciamento de la malla) y  $w_{i,j}$  es el ancho de la celda donde se da el flujo, fija para una malla regular. Flujos dejando una celda tiene pendiente negativa ( $\beta_{i,j} < 0$ ) (Wigmosta y Lettenmaier, 1999; Wigmosta *et al.*, 1994, citados en Gochis *et al.*, 2015).

La transmisividad se calcula a partir de la ley de potencia de la función de transmisividad (Beven [1982] citado por Wigmosta *et al.*, 1994) como:

$$T_{i,j} = \begin{cases} \frac{Ksat_{i,j} D_{i,j}}{n_{i,j}} \left(1 - \frac{z_{i,j}}{D_{i,j}}\right)^{n_{i,j}} & z_{i,j} \leq D_{i,j} \\ 0 & z_{i,j} > D_{i,j} \end{cases} \quad (4)$$

$Ksat_{i,j}$  es el componente lateral de la conductividad hidráulica del suelo saturado para la celda  $i, j$ ,  $D_{i,j}$  es la profundidad total del suelo en  $i, j$  (uniforme para el dominio del WRF-Hydro),  $z_{i,j}$  es la profundidad del nivel freático,  $n_{i,j}$  es el exponente de la ley de potencia local y es un parámetro que indica la tasa de decadencia de  $Ksat_{i,j}$  con la profundidad.

De sustituir la ecuación 4 en 3 se obtiene la razón de flujo de la celda  $i, j$  a su vecina en la dirección  $x$  como:

$$q_{x(i,j)} = \gamma_{x(i,j)} h_{i,j} \quad \text{si se cumple que } \beta_{x(i,j)} < 0 \quad (5)$$

Aquí,

$$\gamma_{x(i,j)} = -\left(\frac{w_{i,j} Ksat_{i,j} D_{i,j}}{n_{i,j}}\right) \tan \beta_{x(i,j)} \quad (6)$$

$$h_{i,j} = \left(1 - \frac{z_{i,j}}{D_{i,j}}\right)^{n_{i,j}} \quad (7)$$

El cálculo se repite para la dirección “y” si se activa la opción de tránsito bi-dimensional en WRF-Hydro.

El tránsito saturado sub-superficial de salida de la celda  $i, j$  ( $Qout_{i,j}$ ) es calculado como:

$$Qout_{i,j} = h_{i,j} \sum_{k=0}^1 \gamma_{i,j,k} \quad (8)$$

$k = 0$  para la dirección  $x$ ,  $k = 1$  para la dirección  $y$

Para aplicación en modelación es más eficiente manejar (3) como:

$$q_{i,j,k}(t) = F_{i,j,k} Q_{out_{i,j}} \quad (9)$$

Aquí,

$$F_{i,j,k} = \frac{\gamma_{i,j,k}}{\sum_{k=0}^1 \gamma_{i,j,k}} \quad (10)$$

El flujo total de entrada ( $Q_{in_{i,j}}$ ) a la celda  $i, j$  desde una celda con mayor gradiente de elevación está dada por:

$$Q_{in_{i,j}} = \sum_{k=0}^1 F_k Q_{out_k} \quad (11)$$

Donde, en este caso  $k$  representa la ubicación de la celda de origen del flujo.

El tránsito lateral neto sub-superficial de humedad saturada ( $Q_{net}$ ) para la celda  $i, j$  es:

$$Q_{net_{i,j}} = Q_{out_{i,j}} - Q_{in_{i,j}} \quad (12)$$

El balance de masa en cada celda en un paso del tiempo del WRF-Hydro ( $\Delta t$ ) se calcula en función del cambio en la profundidad del nivel freático ( $\Delta z$ ).

$$\Delta z = \frac{1}{\phi_{(i,j)}} \left[ \frac{Q_{net_{(i,j)}}}{A} - R_{(i,j)} \right] \Delta t \quad (13)$$

Aquí  $\phi$  es la porosidad del suelo,  $R$  es la razón de recarga de la columna del suelo por infiltración o inyección subterránea profunda y  $A$  es el área de la celda de la malla fina. En WRF-Hydro,  $R$  se representa implícitamente durante la integración del modelo como infiltración y subsecuentemente como incremento de la humedad del suelo. Asumiendo que no hay inyección profunda de humedad (presión derivada del flujo desde debajo de las capas más profundas del suelo),  $R$  en WRF-Hydro es definida igual a 0.

La exfiltración de humedad sub-superficial a la superficie, disponible para el tránsito de flujo superficial, se da cuando hay valores negativos de  $z_{i,j}$ . La exfiltración es más común en depresiones, fondo de valles y áreas de convergencia topográfica (Wigmosta *et al.*, 1994).

Para calcular las entradas y salidas del módulo de tránsito sub-superficial se requiere de los datos y parámetros de entrada a proporcionar al WRF-Hydro cuando se activa el módulo de tránsito sub-superficial y que son:

- Topografía o modelo digital de elevación (MDE), esta malla puede ser provista en resoluciones espaciales igual o más fina que la resolución del LSM Noah.
- Indicar en el archivo “*hydro.namelist*” el tamaño de la celda de la malla fina del terreno usada para el tránsito **DXRT**, el paso del tiempo para el cálculo del tránsito del flujo en la malla fina del terreno **DTRT** y el factor de agregación de la malla fina del terreno **AGGFACTR**.

- En el archivo “*hydro.namelist*” con la opción **SUBRTSWCRT** se activa para que el WRF-Hydro calcule el tránsito sub-superficial.

Se recomienda al usuario revisar el anexo 2 con la guía de los pasos para generar las capas de información de la malla fina del terreno de entrada al WRF-Hydro.

El paso de tiempo (**DTRT**) a utilizar para el sistema hidrológico está directamente relacionado con la resolución de las celdas de la malla fina del terreno del WRF-Hydro. Para prevenir la difusión numérica de la onda de inundación simulada (donde la difusión numérica es la disipación artificial o dispersión de la onda de inundación) se debe seleccionar un paso de tiempo adecuado para que coincida con el tamaño de malla definido. Esta coincidencia es dependiente de la rapidez de la onda o celeridad ( $c$ ) asumida. El Número de Courant,  $Cn = c(\Delta t/\Delta x)$ , debería ser cercano a 1.0 para prevenir la difusión numérica. El valor de  $Cn$  también afecta la estabilidad de la rutina de tránsito por lo que valores de  $Cn$  deberían ser menores que 1.0. Por lo tanto, los siguientes pasos de tiempo son sugeridos para el cálculo del tránsito en función del tamaño de la malla fina (Gochis, *et al.*, 2015):

x (m)	t (s)
30	2
100	6
250	15
500	30
1000	60

### 2.3 Tránsito de flujo superficial

El WRF-Hydro calcula el tránsito superficial cuando la profundidad del agua estancada en una celda de la malla fina del WRF-Hydro excede una profundidad inicial especificada de retención (figura 4). La profundidad del agua estancada calculada en el tránsito del flujo superficial interactúa con el modelo LSM Noah. El dato de entrada al WRF-Hydro es proporcionado por el LSM Noah y posteriormente el resultado calculado como parte del flujo superficial en los módulos de tránsito retroalimenta la variable

de profundidad de agua estancada del LSM Noah para su consideración en la interacción del siguiente paso del tiempo. El flujo superficial domina en climas semiáridos.

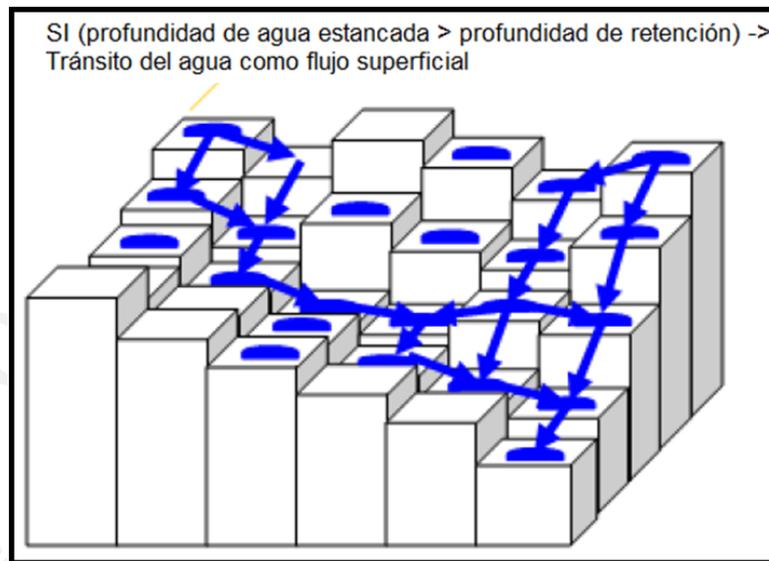


Figura 4. Representación del tránsito de flujo superficial.

Fuente: Gochis *et al.*, 2015. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Technical Document. p. 31. Estados Unidos de América: NCAR.

Para calcular el tránsito superficial el WRF-Hydro aplica la ecuación de continuidad para una onda de inundación superficial combinada con la formulación de onda difusiva de la ecuación de momento (Julien *et al.*, 1995). Utiliza la ecuación de *Manning* como la formulación de resistencia para el momento.

El WRF-Hydro aplica el método bidimensional de onda difusiva completamente variable diseñada alrededor de una diferencia finita, espacialmente explícita, de Julien *et al.* (1995) modificada por Ogden (1997), citados en Gochis *et al.*, (2015). La formulación de onda difusiva es una simplificación de la ecuación general de continuidad y momento de *St. Venant* para una onda en agua poco profunda (o somera).

La forma general de la ecuación de continuidad en forma de diferencia parcial es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = e \quad (14)$$

Aquí,  $h$  es la profundidad del flujo superficial,  $q_x$  y  $q_y$  es la tasa de descarga unitaria en las direcciones  $x, y$ ,  $e$  es el exceso en precipitación ( $i - f$ );  $i$  es la intensidad de precipitación,  $f$  es la razón de infiltración,  $x, y$  son las coordenadas cartesianas,  $t$  es el tiempo.

La ecuación bidimensional de continuidad en forma de diferencia parcial para el flujo de una onda de inundación que fluye sobre la superficie del terreno es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i_e \quad (15)$$

Aquí,  $i_e$  es el exceso de infiltración.

La forma general de las ecuaciones de momento en forma no conservativa es:

En la dirección  $x$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \left( S_{ox} - S_{fx} - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (16)$$

En la dirección  $y$ :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \left( S_{oy} - S_{fy} - \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (17)$$

Aquí,  $h$  es la profundidad del flujo superficial,  $x, y$  son las coordenadas cartesianas,  $t$  es el tiempo,  $S_{o(x,y)}$  es la pendiente del terreno entre celdas en las direcciones  $x, y$ ,  $S_{f(x,y)}$  es la pendiente de fricción (o la pendiente de la línea de energía) en las direcciones  $x, y$ ,  $u, v$  son la velocidad promedio en las direcciones  $x, y$ ,  $g$  es la aceleración de la gravedad.

La onda difusiva de la ecuación de momento en las direcciones  $x, y$  puede ser derivada al relacionar las fuerzas netas por unidad de masa en cada dirección y la aceleración del flujo en relación a esa dirección dada. Las fuerzas (gravitacional, fricción y presión) a lo largo de uno de los ejes se muestran en el lado derecho de la ecuación (16) o (17), en tanto que la aceleración local y convectiva está dada por el lado izquierdo. La aproximación difusiva simplificada de las ecuaciones (16) y (17) asume que las fuerzas netas actuando a lo largo de un eje de interés son aproximadamente igual a cero. Así, la aproximación resultante de la ecuación de momento usada en la formulación de onda difusiva para la dimensión  $x$  es (Rojas *et al.*, 2003):

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (18)$$

Aquí,  $S_{fx}$  es la pendiente de fricción en la dirección  $x$ ,  $S_{ox}$  es la pendiente del terreno en la dirección  $x$  y  $\partial h / \partial x$  es el cambio en la profundidad de la superficie del agua por arriba del terreno en la dirección  $x$ .

Una ventaja de usar la forma de onda difusiva de la ecuación de momento es la capacidad para tomar en cuenta efectos observados de remanso durante el flujo superficial (Julien *et al.*, 1995).

En la combinación de las ecuaciones de continuidad y momento se deben determinar cinco variables hidráulicas para lo cual se establece una ley de resistencia en términos de la relación razón de flujo a la profundidad y a un parámetro de flujo tal como la rugosidad del terreno.

Cuando se activa la opción bidimensional del WRF-Hydro, el tránsito superficial a través de la malla fina del terreno se calcula primero en la dirección  $x$  y después en la  $y$ . Para resolver la ecuación 15 se necesitan los valores para  $q_x$  y  $q_y$ . La descarga unitaria en alguna posición y tiempo depende principalmente de la dirección del flujo, el cual es determinado por el signo de la fricción de la pendiente (Julien *et al.*, 1995).

En la mayoría de los modelos hidrológicos los valores de las descargas unitarias son calculados al usar la ecuación de resistencia, como la ecuación de *Manning*, que incorpora la expresión para la pérdida de momento dada en la ecuación 18. En el WRF-Hydro se incorpora una forma de la ecuación de *Manning*:

$$q_x = \alpha_x h^\beta \quad (19)$$

Aquí,  $\alpha_x$  y  $\beta$  son parámetros del régimen del flujo que varían dependiendo si existen condiciones de flujo laminar o turbulento;  $\alpha_x$  cambia con la derivada de la profundidad del flujo en la formulación de onda difusiva y  $\beta$  es constante.

Bajo condiciones de flujo turbulento en toda la cuenca, se utiliza la ecuación de resistencia de *Manning*, en el Sistema Internacional de unidades (SIU).

$$\alpha_x = \frac{S_{fx}^{1/2}}{n_{ov}} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{5}{3} \quad (20)$$

Aquí,  $n_{ov}$  es el coeficiente de rugosidad de *Manning* de la superficie del terreno – es un parámetro ajustable a través de la capa de información OVROUGHRTFAC que forma parte del archivo terrestre para la malla fina de entrada al WRF-Hydro (ver anexo 2)– y  $\beta$  es un coeficiente unitario dependiente que permanece constante, expresado aquí para el SIU.

La ecuación de *Manning* es usada como la formulación de resistencia para el momento y utiliza especificaciones de un parámetro de rugosidad del flujo superficial. Los valores del coeficiente de rugosidad para el flujo superficial considerados por el WRF-Hydro son los de Vieux (2001), citado por Gochis, *et al.*, 2015, y están mapeados a la clasificación existente de la cobertura de suelo provista por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con 24 tipos de cubierta de suelo (Loveland *et al.*, 1995, citado por Gochis, *et al.*, 2015), que son los mismos datos de clasificación de cubierta de suelo usados en el LSM Noah.

Los datos y parámetros de entrada a proporcionar al WRF-Hydro cuando se activa el módulo de tránsito superficial son:

- Capa de información “TOPOGRAPHY” del archivo de entrada al WRF-Hydro con la elevación de cada celda de la malla fina del terreno. Esta malla puede ser provista en resoluciones espaciales igual o más fina que la resolución del LSM Noah.
- Capa de información “RETDEPRTFAC” del archivo de entrada al WRF-Hydro con la fracción de la profundidad de retención en cada celda de la malla fina del terreno.
- Capa de información “OVROUGHRTFAC” del archivo de entrada al WRF-Hydro con la fracción de rugosidad en cada celda de la malla fina del terreno.
- Indicar en el archivo “*hydro.namelist*” el tamaño de la celda de la malla fina del terreno usada para el tránsito **DXRT**, el paso del tiempo para el cálculo del tránsito del flujo en la malla fina del terreno **DTRT** y el factor de agregación de la malla fina del terreno **AGGFACTR**.

- En el archivo “*hydro.namelist*” la opción **OVRTSWCRT** activa que el WRF-Hydro calcule el flujo superficial.
- En la opción **rt\_option** el usuario selecciona el método de solución de las ecuaciones; el de la celda con mayor desnivel o el método bidimensional de diferencias finitas.

Se recomienda al usuario revisar el anexo 2 con la guía de los pasos para generar las capas de información de la malla fina del terreno de entrada al WRF-Hydro.

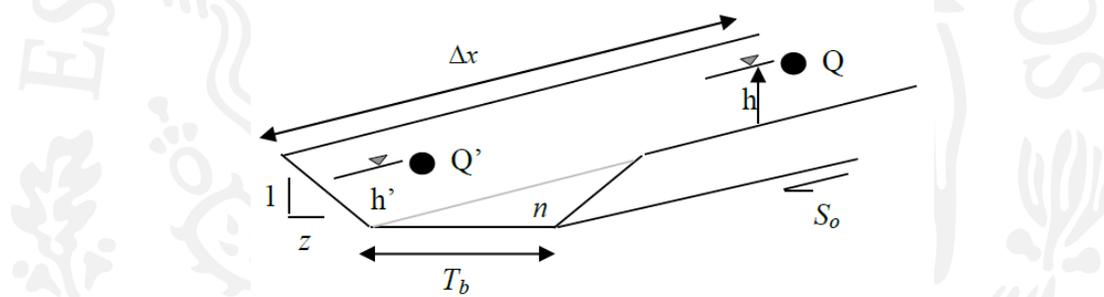
El WRF-Hydro en modo desacoplado genera un archivo con los resultados del flujo superficial sobre la malla fina del terreno, con la frecuencia de tiempo definida para el LSM Noah en el archivo “*namelist.hrlidas*”. Los archivos de salida son:

- a. Archivo “*YYYYMMDDHHMM.RTOUT\_DOMAINX*” en formato netCDF: incluye datos de las variables calculadas en cada celda de la malla fina del terreno. La convención de los términos “*YYYYMMDDHHMM*” se define en la descripción del archivo de salida del LSM Noah. Una opción en el archivo “*hydro.namelist*” (**RTOUT\_DOMAIN = 1**) activa la generación de este archivo. Debido al tamaño en espacio en disco se debe decidir con cuidado cuando guardar los datos de la malla fina del terreno. Las variables de salida por default proporcionadas en este archivo incluyen:
  - LATITUDE: Latitud
  - LONGITUDE: Longitud
  - SOIL\_M: Contenido volumétrico de la humedad del suelo (en unidades de m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)
  - ZWATTLRT: Profundidad de la capa saturada donde el tránsito profundo puede estar ocurriendo. Este valor será igual a la profundidad total de la columna de suelo (comúnmente 2 m) cuando no esté ocurriendo saturación, (unidades de m).

- QSTRMVOLRT: Profundidad acumulada de la entrada de flujo en el canal de corriente, (unidades de mm).
- SFCHEADSUBRT: Valor instantáneo de la profundidad del agua estancada en la superficie, (unidades de mm).

## 2.4 Tránsito de flujo por una red de canales

El tránsito corriente abajo, a través de la red de canales de corriente, se calcula utilizando una formulación explícita unidimensional de onda difusiva, con variaciones en el paso del tiempo, la cual es una simplificación de la ecuación general de *St. Venant* para ondas en aguas poco profundas. Las ecuaciones usadas para el tránsito del flujo en el canal son similares a las del tránsito superficial con la diferencia de que las ecuaciones usadas para el tránsito del flujo en canales están definidas para un ancho finito establecido para una sección dada del canal con geometría trapezoidal (figura 5, Gochis *et al.*, 2015).



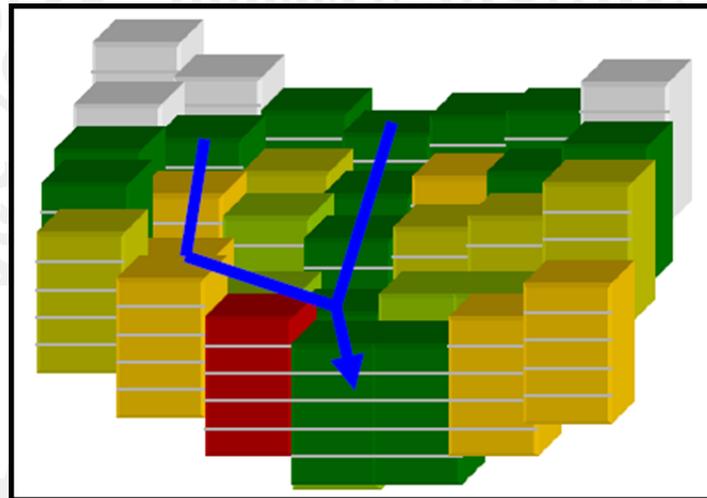
- Pendiente del canal,  $S_o$
- Longitud del canal,  $\Delta x$  (m)
- Pendiente del costado del canal,  $z$  (m)
- Ancho constante del fondo,  $T_b$  (m)
- Coeficiente de rugosidad de Manning,  $n$

Figura 5. Geometría trapezoidal del canal de corriente considerada en el WRF-Hydro.

Fuente: Gochis *et al.*, 2015. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Technical Document. p. 44. Estados Unidos de América: NCAR.

- WRF-Hydro no incluye funciones de pérdida en la red de canales o lagos para remover parte del flujo de regreso al entorno y no representa áreas de inundación o flujos de desbordamiento así que el flujo en el canal del modelo es en una dirección y la dimensión vertical del canal es infinita.
- Los usuarios del WRF-Hydro pueden comparar los valores modelados y los observados de gasto y aplicar relaciones de descarga-estado o “curvas de calificación” cuando deseen relacionar valores de caudal modelados/predichos con niveles reales de ríos y con potenciales áreas de inundación.

El tránsito en la red de canales (caudal o gasto) es calculado celda por celda para aquellas que representan el canal (figura 6). Las celdas que representan la red de canales reciben una entrada lateral desde el flujo superficial calculado mediante un balance simple de masa. El WRF-Hydro considera que cualquier flujo superficial que alcanza una celda de la malla fina asociada a una red de canales de corriente será efectivamente “descargado” en el canal cuando se exceda una profundidad local de retención indicada como parte de los parámetros de entrada al modelo. El WRF-Hydro no incluye una representación explícita del flujo superficial descargando a un canal de corriente.



Nota: El tránsito superficial se da en las celdas del terreno hasta que intersecta celdas que representan la red de canales en la malla fina del terreno, indicadas por la línea azul, donde se vuelve “flujo de entrada” a la red del canal de corriente.

Figura 6. Representación de celdas en las que se calcula el tránsito en la red de canales.

Fuente: Gochis *et al.*, 2015. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Technical Document. p. 40. Estados Unidos de América: NCAR.

El tránsito en la red de canales utiliza la ecuación de continuidad de masa en la forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (21)$$

Aquí,  $A$  es el área de la sección transversal del flujo en el canal trapezoidal,  $Q$  es el flujo total en el canal de geometría trapezoidal,  $q_{lat}$  es la razón de flujo lateral de entrada al canal,  $t$  es el tiempo,  $x$  es la coordenada en el sentido de la corriente.

Y la ecuación de momento en forma conservativa está dada como (Gochis *et al.*, 2015):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -gAS_f \quad (22)$$

El primer término se refiere al cambio local del flujo, el segundo término es el de aceleración convectiva, el tercer término es la fuerza de presión y el cuarto término es la fuerza de fricción;  $\beta$  es un coeficiente de corrección del momento,  $Z$  es la elevación de la superficie de agua y  $S_f$  es la pendiente de fricción del canal.

A partir de la combinación de la ecuación de *Manning* y la de *Chezy* se deriva la pendiente de fricción del canal trapezoidal, en términos de caudal, (Sleigh, 2006) como:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad \text{con} \quad K = \frac{C_m}{n} AR^{2/3} \quad (23)$$

Aquí  $n$  es el coeficiente de rugosidad de *Manning* en la red de los canales de corriente,  $A$  es el área de la sección transversal del flujo en el canal trapezoidal,  $R$  es el radio hidráulico ( $A/P$ );  $P$  es el perímetro mojado, y  $C_m$  es una constante dimensional (1.486 para unidades inglesas ó 1.0 para el SIU).

Ignorando los primeros dos términos en la ecuación de momento y sustituyendo  $S_f$ , ésta resulta en la aproximación de la onda difusiva de flujo en un canal abierto (Gochis *et al.*, 2015). La ecuación de momento se simplifica en:

$$Q = -SIGN\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right) K \sqrt{\left|\frac{\partial Z}{\partial x}\right|} \quad (24)$$

Aquí la función  $SIGN\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)$  es 1 para  $\partial Z/\partial x > 0$  y -1 para  $\partial Z/\partial x < 0$ . El caudal negativo indica que éste se transfiere de una celda del canal a la siguiente con igual o menor gradiente de elevación ya que la acumulación de agua estancada en la celda de la malla que representa el canal de corriente excede la profundidad de retención especificada.

Para calcular las entradas y salidas del módulo de tránsito en la red de canales, se requiere que los datos y parámetros de entrada a proporcionar al WRF-Hydro cuando se activen en el módulo de tránsito por una red de canales:

- Capa de información "TOPOGRAPHY" del archivo de entrada al WRF-Hydro con la elevación de cada celda de la malla fina del terreno. Nota, está malla puede ser provista en resoluciones espaciales igual o más fina que la resolución del LSM Noah.
- Capa de información "CHANNELGRID" del archivo de entrada al WRF-Hydro en la que se indica la ubicación de las celdas en la malla fina del terreno que representan la red del canal de la corriente.
- Capa de información "STREAMORDER" del archivo de entrada al WRF-Hydro en la que se indica el orden de la corriente de *Strahler* para cada celda de la red del canal de corriente en la malla fina del terreno.
- Capa de información "FLOWDIRECTION" del archivo de entrada al WRF-Hydro con la dirección de cada celda de la malla fina del terreno. Esta define explícitamente las direcciones del flujo a lo largo de la red de canales.
- Capa de información "frxst\_pts" (opcional) del archivo de entrada al WRF-Hydro con la identificación de las celdas en la malla fina del terreno que representan los puntos de pronóstico/medición para las cuales el gasto y profundidad del flujo calculadas se guardarán en un archivo netCDF y en un archivo ASCII.
- Archivo "CHANPARAM.TBL" en el que el usuario ajusta los parámetros de la pendiente del costado, ancho del fondo y coeficiente de rugosidad de *Manning* para el canal de geometría trapezoidal, prescritos en función de la orden de corriente de *Strahler*.

- En el archivo "hydro.namelist" con la opción **CHANRTSWCRT** se activa que el WRF-Hydro calcule el tránsito en la red de canales.
- En la opción **channel\_option** el usuario selecciona el método de solución de las ecuaciones, por ejemplo la aproximación Muskingam, Muskingam-Cunge-reach o la diferencia de onda.

Se recomienda al usuario revisar el anexo 2 con la guía de los pasos para generar las capas de información de la malla fina del terreno de entrada al WRF-Hydro.

Los archivos de salida del módulo de tránsito del flujo en la red de canales del WRF-Hydro son:

- I. Archivo "frxst\_pts.txt" con formato ASCII que contiene la serie de tiempo del gasto para los puntos de pronóstico definidos a lo largo de la red de canales. El archivo de datos se usa para pronosticar flujos de corriente y para la calibración del modelo. El contenido del archivo es:
  - Columna 1: Tiempo de la simulación (en segundos)
  - Columna 2: Fecha y tiempo en la forma YYYY-MM-DD\_HH:MM:SS

- Columna 3: índice con el número de la estación (numerado de 0 a n-1 estaciones)
  - Columna 4: Longitud de la estación (en grados decimales)
  - Columna 5: Latitud de la estación (en grados decimales)
  - Columna 6: Gasto en la red de canales que pasa por las celdas de los puntos de pronóstico/medición (en metros cúbicos por segundo)
  - Columna 7: Gasto en la red de canales que pasa por las celdas de los puntos de pronóstico/medición (en pies cúbicos por segundo)
  - Columna 8: Profundidad del flujo/estado del río en las celdas de los puntos de pronóstico/medición (en metros arriba de la base del canal)
- II. Archivo YYYYMMDDHHMM\_**CHANOBS**\_DOMAINx con formato netCDF: Este archivo contiene la misma información que el archivo "frxst\_pts.txt" en formato netCDF.
- III. Archivo YYYYMMDDHHMM\_**CHRTOUT**\_DOMAINx en formato netCDF: Este es un archivo con la misma información que el archivo para los puntos de control, solo que contiene los datos del caudal calculado para todas las celdas que representan la red del canal en el archivo de la malla fina del terreno.

Como en los archivos de salida del LSM Noah, la frecuencia con la que se guardan los resultados del gasto en archivos individuales se controla con la opción **out\_dt = 60**, en minutos, especificada en el archivo "hydro.namelist".

## 2.5 Tránsito de flujo en lagos y embalses

WRF-Hydro emplea un balance simple de masa para estimar el impacto de lagos/embalses en la respuesta hidrológica. El almacenamiento y flujo de salida se estima con un esquema de tránsito de nivel de alberca (*level pool routing*), el cual traza los cambios en la elevación del espejo del agua en el tiempo  $h(t)$ , donde el agua puede salir del embalse por arriba del vertedero de salida  $Q(w)$  y/o de un flujo controlado a través de una puerta ( $Q(o)$ ), donde esos flujos de salida son función de la elevación del agua y parámetros de aliviadero. En WRF-Hydro, la diferencia conceptual entre lagos y embalses es que los embalses tienen un orificio y vertedero de salida para descarga mientras que los lagos solo tienen vertederos.

WRF-Hydro considera la descarga del flujo por arriba del vertedero a través de la siguiente ecuación implementada en el modelo (Gochis *et al.*, 2015; DNR, 2008):

$$Q_w(t) = C_w L h^{3/2} \quad \text{Si se cumple que } h > h_{max} \quad (25)$$

Aquí  $C_w$  es el coeficiente adimensional de descarga del vertedero,  $L$  es la longitud efectiva del vertedero (en metros),  $h$  es la profundidad del agua por arriba de la cresta (en metros).

$Q_w(t) = 0.0$  Si se cumple la condición de que  $h \leq h_{max}$ , donde,  $h_{max}$  es la máxima altura (en metros) antes que comience a derramar el vertedero (Gochis *et al.*, 2015).

El orificio de descarga es una apertura rectangular o circular en el vertedero. La razón de flujo depende de la altura del agua arriba del orificio, el tamaño y posición del orificio. Para un único orificio, el flujo de descarga puede determinarse a partir de la ecuación general del orificio (Gochis *et al.*, 2015; DNR, 2008):

$$Q_o(t) = C_o O_a \sqrt{2gh} \quad (26)$$

Aquí  $Q_o$  es el flujo de descarga del embalse por el orificio ( $m^3/s$ ),  $C_o$  es un coeficiente adimensional de descarga del orificio,  $O_a$  es el área de la sección transversal del orificio (en metros cuadrados),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.8 m/s^2$ ),  $D_o$  es el diámetro del orificio (m),  $h$  es la altura efectiva del orificio, desde el centro del orificio al espejo del agua.

Para orificios circulares;  $O_a = \pi \frac{D_o^2}{4}$

Para orificios rectangulares;  $O_a = bD$ , donde  $b$  y  $D$  son los lados de la orificio rectangular.

Si el orificio descarga libremente por arriba del espejo de agua, la altura efectiva del orificio se mide desde el centro del orificio a la elevación del espejo de agua en el embalse. Si el orificio descarga sumergido, la altura efectiva es la diferencia en la elevación del espejo de agua que se encuentra en el embalse con respecto a la del espejo del agua fuera del embalse.

Los datos y parámetros de entrada y salida a proporcionar al WRF-Hydro cuando se incluyen los objetos lagos/embalses y se activa el módulo de tránsito por lagos/embalses son:

- Capa de información "LAKEGRID" del archivo de entrada al WRF-Hydro en la que se indica la ubicación de las celdas que representan los lagos/embalses en la malla fina del terreno.
- Capa de información "CHANNELGRID" del archivo de entrada al WRF-Hydro en la que se indica la ubicación de las celdas que representan la red del canal de corrientes sobrepuestas a las que representan los lagos/embalses en la malla fina del terreno.
- Archivo "LAKEPARAM.TBL" en el que el usuario ajusta los parámetros relacionados con lagos/embalses.

- En el archivo “*hydro.namelist*” con la opción **CHANRTSWCRT** se activa que el WRF-Hydro calcule el tránsito en lagos/embalses.

Si objetos lago/embalse están presentes en la malla del lago (y también en la red de canales) entonces el tránsito a través de dichos objetos ocurrirá. Se recomienda al usuario revisar el anexo 2 con la guía de los pasos para generar las capas de información de la malla fina del terreno de entrada al WRF-Hydro.

En WRF-Hydro en modo desacoplado genera un archivo de salida en formato ASCII con la nomenclatura YYYYMMDDHHMM\_LAKES\_DOMAINx. Entre las variables más comunes que incluye están:

- ELEVATION: Elevación de la superficie del lago/embalse (unidades de metros arriba del nivel medio del mar).
- INFLOW: Flujo total de entrada al embalse desde los canales tributarios interceptando el lago/embalse (unidades de m<sup>3</sup>/s).
- OUTFLOW: Flujo total de salida desde el embalse a un canal de la red de canales (unidades de m<sup>3</sup>/s).
- STATION\_ID: Índice del lago numerado de 0 a n-1 lagos/embalses tal como se especifica en el archivo de entrada de la malla fina del terreno.

### 3. Instalación del WRF-Hydro en equipos de cómputo del IMTA

El código fuente del WRF-Hydro está desarrollado por el NCAR en lenguaje de programación fortran 90 para plataformas computacionales con sistema operativo (SO) GNU/Linux.

El sistema WRF-Hydro en modo desacoplado y acoplado al modelo atmosférico WRF se instaló en un nodo de un equipo de cómputo tipo *cluster* de alto desempeño denominado *Turing* y en una computadora personal (PC) de escritorio, ambos del IMTA. Las características y compiladores de los equipos de cómputo son:

El clúster Turing cuenta con las siguientes características:

- 1 nodo maestro: 4 procesadores Intel Xeon E5-2650 de 2.8 Ghz con 8 núcleos por procesador (32 en total) y 20 Mb de memoria cache, 128 GB de memoria RAM y disco duro de 600 GB.
- 6 nodo esclavos: 4 procesadores AMD Opteron 6272 de 2.1 Ghz con 16 núcleos cada uno (64 en total) y 2 Mb de memoria cache, 256 GB de RAM y disco duro de 300 GB.

- Arreglo de discos tipo NAS de 60 Tb.
- Conectividad Infinityband interna de baja latencia entre los nodos del clúster de hasta 40 Gbps.
- Sistema operativo Rocks-Linux 6.1 (basado en Centos 6.3).
- Compiladores comerciales PGI y libres GNU fortran y gcc.

La computadora de escritorio tiene las siguientes características: 8 núcleos en el procesador marca Intel(R) Core(TM) i7-2600 CPU @ 3.40GHz, velocidad de 1600 Mhz y con compilador libre GNU fortran y gcc.

En la compilación y ejecución de los archivos ejecutables del sistema WRF-Hydro, en modos desacoplado y acoplado del modelo WRF, se debe tener instalados compiladores de fortran y gcc (libres como de GNU o comerciales como de *The Portland Group, Inc* o PGI) así como las librerías listadas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Librerías necesarias para compilar y correr el sistema WRF-Hydro.

Librería	Relevancia	Disponible en [al 30 de junio de 2016]
<i>zlib</i> , versión 1.2.8	Utilizada para descomprimir los datos de entrada al modelo WRF en formato GRIB1 y 2.	<a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Zlib">http://es.wikipedia.org/wiki/Zlib</a>
<i>jasper</i> , versión 1.701.0	Utilizada en los algoritmos de compresión de datos en el formato GRIB2 que utiliza el modelo WRF.	<a href="http://www.ece.uvic.ca/~frodo/jasper/jasper.pdf">http://www.ece.uvic.ca/~frodo/jasper/jasper.pdf</a>
<i>png</i> , versión 1-2.12	Utilizada en los algoritmos de compresión del formato de datos GRIB2.	<a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Libpng">http://es.wikipedia.org/wiki/Libpng</a>
<i>netCDF-C*</i> , en modo no compartido. Versión 4.3.2	Utilizada para escribir los datos en el formato de entrada/salida del WRF y el WRF-Hydro.	<a href="http://www.unidata.ucar.edu/downloads/netcdf/index.jsp">http://www.unidata.ucar.edu/downloads/netcdf/index.jsp</a>
<i>netCDF-fortran*</i> , en modo no compartido. Versión 4.2	Utilizada para escribir los datos en el formato de entrada/salida del WRF y el WRF-Hydro.	<a href="http://www.unidata.ucar.edu/downloads/netcdf/index.jsp">http://www.unidata.ucar.edu/downloads/netcdf/index.jsp</a>
<i>MPICH2</i> , versión 1.5	Habilita el uso del total de procesadores del equipo de cómputo durante la corrida de los ejecutables.	<a href="http://www.mpich.org/about/overview/">http://www.mpich.org/about/overview/</a>
<i>hdf5</i> , versión 1.8.11	Necesaria para compilar la librería NCO.	<a href="http://www.hdfgroup.org/HDF5/">http://www.hdfgroup.org/HDF5/</a>
<i>NCO</i> , versión 4.4.4	Utilizada para concatenar las capas de información del terreno en la malla fina de entrada al WRF-Hydro.	<a href="http://nco.sourceforge.net/">http://nco.sourceforge.net/</a>

GrADS, versión 2.0.2 (pre-compilada)	Opcional. Utilizada para procesar y visualizar las salidas del WRF y WRF-Hydro.	<a href="http://iges.org/grads/">http://iges.org/grads/</a>
NCL, versión 6.2.0 (pre-compilada)	Opcional. Utilizada para procesar y visualizar las salidas del WRF y WRF-Hydro.	<a href="http://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml">http://www.ncl.ucar.edu/overview.shtml</a>

\* Utilizar el mismo compilador *fortran* y *gcc* para generar las librerías *netCDF* que el utilizado para generar los ejecutables del WRF y el WRF-Hydro.

Antes de instalar las librerías se recomienda:

- Actualizar los paquetes del sistema, por ejemplo en la versión GNU Linux *Community ENTenterprise Operating System* (Centos) desde la línea de comando en una terminal del usuario *root* o administrador se aplica la instrucción ***\$yum -y update***
- Remover y volver a instalar el compilador *gcc*, por ejemplo en GNU Linux Centos desde la línea de comando en una terminal del usuario *root* o administrador se aplican los comandos:
  - o ***\$ yum remove gcc***
  - o ***\$ yum install gcc***
  - o ***\$ yum install gcc-c++*** (necesario para compilar librerías *netCDF*)

Las librerías se instalan, desde el código fuente y preferentemente como usuario administrador o *root*, con la siguiente secuencia de instrucciones en una terminal de trabajo en GNU/Linux:

- Descomprimir el archivo que contiene el código fuente, por ejemplo con la instrucción:
  - ***\$ tar -xvzf zlib-1.2.8.tar.gz*** (*archivo comprimido con el formato gzip*)
- Ingresar al directorio recién descomprimido de la librería y declarar la variable de ambiente para permitir archivos mayores a 2 gigabytes:
  - ***\$ setenv WRFIO\_NCD\_LARGE\_FILE\_SUPPORT 1*** (en el caso del intérprete de comandos C-shell)
  - ***\$ export WRFIO\_NCD\_LARGE\_FILE\_SUPPORT=1*** (en el caso del intérprete de comandos S-shell)
- Configurar las opciones para compilar la librería, por ejemplo:
  - ***\$ ./configure --prefix=/usr/local***

En el caso de las librerías netCDF utilizar la siguiente configuración **`$ ./configure --prefix=/usr/local --disable-netcdf-4 --disable-dap --disable-shared`**

- Compilar la librería en el directorio que resulta de la descompresión del código fuente, aplicar el comando:
  - **`$ make`**
- Verificar que la compilación no tenga errores, aplicar el comando:
  - **`$ make check`**
- Instalar las librerías y archivos de encabezado. Estos se instalarán en los directorios definidos en el argumento **`--prefix`** (se crearán subdirectorios ej. `/usr/local/bin/`, `/usr/local/lib/` y `/usr/local/include/`). Aplicar el comando:
  - **`$ make install`**

Se recomienda al usuario revisar el contenido de los archivos “*INSTALL*” y/o “*README*” dentro de los directorios que se crean cuando se descomprime el código fuente de las librerías. Éstos incluyen sugerencias adicionales para la configuración y compilación en función de la versión del SO GNU/Linux instalada en el equipo de cómputo.

### **3.1 Configuración, compilación y corrida del sistema hidrológico WRF-Hydro en modo desacoplado**

En la configuración y compilación del WRF-Hydro en modo desacoplado se aplican los pasos descritos por Gochis *et al.* (2015):

- Descargar el archivo “*WRF\_Hydro3.0.tar.gz*” con el código fuente de la versión 3.0 del WRF-Hydro desde el sitio oficial de NCAR [http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro/download.php](http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro/download.php)
- Abrir una terminal de trabajo en la sesión del usuario en el equipo de cómputo con SO GNU/Linux.
- Cambiar al directorio de trabajo, por ejemplo **`desacoplado/`** con el comando **`$cd`**
- Descomprimir el archivo con el comando **`$tar -xvzf WRF_Hydro3.0.tar.gz`**

- Ingresar con el comando **\$cd** al directorio **hydro/** que se crea después de descomprimir el archivo “**WRF\_Hydro3.0.tar.gz**”.
- Declarar cuatro variables de ambiente para configurar y compilar el sistema WRF-Hydro en modo desacoplado, como se ejemplifica en la figura 7.

```
[wrfhidro@turing ~]$ setenv HYDRO_D 1
[wrfhidro@turing ~]$ setenv NETCDF_INC /usr/local/include
[wrfhidro@turing ~]$ setenv NETCDF_LIB /usr/local/lib
[wrfhidro@turing ~]$ setenv WRFIO_NCD_LARGE_FILE_SUPPORT 1
```

Figura 7. Variables de ambiente para configurar y compilar el sistema WRF-Hydro en modo desacoplado.

- Un valor de “1” en la variable HYDRO\_D producirá información de diagnóstico durante la corrida del sistema WRF-Hydro. Cuando se selecciona “0” ó no se define, la información de diagnóstico no se generará.
- La variable WRFIO\_NCD\_LARGE\_FILE\_SUPPORT 1 se fija para habilitar el manejo de archivos netCDF mayores a 2 Gb durante la simulación del WRF-Hydro.
- La variable NETCDF\_INC es para indicar la ruta donde se encuentran los archivos de inclusión o encabezado *netCDF*.
- La variable NETCDF\_LIB es para indicar la ruta donde se encuentran las librerías *netCDF*.
- Aplicar el comando **./configure** para desplegar el listado de opciones (figura 8) a seleccionar para configurar las opciones de compilación del código fuente del WRF-Hydro. La opción seleccionada debe ser compatible con el compilador disponible y el modo de la compilación.

```
[wrfhidro@turing ~]$ cd WRF/desacoplado/hydro/
[wrfhidro@turing hydro]$
[wrfhidro@turing hydro]$ ./configure
Please select from following supported options.

    1. Linux PGI compiler sequential
    2. Linux PGI compiler dmpar
    3. IBM AIX compiler sequential, xlf90_r
    4. IBM AIX compiler dmpar
    5. Linux gfort compiler sequential
    6. Linux gfort compiler dmpar
    7. Linux ifort compiler sequential
    8. Linux ifort compiler dmpar
    0. exit only

Enter selection [1-5] : _____
```

Figura 8. Listado de opciones de configuración para la compilación del WRF-Hydro.

La opción serial (*sequential*) se recomienda para compilar el código del modelo en modo de prueba para identificar errores a solucionar previo a la compilación en modo paralelo (*dmpar* o multiprocesador). Asegurar que está instalada la librería MPICH para configurar el modelo en modo paralelo.

- En el caso del *cluster Turing* del IMTA el equipo de cómputo es x86 de 64 bits con compilador PGI Fortran (opciones 1 y 2).
- En el caso de la PC de escritorio el compilador es GNU *gfortran* (opciones 5 y 6).

Corroborar que se creen los archivos “*macros*” y “*Makefile.com*” después de aplicar el comando ***./configure***. En el primero se especifican las opciones de compilación y el segundo contiene las instrucciones para compilar el código fuente del WRF-Hydro contenido en varios subdirectorios.

- Proceder a compilar el código fuente del WRF-Hydro versión 3.0 para generar el archivo ejecutable en modo desacoplado. Aplicar el comando:

***./compile\_offline\_Noah.csh*** para el caso del LSM Noah

***./compile\_offline\_NoahMP.csh*** para el caso del LSM Noah MP

- La compilación del WRF-Hydro configurado en modo serial y multiprocesador se realiza de la misma forma.

Verificar que se cree el archivo ejecutable “*wrf\_hydro\_Noah.exe*” en el directorio **Run/** después de compilar el código del WRF-Hydro en modo desacoplado. Aplicar el comando ***\$ls -l*** para listar el archivo ejecutable, tal como se ejemplifica en la figura 9.

```
[wrfhidro@turing Run]$ cd ..
[wrfhidro@turing hydro]$
[wrfhidro@turing hydro]$ cd Run/
[wrfhidro@turing Run]$ ls -lg *exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro      18 May  3 20:03 wrf_hydro.exe -> wrf_hydro_Noah.exe
-rwxrwxr-x 1 wrfhidro 3237863 May  3 20:03 wrf_hydro_Noah.exe
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 3807973 May 15  2015 wrf_hydro_NoahMP.exe
[wrfhidro@turing Run]$
```

Figura 9. Listado del programa ejecutable del WRF-Hydro V3.0 en modo desacoplado.

Si se presentan errores durante la compilación estos pueden indicar el módulo, el nombre de los archivos y el número de línea con el error. Los números de línea solo son relevantes para los archivos (con terminación *.f*) y no para los archivos (*\*.F*). Debido a que los archivos *\*.f* son creados y removidos durante la compilación, no están disponibles para su vista. Para que no se remuevan los archivos *\*.f* y solucionar el error se necesita realizar las ediciones necesarias en el archivo “*Makefile*” apropiado. Esto significa determinar cuáles archivos “*Makefile*” necesitan ser editados para comentar las líneas “*rm \*.f*” en el directorio del módulo correspondiente.

Para eliminar los archivos ejecutables y objeto generados durante la compilación aplicar el comando ***\$make clean***. Es recomendable que se aplique entre compilaciones.

- Proceder a correr el archivo ejecutable del WRF-Hydro en modo desacoplado. Aplicar el comando:

***\$/wrf\_hydro\_Noah.exe*** En el caso secuencial con un solo procesador

***\$ mpirun -np 8 ./wrf\_hydro\_Noah.exe*** En el caso multiprocesador, ej. con 8 núcleos.

***\$ mpirun -f machinefile ./wrf\_hydro\_Noah.exe*** En el caso de un equipo de cómputo *cluster* con multiprocesadores.

En el archivo “*machinefile*” indicar el nodo de trabajo y el número de procesadores a utilizar, por ejemplo: *compute-0-1:60* representa el nodo 1 y considera 60 núcleos.

Detalles de la corrida del WRF-Hydro en modo desacoplado se describen en el anexo 1 Guía para correr el WRF-Hydro.

### 3.2 Configuración, compilación y corrida del sistema hidrológico WRF-Hydro en modo acoplado al modelo atmosférico WRF

Cuando se compila el sistema WRF-Hydro en modo acoplado con el modelo atmosférico WRF, el WRF-Hydro es llamado como una librería y sirve como una extensión al paquete hidrológico del WRF (Gochis *et al.*, 2015), lo que permite mejorar las simulaciones y predicciones hidro-meteorológicas (lluvia, escurrimiento).

Se recomienda primero instalar, compilar y correr el WRF-Hydro y el WRF por separado antes de compilarlos en modo acoplado. Esto para detectar y solucionar errores iniciales y tener mayor probabilidad de que la versión acoplada se compilará y ejecutará exitosamente.

Instalar y compilar el código fuente del modelo atmosférico WRF y el sistema de pre-procesamiento del WRF (WPS) versión 3.6 o mayor, disponible en el sitio oficial [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html) Seguir las indicaciones del sitio previo a la descarga del código.

Para la configuración, compilación y solución de errores del WRF y del WPS referirse al manual del modelo WRF V3.6 disponible en línea: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Compile/configure-add.htm>

En la configuración y compilación del WRF-Hydro en modo acoplado con el WRF se aplican los pasos descritos por Gochis *et al.* (2015):

- Descargar el archivo “*WRF\_Hydro3.0.tar.gz*” con el código fuente de la versión 3.0 del WRF-Hydro desde el sitio oficial de NCAR [http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro/download.php](http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro/download.php)
- Abrir una terminal de trabajo en la sesión del usuario en el equipo de cómputo con SO GNU/Linux.
- Ingresar con el comando **\$cd** al directorio principal **WRFV3/** del modelo WRF previamente configurado, compilado y ejecutado.
- Descomprimir el archivo con el comando **\$tar -xvzf WRF\_Hydro3.0.tar.gz** dentro del directorio **WRFV3/**. Esto generará o en su caso sustituirá el directorio **hydro/**
- Declarar cuatro variables de ambiente para configurar y compilar el sistema WRF-Hydro en modo acoplado al WRF, como se ejemplifica en la figura 10.

```
[wrfhidro@turing ~]$ setenv WRF_HYDRO 1
[wrfhidro@turing ~]$ setenv NETCDF_INC /usr/local/include
[wrfhidro@turing ~]$ setenv NETCDF_LIB /usr/local/lib
[wrfhidro@turing ~]$ setenv WRFIO_NCD_LARGE_FILE_SUPPORT 1
```

Figura 10. Variables de ambiente para configurar y compilar el sistema WRF-Hydro en modo acoplado con el modelo WRF V3.6.

- Un valor de “1” en la variable WRF\_HYDRO activa las opciones de ambiente para que el código fuente del sistema WRF-Hydro V3.0 sea considerado durante la compilación del modelo WRF V3.6. “0” ó su no definición activará las opciones de ambiente solo cuando se corra el modelo WRF V3.6 sin considerar el código fuente del WRF-Hydro.
- La variable WRFIO\_NCD\_LARGE\_FILE\_SUPPORT 1 se fija para habilitar el manejo de archivos netCDF mayores a 2 Gb durante la simulación del WRF-Hydro.
- La variable NETCDF\_INC es para indicar la ruta donde se encuentran los archivos de inclusión o encabezado *netCDF*.
- La variable NETCDF\_LIB es para indicar la ruta donde se encuentran las librerías *netCDF*.
- Aplicar el comando **./configure** para desplegar el listado de opciones (figura 11) a seleccionar para configurar las opciones de compilación del código fuente del WRF-Hydro acoplado al WRF. La opción seleccionada debe ser compatible con la arquitectura del equipo de cómputo, el compilador disponible y el modo de la compilación.

-----  
Please select from among the following supported platforms.

1. Linux x86\_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (serial)
2. Linux x86\_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (smpar)
3. Linux x86\_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (dmpar)
4. Linux x86\_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (dm+sm)
5. Linux x86\_64, PGI compiler with pgcc, SGI MPT (serial)
6. Linux x86\_64, PGI compiler with pgcc, SGI MPT (smpar)
7. Linux x86\_64, PGI compiler with pgcc, SGI MPT (dmpar)
8. Linux x86\_64, PGI compiler with pgcc, SGI MPT (dm+sm)
9. Linux x86\_64, PGI accelerator compiler with gcc (serial)
10. Linux x86\_64, PGI accelerator compiler with gcc (smpar)

Figura 11. Listado de opciones de configuración para la compilación del modelo WRF V3.6 acoplado al sistema WRF-Hydro.

La opción serial se recomienda para compilar el código del modelo en modo de prueba para identificar errores a solucionar previo a la compilación en modo paralelo (*dmpar* o multiprocesador). Asegurar que está instalada la librería MPICH para configurar el modelo en modo paralelo.

- En el caso del *cluster Turing* del IMTA el equipo de cómputo es x86 de 64 bits con compilador PGI Fortran con gcc (opciones 1 y 3).
- En el caso de la PC de escritorio el compilador es GNU *gfortran con gcc* (opciones 32 y 34).

- Seleccionar la opción básica (número 1) del listado con los anidamientos disponibles para configurar el modelo WRF V3.6 (figura 12).

```
-----
Compile for nesting? (0=no nesting, 1=basic, 2=preset moves, 3=vortex following)
[default 0]: 1
```

Figura 12. Listado de opciones de anidamiento disponibles para el modelo WRF V3.6.

Corroborar que se cree el archivo “*configure.wrf*” después de aplicar el comando ***\$/configure***

Se recomienda revisar el manual del modelo WRF V3.6 para solucionar posibles errores de configuración, disponible en línea: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Compile/configure-add.htm>

- Proceder a compilar el código fuente del WRF-Hydro versión 3.0 acoplado al modelo WRF versión 3.6 para generar el archivo ejecutable. En el ejecutable quedará incluido el WRF-Hydro como una librería del WRF. Aplicar el comando:

***\$/compile em\_real >& make-output &***

Los resultados de la compilación los guarda en el archivo “*make-output*”, para revisar posteriormente posibles errores que surjan durante la compilación. Con el comando ***\$tail -f make-output*** se despliega en pantalla el contenido del archivo durante la compilación.

- La compilación del WRF-Hydro acoplado al WRF configurado con la opción serial y multiprocesador se realiza de la misma forma.

Verificar que se cree el archivo ejecutable “*wrf.exe*” en el directorio **main/** y **run/** el cual ya incluye el WRF-Hydro acoplado al modelo WRF. Aplicar el comando ***\$/ls -l*** para listar el archivo ejecutable, tal como se ejemplifica en la figura 13.

```
[wrfhidro@turing WRFV3]$ cd run/
[wrfhidro@turing run]$
[wrfhidro@turing run]$ ls -lg *exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 17 Apr 29 09:28 ndown.exe -> ../main/ndown.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 15 Apr 29 09:28 nup.exe -> ../main/nup.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 16 Apr 29 09:28 real.exe -> ../main/real.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 14 Apr 29 09:28 tc.exe -> ../main/tc.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 15 Apr 29 09:27 wrf.exe -> ../main/wrf.exe
```

Figura 13. Listado de los programas ejecutables del modelo WRF V3.6 generados en modo acoplado al sistema WRF-Hydro.

- El programa “*real.exe*” es para generar las condiciones iniciales y de frontera para el modelo WRF V3.6.
- El programa “*wrf.exe*” es el programa de integración numérica para resolver la física del modelo WRF V3.6 con la que se realiza la simulación atmosférica. En el modo acoplado ya incluye el WRF-Hydro.
- El programa “*ndown.exe*” es usado para anidamientos.
- El programa “*nup.exe*” es para usar la asimilación de datos en el modelo WRF V3.6.
- El programa “*tc.exe*” es para seguimiento de ciclones tropicales.

Para eliminar los archivos ejecutables y objeto generados durante la compilación (excepto los que se encuentran en el directorio **external/**), aplicar el comando **\$/clean**. Utilizar el comando **\$/clean -a** entre cada nueva compilación del código del modelo WRF V3.6 para limpiar los archivos creados en todos los directorios, incluyendo “*configure.wrf*”. Esto es recomendado si se presenta algún error durante el proceso de compilación o si han editado los archivos de registro o “*configure.wrf*”.

Si aparecen errores como “*error while loading shared libraries: libnetcdf.so*” deberá revisar que las librerías *netCDF* se hayan construido en forma separada.<sup>2</sup>

Utilizar el comando **\$/compile -h help message** para obtener ayuda adicional desde la línea de comando.

- Proceder a correr el archivo ejecutable del WRF acoplado con el WRF-Hydro. Aplicar el comando:

**\$/wrf.exe**                      En el caso secuencial con un solo procesador

<sup>2</sup> Liga que incluye opciones para compilar netCDF. <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/netcdf-install/Configure.html>  
Problema de leer librería netCDF compartida cuando se corre WRF. [http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/overview/wrf\\_prev\\_fixes/wrf\\_fixes\\_v3.0.1.php](http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/overview/wrf_prev_fixes/wrf_fixes_v3.0.1.php)  
[Consultado el 15-SEP-14]

**\$mpirun -np 8 ./wrf.exe** En el caso multiprocesador, ej. con 8 núcleos.

**\$mpirun -f machinefile ./wrf.exe** En el caso de un equipo de cómputo *cluster* con multiprocesadores.

En el archivo “*machinefile*” indicar el nodo de trabajo y el número de procesadores a utilizar, por ejemplo: compute-0-1:60 representa el nodo 1 y utiliza 60 núcleos.

Detalles de la corrida del WRF-Hydro en modo acoplado al WRF se describen en el anexo 1 Guía para correr el WRF-Hydro.

## 4. Descripción del caso piloto

### 4.1 Zona de estudio: subcuenca de los ríos de La Sierra

La subcuenca hidrológica de los ríos de La Sierra se encuentra entre la entidad federativa de Chiapas y de Tabasco (figura 14), forma parte de la cuenca hidrográfica RH30D-R Grijalva-Villahermosa de la región hidrológica número 30 Grijalva-Usumacinta. Cerca de la salida, en la parte baja de la subcuenca de La Sierra, la red hidrográfica de canales tiene la influencia del afluente concentrado de la mayor parte de la superficie de cuatro subcuencas aledañas: Tacotalpa, Almendro, Plátanos y Chacté (DOF, 2013).

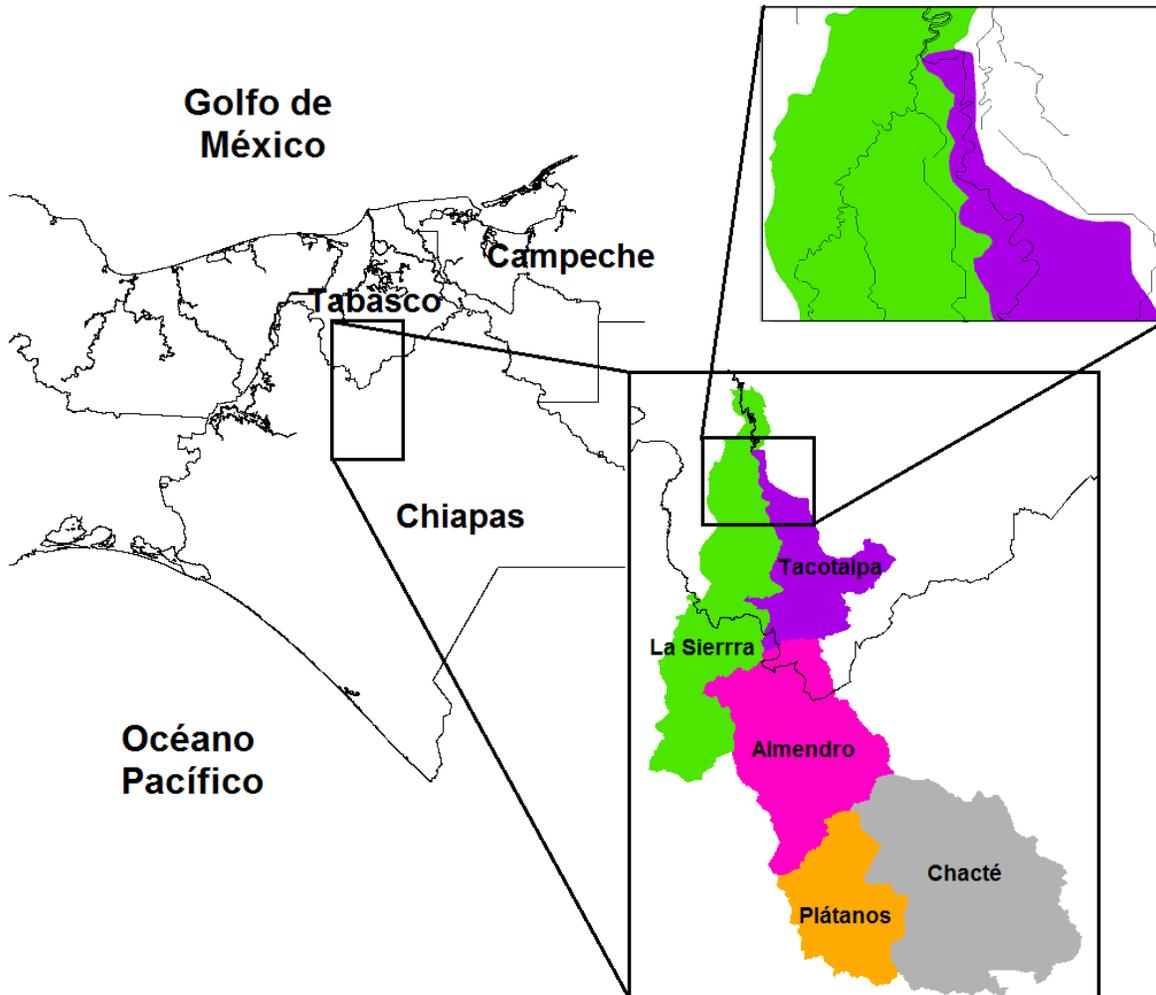


Figura 14. Ubicación de la subcuenca de los ríos de La Sierra y las subcuencas de las que recibe influencia en la parte baja. Elaboración propia.

El modelo WRF en el caso de la subcuenca de los ríos de La Sierra se corre para tres dominios (d01, d02 y d03) en los que realiza la simulación atmosférica: uno madre y dos anidados (figura 15 y cuadro 2). Con la finalidad de reducir al mínimo los problemas de borde o frontera, los dominios se establecieron de tal forma que la simulación atmosférica considere la influencia de los sistemas meteorológicos de mesoescala, el océano y la topografía. Los dominios anidados se centraron sobre el área que cubre la subcuenca de los ríos de La Sierra de tal forma que incluyen la orografía de la región. La simulación del gasto y humedad del suelo se calcula con el WRF-Hydro que se corre para la extensión espacial del dominio d03.



Figura 15. Representación del dominio madre (d01) y los dos dominios anidados (d02 y d03) sobre los que se corre el WRF y el WRF-Hydro.

Cuadro 2. Características de los dominios del WRF y WRF-Hydro para la subcuenca hidrológica de La Sierra.

	<b>Dominio 1 del WRF</b>	<b>Dominio 2 del WRF</b>	<b>Dominio 3 del WRF</b>	<b>Dominio WRF-Hydro</b>
Resolución de las celdas de la malla (mts)	6,750	2,250	750	30
Puntos de la malla en la dirección este-oeste	500	403	202	5,025
Puntos de la malla en la dirección norte-sur	400	403	223	5,550

Las características de los dominios se pueden adecuar a los experimentos y pronósticos que se realicen en el IMTA (revisar el anexo 1 con los pasos para correr los experimentos).

La subcuenca de La Sierra drena una superficie de 1,073.906 kilómetros cuadrados y se encuentra delimitada al Norte por la cuenca hidrológica Grijalva, al Este por las subcuencas hidrológicas Grijalva, Tacotalpa y Almendro, al Sur por la subcuenca hidrológica Chicoasén y al Oeste por las subcuencas hidrológicas Zayula, Pichucalco y Viejo Mezcalapa (DOF, 2013).

La subcuenca es de tipo exorreico, drena a la subcuenca hidrológica Pichucalco donde confluye con el Río Pichucalco, no cuenta con infraestructura hidráulica de control de avenidas y presenta una respuesta rápida ante eventos de precipitación dada su orografía escarpada e irregular. Las características de la subcuenca se resumen en el cuadro 3.

Cuadro 3. Características de la subcuenca hidrológica de La Sierra. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2012. Atlas Digital del Agua. México 2012. Recuperado de:  
<http://www.conagua.gob.mx/atlas/index.html>

Nombre de la subcuenca	De La Sierra
Superficie (km <sup>2</sup> )	1073.906 (267.33 perímetro)
Tipo	Exorréica
Clave de la cuenca hidrológica	3050
Altura máxima (m.s.m.n.)	2,320 mts
Altura mínima (m.s.m.n.)	0 mts
Clave región hidrológica	30
Nombre de la región hidrológica administrativa	XI. Frontera Sur
Ríos principales	Río de La Sierra
Volumen disponible a la salida	1,253.46 millones de metros cúbicos.

Más del 50% del área de la subcuenca de La sierra se encuentra en una elevación menor a 500 metros sobre el nivel del mar (msnm) y en una pequeña porción del sureste de la parte alta de la subcuenca la elevación llega a los 2,320 msnm (figura 16). En las subcuencas tributarias más del 50% del territorio está por debajo de los 1,000 msnm.

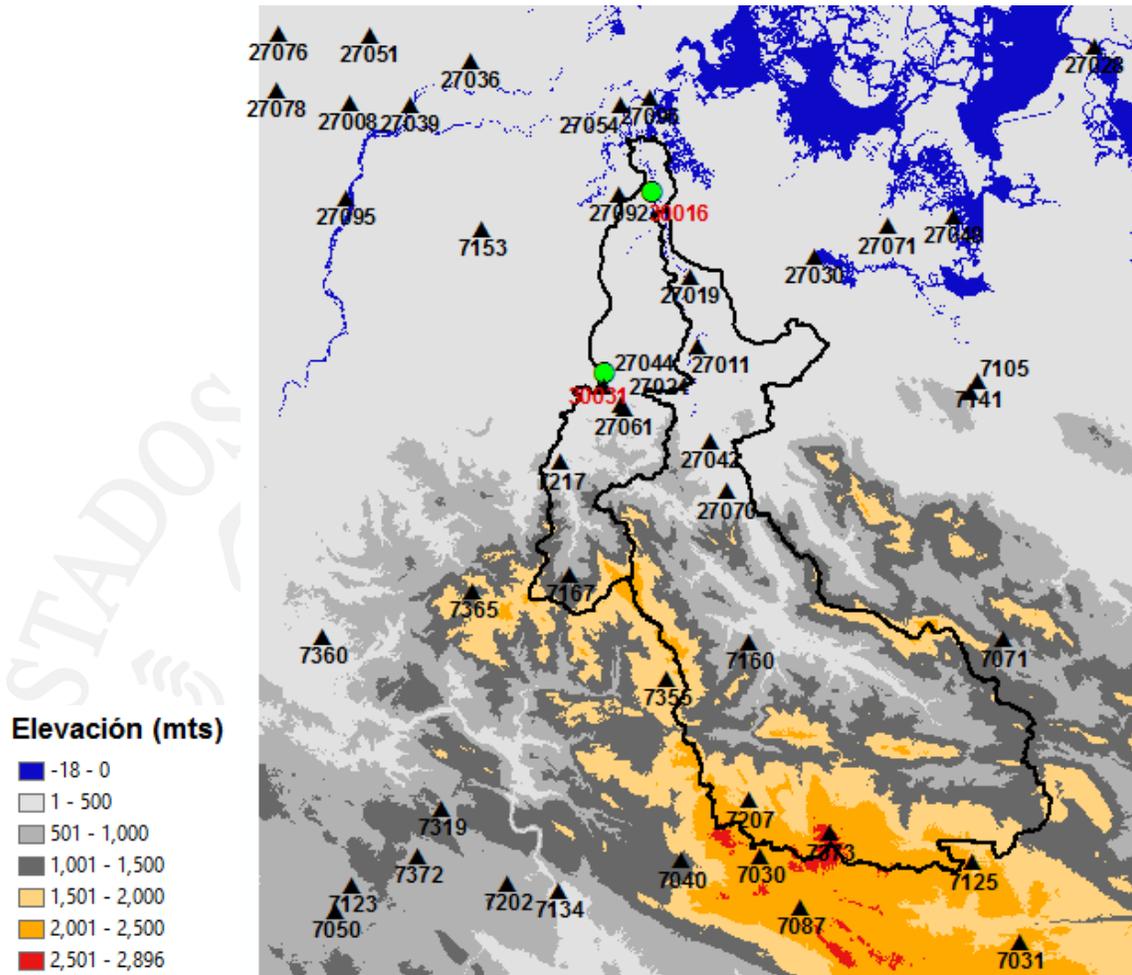


Figura 16. Topografía del dominio que incluye la subcuenca de La Sierra.

#### 4.2 Estaciones climáticas e hidrométricas

En el dominio d03 que incluye la subcuenca de La Sierra se identifican 44 estaciones climáticas que cuentan de datos diarios observados de precipitación para las fechas de simulación (triángulos y texto negro en la figura 16 y tabla 4), disponibles en la base de datos climáticos diarios CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). De éstas, 5 estaciones se ubican en zonas que influyen en el gasto registrado en la parte media de la subcuenca (celdas con fondo gris oscuro en el cuadro 4) y 7 estaciones se encuentran en áreas cuyo gasto es medido en la parte baja de la subcuenca (celdas con fondo gris claro en el Cuadro 4).

Cuadro 4. Relación de estaciones climáticas en el dominio que incluye la subcuenca de La Sierra.

Clave	Municipio	Altura	Clave	Municipio	Altura
00007030	Chamula, Chis.	1,930.0	00007373	Chamula, Chis.	2,570.0
00007031	Chanal, Chis.	2,100.0	00027008	Cardenas, Tab.	25.0
00007040	Ixtapa, Chis.	1,544.0	00027011	Tacotalpa, Tab.	20.0
00007050	Ocozocoautla de Espinosa, Chis.	781.0	00027019	Jalapa, Tab.	14.0
00007071	Chilon, Chis.	1,160.0	00027024	Teapa, Tab.	80.0
00007087	San Cristobal de las Casas, Chis.	2,113.0	00027028	Jonuta, Tab.	6.0
00007105	Salto de Agua, Chis.	93.0	00027030	Macuspana, Tab.	11.0
00007123	Ocozocoautla de Espinosa	838.0	00027036	Cunduacan, Tab.	15.0
00007125	Oxchuc, Chis.	1,987.0	00027039	Cunduacan, Tab.	23.0
00007134	Chiapa de Corzo, Chis.	418.0	00027042	Tacotalpa, Tab.	44.0
00007141	Salto de Agua, Chis.	10.0	00027044	Teapa, Tab.	51.0
00007153	Reforma, Chis.	30.0	00027048	Macuspana, Tab.	7.0
00007160	Simojovel, Chis.	660.0	00027051	Cunduacan, Tab.	20.0
00007167	Tapilula, Chis.	780.0	00027054	Centro, Tab.	24.0
00007202	Tuxtla Gutierrez, Chis.	543.0	00027061	Teapa, Tab.	86.0
00007207	Larrainzar, Chis.	2,000.0	00027070	Tacotalpa, Tab.	63.0
00007217	Solosuchiapa, Chis.	165.0	00027071	Macuspana, Tab.	11.0
00007319	San Fernando, Chis.	950.0	00027076	Cardenas, Tab.	13.0

00007355	Jitotol, Chis.	1,690.0	00027078	Cardenas, Tab.	19.0
00007360	Tecpatan, Chis.	300.0	00027092	Centro, Tab.	18.0
00007365	Ocoatepec, Chis.	1,460.0	00027095	Huimanguillo, Tab.	36.0
00007372	Berriozabal, Chis.	890.0	00027096	Centro, Tab.	5.0

\* Celdas en gris oscuro indican estaciones que se ubican en zonas que influyen en el caudal de la parte media de la subcuenca. En gris claro para el caso de la parte baja de la subcuenca.

En la subcuenca de La Sierra se encuentran dos estaciones hidrométricas con registros del gasto para las fechas de simulación (puntos verdes con texto en rojo en la figura 16), la estación 30031 Puyacatengo que registra el gasto proveniente de la parte alta de la subcuenca y la estación 30016 Pueblo Nuevo que monitorea el gasto proveniente de la parte alta de la subcuenca así como del afluente concentrado de la mayor parte de las cuatro subcuencas tributarias.

#### **4.3 Fechas para la simulación del caso piloto**

Las fechas acordadas para la simulación de la precipitación y el gasto en el dominio d03 que incluye la subcuenca de La Sierra es el periodo 23 de septiembre al 2 de octubre de 2010.

Se analizaron las series de tiempo del gasto y la precipitación acumulada registrada en las doce estaciones climáticas que se encuentran en la subcuenca de La Sierra y sus tributarias, para dos fechas propuestas inicialmente para realizar la simulación hidro-meteorológica; septiembre-octubre de 2005 y 2010.

Los días con recurrencia y mayor precipitación se presentaron en el mes de septiembre para el año 2005 y 2010 (figura 17). La precipitación en octubre de 2005 fue menor a la de septiembre no obstante que el ciclón tropical (CT) “*Stan*” y “*Wilma*” afectaron el sureste mexicano (Beven *et al.*, 2008, CONAGUA, 2006).

La precipitación diaria acumulada más intensa se registró entre el 26 al 29 de septiembre de 2010 asociada con el CT “*Matthew*”, un ejemplo de la distribución espacial se presenta en la figura 18. El pico de precipitación a principios y mediados de septiembre de ese mismo año se relaciona con la depresión tropical Once-e y el CT “*Karl*”, respectivamente (CONAGUA, 2011).

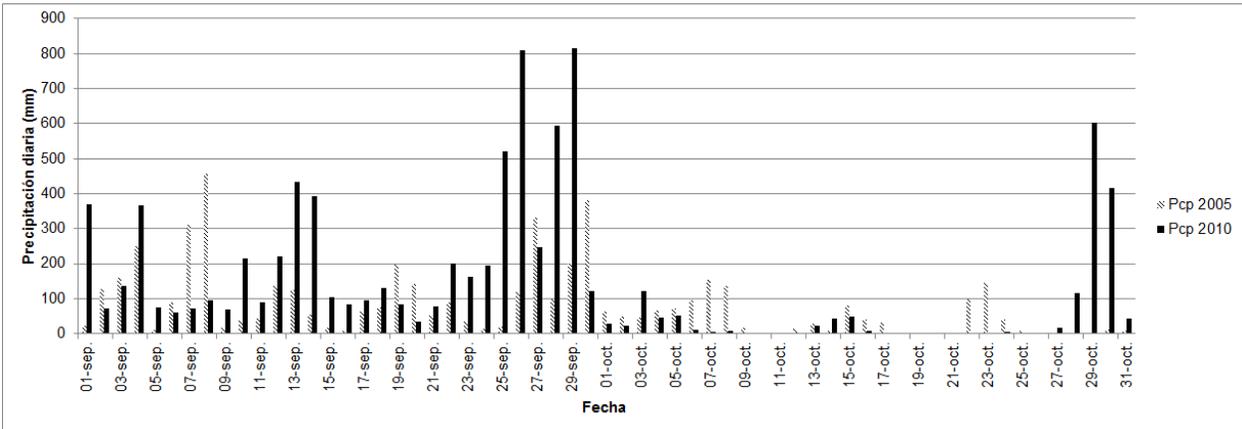


Figura 17. Serie de la precipitación acumulada diaria de las estaciones climáticas que se encuentran en la subcuenca de La Sierra y sus tributarias.

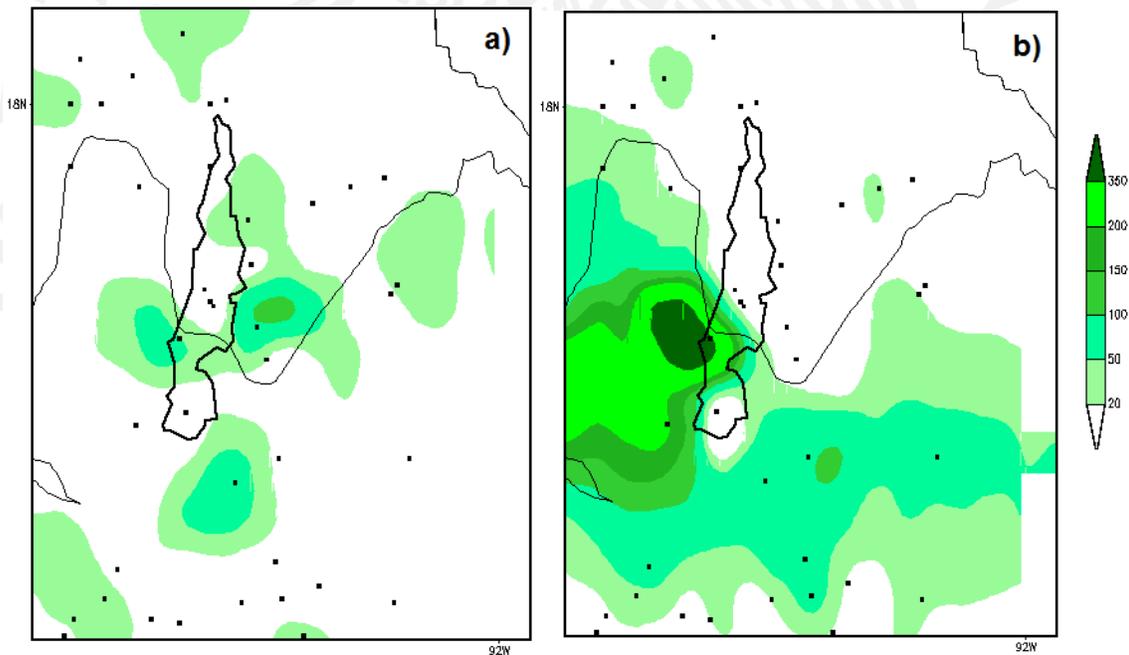


Figura 18. Ejemplo de la distribución espacial de la precipitación: a) del 27 y b) 28 de septiembre de 2010.

El gasto diario presenta una respuesta directa con el patrón de precipitación tal como se observa en la serie diaria del gasto en la estación 30016 (figura 19), ubicada cerca de la salida de la subcuenca de La Sierra. El pico máximo del gasto se presenta a finales de septiembre de 2010 y es el doble del pico máximo registrado en 2005.

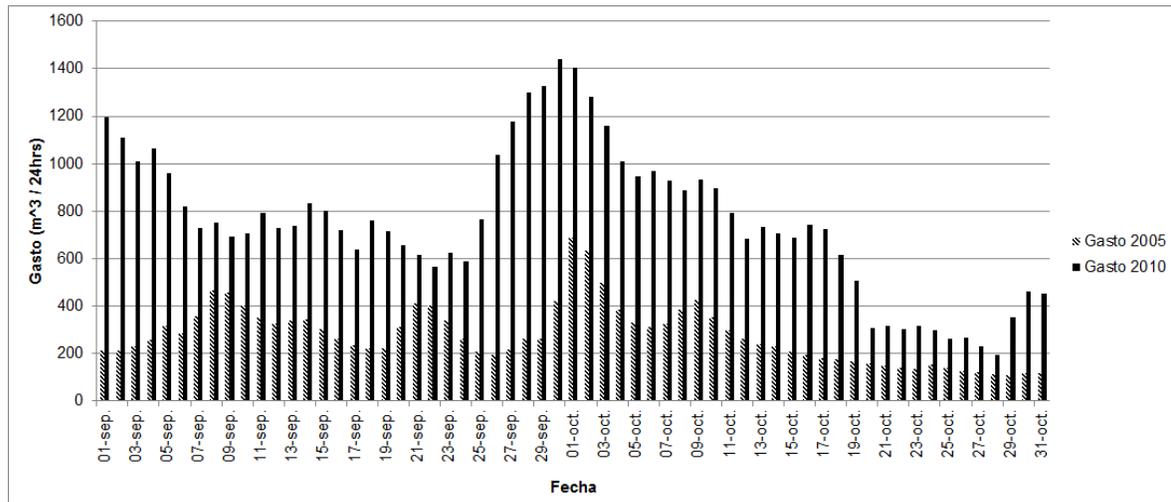


Figura 19. Serie del gasto diario registrado en la estación hidrométrica 30016.

## 5.0 Resultados de la simulación del modelo WRF-Hydro en las subcuencas de los ríos de la Sierra

### 5.1 Descripción de los experimentos

#### Configuración de las opciones físicas y dinámicas del WRF

La configuración de las opciones físicas y dinámicas del WRF se realizan en el archivo de control "namelist.input". En este trabajo se aplicó una configuración de opciones similar a una de las utilizadas en el IMTA para correr el WRF.

El principal ajuste en la configuración de las opciones se relaciona con los esquemas de parametrización de la convección de cúmulus para simular la precipitación, aplicada a los tres dominios del WRF definidos para la subcuenca de La Sierra, con base en la consideración de las conclusiones a las que llegó Arakawa (2004; citado por Gilliland & Rowe, S/A) después de la revisión y análisis que realizó de artículos de diversos investigadores, a partir de lo cual considera que los esquemas de parametrización de cúmulus en el WRF (CPS por sus siglas en inglés) fueron desarrollados para operar preferentemente en escalas de 32 a 48 km de malla. Estos esquemas se desarrollaron inicialmente en modelos globales. Aunque en algunas ocasiones, como lo encontrado en los experimentos realizados, no es completamente válido asumir que la simulación en mallas finas no necesitarán un CPS para mejorar la simulación de la precipitación y los parámetros asociados (Litta *et al.*, 2011; Gilliland & Rowe, S/A).

Con base en lo anterior se realizaron seis experimentos con el modelo WRF en los que se variaron los esquemas de parametrización de cúmulus (Cu) que inciden directamente en la simulación de la convección y la precipitación (cuadro 5).

Cuadro 5. Parametrizaciones de cúmulus aplicadas en la simulación atmosférica con el WRF.

Parametrización (Cu)	Descripción del esquema
0	Sin esquema de cúmulus. Solución explícita. La convección se presenta en cualquier región de la malla del dominio.
1	Kain-Fritsch (K-F): un esquema de submalla para convección profunda y somera que usa una aproximación de flujo de masa en corrientes descendentes y remoción de CAPE.
2	Betts-Miller-Janjic (B-M-J): Esquema de ajuste para convección profunda y somera relajado hacia perfiles de humedad y temperatura variables determinados a partir de consideraciones termodinámicas. Usado operacionalmente en el WRF-NMM en NCEP.
4	Arakawa-Schubert simplificado (A-S): esquema simple de flujo de masa con cuasi-equilibrio cercano con esquema de mezcla somera.
6	Tiedke modificado (T): Esquema tipo flujo de masa con remoción de CAPE, componente somera y transporte de momento.
14	Nuevo Arakawa-Schubert simplificado (A-S-n). Esquema de flujo de masa con componentes profunda y somera y transporte de momento.

Fuente: <http://meteomodel.pl/klimat/braer/01.txt>

### **Configuración de las opciones físicas del WRF-Hydro**

La configuración de las opciones físicas del WRF-Hydro se realiza en los archivos de control “*hydro.namelist*” y “*namelist.hrlidas*”. En los archivos se habilitan/deshabilitan las opciones de las funciones de tránsito a resolver, las rutas de los archivos de entrada (con datos atmosféricos y terrestres), la profundidad de las capas del suelo, el paso de tiempo, la resolución espacial de la malla fina así como el múltiplo entre el tamaño de la malla fina con el de la malla considerada para el LSM Noah.

El WRF-Hydro considera un conjunto de archivos con parámetros físicos para ajustar la respuesta e intensidad del gasto simulado. En los archivos se varían, entre otros, valores relacionados con las características de la red de canales o con la conductividad hidráulica saturada. En las siguientes subsecciones se detallan los ajustes aplicados.

### ***Pasos del tiempo del WRF-Hydro***

En los experimentos realizados se varió el paso del tiempo considerado por el WRF-Hydro para la solución de las ecuaciones, al modificarse los valores en la variable **DTRT** del archivo “*hydro.namelist*”. Se consideró un valor inicial de 2 segundos, como lo sugieren los desarrolladores del sistema para un tamaño de celda/pixel de 30 metros de resolución (Gochis *et al.*, 2015), y se ajustó el valor para reducir las inestabilidades presentes en el modelo, observadas en los resultados de la simulación del gasto, y que se relacionan con el número de Courant (**Cn**) el cual debe ser cercano a 1.0 para prevenir la difusión numérica. El valor de **Cn** también afecta la estabilidad de la rutina de tránsito por lo que valores de **Cn** deben ser menores que 1.0. Los pasos de tiempo aplicados en los experimentos se listan a continuación.

T (seg) aplicados para la malla fina de 30 metros de resolución
2
3
4
5
6

### ***Parámetros relacionados con la red de canales***

En los experimentos hidrológicos se variaron los parámetros relacionados con la red de canales de corriente en el archivo “*CHANPARM.TBL*”. El contenido del archivo se presenta en la figura 20.

La red de canales considera como mínimo 1,000 celdas para que se presente el drenado en la red de canales. La capa de información de la red de canales se genera con el MDE de INEGI procesado con ArcGIS.

Channel Parameters				
StreamOrder				
StreamOrder	Bw	HLINK	ChSSlp	MannN'
10,1,	'Bw	HLINK	ChSSlp	MannN'
1,	3.0,	0.02,	3.0,	0.08
2,	10.0,	0.02,	2.0,	0.10
3,	30.0,	0.02,	0.75,	0.12
4,	55.,	0.03,	0.20,	0.06
5,	70.,	0.03,	0.10,	0.05
6,	100.,	0.03,	0.05,	0.04
7,	110.,	0.03,	0.05,	0.04
8,	120.,	0.10,	0.05,	0.03
9,	130.,	0.30,	0.05,	0.02
10,	150.,	0.30,	0.05,	0.01

Figura 20. Contenido del archivo de parámetros “CHANPARAM.TBL”.

La descripción de las columnas del archivo “CHANPARAM.TBL” es:

- La primera columna es el orden *Strahler* para cada tramo de la red de canales de corriente. Se asocia con los valores de la capa de información de la orden de *Strahler* obtenida al procesar el modelo digital de elevación del INEGI con ArcGIS.
- La columna “BW” es el ancho del fondo del canal (en metros).
- “HLINK” es la profundidad inicial del agua en el canal (en metros), los desarrolladores del WRF-Hydro recomiendan utilizar valores pequeños y permitir que el modelo alcance su propio equilibrio después de varias horas de simulación que se relacionan con el tiempo que toma una gota de lluvia en escurrir desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida de la misma.
- “ChSSlp” es la pendiente del costado del canal.
- “MannN” es el coeficiente de rugosidad de *Manning* para el orden de corriente respectivo.

En el cuadro 6 se indican los ajustes aplicados en los parámetros de cada uno de los experimentos, denotados con la letra E1, E2 y E3, en relación con:

- i. el coeficiente de *Manning* para las siete categorías u orden *Strahler* de las corrientes. El coeficiente es un parámetro de rugosidad que pone resistencia al movimiento del caudal en la red de canales. En la figura 21 se representa gráficamente los valores aplicados para el coeficiente de *Manning* para cada experimento y orden de *Strahler*,
- ii. el ancho del fondo para cada una de las siete categorías que conforman la red de canales de corriente.

Cuadro 6. Configuración de los experimentos de simulación del WRF-Hydro en modo desacoplado y acoplado al WRF.

Orden <i>Strahler</i> de la corriente	E1		E2		E3	
	Man	Anch	Man	Anch	Man	Anch
1	0.50	1	0.15	1.5	0.35	1.5
2	0.35	3	0.12	5	0.22	8
3	0.20	8	0.10	15	0.15	25
4	0.15	35	0.07	45	0.12	60
5	0.10	55	0.05	60	0.07	90
6	0.08	75	0.04	90	0.05	120
7	0.05	110	0.035	100	0.035	140

Man: Coeficiente de *Manning*, Anch: Ancho del fondo del canal (mts).

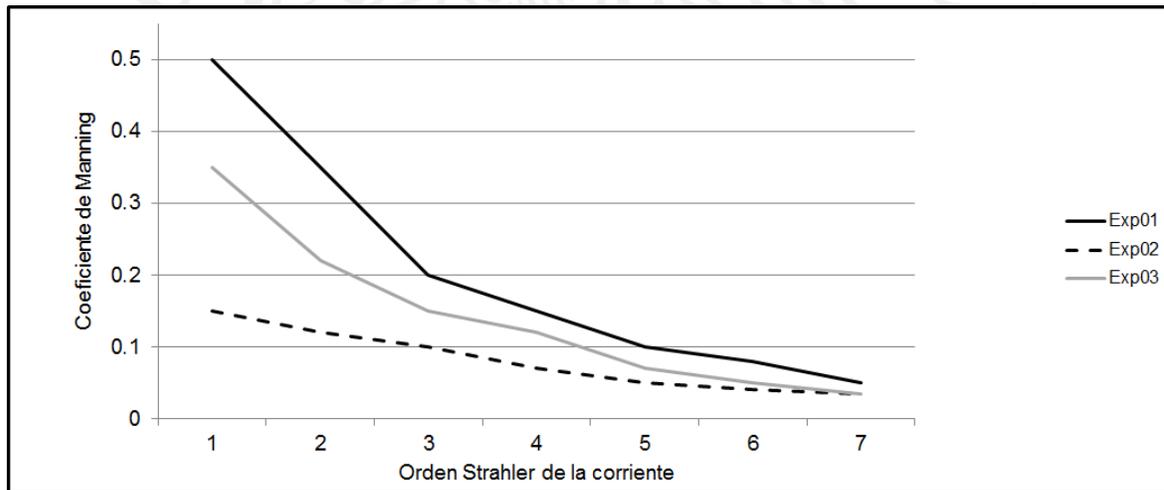


Figura 21. Representación del coeficiente de *Manning* considerado para cada experimento.

La selección de los coeficientes de *Manning* se basó a partir de la información que se encuentra en el anexo de un documento técnico de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) que propone valores del coeficiente de rugosidad de *Manning* para cauces naturales (SAGARPA, S/A) y en los valores que incluye el archivo del caso de prueba del WRF-Hydro, para la región de *Front Range*, Colorado, proporcionado por los desarrolladores para los casos de prueba del WRF-Hydro. En el documento de la SAGARPA se indica un coeficiente entre 0.03 y 0.05 para cursos de montaña con anchos menores a 30 metros y de 0.10 a 0.20 en caso de presencia de árboles, en tanto que establece valores de 0.035 a 0.10 para cursos con anchos mayores a 30 metros y con secciones irregulares y rugosas.

- Los valores de E3 son los que mejor inciden en la representación del gasto simulado con el WRF-Hydro.

### Parámetros relacionados con la conductividad hidráulica

Otro parámetro modificado en los experimentos se relaciona con la conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas de suelo que se definen en el archivo "HYDRO.TBL". El contenido parcial del archivo se presenta en la figura 22.

```

19, for SATDK
SATDK    MAXSMC    REFSMC    WLTSMC    QTZ      '
1.76E-4, 0.439,    0.336,    0.010,    0.92,    'SAND'
1.56E-4, 0.521,    0.483,    0.028,    0.82,    'LOAMY SAND'
3.46E-5, 0.534,    0.483,    0.047,    0.60,    'SANDY LOAM'
7.20E-5, 0.576,    0.460,    0.084,    0.25,    'SILT LOAM'
7.20E-5, 0.576,    0.483,    0.084,    0.10,    'SILT'
1.41E-5, 0.539,    0.429,    0.066,    0.40,    'LOAM'
2.45E-6, 0.504,    0.414,    0.067,    0.60,    'SANDY CLAY LOAM'
1.70E-6, 0.564,    0.487,    0.120,    0.10,    'SILTY CLAY LOAM'
1.41E-6, 0.565,    0.482,    0.103,    0.35,    'CLAY LOAM'
2.17E-6, 0.506,    0.438,    0.100,    0.52,    'SANDY CLAY'
1.02E-6, 0.568,    0.504,    0.126,    0.10,    'SILTY CLAY'
1.28E-6, 0.568,    0.512,    0.138,    0.25,    'CLAY'
3.38E-6, 0.539,    0.429,    0.066,    0.05,    'ORGANIC MATERIAL'
0.0,    1.0,    0.0,    0.0,    0.60,    'WATER'
1.41E-4, 0.20,    0.170,    0.006,    0.07,    'BEDROCK'
1.41E-5, 0.421,    0.283,    0.028,    0.25,    'OTHER(land-ice)'
9.74E-7, 0.468,    0.454,    0.030,    0.60,    'PLAYA'
1.41E-4, 0.200,    0.170,    0.006,    0.52,    'LAVA'

```

Figura 22. Sección del contenido del archivo "HYDRO.TBL".

Donde,

SATDK – es la conductividad hidráulica saturada (m/s)

MAXSMC – Máximo valor de humedad volumétrica en el suelo (m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>)

REFSMC – Valor de referencia de la humedad volumétrica del suelo (m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>)

WLTSMC – “punto de marchitamiento” para el agua volumétrica del suelo (m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>)

QTZ – Fracción “quartz” del suelo

La conductividad hidráulica se refiere a la velocidad con la que el agua pasa a través de la masa del suelo, por unidad de gradiente de carga hidráulica. Este parámetro depende de la porosidad del suelo, particularmente, de la proporción de poros con radio equivalente mayor a 15 µm que se mantienen abiertos en condiciones de saturación (Flores y Alcalá, 2010).

La conductividad hidráulica saturada de agua en el suelo se refiere a la permeabilidad del suelo. Bajos valores de conductividad hidráulica saturada (ej.  $<3.0 \times 10^{-6}$ ) podrían ser debidos a una baja porosidad, pocos poros grandes y una pobre interconectividad entre ellos, así como a la presencia de una elevada cantidad de arcillas expandibles. Valores altos (ej.  $>3.0 \times 10^{-4}$ ), generalmente, se presentan en suelos de textura gruesa, a pesar de su baja porosidad (Flores y Alcalá, 2010).

Los valores de la conductividad hidráulica saturada se ajustaron con base en los datos propuestos por Clapp y Hornberger (1978) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA [http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2\\_074846](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_074846)).

En el cuadro 7 y figura 23 se presentan los valores aplicados para cada experimento denotado con la letra K0 para los valores que vienen en el caso de prueba del WRF-Hydro, K1 en el que se aproximan a los datos de Clapp y Hornberger (1978) y K2, K3 y K4 que se ajustan entre los rangos propuestos por la USDA.

- Los valores de K2 son los que mejor inciden en la representación del gasto simulado con el WRF-Hydro.

Cuadro 7. Valores de conductividad hidráulica aplicada en los experimentos.

Textura de suelo	K0 (m/s)	K1 (m/s)	K2 (m/s)	K3 (m/s)	K4 (m/s)
sand	1.07E-06	1.76E-04	4.23E-05	5.00E-07	1.41E-04
Loamy sand	1.41E-05	1.56E-04	4.23E-05	5.00E-06	1.41E-04
Sandy loam	5.23E-06	3.46E-05	1.41E-05	1.00E-06	1.41E-05
Loam	3.38E-06	1.41E-05	6.94E-06	8.00E-07	1.41E-05
Silty loam	2.81E-06	7.20E-05	7.20E-06	8.00E-07	1.41E-05
Silt	2.81E-06	7.20E-05	7.20E-06	8.00E-07	1.41E-05
Clay loam	2.45E-06	1.41E-06	4.23E-06	8.00E-07	4.23E-06
Sandy clay loam	4.45E-06	2.45E-06	6.31E-06	9.00E-07	8.00E-06
Silty clay loam	2.04E-06	1.70E-06	4.23E-06	8.00E-07	3.35E-06
Sandy clay	7.22E-06	2.17E-06	1.20E-07	1.00E-06	3.00E-06
Silty clay	1.34E-06	1.02E-06	2.50E-07	6.00E-07	2.00E-06

Clay	9.74E-07	1.28E-06	4.20E-07	1.00E-07	1.41E-06
Organic mater	3.38E-06	3.38E-06	1.38E-06	2.20E-06	7.00E-06
Bedrock	1.41E-04	3.38E-06	1.10E-04	1.10E-05	3.38E-06

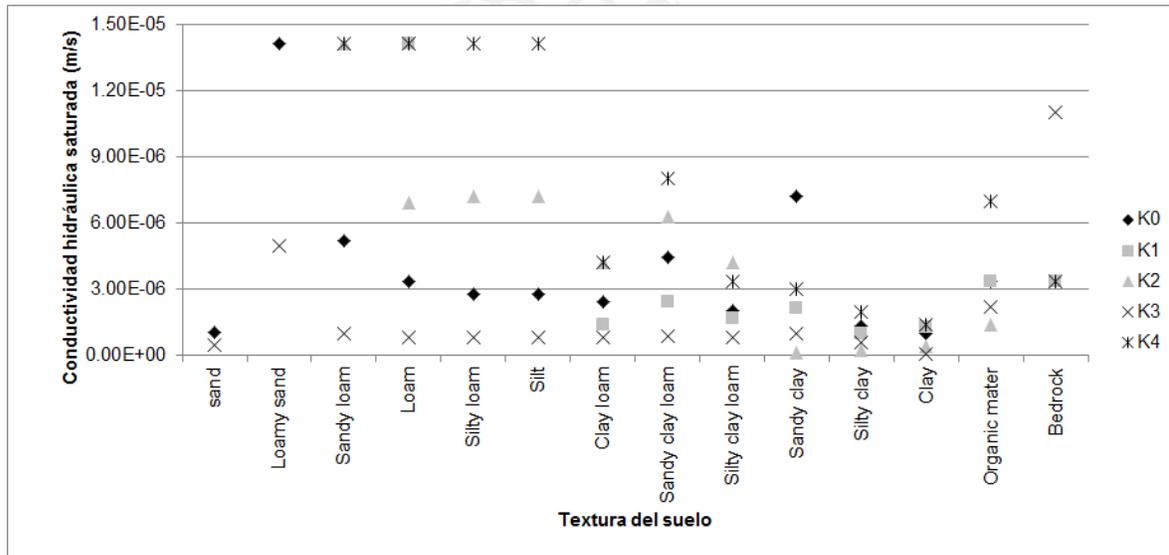


Figura 23. Variación de los valores de la conductividad hidráulica para diferentes texturas de suelo.

- En caso de que se necesite modificar los valores de otros parámetros diferentes para ajustar la simulación del gasto, revisar el manual técnico del WRF-Hydro (Gochis, *et al.*, 2015).

## 5.2 Análisis de la precipitación del WRF respecto a la observada

Se realizó la simulación de seis experimentos atmosféricos con el modelo WRF en modo desacoplado y una en modo acoplado con el WRF-Hydro, en los que se varió la configuración de los esquemas de parametrización de cúmulus (Cu), como se indica en Cuadro 4. A continuación se presenta el análisis de los resultados de la precipitación simulada con respecto a la observada para el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010 y se define la configuración que se utilizó para realizar la simulación hidrológica con el WRF-Hydro desacoplado y acoplado con el WRF.

En el caso de la precipitación acumulada en las cinco estaciones que se encuentran en el área de influencia del gasto medido en la parte media de la subcuenca (figura 24), el esquema Cu0 es el que más subestima la precipitación entre el 23 y 26 de septiembre y, junto al esquema Cu1, es el que mayor sobreestimación presenta el día de máxima intensidad modelada del periodo (28 de septiembre).

Los esquemas Cu2, Cu4 y Cu6, utilizados cuando se corrió el WRF en modo desacoplado, aunque subestiman la precipitación del 26, 28 y 29 de septiembre, días en los que se registró en las estaciones climáticas la mayor precipitación, son los que tienen mejor representatividad de la medida en estaciones climáticas. Éstos esquemas sobreestiman la precipitación del 27 de septiembre.

La precipitación que resulta del WRF acoplado con el WRF-Hydro (denominado en la figura 24 como Cu\_6\_Ac), utilizando el esquema Cu6, mejora la que es obtenida en modo desacoplado para el 28 y 30 de septiembre e incrementa la sobreestimación del 23 y 27 del mismo mes.

En tanto que el esquema Cu14 subestima la precipitación de los días con mayor precipitación observada.

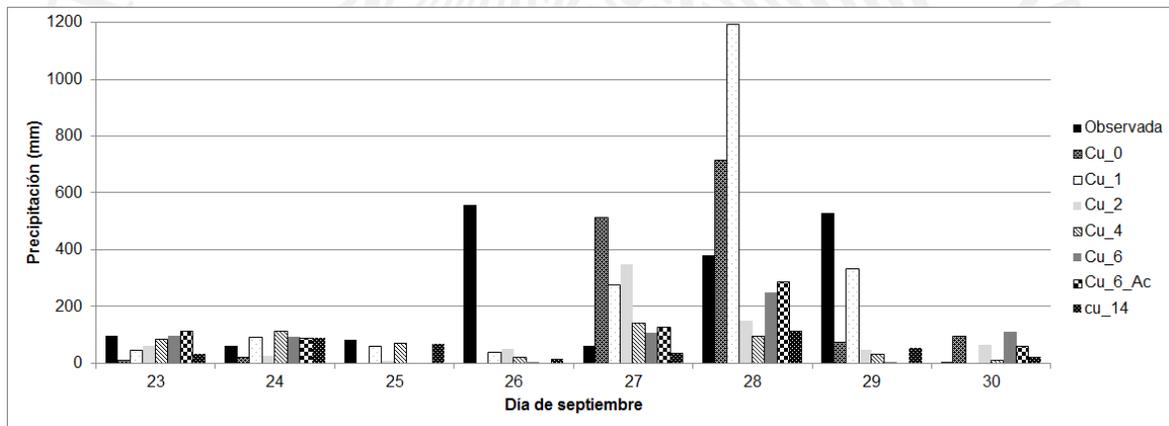


Figura 20. Precipitación diaria acumulada en cinco estaciones climáticas que se encuentran en el área que influye en el gasto medido en la parte media de la subcuenca de La Sierra.

A partir de la precipitación simulada con el WRF-Hydro, analizada con respecto a la medida en doce estaciones climáticas que se distribuyen en la subcuenca La Sierra y sus tributarias (las cinco estaciones ya analizadas más siete adicionales), que inciden en el gasto medido en la parte baja de la subcuenca, se observa que el esquema Cu0 y Cu1 son los que se disparan en la sobreestimación de la precipitación para el 28 de septiembre en comparación con el resto de los esquemas y días. Esto tiene implicaciones relevantes en la simulación del gasto con el WRF-Hydro ya que se modelan valores horarios mayores a 20,000 m<sup>3</sup>/s, tal como se discute en la siguiente sección, motivo por el cual no se consideran los resultados de estos esquemas para los experimentos de simulación hidrológica.

La precipitación simulada cuando se aplica el esquema Cu2 es más consistente con la observada entre los días 26 al 29 de septiembre de 2010.

En tanto que la precipitación que resulta del WRF acoplado al WRF-Hydro (denominado en la figura 25 como Cu\_6\_Ac), utilizando el esquema Cu6, mejora la que es obtenida en modo desacoplado para el 28 y 30 de septiembre.

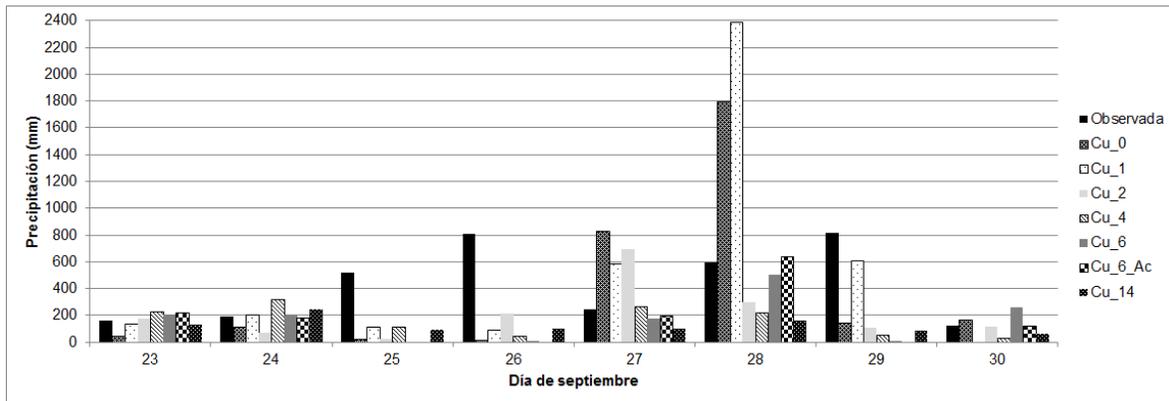


Figura 25. Precipitación diaria acumulada en 12 estaciones climáticas que se encuentran en el área que influye en el gasto medido en la parte baja de la subcuenca de La Sierra.

Espacialmente, el patrón de la precipitación simulada, acumulada en el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010, presenta una sobreestimación en la mayor parte del área de la subcuenca de La Sierra y sus cuatro tributarias cuando se considera el esquema de parametrización de cúmulus Cu0 y una subestimación que se va acentuando desde el esquema de cúmulus Cu2 hasta el Cu6, tal como se observa en las figuras 26 a)-d). La sobreestimación es influenciada por la intensidad de precipitación simulada del día 28 de septiembre.

La sobreestimación de la precipitación con Cu0 incide en que la simulación del gasto se dispare, como se argumenta en la siguiente sección.

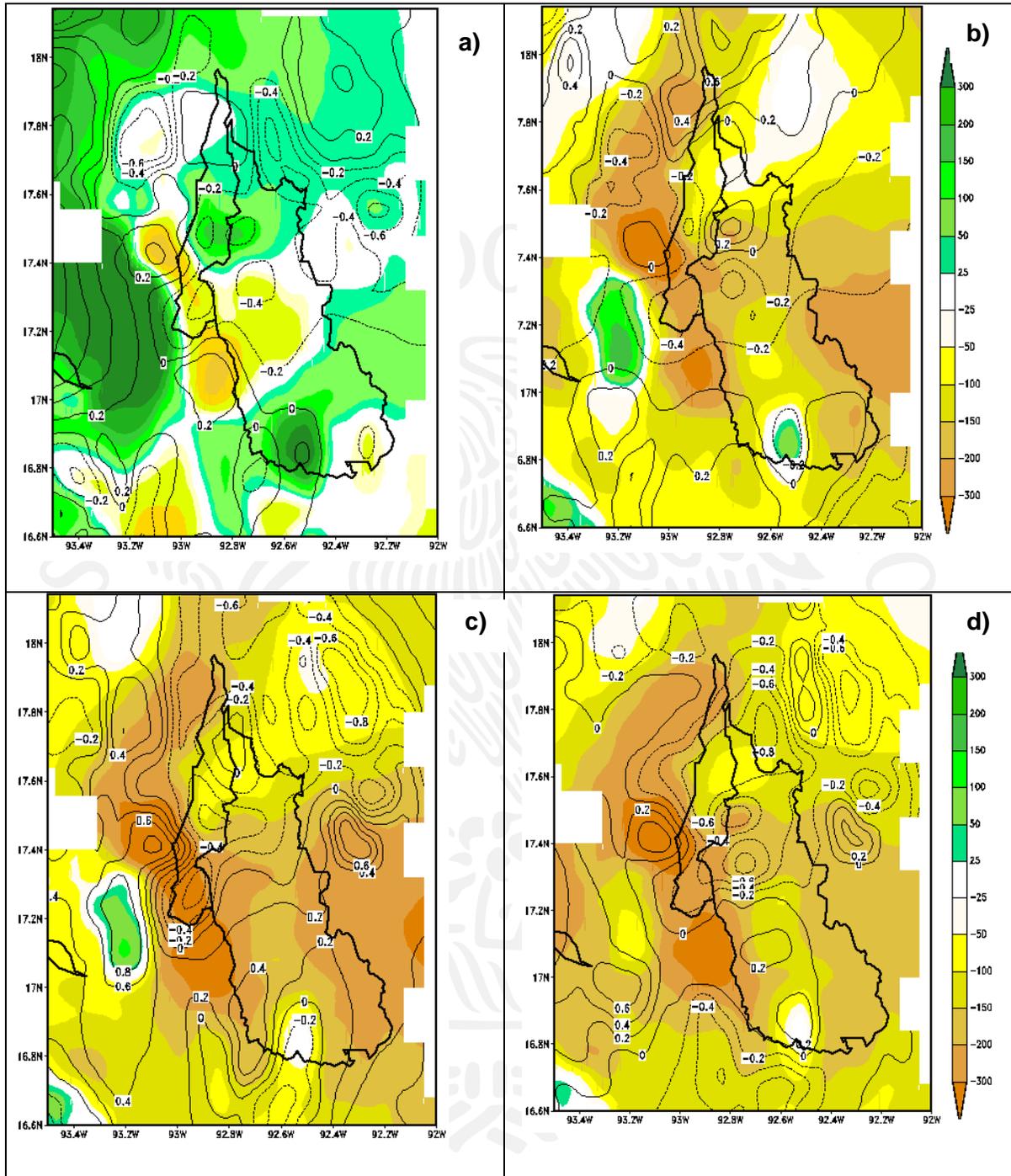


Figura 21. Diferencia entre la precipitación medida en estaciones climáticas y la modelada con el WRF para el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010. a) esquema de cúmulus Cu0, b) esquema de cúmulus Cu2, c) esquema de cúmulus Cu4 y d) esquema de cúmulus Cu6. Las líneas representan la correlación de Pearson.

En el diagrama de Taylor de la figura 27 se muestra la relación entre la correlación de *Pearson* y la proporción entre la desviación estándar de la precipitación modelada, bajo cuatro esquemas de parametrización de cúmulus, y la observada en doce estaciones climáticas analizadas, y que se encuentran distribuidas en la subcuenca de La Sierra y sus cuatro tributarias.

La correlación de *Pearson* (Wilks, 2006) se calcula con:

$$r_{xy} = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma_x} \frac{(y_i - \bar{y})}{\sigma_y} \right] \quad (27)$$

Aquí  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son la desviación estándar de los datos simulados y observados, respectivamente  $x_i$  son los  $n$  datos individuales de la variable modelada y  $\bar{x}$  es el promedio de la variable.

La desviación estándar (Wilks, 2006) se calcula con:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (28)$$

Aquí  $x_i$  son los  $n$  datos individuales de la variable y  $\bar{x}$  es el promedio de la variable.

A partir del diagrama de Taylor, en el caso de la precipitación simulada con el WRF desacoplado del WRF-Hydro (figura 27.a), se identifica que el esquema Cu0, que considera solución explícita para la convección, tiene valores de correlación menor a 0.5 y en el 50% de las estaciones la precipitación modelada sobreestima la observada para el periodo del 23 al 30 de septiembre de 2010. Con los otros tres esquemas de parametrización la precipitación es subestimada, como lo reflejan los valores de la relación entre la desviación estándar modelada y la observada. El esquema Cu2 es el que tiene valores intermedios de subestimación aunque es el esquema Cu6 el que tiene correlaciones mayores a 0.6.

Las métricas de la precipitación simulada con el WRF acoplado al WRF-Hydro, utilizando el esquema Cu6 (representado en la figura 27.b como Cu-6(Ac)), mejoran para las estaciones 7160, 7373, 27019 y 27024 en comparación con la que resulta para el mismo esquema en modo desacoplado.

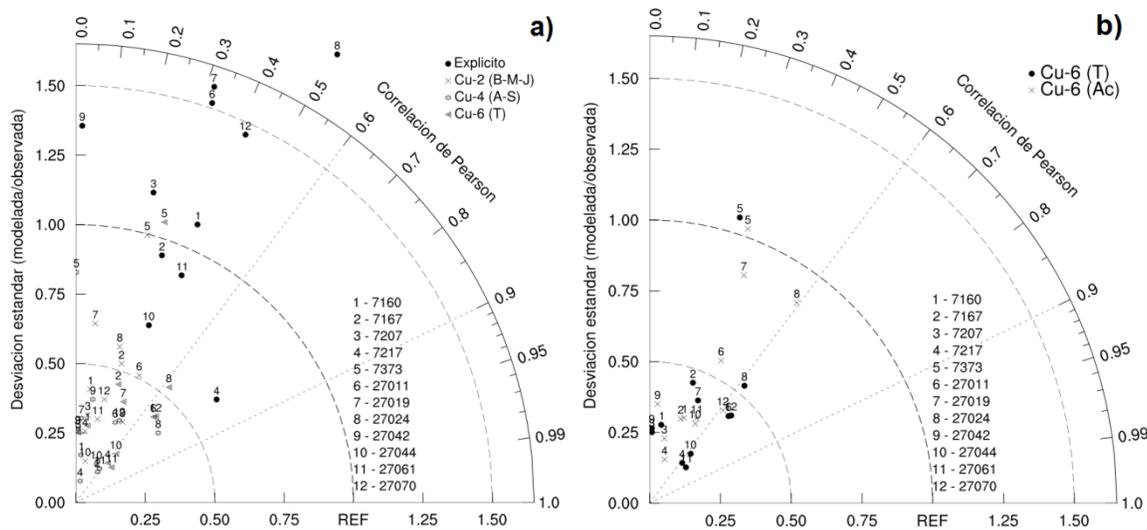


Figura 27. Diagrama de Taylor para la precipitación medida en doce estaciones climáticas y la modelada a) en modo desacoplado bajo cuatro esquemas de parametrización de cúmulus (Cu) y b) en modo acoplado para el esquema Cu6.

Con base en la consistencia en el patrón y proximidad entre los valores de precipitación modelados con el WRF en modo desacoplado contra los observados en los días en los que se presenta la mayor precipitación del periodo analizado, y considerando los valores de correlación, es que se utilizó la precipitación obtenida con los esquemas Cu2 y Cu6 para forzar la mayor parte de los experimentos hidrológicos realizados con el WRF-Hydro.

Un aspecto relevante a subrayar es que, en términos generales, es pobre la representación de la precipitación simulada con el WRF con respecto a los picos máximos medidos en las estaciones climáticas en los días analizados para las seis configuraciones de cúmulus analizadas. Se recomienda realizar una evaluación objetiva de la precipitación modelada con el WRF en el sureste de México en el que se ajusten los esquemas de parametrización en combinación con el ajuste de otros parámetros físicos del modelo y los datos de entrada al WRF.

### 5.3 Análisis del gasto del WRF-Hydro respecto al observado

La simulación del gasto (Q), con el WRF-Hydro en modo desacoplado, a la salida de la subcuenca de La Sierra (estación hidrométrica 30016), considerando los datos atmosféricos generados con el WRF sin activar esquemas de parametrización de cúmulus (Cu0), es muy extremo con respecto al Q observado (figura 28), influenciado por la precipitación sobreestimada del 28 de septiembre. El gasto arroja valores mayores de 20,000 m<sup>3</sup>/s

- La nomenclatura para el nombre de los experimentos es **Cux\_Ex\_Kx\_Tx**  
Aquí:  
**Cux** se refiere a la parametrización de cúmulus y “x” al número correspondiente con el esquema indicado previamente.  
**Ex**: Se refiere a las variaciones en los parámetros de rugosidad de *Manning* y ancho del fondo de la red de canales, “x”  
**Kx**: corresponde a los ajustes en el parámetro de conductividad hidráulica para diferentes texturas del terreno, “x”  
**Tx**: representa el paso en el tiempo asignado para el WRF-Hydro, “x” corresponde al valor considerado.

Con base en lo identificado en los valores del gasto se procedió a realizar experimentos numéricos con el WRF-Hydro solo considerando los forzantes atmosféricos generados con el WRF para los esquemas de parametrización de cúmulus *Betts-Miller-Janjic* (Cu2), *Arakawa-Schubert* simplificado (Cu4) y *Tiedke* modificado (Cu6).

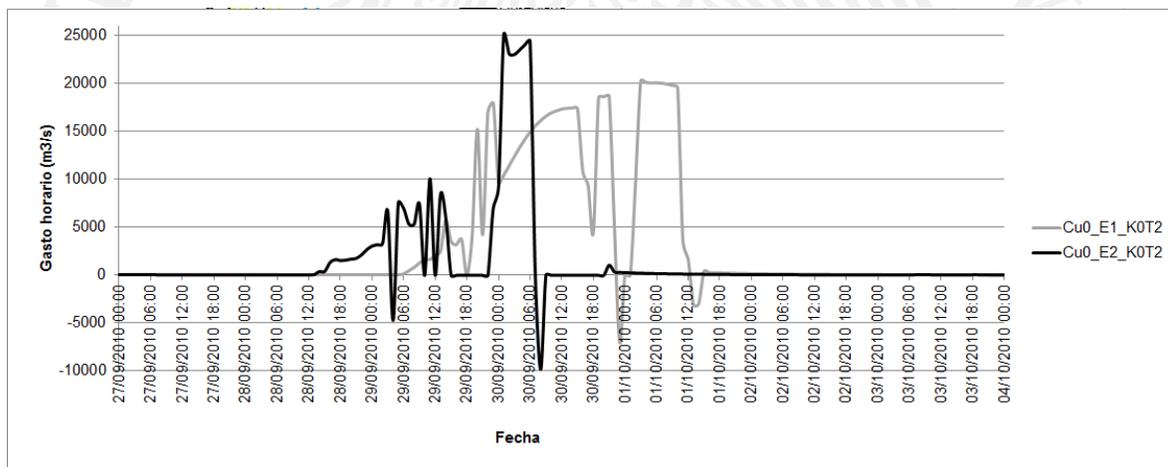


Figura 28. Gasto simulado en la estación 30016 con el WRF-Hydro en modo desacoplado considerando la precipitación modelada con el esquema Cu0.

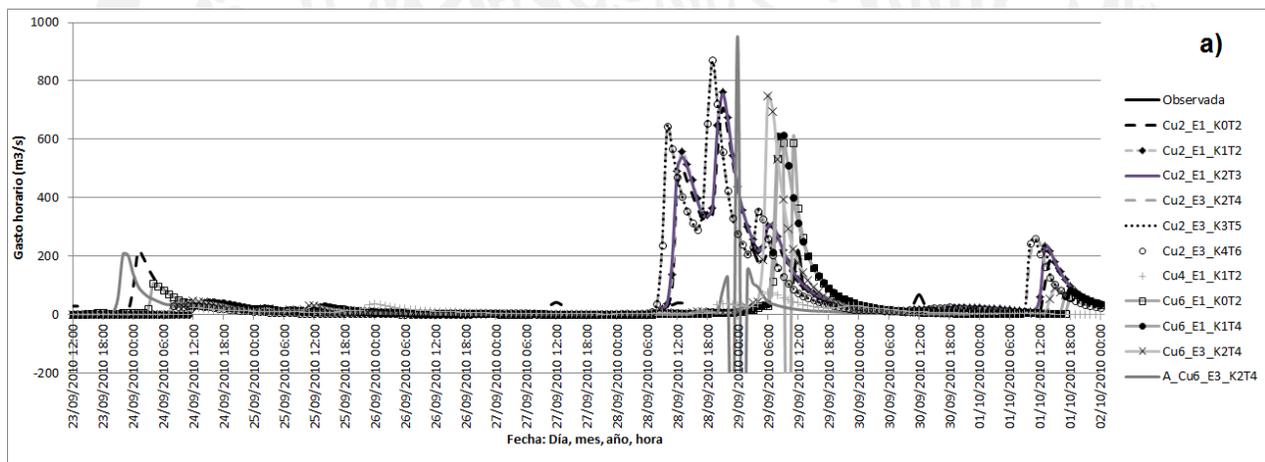
El gasto modelado con el WRF-Hydro en modo desacoplado, cuando es forzado con los datos atmosféricos del WRF, utilizando la parametrización Cu2 es mayor que el que resulta con la parametrización Cu6, ésta última está por arriba del gasto obtenido con los datos atmosféricos bajo la parametrización Cu4. Se identifica que los resultados del Q modelado forzado con Cu2 y Cu6 son más próximos al Q observado.

El Q modelado, forzado con los datos atmosféricos bajo Cu2, se aproxima al patrón del Q observado entre el 28 al 29 de septiembre y el 01 de octubre de 2010 (figura 29 y 30), como respuesta a la precipitación simulada para ese periodo. El Q modelado cuando se consideran los datos atmosféricos

bajo Cu6 es representativo del patrón del Q observado del 29 de septiembre en la estación 30031 o del 30 de septiembre para la estación 30016.

Los gastos modelados, considerando los datos atmosféricos forzados con Cu6 y Cu2, sobreestiman el Q medido en la estación hidrométrica 30031, de la parte media de la subcuenca, entre 200% y 300%, respectivamente. En la estación 30016, a la salida de la subcuenca, el gasto es sobreestimado con valores alrededor del 250% con el Q modelado cuando se fuerza con Cu2 y es subestimado cuando se fuerza con Cu6, cuando se utiliza la combinación de parámetros más efectiva en cada estación, como lo es E3\_K2T4.

El WRF-Hydro acoplado al WRF simula una magnitud de gasto mayor, y se presenta seis horas antes, en la estación 30031 en comparación con el Q que resulta del modo desacoplado bajo la misma configuración Cu6\_E3\_K2T4. La modelación del Q en la estación 30016 se reduce en comparación con el gasto simulado para el 29 de septiembre con el modo desacoplado, no obstante la mejora en la simulación de la precipitación que resulta en modo acoplado. Lo anterior se relaciona a que las mejoras en la precipitación simulada con el WRF acoplado remueven parte de la humedad del suelo, la precipitación mejora en áreas que inciden principalmente en el gasto de la parte media de la subcuenca y a los resultados de la simulación de la variable de humedad del suelo, que se presenta en la siguiente sección.



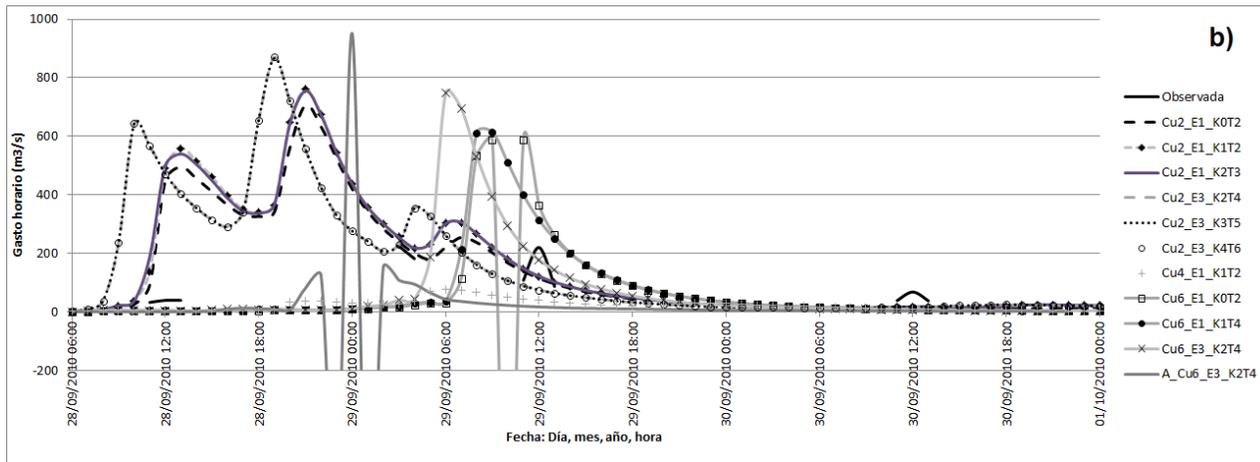


Figura 29. Gasto horario ( $m^3/s$ ) simulado bajo diferentes experimentos de modelación con el WRF-Hydro en la estación 30031, a) periodo 23 de septiembre al 02 de octubre de 2010 y b) periodo 28 al 30 de septiembre.

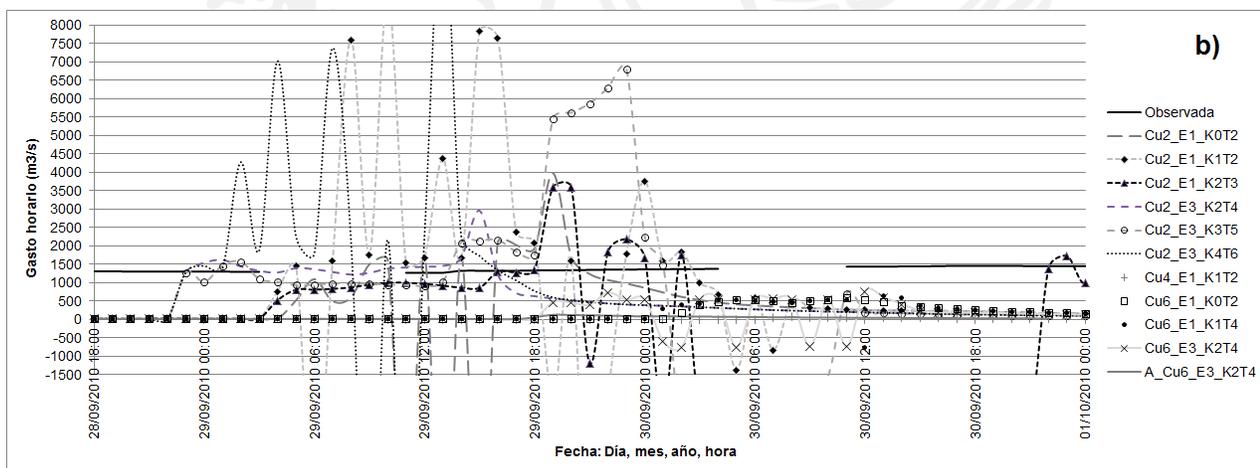
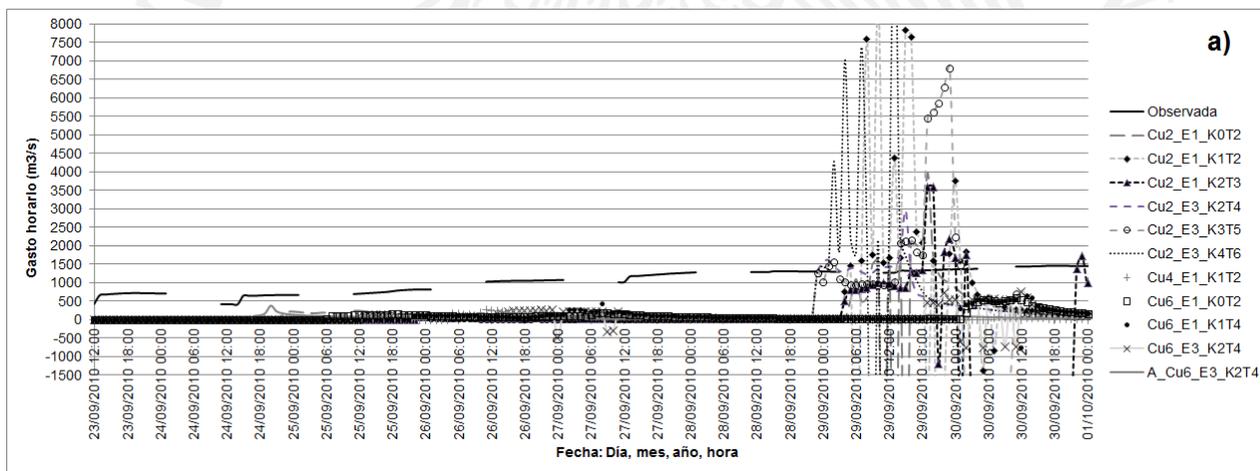


Figura 30. Igual a la anterior, para el caso de la estación 30016.

En las series del Q se presentan valores negativos en la estación 30016 (figura 30) debido a la no linealidad del WRF-Hydro, lo que puede implicar que hay inestabilidad o un flujo inverso o remanso en algunos tramos de la red de los canales. La estabilidad numérica asociada con el paso de tiempo asignado al WRF-Hydro indica que es baja para valores de 2 y 6 segundos o bien se presenta inestabilidad. Con valores de 4 y 5 segundos la estabilidad mejora, como se observa en la figura 16 y se resume en el cuadro 8.

Los valores del coeficiente de rugosidad de *Manning* de la configuración E1 son mayores a los de E2 en tanto que en E3 son intermedios. La influencia de la variación de los coeficientes de *Manning* influye, principalmente, en el inicio de la señal de Q, presentándose un desfase/retraso entre 10 a 18 horas en el inicio de Q con E1 en comparación con E2 y E3 (figuras 29b y 30b).

Con respecto a la respuesta de la intensidad del Q relacionado con la conductividad hidráulica saturada (K) se identifica, de las series presentadas en las figuras 29 y 30, que la Q modelada con K0 y K2 son altas pero con valores de intensidad menor en comparación con el Q que resulta con K1, K3 y K4 (cuadro 8), que es más acentuado en la estación 30016.

La intensidad del Q modelado en la estación 30031 con K0 es muy alta el 24 de septiembre y se atenúa con K2 a valores cercanos al Q observado. En el periodo de máxima Q modelada el patrón del Q es similar aunque ligeramente superior en el caso de K2, misma situación que el pico del 1 de octubre.

Hasta este punto, se identifica del análisis subjetivo que la mejor combinación de opciones y parámetros en el WRF-Hydro en modo desacoplado para simular el Q corresponde a un paso de tiempo entre 4 ó 5 segundos con una combinación de parametrización de cúmulus Cu2 o Cu6 considerando una configuración de parámetros de conductividad hidráulica saturada para la configuración K0 o K2.

Cuadro 8. Resumen cualitativo de la estabilidad numérica e intensidad del gasto simulado vs observado.

Estación	30016	30031		30016	30031
Paso de tiempo del WRF-Hydro (seg)	Estabilidad numérica		Conductividad hidráulica (K)	Aproximación entre Q modelado con Q observado	
2	Baja	Baja	K0	Alta	Media
3	Media	Alta	K1	Baja	Media
4	Alta	Alta	K2	Alta	Media
5	Alta	Alta	K3	Baja	Media

6	Baja	Alta		K4	Baja	Media
---	------	------	--	----	------	-------

Se realizó un análisis objetivo de los resultados a partir de calcular métricas entre el Q simulado, en diez experimentos generados con el WRF-Hydro en modo desacoplado y uno en modo acoplado, con el Q horario medido en dos estaciones hidrométricas (30031 y 30016) para dos periodos: 23 al 30 de septiembre de 2010 y 28 al 30 de septiembre, éste último fue en el que se simularon los Q más elevados. Se obtuvo la desviación estándar, el coeficiente de correlación de *Pearson*, el coeficiente de correlación de *Spearman*, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente *Nash-Sutcliffe*.

La correlación de *Spearman* (Wilks, 2006) se calcula con:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (29)$$

Donde  $D$  es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de  $x - y$ .  $N$  es el número de parejas.

El RMSE (Wilks, 2006) se calcula con:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (30)$$

Aquí  $y_i$  es la variable modelada y  $x_i$  es la variable observada.

El coeficiente *Nash-Sutcliffe* se calcula con:

$$E = 1 - \frac{\sum (X_{obs,i} - \overline{X_{modelo}})^2}{\sum (X_{obs,i} - \overline{X_{obs}})^2} \quad (31)$$

Donde  $X_{obs}$  son los datos del gasto observado en las estaciones hidrométricas y  $X_{modelo}$  son los valores simulados del gasto en el tiempo/lugar  $i$ . La barra sobre las letras representa el promedio de la variable.

Se omitieron valores negativos modelados y el correspondiente observado para la misma hora. Asimismo, se omitieron las horas sin información observada y se excluyeron las simuladas correspondientes a dichas horas.

Los resultados numéricos de las métricas para las estaciones hidrométricas se presentan en los cuadros 8 y 9. La desviación estándar, la correlación de *Spearman* y el coeficiente *Nash-Sutcliffe* se presentan gráficamente en la figura 19 y 20 para los dos periodos analizados.

De las métricas en la estación 30031 (cuadro 9) se encuentra que la desviación estándar (Dst) del Q horario modelado considerando Cu2 es más del triple que la Dst observada y presenta los valores más altos de RMSE para los dos periodos, congruente con la sobreestimación que se observa en la gráfica con la serie horaria del gasto. La Dst del Q generado con Cu6 es entre 2 y 3 veces la Dst observada con un RMSE menor al de Cu2, entre 50% y 70%. En el caso de Q con Cu4, la Dst modelada y el RMSE es el que presenta los valores más bajos en los dos periodos, en el primer caso es señal de una subestimación del Q. El RMSE en todos los experimentos aumenta su valor cuando se amplía el periodo de análisis.

En el caso del Q simulado con el WRF-Hydro acoplado con el WRF, para una configuración similar al del modo desacoplado (Cu6E3K2T4), la Dst y el RMSE se reduce y los coeficientes de correlación se detrimentan en el caso acoplado, principalmente para el periodo 23 al 30 de septiembre, señal de una subestimación con respecto al Q del modo acoplado. Las correlaciones permanecen altas para el periodo de máxima simulación del gasto; 28 al 30 de septiembre.

Cuadro 9. Resultados de las métricas entre el Q modelado y el observado para la estación 30031.

Métrica	Dst-Obs		Dst-Mod		Corr Pearson		Corr Spearman		Rmse	
	23-30 sep	28-30 sep	23-30 sep	28-30 sep	23-30 sep	28-30 sep	23-30 Sep	28-30 sep	23-30 sep	28-30 sep
<b>Experimento</b>										
Cu2E1K0T2	49.03	61.23	149.90	191.81	0.19	-0.04	0.23	0.13	151.12	231.96
Cu2E1K1T2	49.03	61.23	163.26	206.83	0.20	-0.03	0.37	0.10	164.44	253.38
Cu2E1K2T3	49.03	61.23	162.60	205.09	0.20	-0.04	0.37	0.09	163.92	252.54
Cu2E3K2T4	49.03	61.23	166.48	217.35	0.15	-0.09	0.32	-0.03	169.33	261.26
Cu2E3K3T5	49.03	61.23	166.22	216.97	0.15	-0.09	0.32	-0.03	169.07	260.84
Cu2E3K4T6	49.03	61.23	166.56	217.51	0.15	-0.09	0.32	-0.03	169.42	261.40
Cu4E1K1T2	49.03	61.23	14.45	17.64	0.67	0.72	0.47	0.78	55.21	72.09
Cu6E1K0T2	49.03	61.23	105.13	155.31	0.47	0.48	0.18	0.82	93.31	137.53
Cu6E1K1T4	49.03	61.23	95.32	139.63	0.53	0.55	0.30	0.83	81.83	117.89
Cu6E3K2T4	49.03	61.23	94.60	141.28	0.63	0.70	0.26	0.88	76.37	108.17
AC6E3K2T4	49.66	62.76	29.73	27.76	0.29	0.64	0.07	0.85	62.20	76.37

El coeficiente de correlación de *Spearman*, que explica la dispersión de parejas de puntos del Q modelado y el Q observado sin que necesariamente se ajusten a una recta como en el caso del coeficiente de *Pearson*, para los experimentos Cu2E3K2T4 y Cu6E3K2T4 (filas en gris en el cuadro 9 y figura 31) es de 0.32 con Cu2 y 0.26 con Cu6 en modo desacoplado y se reduce a 0.07 en modo acoplado con Cu6 para el periodo 23-30 de septiembre de 2010. El coeficiente se reduce a -0.3 con Cu2 y aumenta a 0.88 con Cu6, en modo desacoplado, y a 0.85 en modo acoplado para el periodo 28 al 30 de septiembre.

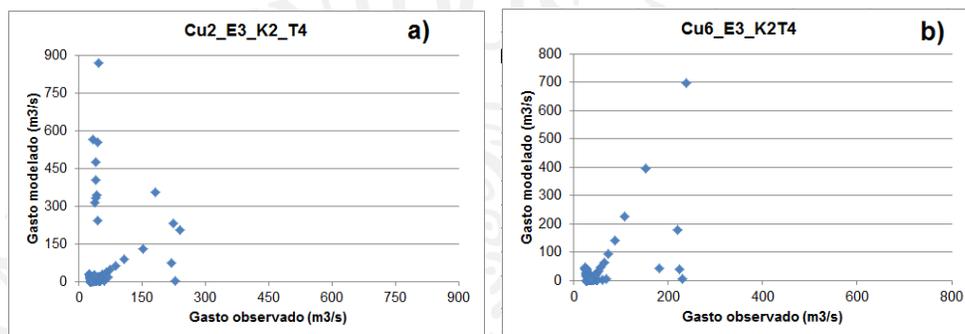


Figura 31. Dispersión entre el gasto horario modelado y observado en el periodo 23-30 de septiembre de 2010 en la estación 30031 para a) Cu2 y b) Cu6.

En la estación 30016 (cuadro 10), la Dst del Q modelado considerando Cu2, en combinación con K1, K3 o K4, sobreestima en más de 1.5 veces la Dst de la Q observada y presenta los mayores valores del RMSE para los dos periodos. Mejoran los resultados de la Dst modelada cuando se considera K0 o K2 con Cu2, con valores del RMSE alrededor de la mitad de los tres experimentos anteriores. En el caso de Cu4, la Dst del Q modelado representa entre el 2.5% y el 13% de la Dst del Q observado, similar al resultado identificado para la estación 30031 e indicativo de la subestimación del Q modelado. La Dst con Cu6, en modo desacoplado y acoplado al WRF, subestima la Dst de la Q observada y los valores del RMSE son próximos al de los tres experimentos de Cu2 con K0 y K2. La desviación estándar que resulta del modo acoplado (AC6E3K2T4) es próxima a la que resulta con Cu4, lo que es un indicativo de la alta subestimación del Q modelado, como se observa en la serie del Q de la estación 30016 (figura 30).

Cuadro 10. Resultados de las métricas entre el Q modelado y el observado para la estación 30016.

Métrica	Dst-Obs		Dst-Mod		Corr Pearson		Corr Spearman		Rmse	
	23-30 sep	28-30 sep	23-30 sep	28-30 sep	23-30 sep	28-30 sep	23-30 sep	28-30 sep	23-30 sep	28-30 sep
Experimento										
Cu2E1K0T2	442.86	516.57	549.71	812.36	0.17	0.04	0.23	0.25	768.90	992.92

Cu2E1K1T2	443.99	522.86	1,178.12	1,775.01	0.14	0.01	0.23	0.21	1,232.17	1,850.59
Cu2E1K2T3	424.76	523.07	657.16	992.89	0.23	0.12	0.15	0.30	789.32	1,063.98
Cu2E3K2T4	445.42	517.91	465.68	640.84	0.14	-0.05	0.22	0.02	745.80	904.11
Cu2E3K3T5	442.71	520.62	1,264.78	1,837.90	0.18	0.05	0.22	0.16	1,277.01	1,929.05
Cu2E3K4T6	444.16	515.97	1,149.09	1,762.80	0.08	-0.05	0.23	0.04	1247.70	1,859.84
Cu4E1K1T2	445.42	517.91	57.21	13.01	0.07	0.06	0.04	0.03	770.62	972.61
Cu6E1K0T2	445.42	517.91	113.07	159.81	0.19	0.12	0.08	0.11	719.12	888.14
Cu6E1K1T4	444.23	517.93	127.32	174.96	0.22	0.13	0.12	0.14	721.80	880.62
Cu6E3K2T4	443.32	521.07	159.51	222.02	0.21	0.13	0.15	0.30	697.40	855.81
AC6E3K2T4	444.28	518.44	51.33	34.04	0.00	0.12	0.11	0.33	769.31	960.76

El coeficiente de correlación de *Spearman* es mayor para el experimento Cu6E3K2T4 en comparación con Cu2E3K2T4 (filas en gris en el cuadro 10 y figura 32) en ambos periodos, que aunque muy bajos se consideran los mejores con la situación de que presenta remansos (valores negativos de Q) en varios momentos durante la simulación con el WRF-Hydro los cuales no fueron considerados para el análisis.

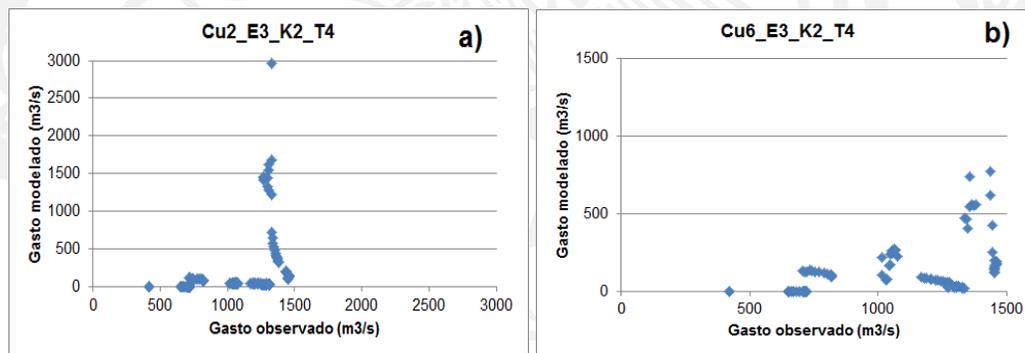


Figura 32. Dispersión entre el gasto horario modelado y observado en el periodo 23-30 de septiembre de 2010 en la estación 30016 para a) Cu2 y b) Cu6.

La desviación estándar se normalizó y se le sumó 1, así valores cercanos a uno representan valores similares entre el Q modelado y el Q observado, valores mayores a uno indican una sobreestimación del Q modelado y valores menores a uno representan una subestimación.

Los resultados de la Dst normalizada indican una sobreestimación mayor a dos veces entre el Q modelado y el Q observado en la estación 30031 (figura 33.a), siendo mayor para los experimentos Cu2

en comparación con Cu6. Con Cu4 se presenta una subestimación de más del 50% del Q observado. Las correlaciones más altas se dan con Cu6 para el periodo 28 al 30 de septiembre. El Q es subestimado en el modo acoplado en comparación con el modo desacoplado para la misma configuración de experimento (Cu6E3K2T4) para ambos periodos y la correlación tuvo un decremento mayor en el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010.

En la estación 30016 (figura 33.b) hay una sobreestimación que sobrepasa el 300% cuando se consideró Cu2 y una subestimación mayor al 50% con Cu6 y Cu4. El experimento Cu2E3K2T4 es el más próximo al Q observado. La correlación más alta, aunque menor a 0.5, se da para el experimento Cu6E3K2T4 y Cu2E3K2T4. Las métricas del modo acoplado indican una subestimación marcada del Q modelado con respecto al observado.

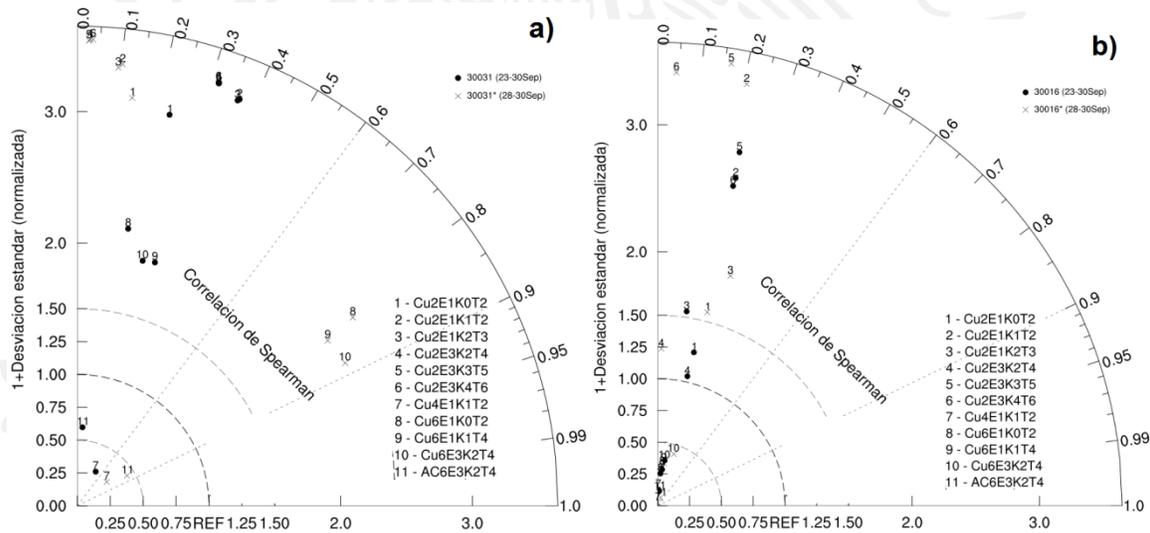


Figura 33. Diagrama de Taylor con la desviación estándar normalizada y la correlación de Spearman entre los experimentos del WRF-Hydro y el gasto horario observado en: a) estación 30031 y b) estación 30016, para el periodo 23-30 de septiembre y 28-30 de septiembre de 2010.

Los resultados del *coeficiente Nash-Sutcliffe* (figura 34) reafirman que los experimentos que combinan un tiempo (T) de 3 y 4 segundos con una conductividad hidráulica K2 son los más óptimos al estar más cercanos a un valor de cero. Las combinaciones con el esquema de cúmulo Cu6 es mejor que con el esquema Cu2 cuando se consideran las dos estaciones. Bajo el experimento con la combinación Cu2, E3, K2 y T4 se representa en mejor medida el gasto en la estación 30016 en el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010. El gasto es mejor representado en la estación 30031 con los experimentos que consideran Cu6 en modo desacoplado y acoplado.

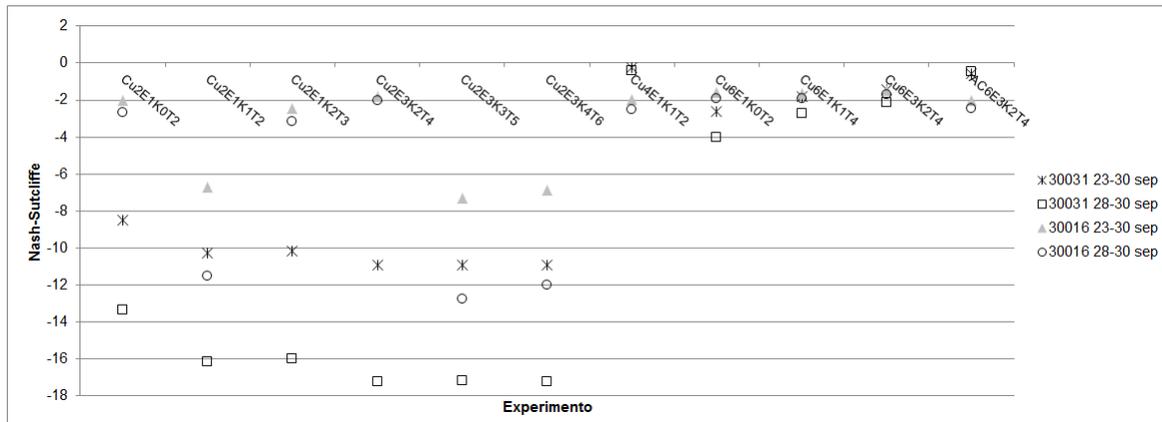


Figura 34. Representación del coeficiente Nash-Sutcliffe de los experimentos de simulación del gasto en las estaciones hidrométricas para dos fechas.

#### 5.4 Análisis de la humedad del suelo simulada con el WRF-Hydro

Se accedió a datos de humedad del suelo del *Global Land Surface Monitoring and Prediction* del *Climate Prediction Center* (CPC; [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/leaky\\_glb.htm](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/leaky_glb.htm)) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Huang *et al.*, 1996; van den Dool *et al.*, 2003; Fan y van den Dool, 2004) para realizar la evaluación de la humedad simulada en el caso piloto con el WRF-Hydro en modo desacoplado y acoplado al WRF.

Los datos del CPC los calculan con un modelo hidrológico de una capa (Huang *et al.*, 1996; van den Dool *et al.*, 2003) y corresponden a la humedad mensual del suelo representada por la altura equivalente de una columna de agua (en milímetros) para una profundidad del terreno de 1.6 metros. Son datos globales con una resolución espacial de 0.5°x0.5° y cubren el periodo 1948-2016.

Se calculó la climatología histórica de la humedad del suelo del CPC para el mes de septiembre del periodo 1948-2015 (figura 35.a) y se comparó con la humedad del suelo del CPC del mes de septiembre de 2010 (figura 35.b). Se observa que la humedad de septiembre de 2010 es mayor que su climatología, lo cual es un indicativo de que capta la señal relacionada con la precipitación que se presentó en el mes, y probablemente la humedad “real” asociada, en la región que comprende la subcuenca de La Sierra.

Con base en lo anterior, se consideraron los datos del CPC del mes de septiembre de 2010 para evaluar la humedad calculada con el WRF-Hydro.

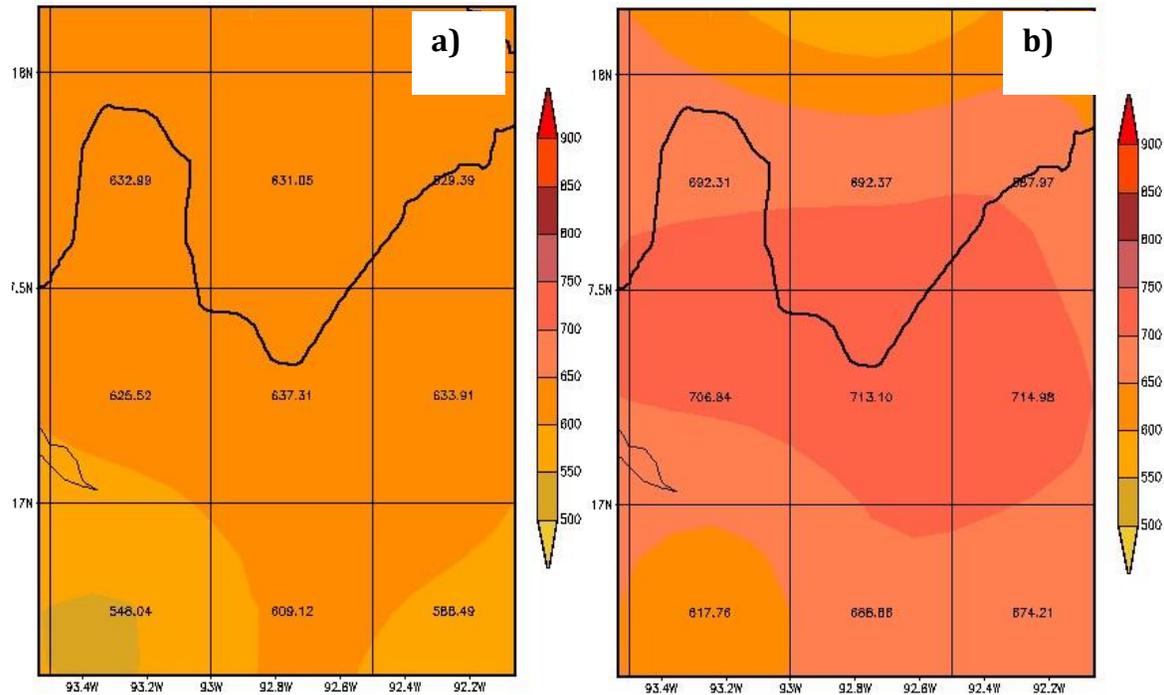


Figura 35. Humedad del suelo (mm) del CPC para a) la climatología de septiembre del periodo 1948-2015 y b) para el mes de septiembre de 2010.

El WRF-Hydro calcula el contenido volumétrico de humedad en el suelo ( $m^3/m^3$ ) para cada una de las cuatro capas del suelo con estratos divididos en 0.1, 0.4, 1.0 y 2.0 metros de profundidad. Se procedió a calcular la profundidad equivalente de una columna de agua para cada estrato del suelo para lo cual se consideró que tanto la humedad como el suelo se distribuyen sobre una misma área (celdas de 750 mts x 750 mts). La humedad se distribuye en una altura unitaria de un metro por lo que se realiza una conversión a milímetros, para esto se multiplica por 1,000 mm al espesor de humedad que corresponde a cada una de las cuatro capas que se procesen. Al final se suman las alturas del agua de las cuatro capas para obtener la altura total correspondiente a una profundidad de 2.0 mts, que es aproximada con los 1.6 mts que considera el CPC.

Se calculó la humedad promedio del periodo 23 al 30 de septiembre de 2010, para celdas con resolución de 750 mts x 750 mts, a partir de los datos horarios de humedad del suelo calculados con el LSM-Noah que es llamado por el WRF-Hydro cuando se corre en modo desacoplado, así como la que resultó del modo acoplado cuando es llamado directamente por el WRF.

Se obtuvo la diferencia entre la humedad media del WRF-Hydro y la del CPC para cuatro experimentos: Cu0\_E2\_K0T2, Cu2\_E3\_K2T4, Cu6\_E3\_K2T4 y Ac\_Cu6\_E3\_K2T4 (figura 36), el primero simuló una marcada sobreestimación de la precipitación y el gasto entre el 28 y 29 de septiembre de 2010, los siguientes dos son los que representan en mejor medida la precipitación y el gasto y el último corresponde al modo acoplado de la configuración Cu6\_E3\_K2T4.

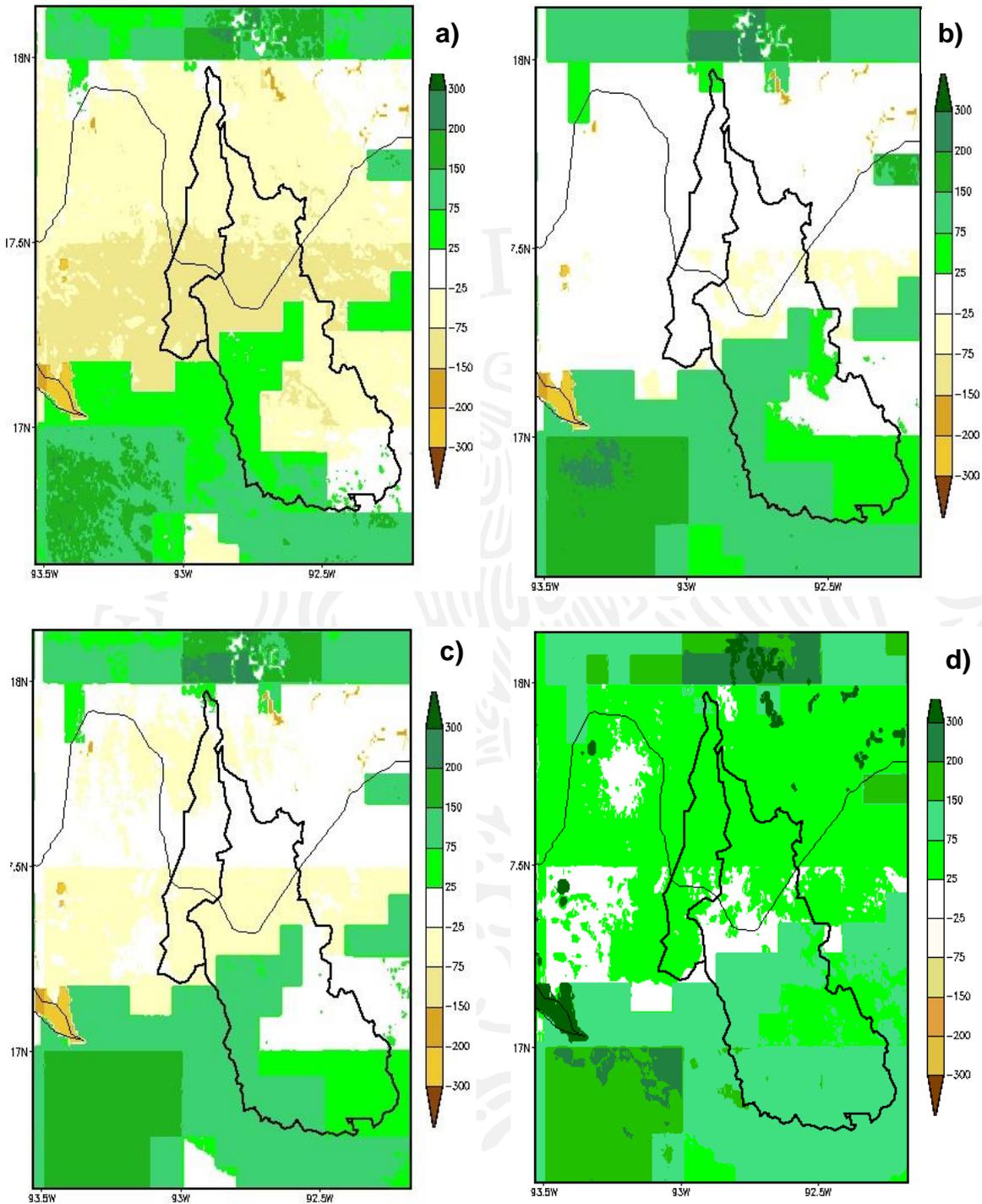


Figura 36. Diferencia de la humedad media (23-30 de septiembre) calculada a partir del WRF-Hydro y la humedad de septiembre de 2010 del CPC para los experimentos a) Cu0\_E2\_K0T2, b) Cu2\_E3\_K2T4, c) Cu6\_E3\_K2T4, c) y d) Ac\_Cu6\_E3\_K2T4.

En los cuatro casos presentados el promedio de humedad calculada a partir de los datos del WRF-Hydro, en el periodo del 23 al 30 de septiembre de 2010, es superior a la humedad del mes de septiembre de los datos del CPC para la parte centro y sur de las subcuencas tributarias, en tanto que es menor en el norte de las subcuencas tributarias y en la totalidad de la subcuenca de la Sierra, esto último es más marcado para el experimento Cu0\_E2\_K0T2, en el cual se simuló un Q de más de 20,000 m<sup>3</sup>/s.

En los experimentos Cu2\_E3\_K2T4 y Cu6\_E3\_K2T4 la diferencia de humedad del suelo es hacia valores de mayor contenido de humedad en comparación con Cu0\_E2\_K0T2 mientras que el gasto máximo simulado fue menor. Lo anterior refleja un comportamiento inversamente proporcional entre las dos variables para el conjunto de los cuatro experimentos, mismo que son preguntas que tienen que ser resueltas con la profundización o desarrollo de nuevas líneas de investigación. Esta enmascaración de resultados al considerar promedios probablemente se relacione con la diferencia en la distribución temporal (horaria) de la precipitación entre los experimentos lo cual impacta la simulación del gasto. La humedad promedio del suelo de los datos modelados con el WRF-Hydro son un indicio de un caso extremo al ser mayor que la humedad del CPC para el mes de septiembre, ésta última es mayor a la humedad climatológica del mes de septiembre calculada con los datos del CPC, tal como se observa con los valores de la figura 35a y figura 35b.

Es mayor la humedad del suelo simulada con el experimento en modo acoplado en comparación con la del modo desacoplado como lo reflejan los valores positivos, de la diferencia entre la humedad del WRF-Hydro y la del CPC, en la figura 36.d en comparación con los de la figura 36.c que tienen una misma configuración de parámetros. Esto se relaciona con la frecuencia con que es llamado el LSM-Noah, en modo acoplado es llamado cada paso de tiempo definido para el WRF (40 segundos), en tanto que en modo desacoplado es llamado cada 60 minutos, lo que incide en la cantidad de humedad del suelo que es proporcionada y retroalimentada por los módulos de tránsito del WRF-Hydro, como se ejemplifica en la humedad del 27 y 28 de septiembre (figura 23).

Es mayor la humedad calculada con el WRF-Hydro en modo acoplado (figura 23.c y 23.d) en comparación con la del modo desacoplado (figura 23.a y 23.b). La fecha en la que cambia de valores bajos a altos de humedad se presenta desfasada entre los resultados del modo acoplado y desacoplado, siendo entre el 27 y 28 de septiembre para el primer caso y entre el 28 y 29 de septiembre para el modo desacoplado. Esto incide en el momento en que se dan los picos máximos del gasto simulado.

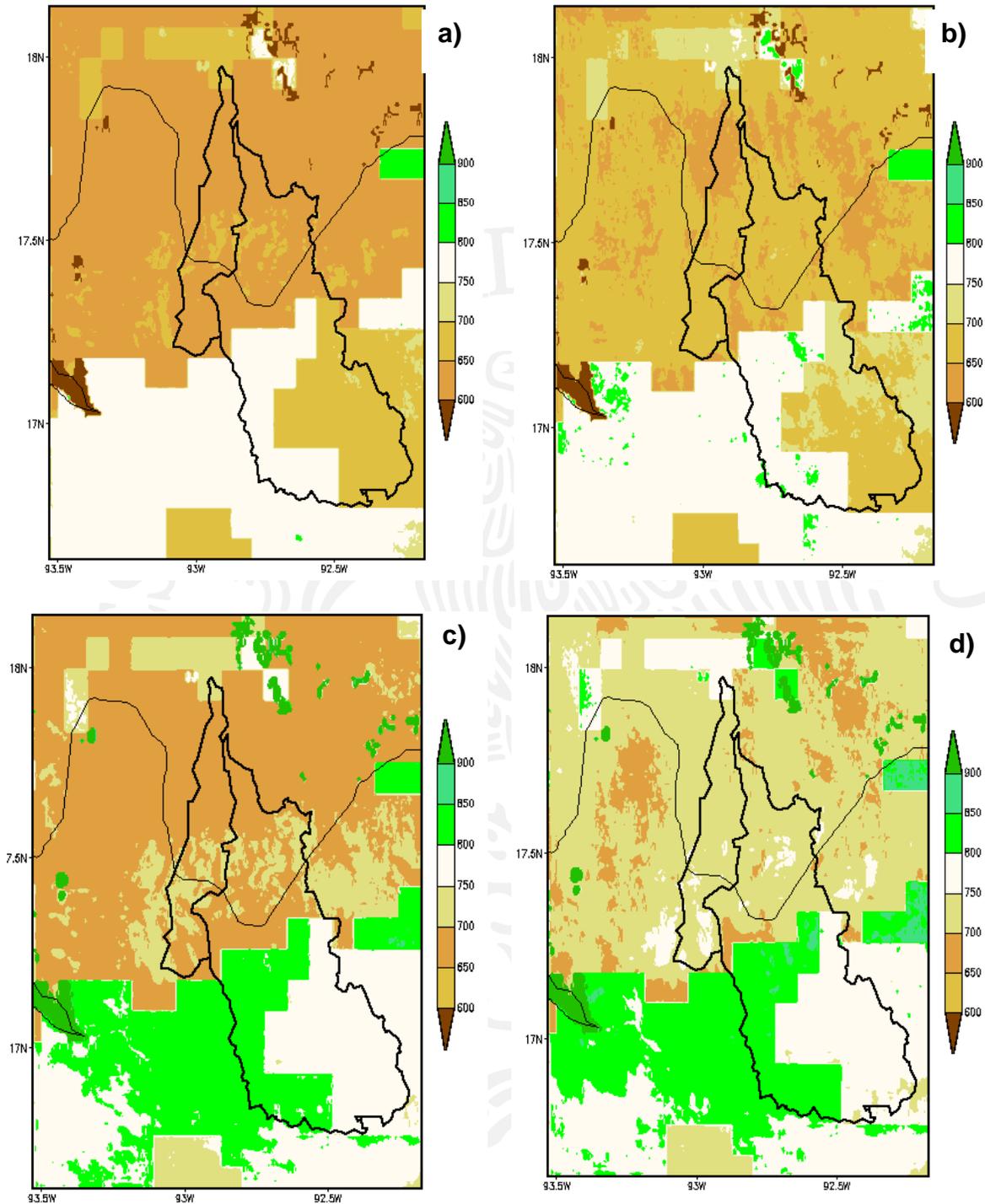


Figura 37. Humedad del suelo para el experimento Cu6\_E3\_K2T4 para a) 28 y b) 29 de septiembre de 2010 y para el experimento Ac\_Cu6\_E3\_K2T4 para c) 27 y d) 28 de septiembre de 2010.

## 6.0 Conclusiones y recomendaciones

Se demuestra que el WRF-Hydro puede ser una herramienta valiosa para simular el gasto en la subcuenca de La Sierra, tal y como se identifica a partir del análisis de los resultados modelados, y puede consolidar el pronóstico operativo de condiciones extremas del gasto que apoye en la gestión oportuna del riesgo relacionado con inundaciones.

De los experimentos realizados con el modelo atmosférico WRF, en el que se variaron las opciones físicas relacionadas con los esquemas de parametrización de cúmulus, se encontró que el esquema de *Betts-Miller-Janjic* y el de *Tiedke* modificado presentan los mejores resultados para la precipitación en la región de estudio, no obstante es pobre la representación de la precipitación simulada con respecto a los picos máximos medidos en las estaciones climáticas entre los días 26 al 29 de septiembre de 2010 para los dominios que incluyen la subcuenca de La Sierra. Esto probablemente se relacione con la proporción en la resolución espacial y temporal entre los datos de entrada al modelo atmosférico y la resolución de las mallas sobre las que se realiza la solución de las ecuaciones físicas y dinámicas. Los datos de entrada son del NCEP FNL, salidas post-procesadas del GFS con asimilación de datos observados, con una resolución de espacial de 1° (aproximadamente celdas de 110 kilómetros x 110 kilómetros) preparadas operacionalmente cada 6 horas. La resolución de la malla de los tres dominios considerados para el WRF en el caso piloto son de 6,750 mts, 2,250 mts y 750 mts.

Se recomienda llevar a cabo evaluaciones objetivas más detalladas de los esquemas de parametrización de cúmulus para representar la precipitación en el sureste de México, las cuales se combinen con la variación de otras opciones físicas y dinámicas del WRF.

Durante la simulación con el sistema WRF-Hydro se presentaron valores negativos del gasto simulado que se solventaron al modificar el paso del tiempo del modelo, a valores entre 3 y 4 segundos para el tamaño de la celda de la malla fina de 30 metros. Dichos valores también pueden representar un flujo de remanso dada las consideraciones físicas con que está desarrollado el WRF-Hydro pero también son un reflejo de la interacción entre los elementos considerados en la simulación y la alta no linealidad del sistema que busca ser representado con el WRF-Hydro.

A partir de los resultados de las métricas aplicadas al gasto horario modelado con el WRF-Hydro respecto al observado en estaciones hidrométricas se identifica que la mejor combinación de opciones y parámetros en el WRF-Hydro para simular el Q corresponde a un paso de tiempo entre 3 y 4 segundos con una configuración de parámetros de conductividad hidráulica con valores de K0 y K2. Bajo el experimento con la combinación Cu2, E3, K2 y T4 se representa en mejor medida el gasto en la estación 30016 en el periodo 23 al 30 de septiembre de 2010. El gasto es mejor representado en la estación 30031 con los experimentos que consideran Cu6 en modo desacoplado y es subestimado en modo acoplado.

Se recomienda continuar con líneas de investigación en las que se realicen pruebas de sensibilidad del WRF-Hydro para otros casos históricos en los que se consideren datos atmosféricos generados con el WRF con los esquemas de parametrización de cúmulus *Betts-Miller-Janjic* y el de *Tiedke* modificado. Lo anterior permitirá contar con una herramienta poderosa con fines de prevención y reducción de riesgo bajo condiciones de variabilidad y cambio climático.

El análisis de la humedad del suelo simulada con el WRF-Hydro se realizó con respecto a la humedad del suelo mensual calculada en el CPC con un modelo hidrológico de una capa de 1.6 mts de profundidad disponible para una resolución de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Los resultados son alentadores y reflejan que en el sur de las subcuencas tributarias la humedad del suelo fue mayor a la del CPC del mes de septiembre de 2010, el cual está por arriba de la climatología de la humedad del mes para el periodo 1948-2015, y en el norte de las subcuencas así como en La Sierra se observa una cantidad menor de humedad simulada. Los resultados para los diferentes experimentos realizados probablemente enmascaren el efecto que tiene la distribución temporal (horaria) de la precipitación con el correspondiente impacto en la simulación del gasto.

A partir de los avances logrados, se recomienda continuar con el desarrollo de líneas de investigación para evaluar y calibrar el WRF-Hydro en el sureste de México a partir de datos observados que se midan en estaciones provisionales, regularmente espaciadas, como parte de campañas anuales de medición de parámetros meteorológicos e hidrológicos. Lo anterior permitirá generar campos meteorológicos de entrada al sistema y disponer de información para evaluar las variables hidrológicas que se modelen, como por ejemplo la humedad del suelo de la cual se dispone datos limitados.

La simulación atmosférica e hidrológica se realizó en uno de los nodos de la supercomputadora tipo cluster del IMTA. El WRF y WRF-Hydro también se instalaron en una computadora (PC) de escritorio. Aunque las capacidades de la PC son suficientes, fueron limitadas para correr el WRF con el tamaño y resolución espacial utilizada en los dominios que se corrieron en el cluster del IMTA, por lo que ésta tiene la capacidad probada para correr dominios más pequeños y con resolución menor o más gruesa.

Se recomienda que el WRF-Hydro se corra en modo desacoplado ya que una hora de simulación toma entre 5 y 8 minutos en comparación con aproximadamente 30 minutos que toma en modo acoplado con el WRF. Una ventaja es que se pueden modificar los parámetros y reiniciar la corrida para ajustar la simulación del gasto más eficientemente que en modo acoplado.

## 7.0 REFERENCIAS

- Altamirano, M.A. (2014). Asistencia técnica para el desarrollo e implementación de productos hidrometeorológicos generados a partir del sistema WRF-Hydro. *Informe técnico OMM/MOMET No. 049*. Disponible en: <https://sites.google.com/a/wmo.int/mx/infosmomet/mometyear/2014>
- Arnault, J., L. Hingerl, J. Bliefernicht, S. Andresen1, T. Rummmler, A. Aduna, y H. Kunstmann. (2014): *Evaluation of a fully coupled atmospheric hydrological modeling system for the Sissili watershed in the West African Sudanian Savannah*. 1st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014. Noviembre 17, 2014. Sitio web: [http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/Cosenza\\_11June2014\\_Joel.pdf](http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/Cosenza_11June2014_Joel.pdf)
- Beven II, J.L., Lixion A. Avila, Eric S. Blake, Daniel P. Brown, James L. Franklin, Richard D. Knabb, Richard J. Pasch, Jamie R. Rhome, y Stacy R. Stewart. (2008). *Annual Summary Atlantic Hurricane Season of 2005*. *Mon. Weather Rev.* Vol 136 (1109-1173). Junio 11, 2016. Sitio web: <http://www.aoml.noaa.gov/general/lib/lib1/nhclib/mwreviews/2005.pdf>
- Clapp, R. B. y G. M. Hornberger. (1978). "Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties," *Water Resources Research*, 14: 601604.
- CONAGUA. (2006). Análisis de la temporada de huracanes 2005 en México. Recuperado el 04 de julio de 2016. Junio 20, 2016. Sitio web: <http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Resumenes/2005.pdf>
- CONAGUA. (2011). Análisis de la temporada de ciclones tropicales 2010. Recuperado el 04 de julio de 2016. Sitio web: <http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Resumenes/2010.pdf>
- CONAGUA. (2012). Atlas digital del agua México 2012. Sistema Nacional de Información del Agua. Junio 25, 2016. Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/index.html> y <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo23.html>
- Department of Natural Resources of IOWA (DNR). (2008): *Iowa Stormwater Management Manual. Versión 2*. Diciembre 5, 2008. *Department of Natural Resources of IOWA*. Noviembre 23, 2014. Sitio web: [http://www.iowastormwater.org/documents/filelibrary/files/infiltration\\_bmps/Outlet\\_Structures\\_48\\_B13497A39A1.pdf](http://www.iowastormwater.org/documents/filelibrary/files/infiltration_bmps/Outlet_Structures_48_B13497A39A1.pdf)
- DOF. (2013). Disponibilidad de agua en RH30. Junio 20, 2014. Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/2013%5CDISPONIBILIDAD-GRIJALVAUSUMACINTA-DOF-30042013.pdf> y [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5297480&fecha=30/04/2013](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5297480&fecha=30/04/2013)

- Ek, M.B., K.E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, y J.D. Tarpley. (2003): *Implementation of Noah land surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta model*. Submitted to J. Geophys. Res., Aug., 2003. Noviembre 23, 2014. Sitio web: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JD003296/pdf>
- Fan Y., y H. van den Dool. (2004). *Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5 degree resolution for 1948 to present*. J. of Geophysical Research, vol. 109, D10102, doi:10.1029/2003JD004345.
- Flores D., L. y Alcalá M., J.R. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. UNAM. Julio 18, 2016.  
<http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Givati, A., E. Fredj, T. Rummeler, D. Gochis , y H. Kunstmann. (2014): *Using the WRF-Hydro model for flood forecasting of 100 years flood event in Israel*. 1st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014. Noviembre 17, 2014. Sitio web: <http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/WRF%20Hydro-Israel.pdf>
- Gochis, D. J., y Chen, F. (2003). *Hydrological Enhancements to the Community North Land Surface Model*. NCAR/TN- 454+STR, NCAR Technical Note[M]. Research Applications Program, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 2003. Noviembre 23, 2014. <http://nldr.library.ucar.edu/repository/assets/technotes/TECH-NOTE-000-000-000-516.p>
- Gochis D., W. Yu, K. Ikeda, y K. Sampson. (2014): *Integrated Hydrometeorological Predictions: A case study of the Colorado Front Range Flood of 2013*. 1st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014. Noviembre 17, 2014. Sitio web: [http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/Col\\_Flood\\_WRF\\_Hydro\\_Calabria\\_2014.pdf](http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/Col_Flood_WRF_Hydro_Calabria_2014.pdf)
- Gochis, D.J., W. Yu, y D.N. Yates. (2015). *The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0*. NCAR Technical Document. Pp. 120. Junio 10, 2016. Sitio web: [https://www.ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro](https://www.ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro)
- Gilliland, E. K. y C. M. Rowe. (S/A). *A comparison of cumulus parameterization schemes in the wrf model*. University of Nebraska, Lincoln, Nebraska. Noviembre 25, 2014. Sitio web: [https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=https%3A%2F%2Fams.confex.com%2Fams%2Fpdfpapers%2F120591.pdf&ei=KNd7VOrxJvGasQTh2oGqDg&usq=AFQjCNEH-Ny5D\\_AUM\\_A6J7D9d1IEqN8j6Q](https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=https%3A%2F%2Fams.confex.com%2Fams%2Fpdfpapers%2F120591.pdf&ei=KNd7VOrxJvGasQTh2oGqDg&usq=AFQjCNEH-Ny5D_AUM_A6J7D9d1IEqN8j6Q)
- Huang J., H. van den Dool y K. P. Georgakakos. (1996). *Analysis of Model-Calculated Soil Moisture over the United States (1931-93) and Application to Long-Range Temperature Forecasts*. Journal of Climate, Vol.9, No.6.
- Julien, P. Y., Saghafian, B., y F. L. Ogden. (1995). *Raster-Based Hydrologic Modeling of Spatially-Variied Surface Runoff*. *Water Resources Bulletin*, AWRA, 31(3), p. 523-536. Noviembre

23, 2014. Sitio web: [http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce\\_old/Projects/Paperspdf/Julien%20et%20al.%20CASC2D-AWRA95a.pdf](http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/Paperspdf/Julien%20et%20al.%20CASC2D-AWRA95a.pdf)

- Li, L., D. J. Gochis, y M.d. S. Mesquita. (2014): *WRF-Hydro simulation of the Himalayan Beas river basin*. 1st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014. Noviembre 17, 2014. Sitio web: [http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/1st%20WRF-Hydro\\_workshop\\_Lu\\_6.11.pdf](http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/1st%20WRF-Hydro_workshop_Lu_6.11.pdf)
- Litta A. J., S. M. Idracula, y U. C. Mohanty. (2011). *A Comparative Study of Convective Parameterization Schemes in WRF-NMM Model*. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 33– No.6, Noviembre 2011. Noviembre 25, 2014. Sitio web: <http://research.ijcaonline.org/volume33/number6/pxc3875739.pdf>
- Senatore. A., y G. Mendicino. (2014): *Fully coupled WRF-Hydro atmospheric-hydrological modeling in a Mediterranean catchment*. 1st European Fully Coupled Atmospheric-Hydrological Modeling and WRF-Hydro Users workshop Rende (Cosenza, Italy), June 11-13, 2014. Noviembre 17, 2014. Sitio web: <http://www.eco-hydrology.org/wrf-hydro2014/pdf/Euro-WRF-Hydro-11June-Senatore.pdf>
- Rojas, R., P. Julien, y B. Johnson. (2003): *CASC2D-SED v 1.0. Reference Manual. A 2-Dimensional Rainfall-Runoff and Sediment Model*. Pp. 146. Noviembre 23, 2014. Sitio web: [http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce\\_old/Projects/CASC2D-SED%20Web%20site%20082506/Download\\_files/CASC2D-SED-Reference-Manual.pdf](http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/CASC2D-SED%20Web%20site%20082506/Download_files/CASC2D-SED-Reference-Manual.pdf)
- SAGARPA. (S/A). *Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas. Colegio de Postgraduados*. Mayo 25, 2016. Sitio web: [http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20OE%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO\\_HIDROLOG%C3%8DA.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20OE%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%C3%8DA.pdf)
- Sleigh, A. (2006): *CIVE2400 Fluid mechanics. Section 2: Open channel hydraulics*. Noviembre 27, 2014. Sitio web: <http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE2400/OpenChannelHydraulics2.pdf>
- van den Dool H., J. Huang y Y. Fan, J. (2003). *Performance and Analysis of the constructed analogue method applied to US soil moisture applied over 1981-2001*. J. of Geophysical Research, vol. 108, p 1-16.
- Wigmosta, M.S., L.W. Vail, y D.P. Lettenmaier. (1994): *A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain*. *Water Resour. Res.* 30(6), 1665-1679. Noviembre 25, 2014. Sitio web: <http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Wigmosta94-WWR.pdf>
- Wigmosta, M.S. y D.P. Lettenmaier. (1999): *A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow*. *Water Resour. Res.*, 35(1), 255-264. Noviembre 25, 2014. Sitio web: <http://people.ucalgary.ca/~hayashi/glgy607/reading/Wigmosta1999.pdf>
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series. Vol. 91. Second Edition. Editado por Renata Dmowska, Dennis Hartmann, y H. Thomas

Rossby. Julio 01, 2016. Sitio web:  
[http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/AnalisisDatos/Statistical\\_Methods\\_Wilks.pdf](http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/AnalisisDatos/Statistical_Methods_Wilks.pdf)

**Anexo I Guía para correr el modelo WRF-Hydro**

**Documento aparte**

**Anexo 2 Guía para el procesamiento de la malla fina**

**Documento aparte**

## ANEXO 1. GUÍA PARA CORRER EL WRF-HYDRO

### Índice

<b>1. Introducción</b> .....	<b>77</b>
<b>2. Pasos para correr el modelo WRF-Hydro para realizar la simulación hidrológica</b> .....	<b>77</b>
<b>2.1. Correr el WPS para pre-procesar los datos de entrada del WRF</b> .....	<b>80</b>
2.1.1. Ingresar al directorio del WPS.....	81
2.1.2. Procesamiento de datos geográficos para el WRF con el programa geogrid.exe .....	82
2.1.3. Pre-procesar los campos meteorológicos para el WRF con el programa ungrib.exe .....	86
2.1.4. Interpolar los datos meteorológicos para el WRF con el programa metgrid.exe .....	95
<b>2.2. Concatenar el archivo con las características del terreno para la malla fina</b> .98	
<b>2.3. Correr el WRF para generar los datos atmosféricos de entrada al WRF-hydro en modo desacoplado</b> .....	<b>104</b>
2.3.1. Ingresar al directorio del WRF.....	104
2.3.2. Generar los archivos con las condiciones iniciales y de frontera para el WRF .....	106
2.3.3. Correr el WRF .....	108
<b>2.4. Correr el WRF-Hydro en modo desacoplado</b> .....	<b>109</b>
2.4.1. Ingresar al directorio donde se corre el WRF-Hydro.....	109
2.4.2. Verificar que se cuenta con los datos de entrada al WRF-Hydro .....	111
2.4.3. Ajustar las opciones en los archivos de control para correr el WRF-Hydro.....	112
2.4.4. Ajustar los valores en los archivos de parámetros del WRF-Hydro.....	114
2.4.5. Correr el WRF-Hydro.....	115
<b>2.5. Correr el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF</b> .....	<b>118</b>
2.5.1. Ingresar al directorio donde se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF .....	118
2.5.2. Verificar que se cuenta con los datos de entrada al WRF-Hydro acoplado al WRF .....	120
2.5.3. Ajustar las opciones en los archivos de control para correr el WRF-Hydro acoplado al WRF .....	120
2.5.4. Ajustar los valores en los archivos de parámetros para el WRF-Hydro .....	121
2.5.5. Generar las condiciones iniciales y de frontera para el WRF con el acoplamiento del WRF-Hydro .....	121
2.5.6. Correr el WRF-Hydro acoplado con el WRF .....	121
<b>3. Referencias</b> .....	<b>122</b>
<b>Apéndice 1. Archivo de control del WRF</b> .....	<b>123</b>
<b>Apéndice 2. Archivos de control del WRF-Hydro</b> .....	<b>126</b>

## Listado de figuras

Figura 1. Ingreso al directorio WRF/ y listado de los subdirectorios que contiene.....	77
Figura 2. Diagrama de flujo del WRF-Hydro en modo acoplado con el WRF. Elaboración propia.....	79
Figura 3. Diagrama de flujo del WRF-Hydro en modo desacoplado. Elaboración propia.....	80
Figura 4. Representación del dominio madre y los dos dominios anidados sobre los que se corre el WRF.....	81
Figura 5. Ingreso al directorio WPS/ y listado de los ejecutables.....	82
Figura 6. Sección del listado de los directorios con los datos geográficos usados para correr el programa “geogrid.exe”.....	83
Figura 7. Enlace de acceso directo al archivo “GEOGRID.TBL.ARW” que resulta de aplicar el comando \$ln -s.....	85
Figura 8. Ejecución del programa “geogrid.exe” y despliegue del inicio del procesamiento.....	86
Figura 9. Mensaje que aparece en la terminal de trabajo al concluir la ejecución del programa “geogrid.exe”.....	86
Figura 10. Listado de los archivos con la información geográfica procesada con el programa “geogrid.exe” para los tres dominios de trabajo.....	86
Figura 11. Ingreso al sitio web en el que se encuentran los datos FNL. UCAR-CISL Research Data Archive (RDA), 2016. Recuperado de: <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/">http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/</a> .....	88
Figura 12. Pestaña para acceder a los datos FNL. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/">http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/</a> .....	89
Figura 13. Selección de la opción en la que hay disponibles archivos con datos FNL posteriores a 2007. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!access">http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!access</a> .....	89
Figura 14. Opción para la consulta de los archivos con datos FNL disponibles. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#cgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&amp;gindex=2">http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#cgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&amp;gindex=2</a> .....	90
Figura 15. Selección de fechas y variables meteorológicas de los datos FNL a descargar. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#cgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&amp;action=customize&amp;gindex=2">http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#cgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&amp;action=customize&amp;gindex=2</a> .....	90
Figura 16. Selección de los archivos FNL a descargar y la modalidad de la descarga. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#cgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&amp;action=customize&amp;gindex=2">http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#cgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&amp;action=customize&amp;gindex=2</a> .....	91
Figura 17. Archivo que se utiliza para descargar los datos FNL en la carpeta z_FNL/. En la sección sombreada se indica la línea en la que se debe incluir la contraseña.....	91
Figura 18. Listado de los archivos meteorológicos FNL descargados en el directorio z_FNL/.....	92
Figura 19. Enlaces de acceso directo a los archivos GRIBFILE.* que resultan de aplicar el programa “link_grib.csh”.....	92
Figura 20. Listado del enlace de acceso directo al archivo “Vtable.GFS” que resulta de aplicar el comando \$ln -s.....	93
Figura 21. Ejecución del programa “ungrib.exe” y despliegue del inicio del procesamiento.....	94
Figura 22. Mensaje que aparece en la terminal de trabajo al concluir la ejecución del programa “ungrib.exe”.....	94
Figura 23. Listado de los archivos intermedios con la información meteorológica, generados con el programa “ungrib.exe”.....	95
Figura 24. Enlace de acceso directo al archivo “METGRID.TBL.ARW” que resulta de aplicar el comando \$ln -s.....	96
Figura 25. Ejecución del programa “metgrid.exe” y despliegue del inicio del procesamiento.....	97
Figura 26. Mensaje que aparece en la terminal de trabajo al concluir la ejecución del programa “metgrid.exe”.....	97
Figura 27. Listado de los archivos meteorológicos pre-procesados para el WRF con el programa “metgrid.exe”.....	98
Figura 28. Ingreso al directorio WRF/ y listado de los subdirectorios que contiene.....	99
Figura 29. Listado de archivos contenidos en el directorio Netcdf-Hydro/.....	100
Figura 30. Contenido del programa “ncks_file_concatenator.csh”. La sección sombreada es la que se debe modificar.....	102
Figura 31. Ejecución del programa “ncks_file_concatenator.csh”.....	103
Figura 32. Listado del archivo en el que se concatenaron las características del terreno para la malla fina.....	103
Figura 33. Listado del archivo concatenado que se copió al directorio donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado.....	103
Figura 34. Listado del archivo concatenado que se copió al directorio donde se corre el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF.....	104
Figura 35. Listado del directorio WRF/ donde se encuentran el subdirectorio desacoplado/ para correr el WRF.....	104

Figura 36. Listado del directorio desacoplado/ donde se corre el WRF-Hydro y el WRF desacoplados en directorios por separado.....	105
Figura 37. Ingreso al directorio WRFV3/ donde se corre el WRF y listado del contenido. ....	105
Figura 38. Ingreso al directorio run/ y listado de los programas ejecutables para correr el WRF.....	106
Figura 39. Sección del listado de los archivos meteorológicos que son entrada para el WRF.....	106
Figura 40. Ejecución del programa “real.exe” con cuatro procesadores de un equipo de cómputo. ....	107
Figura 41. Mensaje en la última línea del archivo “rsl.error.000” cuando concluye la ejecución del programa “real.exe”.....	107
Figura 42. Listado de los archivos con las condiciones iniciales y las condiciones de frontera para correr el WRF en modo desacoplado, generados con el programa “real.exe” .....	108
Figura 43. Ejecución del programa “wrf.exe” con cuatro procesadores de un equipo de cómputo. ....	108
Figura 44. Mensaje en la última línea del archivo “rsl.error.0000” cuando concluye la ejecución del programa “wrf.exe”.....	108
Figura 45. Sección del listado de los archivos con los datos de la simulación atmosférica horaria del WRF, generados con el programa “wrf.exe”. ....	109
Figura 46. Listado de los archivos y subdirectorios contenidos en el directorio hydro/ donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado. ....	110
Figura 47. Programa ejecutable “wrf_hydro_Noah.exe” copiado al directorio zChiapas/, que es donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado. ....	110
Figura 48. Ingreso al directorio donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado y listado de parte del contenido.....	111
Figura 49. Listado del archivo del terreno “geo_em.d03.nc”para el dominio 3 copiado al directorio DOMAIN/ en el que se colocan los datos terrestres para el WRF-Hydro. ....	111
Figura 50. Listado del archivo “wrfinput_d03” con las condiciones iniciales del dominio 3 copiado al directorio DOMAIN/ en el que se colocan los datos terrestres para el WRF-Hydro. ....	112
Figura 51. Listado del archivo de con los datos en la malla fina del terreno contenido en el directorio DOMAIN/ .....	112
Figura 52. Ingreso al directorio zChiapas/ en el que se corre el WRF-Hydro desacoplado, y listado de los archivos de control. ....	113
Figura 53. Sección del archivo de control “hydro.namelist” del WRF-Hydro.....	113
Figura 54. Sección del archivo de control “namelist.hrlas” del WRF-Hydro. ....	114
Figura 55. Listado de los archivos de parámetros “CHANPARAM.TBL” correspondientes a los experimentos. ....	115
Figura 56. Contenido del archivo de parámetros “CHANPARAM.TBL”.....	115
Figura 57. Ejecución del programa “wrf_hydro.exe” utilizando cuatro procesadores de un equipo de cómputo. ....	116
Figura 58. Mensaje de la última línea del archivo “diag_hydro.00000” cuando concluye la ejecución del programa “wrf_hydro.exe”.....	116
Figura 59. Sección del listado de los archivos con los datos de la simulación hidrológica generados con el programa “wrf_hydro.exe”.....	116
Figura 60. Sección del archivo “frxst_pts_out.txt”. ....	117
Figura 61. Listado del directorio WRF/ donde se encuentra el subdirectorio acoplado/ para correr el WRF-Hydro acoplado al WRF.....	118
Figura 62. Listado del directorio acoplado/ donde se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF. ....	119
Figura 63. Listado de los archivos y subdirectorios contenidos en el directorio WRFV3/ donde se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF.....	119
Figura 64. Listado de los programas ejecutables en el directorio run/ usados para correr el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF.....	119
Figura 65. Comando para ingresar al directorio run/ en el que se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF, y listado de los archivos de control. ....	120

## CUADROS

Cuadro 1. Descripción de las secciones <i>&amp;share</i> y <i>&amp;geogrid</i> del archivo "namelist.wps". El texto remarcado en negrita indica las variables que se modifican. ....	83
Cuadro 2. Descripción de las secciones <i>&amp;share</i> y <i>&amp;ungrib</i> del archivo "namelist.wps". El texto remarcado en negrita indica las variables que se modifica. ....	88
Cuadro 3. Descripción de las secciones <i>&amp;share</i> y <i>&amp;metgrid</i> del archivo "namelist.wps". El texto remarcado en negrita indica las variables que se modifican. ....	96
Cuadro 4. Descripción de los archivos con las características del terreno para la malla fina. ....	100



## 1. Introducción

En la guía se desarrollan los pasos para correr el WRF-Hydro versión 3.0 en modo desacoplado y acoplado al modelo atmosférico WRF versión 3.6. Los datos meteorológicos de entrada al WRF-Hydro en modo desacoplado se generaron con el modelo WRF para el realizar la simulación hidrológica en la subcuenca de los ríos de La Sierra, ubicada entre Tabasco y Chiapas, en México.

La guía retoma la experiencia generada durante el desarrollo de la actividad de instalación, configuración y compilación del modelo hidrológico WRF-Hydro y el modelo atmosférico WRF en dos equipos de cómputo del IMTA; uno de ellos tipo cluster y otro una computadora de escritorio, así como la información consultada en documentos como “*The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0*” (Gochis, et al., 2015) y “*WRF-ARW Version 3 Modeling System User's Guide*” (NCAR, 2014).

## 2. Pasos para correr el modelo WRF-Hydro para realizar la simulación hidrológica

Ingresar al equipo de cómputo con SO GNU/Linux y abrir una nueva terminal de trabajo.

Ingresar al directorio **WRF/**, en el que se encuentran los directorios de trabajo para correr el WRF y el WRF-Hydro. Aplicar los comandos que se indican en la figura 1 para listar el contenido.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cd WRF/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 44
drwxrwxr-x 3 wrfhidro 4096 Apr 18 20:35 acoplado
drwxr-xr-x 8 wrfhidro 4096 Jun 15 13:04 ARWpost
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 May 3 19:37 desacoplado
drwxrwxr-x 2 wrfhidro 4096 Jul 1 2016 Netcdf-Hydro
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 May 26 14:11 ProcesamientoSalidas
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 Jul 1 2016 RespaldoProgramas
drwxr-xr-x 8 wrfhidro 20480 Jun 28 21:34 WPS
```

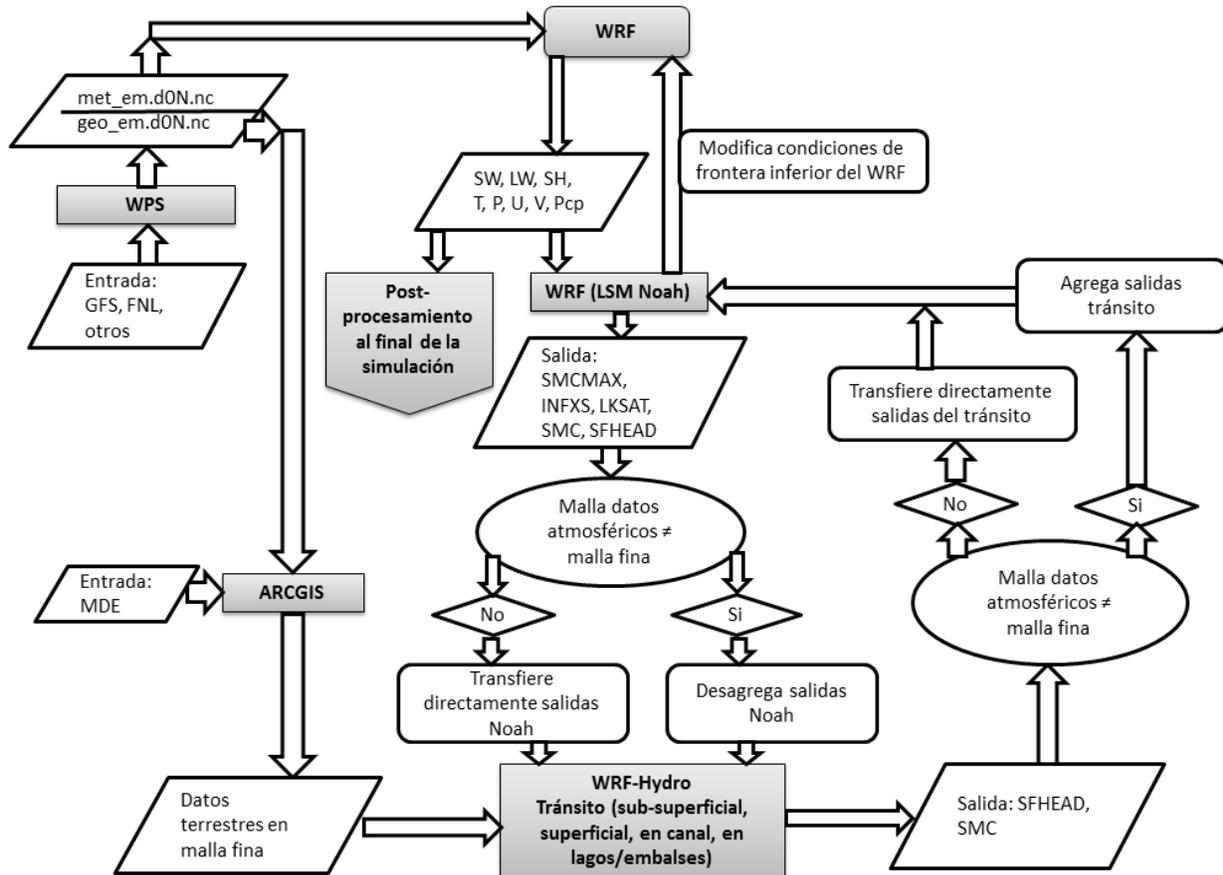
Figura 1. Ingreso al directorio **WRF/** y listado de los subdirectorios que contiene.

El WRF-Hydro corre en dos modos; desacoplado y acoplado al modelo atmosférico WRF. Los datos meteorológicos de entrada al WRF-Hydro cuando se corre en modo desacoplado, pre-

procesados en el formato utilizado por el modelo (Gochis, *et al.*, 2015), pueden provenir de datos observados o de cualquier modelo atmosférico, como por ejemplo el ECMWF, el WRF o el COSMO.

El WRF-Hydro acoplado al WRF (figura 2) se corre con datos meteorológicos globales del *NCEP Final Analysis (FNL)*, éstos se pueden sustituir por datos de modelos globales o regionales como el *Global Forecast System (GFS)*, pre-procesados con el WPS para los dominios de trabajo. El WRF calcula variables atmosféricas que alimentan el modelo de superficie del terreno (LSM) Noah activado directamente por el WRF y este a su vez proporciona datos de entrada para el cálculo de los tránsitos con el WRF-Hydro.

Los resultados del Noah junto a un conjunto de datos terrestres en una malla fina del terreno, generados con el paquete ArcGIS en Windows (ver el anexo 2 con los detalles para generar los datos), son utilizados por los módulos de tránsito del WRF-Hydro para calcular los tránsitos sub-superficiales y superficiales y actualizar las variables de humedad que retroalimentan el Noah, éste a su vez retroalimenta las condiciones de la frontera inferior del modelo atmosférico WRF en cada iteración, repitiéndose el ciclo hasta que concluye la simulación.



SMCMAX – Máximo contenido de humedad del suelo para cada tipo de suelo.

INFXS – Exceso de infiltración.

LKSAT – Conductividad saturada lateral para cada tipo de suelo.

SMC – Contenido de humedad del suelo para cada tipo de suelo.

SFHEAD: Profundidad del agua estancada en la superficie, (unidades de mm).

met\_em.d0N – Archivos con los datos atmosféricos procesados con el WPS. N se refiere al identificador del dominio de trabajo.

geo\_em.d0N – Archivos con los datos terrestres procesados con el WPS.

wrfinput03.nc – Archivo con las condiciones iniciales de los datos atmosféricos.

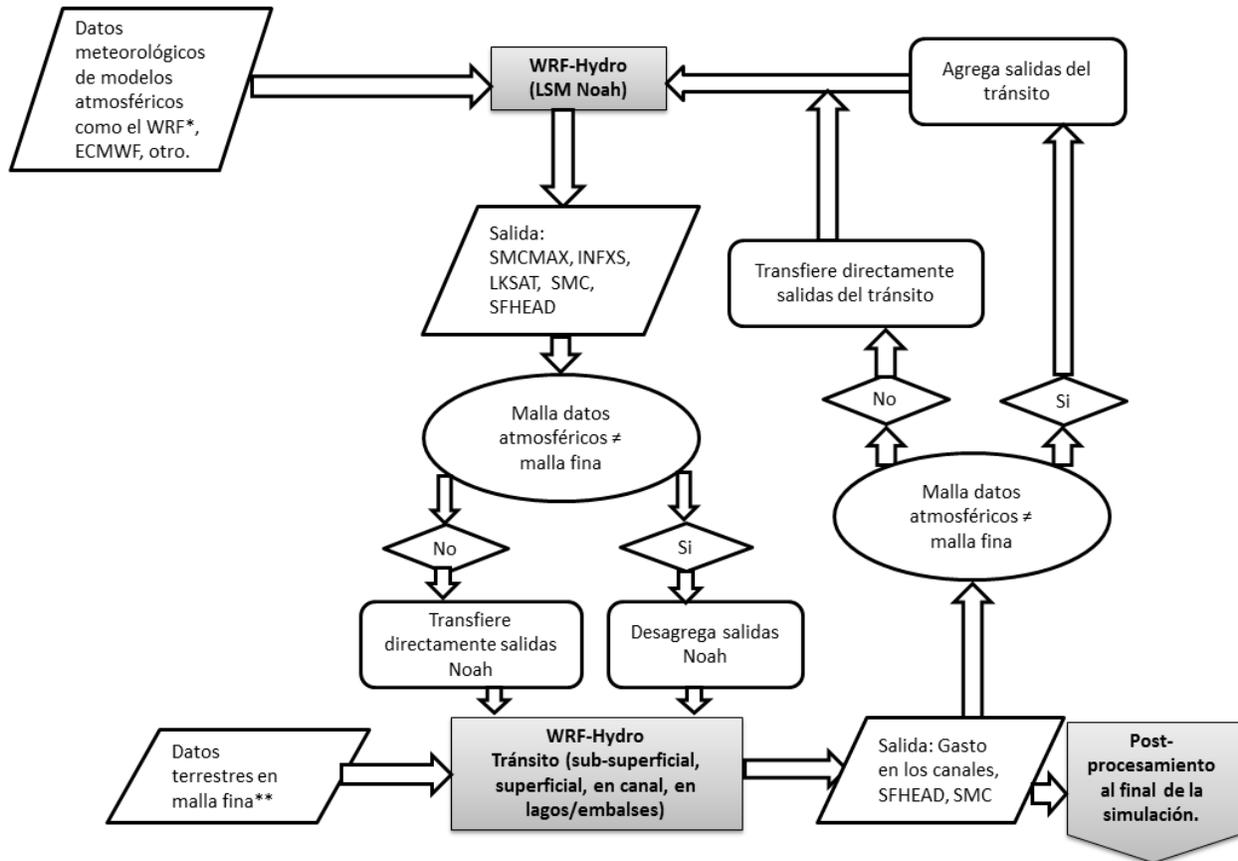
Wrfbdy01.nc – Archivo con las condiciones de frontera de los datos atmosféricos.

Figura 2. Diagrama de flujo del WRF-Hydro en modo acoplado con el WRF. Elaboración propia.

El WRF-Hydro en modo desacoplado (figura 3) puede utilizar como datos meteorológicos, en el formato de entrada al modelo (Gochis, *et al.*, 2015), los provenientes de datos observados o de cualquier modelo atmosférico. En la consultoría se utilizaron los datos generados con el modelo WRF cuyo formato es reconocido por default por el WRF-Hydro. Los datos atmosféricos son los datos de entrada o forzantes dinámicos que alimentan el LSM Noah que es activado por el WRF-Hydro, para calcular las variables de estado y flujo de humedad/calor en la superficie y en las capas con diferentes profundidades del suelo.

Los resultados del LSM Noah, junto a datos de las características del terreno para una malla fina, se pasan a los módulos de tránsito del WRF-Hydro para el cálculo del gasto o caudal. Los datos para la malla fina del terreno se generan previo a la ejecución del WRF-Hydro con el paquete ArcGIS en Windows (ver el anexo 2 con los detalles para generar los datos). Las funciones de tránsito del WRF-Hydro calculan los tránsitos y las variables de humedad en una malla fina; las variables de humedad retroalimentan el LSM Noah en la siguiente iteración, repitiéndose el proceso hasta concluir con la simulación.

La resolución espacial de las celdas de la malla del LSM Noah, que es activado por el WRF-Hydro en modo desacoplado, será la misma que la de los datos atmosféricos de entrada. En la consultoría se utilizó una malla con celdas de 750 metros de resolución. En tanto que la resolución para la malla fina en la cual el WRF-Hydro calcula los tránsitos es de 30 metros.



\* Revisar el diagrama del modo acoplado para la generación de los datos atmosféricos con el modelo WRF.

\*\* Revisar el diagrama del modo acoplado para la generación de los datos terrestres en la malla fina.

Figura 3. Diagrama de flujo del WRF-Hydro en modo desacoplado. Elaboración propia.

En las siguientes secciones se describen los pasos para procesar los archivos con los datos para correr el WRF-Hydro y el WRF, así como para ejecutar los modelos y procesar los resultados de la simulación.

## 2.1. Correr el WPS para pre-procesar los datos de entrada del WRF

Los datos atmosféricos de entrada al LSM Noah que fuerza al WRF-Hydro se generaron con el modelo WRF. A su vez, el WRF usa archivos con condiciones geográficas y atmosféricas iniciales y de frontera, estas últimas se obtienen a partir de los datos meteorológicos de re-análisis del FNL o de un modelo regional como el GFS.

El WRF en el caso de la subcuenca de los ríos de La Sierra se corre para tres dominios (d01, d02 y d03) en los que realiza la simulación atmosférica: uno madre y dos anidados (figura 4). Los dominios se establecieron de tal forma que la simulación atmosférica considere la influencia de los sistemas meteorológicos de mesoescala, el océano y la topografía. Los dominios anidados se centraron sobre el área que cubre la subcuenca de los ríos de La Sierra,

entre parte de los estados de Chiapas y Tabasco, de tal forma que incluyen la orografía de la región. El WRF-Hydro se corre para el dominio d03.

Las características de los dominios se pueden adecuar a los experimentos y pronósticos que se realicen en el IMTA.



Figura 4. Representación del dominio madre y los dos dominios anidados sobre los que se corre el WRF.

Los archivos para correr el WRF se generan al procesar los datos geográficos y meteorológicos con el Sistema de Pre-procesamiento del WRF (WPS, por sus siglas en inglés), mediante la aplicación de los programas ejecutables *geogrid.exe*, *ungrib.exe* y *metgrid.exe*.

- El WPS se debe correr independientemente si el WRF está acoplado o desacoplado del WRF-Hydro.

En las siguientes subsecciones se describe con detalle los ejecutables del WPS, el archivo de control “*namelist.wps*” y los pasos para aplicarlos.

### 2.1.1. Ingresar al directorio del WPS

Abrir una terminal de trabajo en la sesión del usuario. Ingresar al directorio donde se encuentran los ejecutables para correr el WPS. Listar los ejecutables y el archivo de control del WPS, tal como se observa en la figura 5.

```

rene@wrf-hydro:~/WRF
-bash-4.1$ cd WRF/WPS/
-bash-4.1$ ls -lg *exe namelist.wps
lrwxrwxrwx 1 wrfhydro  23 May  3 22:37 geogrid.exe -> geogrid/src/geogrid.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhydro  23 May  3 22:39 metgrid.exe -> metgrid/src/metgrid.exe
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1197 May  3 23:45 namelist.wps
lrwxrwxrwx 1 wrfhydro  21 May  3 22:38 ungrrib.exe -> ungrrib/src/ungrrib.exe

```

Figura 5. Ingreso al directorio **WPS/** y listado de los ejecutables.

En la figura 5 se muestra el listado de los archivos ejecutables (archivos con terminación `.exe`) y el archivo de control `namelist.wps` (texto en negro). Los archivos ejecutables aparecen como enlaces simbólicos (texto en azul) que apuntan a la ubicación original de los programas en otros directorios (texto en verde).

- Los enlaces simbólicos establecen accesos directos entre archivos, que pueden estar en el mismo directorio o en uno diferente, mediante la aplicación del comando `$ln -s`

### 2.1.2. Procesamiento de datos geográficos para el WRF con el programa `geogrid.exe`

El programa ejecutable `“geogrid.exe”` en el directorio **WPS/** procesa los tres dominios de simulación e interpola los datos terrestres a las mallas de los dominios para ser considerados posteriormente por el WRF y el WRF-Hydro.

El programa `“geogrid.exe”` se debe correr cada vez que se modifica la configuración u opciones de la sección `&geogrid` en el archivo `“namelist.wps”` (comentado en el cuadro 1).

- Aplicar los siguientes pasos para correr el programa ejecutable `“geogrid.exe”`.

Primero verificar que se encuentren los datos geográficos del terreno y de uso de suelo. Los datos tienen una resolución espacial de 30 segundos de arco, 2, 5 y 10 minutos de arco, actualizados desde la liberación de la versión 3.5.1 del WRF. Aplicar el comando `$cd` para ingresar al directorio **geogrid/geo/** y listar su contenido (figura 6) aplicar los comandos:

```

$ cd /home/rene/WRF/WPS/geogrid/geo
$ ls -lg

```

```
[rene@wrf-hydro geog]$ ls -lg
total 1016
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 albedo_ncep
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  4  2013 clayfrac_5m
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 dic 20  2010 erod
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 greenfrac
drwxr-xr-x.  2 rene 36864 abr  2  2013 greenfrac_fpar_modis
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hangl
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hanis
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hasynw
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hasys
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hasysw
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hasyw
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hcnvx
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hlennw
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hlens
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hlensw
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hlenw
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hslop
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hstdv
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 hzmax
drwxr-xr-x.  2 rene  4096 ene  7  2013 islope
drwxr-xr-x.  2 rene 12288 mar 19  2014 lai_modis_10m
drwxr-xr-x.  2 rene 36864 feb 12  2014 lai_modis_30s
```

Figura 6. Sección del listado de los directorios con los datos geográficos usados para correr el programa "geogrid.exe".

En caso de que no se cuente con los directorios listados en la figura 6, proceder a descargar el archivo "geog\_complete.tar.bz2" desde la página del WRF [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html)

Descomprimir dentro del directorio **geogrid/** el archivo "geog\_complete.tar.bz2" que contiene los datos geográficos. Aplicar el comando:

**\$ tar jvxf /home/rene/WRF/Paquetarias/geog\_new\_WRF-3.6.tar.bz2**

En el directorio del **WPS/** proceder a editar la sección **&share** y **&geogrid** del archivo de control "namelist.wps" que se encuentra en el directorio **WPS/** (comentado en el cuadro 1), en función de la configuración que se requiera establecer cuando se corra un caso de estudio o un pronóstico. Abrir y editar el archivo con el comando:

**\$ gedit namelist.wps**

En la sección **&share** y **&geogrid** (cuadro 1) se puede modificar, entre otras opciones, la configuración dinámica para correr el WRF (*Advanced Research WRF* (ARW) o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM)), la configuración de los dominios o la ruta/directorio con la ubicación de los datos geográficos.

Cuadro 1. Descripción de las secciones **&share** y **&geogrid** del archivo "namelist.wps". El texto remarcado en negrita indica las variables que se modifican.

### **&share**

```
wrf_core = 'ARW',          # $ variable para definir alguna de las dos configuraciones
                           # $ dinámicas con la que se puede correr el WRF; Advanced Research
                           # $ WRF (ARW) o Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM)

max_dom = 3,              # $ Un número entero para indicar el total de dominios para
                           # $ la simulación (ver figura 14). En la consultoría se utilizan tres
                           # $ dominios, uno madre y dos anidados.

start_date =
'2010-09-20_00:00:00','2010-09-20_00:00:00','2010-09-20_00:00:00', # $ Fecha de inicio
                           # $ para el procesamiento de datos para los tres dominios, en la
                           # $ consultoría fue el 20 de septiembre de 2010.

end_date = '2010-10-08_00:00:00','2010-10-08_00:00:00','2010-10-08_00:00:00', # $ Fecha
                           # $ de fin para el procesamiento de datos para los tres dominios, en la
                           # $ consultoría fue el 8 de octubre de 2010.

interval_seconds = 21600 # $ intervalo del tiempo de los datos meteorológicos en los
                           # $ archivos FNL, en segundos. 21,600 equivale a seis horas.

io_form_geogrid = 2,
/
```

### **&geogrid**

```
parent_id = 1,1,2,        # $ Identificador para cada uno de los dominios, la primera
                           # $ columna se refiere al dominio madre y las columnas siguientes a cada
                           # $ uno de los dos dominios anidados.

parent_grid_ratio = 1,3,3, # $ Relación de tamaño entre la resolución espacial de la
                           # $ malla de los dominios. En la consultoría fue de 1:3 entre el dominio 2
                           # $ con relación al dominio 1 y entre el dominio 3 con relación al dominio
                           # $ 2.

i_parent_start = 1,125,125, # $ Punto inicial (i) para la longitud de la esquina inferior
                           # $ izquierda del dominio.

j_parent_start = 1,96,151, # $ Punto inicial (j) para la latitud de la esquina inferior
                           # $ izquierda del dominio.

e_we = 500,403,202,      # $ Numero de nodos en la malla de los dominios en la
                           # $ dirección oeste-este.

e_sn = 400,403,223,      # $ Numero de nodos en la malla de los dominios en la
                           # $ dirección sur-norte.

geog_data_res = '5m','2m','30s',
dx = 6750,                # $ Resolución de la celda de la malla del dominio madre en la dirección
                           # $ este-oeste

dy = 6750,                # $ Resolución de la celda de la malla del dominio madre en la dirección
                           # $ norte-sur

map_proj = 'mercator',    # $ Se indica el tipo de proyección geográfica a considerar.

ref_lat = 20,
ref_lon = -88,
truelat1 = 22.5,
truelat2 = 0,
stand_lon = -102,
geog_data_path = '/home/rene/WRF/WPS/geogrid/geo' # $ Directorio con la ubicación de los
                           # $ datos terrestres que son entrada al ejecutable "geogrid.exe" del WPS
                           # $ para realizar el procesamiento.

/
```

Después de editar el archivo "*namelist.wps*" y guardar los cambios, continuar con el establecimiento en el directorio **geogrid/** de un acceso directo o enlace simbólico al archivo "*GEOGRID.TBL*"<sup>1</sup> que corresponda a la configuración dinámica con la que se corre el modelo

<sup>1</sup> El archivo "*GEOGRID.TBL*" define cada uno de los campos que generará el programa "*geogrid.exe*", los métodos de interpolación que se usan por campo, así como la ubicación de los archivos del sistema donde se localiza el conjunto de datos para esos campos.

WRF (ARW o NMM), (figura 7) indicada en la variable “*wrf\_core*” de la sección *&share* en el archivo de control “*namelist.wps*”.

- Los enlaces simbólicos sirven para establecer accesos directos entre archivos, que pueden estar en el mismo directorio o en uno diferente, mediante la aplicación del comando ***\$ln -s ORIGINAL ENLACE***; donde *ORIGINAL* se refiere al archivo/directorio para el que se establece el enlace y *ENLACE* es el archivo al que se enlaza el fichero original.

```
-bash-4.1$ cd geogrid
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ln -s GEOGRID.TBL.ARW GEOGRID.TBL
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 124
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 15 May 3 22:37 geogrid.exe -> src/geogrid.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 15 Jul 1 2016 GEOGRID.TBL -> GEOGRID.TBL.ARW
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 13160 Apr 14 2014 GEOGRID.TBL.ARW
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 13934 Apr 14 2014 GEOGRID.TBL.ARW_CHEM
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 13445 Apr 14 2014 GEOGRID.TBL.FIRE
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 7081 Apr 6 2009 GEOGRID.TBL.NMM
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 54446 Jul 10 2006 gribmap.txt
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 1462 Mar 31 2010 Makefile
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 4096 May 3 22:37 src
drwxr-xr-x 4 wrfhidro 4096 Aug 14 2014 util
```

Figura 7. Enlace de acceso directo al archivo “*GEOGRID.TBL.ARW*” que resulta de aplicar el comando ***\$ln -s***

En la figura 261 el archivo con texto en color azul es el acceso directo al archivo original “*GEOGRID.TBL.ARW*” que se encuentra dentro del directorio ***geogrid/***.

- El enlace de acceso directo del archivo “*GEOGRID.TBL*” se realiza cuando se modifica la configuración dinámica con la que se corre el WRF (ARW o NMM), en caso contrario solo realizarlo una vez, independientemente de que se modifiquen variables diferentes a *wrf\_core* en el archivo de control “*namelist.wps*” cuando se corra un caso de estudio o un pronóstico diferente.

Ejecutar el programa “*geogrid.exe*” en el directorio ***WPS/*** (figura 8) para generar los archivos con las características del terreno para los tres dominios de trabajo definidos en el archivo “*namelist.wps*”. Aplicar el comando:

***\$/geogrid.exe***

```
-bash-4.1$ ./geogrid.exe
Parsed 22 entries in GEOGRID.TBL
Processing domain 1 of 3
  Processing XLAT and XLONG
  Processing MAPFAC
  Processing F and E
  Processing ROTANG
  Processing LANDUSEF
  Calculating landmask from LANDUSEF ( WATER = 16 )
  Processing HGT_M
  Processing SOILTEMP
```

Figura 8. Ejecución del programa “*geogrid.exe*” y despliegue del inicio del procesamiento.

Cuando concluye la ejecución del programa “*geogrid.exe*” debe aparecer el mensaje de la figura 9 en la terminal de trabajo.

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Successful completion of geogrid. !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

Figura 9. Mensaje que aparece en la terminal de trabajo al concluir la ejecución del programa “*geogrid.exe*”.

Una vez que concluye satisfactoriamente la ejecución del programa “*geogrid.exe*”, revisar que se hayan generado en el directorio **WPS/** los archivos con la información geográfica para los tres dominios, tal como se listan en la figura 10.

```
-bash-4.1$ ls -lg geo_em.d0*
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 105953152 Jul  1  2016 geo_em.d01.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro  86002868 Jul  1  2016 geo_em.d02.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro  23760828 Jul  1  2016 geo_em.d03.nc
```

Figura 10. Listado de los archivos con la información geográfica procesada con el programa “*geogrid.exe*” para los tres dominios de trabajo.

En caso de que no aparezca el mensaje de la figura 9 o no se hayan generado los archivos con la información geográfica listados en la figura 10, revisar el archivo “*geogrid.log*” para identificar posibles causas de errores para su atención.

### 2.1.3. Pre-procesar los campos meteorológicos para el WRF con el programa *ungrib.exe*

El programa ejecutable “*ungrib.exe*” en el directorio **WPS/** sirve para extraer los campos meteorológicos regionales contenidos en los archivos obtenidos de la base de datos del *NCEP Final Analysis (FNL)* (éstos se pueden sustituir por datos de modelos globales o regionales como el GFS). Los datos los re-escribe en archivos con un formato intermedio para que sean

procesados posteriormente por el programa ejecutable “*metgrid.exe*”. El formato consiste en escribir los campos meteorológicos como datos en rebanadas horizontales bidimensionales.

Se utilizaron los datos FNL ya que se generan con el mismo modelo global (GFS) que se utiliza en el IMTA para alimentar el WRF que corre en forma rutinaria. Son preparados aproximadamente una hora después de que se inicializa el GFS en NCEP para que asimile más datos observacionales. Los datos FNL tienen una resolución espacial de 1° y temporal de 6 horas. La base de datos cuenta con información desde julio de 1999 para el formato GRIB1 y diciembre de 2007 para el formato GRIB2, con lo cual se cubren las fechas para la simulación del caso piloto; del septiembre a octubre de 2010.

El programa “*ungrib.exe*” se debe correr cada vez que se modifica la fuente de los datos meteorológicos o se modifica la fecha para la simulación con el WRF en la sección *&shared* y *&ungrib* en el archivo “*namelist.wps*” (comentado en el cuadro 2).

- Aplicar los siguientes pasos para correr el programa ejecutable “*ungrib.exe*”.

Ingresar al directorio **WPS/**, aplicar el comando:

```
$ cd /WRF/WPS
```

Editar la sección *&share* y *&ungrib* del archivo de control “*namelist.wps*” que se encuentra en el directorio **WPS/** (comentado en el cuadro 2), en función de la configuración y las fechas definidas para correr un caso piloto de estudio o un pronóstico diferente. Abrir y editar el archivo con el comando:

```
$ gedit namelist.wps
```

En la sección *\$share* (cuadro 2) las variables de relevancia a editar para el programa “*ungrib.exe*” son las fechas de inicio y fin para correr el caso de estudio o el pronóstico con el WRF, la frecuencia temporal disponible de los datos meteorológicos en los archivos FNL (es de 6 horas) y el formato con el que se escribirán los archivos intermedios.

Después de editar el archivo “*namelist.wps*” y guardar los cambios, proceder a la descarga de los datos meteorológicos históricos de re-análisis del FNL con formato GRIB2. Los datos se pueden sustituir por pronósticos de modelos globales o regionales, como por ejemplo del GFS.

Ingresar con el comando **\$cd** al directorio **z\_FNL/** donde se descargan y guardan los datos FNL.

```
$ cd /home/rene/WRF/WPS/z_FNL
```

Cuadro 2. Descripción de las secciones *&share* y *&ungrib* del archivo "namelist.wps". El texto remarcado en negrita indica las variables que se modifica.

<b>&amp;share</b>	
wrf_core = 'ARW',	#\$ variable para definir alguna de las dos configuraciones dinámicas con la que se corre el WRF; ARW o NMM.
<b>max_dom = 3,</b>	#\$ Un número entero para indicar el total de dominios para la simulación. En la consultoría se utilizan tres dominios, uno madre y dos anidados.
<b>start_date =</b> '2010-09-20_00:00:00','2010-09-20_00:00:00','2010-09-20_00:00:00',	#\$ Fecha de inicio para el procesamiento de datos para los tres dominios, en la consultoría fue el 20 de septiembre de 2010.
<b>end_date =</b> '2010-10-08_00:00:00','2010-10-08_00:00:00','2010-10-08_00:00:00',	#\$ Fecha de fin para el procesamiento de datos para los tres dominios, en la consultoría fue el 8 de octubre de 2010.
<b>interval_seconds = 21600</b>	#\$ intervalo del tiempo de los datos meteorológicos en los archivos FNL, en segundos. 21,600 equivale a seis horas.
io_form_geogrid = 2,	#\$ El formato de escritura de los archivos interpolados horizontalmente, el número 2 indica que el formato es netCDF.
/	
<b>&amp;ungrib</b>	
out_format = 'WPS',	#\$ es el formato de escritura para los archivos intermedios. En la mayoría de los casos se maneja el formato WPS.
prefix = 'FILE',	#\$ Prefijo para el nombre de los archivos intermedios que se generen.
/	

Abrir un navegador de internet y acceder al sitio donde se resguardan los datos FNL <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/> e ingresar con su cuenta o registrarse como nuevo usuario, tal como se muestra en la elipse en la figura 11.



Figura 11. Ingreso al sitio web en el que se encuentran los datos FNL. UCAR-CISL Research Data Archive (RDA), 2016. Recuperado de: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>

Dentro del sitio de los datos FNL, seleccionar la pestaña “Data Access”, marcada en el círculo en la figura 12.



Figura 12. Pestaña para acceder a los datos FNL. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>

Dentro de la sección “Data Access”, seleccionar los archivos con datos disponibles desde 2007, tal como se muestra en el círculo en la figura 13.

		Web Server Holdings	Data Format Conversion
Union of Available Products		<a href="#">Web File Listing</a>	<a href="#">Get Converted Files</a>
P R O D U C T S	GRIB1 6 HOURLY FILES 1999.07.30 to 2007.12.06	<a href="#">Web File Listing</a>	<a href="#">Get Converted Files</a>
	GRIB2 6 HOURLY FILES 2007.12.06 to current	<a href="#">Web File Listing</a>	<a href="#">Get Converted Files</a>

Figura 13. Selección de la opción en la que hay disponibles archivos con datos FNL posteriores a 2007. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!access>

Se despliega una siguiente ventana en la que debe seleccionar la opción de consulta interactiva de los archivos de datos, tal como se muestra en la elipse en la figura 14.

<b>Faceted Browse</b>	<b>Complete File List</b>
Interactively browse the Internet-accessible collection of data files and make selections to create a list of only the files you need. <b>Please note</b> that this is not a subsetting service. You will still receive whole data files as they exist in our archive.	View a hierarchical listing of the full collection of data files

Figura 14. Opción para la consulta de los archivos con datos FNL disponibles. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#lcgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&gindex=2>

En la siguiente ventana que aparezca, indicar las fechas de los datos FNL a descargar y dejar en blanco las casillas relacionadas con las variables meteorológicas, tal como se muestra en la elipse de la figura 15. Al final de la pantalla dar clic en el botón “Continue”. En el caso piloto en las cuencas de los ríos de La Sierra, las fechas de trabajo son del 20 de septiembre de 2010 al 8 de octubre de 2010.

Description
Data Access
Documentation
Software

### Internet Download Files - Create a File List

Your options are:

- **Browse** the complete list of files in this dataset
- Show the **most recent** files from the *GRIB2 6 HOURLY FILES 2007.12.06 to current* dataset product
- Make selections from the following options (or accept the defaults) to get a list of all Internet files that contain any data selections (you will then have further opportunity to refine your list), and then click the "Continue" button below.

**Dataset Product:** GRIB2 6 HOURLY FILES 2007.12.06 to current

**Temporal (Valid Time) Selection:** 2010-09-15 00:00 ▼ 📅 to 2010-09-21 00:00 ▼ 📅

**\*Parameter Selection:** (selecting no parameters has the same effect as selecting all parameters)

Figura 15. Selección de fechas y variables meteorológicas de los datos FNL a descargar. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#lcgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&action=customize&gindex=2>

En la siguiente ventana activar las casillas de los archivos FNL que requiera descargar y al final de la pantalla dar clic en el botón “Create” (figura 16) para generar un archivo para descargar desde el equipo de cómputo del IMTA el conjunto de datos con el comando **\$wget**.

<input type="checkbox"/>	*fnl_20100920_06_00.grib2	WMO GRIB2	288 Grids	2010-09-20 06:00	2010-09-20 06:00	15.40	<a href="#">GRIB2 201</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	*fnl_20100920_12_00.grib2	WMO GRIB2	288 Grids	2010-09-20 12:00	2010-09-20 12:00	15.44	<a href="#">GRIB2 201</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	*fnl_20100920_18_00.grib2	WMO GRIB2	288 Grids	2010-09-20 18:00	2010-09-20 18:00	15.45	<a href="#">GRIB2 201</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	*fnl_20100921_00_00.grib2	WMO GRIB2	288 Grids	2010-09-21 00:00	2010-09-21 00:00	15.41	<a href="#">GRIB2 201</a>
<input type="checkbox"/>	*fnl_20100921_06_00.grib2	WMO GRIB2	288 Grids	2010-09-21 06:00	2010-09-21 06:00	15.33	<a href="#">GRIB2 201</a>

To get data files, do one of the following:

- Select two or more files and  them as a single Unix tar file
- Select one or more files and  a  script to read them from the Internet using
- Click the individual filename links to download files one-at-a-time

Figura 16. Selección de los archivos FNL a descargar y la modalidad de la descarga. UCAR-CISL RDA, 2016. Recuperado de: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#cgi-bin/datasets/getWebList?dsnum=083.2&action=customize&gindex=2>

En este momento se abrirá una nueva ventana con el archivo que incluye las instrucciones para descargar los datos. Guardar el archivo en el directorio **z\_FNL/**, donde se descargarán los datos FNL, con el nombre "*wget\_2010.txt*". Editar el archivo e indicar, en la línea que aparece sombreada en la figura 17, la contraseña que estableció para ingresar al sitio de los datos FNL.

```
#!/bin/csh -f
#
# c-shell script to download selected files from rda.ucar.edu using Wget
# NOTE: if you want to run under a different shell, make sure you change
#       the 'set' commands according to your shell's syntax
# after you save the file, don't forget to make it executable
# i.e. - "chmod 755 <name_of_script>"
#
# Experienced Wget Users: add additional command-line flags here
# Use the -r (--recursive) option with care
# Do NOT use the -b (--background) option - simultaneous file downloads
# can cause your data access to be blocked
set opts = "-N"
#
# Replace "xxxxxx" with your password
# IMPORTANT NOTE: If your password uses a special character that has special
# meaning to csh, you should escape it with a backslash
# Example: set passwd = "my!\password"
set passwd = 'xxxxxx'
set num_chars = `echo "$passwd" |awk '{print length($0)}'`
if ($num_chars == 0) then
    echo "You need to set your password before you can continue"
    echo " see the documentation in the script"
    exit
endif
```

Figura 17. Archivo que se utiliza para descargar los datos FNL en la carpeta **z\_FNL/**. En la sección sombreada se indica la línea en la que se debe incluir la contraseña.

Una vez que cuenta con el archivo “*wget\_2010.txt*” en la carpeta **z\_FNL/**, proceder con la descarga de los datos FNL ejecutando el archivo con el comando:

***\$/wget\_2010.txt***

El listado de los archivos descargados se muestra en la figura 18.

```
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100920_00_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100920_06_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100920_12_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100920_18_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100921_00_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100921_06_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100921_12_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100921_18_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100922_00_00.grib2
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 15M Oct 3 2014 fnl_20100922_06_00.grib2
```

Figura 18. Listado de los archivos meteorológicos FNL descargados en el directorio **z\_FNL/**

Una vez que se cuenta con los datos FNL en el directorio **z\_FNL/**, regresar al directorio **WPS/** o descender un nivel de directorio con el comando ***\$cd ..***

En el directorio **WPS/** proceder al establecimiento del acceso directo a los archivos con datos FNL para que sean leídos por el programa “*ungrib.exe*”, para ello aplicar el programa “*link\_grib.csh*” y listar los archivos que se enlacen (figura 19). Aplicar los comandos:

***\$/link\_grib.csh /Data\_FNL/fnl\****  
***\$ ls -lg GRIBFILE\****

```
-bash-4.1$ ./link_grib.csh z_FNL/fnl*
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg GRIBFILE*
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAA -> z_FNL/fnl_20100918_12_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAB -> z_FNL/fnl_20100918_18_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAC -> z_FNL/fnl_20100919_00_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAD -> z_FNL/fnl_20100919_06_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAE -> z_FNL/fnl_20100919_12_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAF -> z_FNL/fnl_20100919_18_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAG -> z_FNL/fnl_20100920_00_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAH -> z_FNL/fnl_20100920_06_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAI -> z_FNL/fnl_20100920_12_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAJ -> z_FNL/fnl_20100920_18_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAK -> z_FNL/fnl_20100921_00_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAL -> z_FNL/fnl_20100921_06_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAM -> z_FNL/fnl_20100921_12_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAN -> z_FNL/fnl_20100921_18_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAO -> z_FNL/fnl_20100922_00_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAP -> z_FNL/fnl_20100922_06_00.grib2
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 30 Jul 1 2016 GRIBFILE.AAQ -> z_FNL/fnl_20100922_12_00.grib2
```

Figura 19. Enlaces de acceso directo a los archivos GRIBFILE.\* que resultan de aplicar el programa “*link\_grib.csh*”.

En la figura 19 los archivos con texto en azul son de acceso directo a los archivos originales (archivos **fnl\***) que se encuentra dentro del directorio **z\_FNL/**

- El enlace de acceso directo a los archivos FNL, u otros archivos como del GFS, se debe realizar cada vez que se descarguen nuevos archivos meteorológicos.

En el directorio **WPS/** continuar con el establecimiento de un acceso directo o enlace simbólico del archivo “*Vtable*” que corresponda al origen de los archivos meteorológicos de entrada (figura 20). El archivo *Vtable* indica a “*ungrib.exe*” la estructura y contenido de los datos meteorológicos en los archivos del FNL. La tabla asociada a los datos FNL es la del modelo GFS.

```
/storage/array2/wrfhidro/WRF/WPS
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ln -s ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS Vtable ^C
-bash-4.1$
-bash-4.1$ !ls
ls -lg Vtable
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 33 Apr 20 19:13 Vtable -> ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS
```

Figura 20. Listado del enlace de acceso directo al archivo “*Vtable.GFS*” que resulta de aplicar el comando **\$ln -s**.

En la figura 20 el archivo con texto en color azul representa el acceso directo al archivo original “*Vtable.GFS*” que se encuentra dentro del directorio **ungrib/Variable\_Tables/**.

- El enlace de acceso directo al archivo “*Vtable*” se realiza cuando se modifica el origen de los datos meteorológicos, en caso contrario solo realizarlo una vez, independientemente de los cambios que se efectúen en el archivo de control “*namelist.wps*” cuando se corran diferentes casos de estudio o pronósticos.

Ejecutar el programa “*ungrib.exe*” en el directorio **WPS/** (figura 21) para extraer los campos meteorológicos de los archivos FNL, de acuerdo con las opciones definidas en la sección **&share** y **&ungrib** del archivo “*namelist.wps*”. Aplicar el comando:

**\$ ./ungrib.exe**

```

/storage/array2/wrfhidro/WRF/WPS
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ./ungrib.exe
*** Starting program ungrib.exe ***
Start_date = 2010-09-20_00:00:00 ,      End_date = 2010-10-08_18:00:00
output format is WPS
Path to intermediate files is ./

#####
Inventory for date = 2010-09-18 12:00:00

PRES  TT      UU      VV      RH      HGT      PSFC      PMSL      SM000010 SM010040 SM040100
SM100200 SM010200 ST000010 ST010040 ST040100 ST100200 ST010200 SEAICE  LANDSEA  SOILHGT  SKINTEM
P SNOW      SNOWH
-----
2013.0  o      o      o      o      o      o      x      o      o      o      o
o      o      o      o      o      o      o      o      o      o      o
o
2001.0  x      x      x      x      o      x      o      x      x      x      x
x      o      x      x      x      o      x      x      x      x      x
x
1000.0  x      x      x      x      x      x

```

Figura 21. Ejecución del programa “*ungrib.exe*” y despliegue del inicio del procesamiento.

Cuando concluye la ejecución del programa “*ungrib.exe*” debe aparecer el mensaje de la figura 22 en la terminal de trabajo.

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!  Successful completion of ungrib.  !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

Figura 22. Mensaje que aparece en la terminal de trabajo al concluir la ejecución del programa “*ungrib.exe*”.

Una vez que concluye satisfactoriamente la ejecución del programa “*ungrib.exe*”, revisar que se hayan generado los archivos intermedios en el directorio **WPS/** (figura 23). Para ello, aplicar el comando:

```
$ ls -lg FILE*
```

```

-bash-4.1$ ls -lg FILE*
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Apr 22 17:16 FILE:2010-09-18_12
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Apr 22 17:16 FILE:2010-09-18_18
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Apr 22 17:16 FILE:2010-09-19_00
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Apr 22 17:16 FILE:2010-09-19_06
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Apr 22 17:16 FILE:2010-09-19_12
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-20_00
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-20_06
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-20_12
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-20_18
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-21_00
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-21_06
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-21_12
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-21_18
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-22_00
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-22_06
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 39130800 Jul 1 2016 FILE:2010-09-22_12

```

Figura 23. Listado de los archivos intermedios con la información meteorológica, generados con el programa “*ungrib.exe*”.

En caso de que no aparezca el mensaje de la figura 22 o no se hayan generado los archivos intermedios listados en la figura 23, revisar el archivo “*ungrib.log*” para identificar posibles causas de errores para su atención.

### **2.1.4. Interpolación de los datos meteorológicos para el WRF con el programa *metgrid.exe***

El programa ejecutable “*metgrid.exe*” realiza la interpolación meteorológica horizontal de los archivos intermedios (FILE:\*), generados previamente con el programa “*ungrib.exe*”, para las mallas de los tres dominios definidos en el archivo “*namelist.wps*” con el fin de generar los archivos de entrada al WRF.

El programa “*metgrid.exe*” se debe correr cada vez que se modifica la fecha para la simulación con el WRF en la sección *&shared* en el archivo “*namelist.wps*” (comentado en el cuadro 3).

- Aplicar los siguientes pasos para correr el programa ejecutable “*metgrid.exe*”.

Ingresar al directorio **WPS/**, aplicar el comando:

```
$ cd /home/rene/WRF/WPS
```

Editar la sección *&share* y *&metgrid* del archivo de control “*namelist.wps*” que se encuentra en el directorio **WPS/** (comentado en el cuadro 3) en función de la configuración y las fechas definidas para correr un caso piloto de estudio o un pronóstico diferente. Abrir y editar el archivo con el comando:

```
$ gedit namelist.wps
```

En la sección *&share* (cuadro 3) mantener la misma configuración establecida durante la ejecución del “*geogrid.exe*”. En la sección *&metgrid* definir el prefijo del nombre de los archivos meteorológicos intermedios, similar al establecido en la sección *&ungrib*, el formato de escritura para los datos interpolados horizontalmente, y la ruta del directorio en la que se escribirán los datos atmosféricos pre-procesados para el WRF.

Después de editar el archivo “*namelist.wps*” y guardar los cambios, en el directorio **metgrid/** continuar con el establecimiento de un acceso directo o enlace simbólico al archivo “*METGRID.TBL*<sup>2</sup>” que corresponda a la configuración dinámica con la que se correr el modelo WRF (ARW o NMM) indicada en la variable “*wrf\_core*” de la sección *&share* en el archivo de

<sup>2</sup> El archivo “*METGRID.TBL*” contiene una sección para cada campo meteorológico, dentro de cada sección se especifican opciones tales como el método de interpolación usado para cada campo, los campos que actúan como máscaras para interpolaciones enmascaradas, y la posición que ocupa el campo en la celda para la interpolación.

control “*namelist.wps*”, y listar el archivo que se enlace, mediante la aplicación de los comandos que se muestran en la figura 24.

Cuadro 3. Descripción de las secciones *&share* y *&metgrid* del archivo “*namelist.wps*”. El texto remarcado en **negrita** indica las variables que se modifican.

<b><i>&amp;share</i></b>	
wrf_core = 'ARW',	#\$ variable para definir alguna de las dos configuraciones dinámicas con la que se corre el WRF; ARW o NMM.
<b>max_dom = 3,</b>	#\$ Un número entero para indicar el total de dominios para la simulación. En la consultoría se utilizan tres dominios, uno madre y dos anidados.
<b>start_date =</b> '2010-09-20_00:00:00','2010-09-20_00:00:00','2010-09-20_00:00:00',	#\$ Fecha de inicio para el procesamiento de datos para los tres dominios, en la consultoría fue el 20 de septiembre de 2010.
<b>end_date =</b> '2010-10-08_00:00:00','2010-10-08_00:00:00','2010-10-08_00:00:00',	#\$ Fecha de fin para el procesamiento de datos para los tres dominios, en la consultoría fue el 8 de octubre de 2010.
<b>interval_seconds = 21600</b>	#\$ intervalo del tiempo de los datos meteorológicos en los archivos FNL, en segundos. 21,600 equivale a seis horas.
io_form_geogrid = 2,	#\$ El formato de escritura de los archivos interpolados horizontalmente, el número 2 indica que el formato es netCDF.
/	
<b><i>&amp;metgrid</i></b>	
fg_name = 'FILE',	#\$ Prefijo del nombre de los archivos meteorológicos intermedios que leerá “ <i>metgrid.exe</i> ”.
io_form_metgrid = 2,	#\$ El formato de escritura de los archivos interpolados horizontalmente, el número 2 indica que el formato es netCDF.
<b>opt_output_from_metgrid_path =</b> '/home/rene/WRF/desacoplado/WRFV3/zChiapas,	#\$ Directorio con la ruta del directorio donde se guardan los archivos meteorológicos procesados para el WRF con el ejecutable “ <i>metgrid.exe</i> ” del WPS.
/	

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/WPS
-bash-4.1$ ln -s metgrid/METGRID.TBL.ARW metgrid/METGRID.TBL
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg metgrid/METGRID.TBL
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 15 Feb 22 12:05 metgrid/METGRID.TBL -> METGRID.TBL.ARW
```

Figura 24. Enlace de acceso directo al archivo “*METGRID.TBL.ARW*” que resulta de aplicar el comando *\$ln -s*.

En la figura 24 el archivo con texto en color azul es el acceso directo al archivo original “*METGRID.TBL.ARW*” que se encuentra dentro del directorio **metgrid/**.

- El enlace de acceso directo al archivo “*METGRID.TBL.ARW*” se realiza cuando se modifica la configuración dinámica con la que se corre el WRF (ARW o NMM), en caso contrario solo realizarlo una vez, independientemente de que se modifiquen variables distintas a “*wrf\_core*” en el archivo de control “*namelist.wps*” cuando se corra un caso de estudio o un pronóstico.

Ejecutar el programa “*metgrid.exe*” en el directorio **WPS**, para interpolar horizontalmente los datos meteorológicos a ser usados por el WRF. Aplicar el comando:

**\$ ./metgrid.exe**

En la figura 25 se muestra la ejecución del programa “*metgrid.exe*” y la representación del procesamiento inicial del programa.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/WPS
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ./metgrid.exe
Processing domain 1 of 3
Processing 2010-09-20_00
FILE
Processing 2010-09-20_06
FILE
```

Figura 25. Ejecución del programa “*metgrid.exe*” y despliegue del inicio del procesamiento.

Cuando concluye la ejecución del programa “*metgrid.exe*” debe aparecer el mensaje de la figura 26 en la terminal de trabajo.

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Successful completion of metgrid. !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

Figura 26. Mensaje que aparece en la terminal de trabajo al concluir la ejecución del programa “*metgrid.exe*”.

Una vez que concluye satisfactoriamente la ejecución del programa “*metgrid.exe*”, revisar que se hayan generado los archivos meteorológicos procesados para los tres dominios (figura 27), tal como se lista en la ruta del directorio indicada en la variable *opt\_output\_from\_metgrid\_path* de la sección *&metgrid* del archivo “*namelist.wps*”. Aplicar el comando de despliegue **\$ls -lg**

```
-bash-4.1$ ls -lg met_em.d0*
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-20_00:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-20_06:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-20_12:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-20_18:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-21_00:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-21_06:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-21_12:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-21_18:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-22_00:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-22_06:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-22_12:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-22_18:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul 1 2016 met_em.d01.2010-09-23_00:00:00.nc
```

Figura 27. Listado de los archivos meteorológicos pre-procesados para el WRF con el programa “*metgrid.exe*”.

La nomenclatura del nombre de los archivos generados con el programa “*metgrid.exe*” es: *met\_em.d0N.YYYY-MM-DD\_HH:mm:ss.nc*, donde *N* indica el número del dominio, *YYYY* es el año, *MM* es el mes, *DD* es el día, *HH* es la hora Z, *mm* son los minutos, *ss* son los segundos y *nc* indica el formato netCDF de los datos.

En caso de que no aparezca el mensaje de la figura 26 o no se hayan generado los archivos meteorológicos pre-procesados para el WRF (figura 27), revisar el archivo “*metgrid.log*” para identificar posibles causas de errores para su atención.

## 2.2. Concatenar el archivo con las características del terreno para la malla fina

El WRF-Hydro para correr y simular el caudal en las redes de canales, que representan los cauces de los cuerpos de agua, además de los datos atmosféricos utiliza un conjunto de datos con las características de la superficie del terreno (topografía, dirección de flujo, canales de flujo, orden de *Strahler* de los canales, latitud, longitud) para una malla igual o más fina que la correspondiente a los datos atmosféricos que son entrada al modelo. Los datos atmosféricos del dominio 3 tienen 750 metros de resolución.

Los datos terrestres usados para el WRF-Hydro en una malla más fina, con celdas de 30 metros de resolución, se generan previo a correr el modelo a partir de un Modelo Digital de Elevación del INEGI que se procesa con el *ArcGIS Geographic Information System* (GIS) de ESRI® V10.2.2, en el sistema operativo Windows. En el anexo 2 de la consultoría se describen los pasos para generar cada uno de los archivos con las características del terreno para la malla fina.

Una vez que se cuenta con los archivos con las características del terreno, éstos se deben concatenar mediante el uso de operadores de archivos con formato netCDF (NCO) en el SO

GNU/Linux, contenidos en el archivo “*ncks\_file\_concatenator.csh*”<sup>3</sup>, que proporcionan en la página los desarrolladores del WRF-Hydro.

- La concatenación del archivo se realiza sólo cuando se modifican o generan nuevos archivos con ArcGIS con las características del terreno.

- Los pasos para concatenar los archivos con las características del terreno para la malla fina son:

Abrir una terminal de trabajo en la sesión del usuario. Ingresar con el comando **\$cd** al directorio **WRF/** y listar su contenido con el comando **\$ls -lg**, tal como se muestra en la figura 28.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cd WRF/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 44
drwxrwxr-x 3 wrfhidro 4096 Apr 18 20:35 acoplado
drwxr-xr-x 8 wrfhidro 4096 Jun 15 13:04 ARWpost
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 May 3 19:37 desacoplado
drwxrwxr-x 2 wrfhidro 4096 Jul 1 2016 Netcdf-Hydro
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 May 26 14:11 ProcesamientoSalidas
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 Jul 1 2016 RespaldoProgramas
drwxr-xr-x 8 wrfhidro 20480 Jun 28 21:34 WPS
```

Figura 28. Ingreso al directorio **WRF/** y listado de los subdirectorios que contiene.

Ingresar al subdirectorio **Netcdf-Hydro/** y listar su contenido, tal como se muestra en la figura 29. En el subdirectorio se encuentra el programa “*ncks\_file\_concatenator.csh*” con el cual se concatenan los archivos con los datos de las características del terreno para la malla fina. Aplicar los comandos:

**\$ cd Netcdf-Hydro/**

**\$ ls -lg**

<sup>3</sup> El archivo para concatenar las capas de información en la malla fina del terreno es proporcionado por los desarrolladores de NCAR en la página del modelo.

```

smn1@smn:~/WRF/NetCDFSMN
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
[smn1@smn NetCDFSMN]$ pwd
/home/smn1/WRF/NetCDFSMN
[smn1@smn NetCDFSMN]$ ls -l
total 121000
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142732 feb 14 15:20 Est02.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142732 feb 13 13:43 F_Can06_200.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142732 feb 14 07:09 F_Can06_50.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142740 feb 13 13:43 F_Dir06.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142732 feb 13 13:43 F_Ord06_200.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142732 feb 14 07:09 F_Ord06_50.nc
-rw-rw-r--. 1 smn1 smn1 57687992 mar  9 13:34 Fulldom_hires_netcdf_file.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142732 feb 13 13:43 Lake-9999.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 8261124 feb 13 13:43 Lat.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 8261132 feb 13 13:43 Lon.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 4142732 feb 13 13:43 MDE06.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1    1640 feb 16 09:59 ncks_file_concatenator.csh
-rw-r--r--. 1 smn1 smn1    1640 feb 13 13:43 ncks_file_concatenator.csh~
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 8261140 feb 13 13:43 OVROUGHRTFAC.nc
-rwxr-xr-x. 1 smn1 smn1 8261140 feb 13 13:43 RETDEPRTFAC.nc
[smn1@smn NetCDFSMN]$

```

Figura 29. Listado de archivos contenidos en el directorio **Netcdf-Hydro/**

Copiar en el directorio **Netcdf-Hydro/** los archivos con las características del terreno (cuadro 4) para la malla fina generados en Windows, en caso de que se hayan modificado o generado nuevos con el paquete ArcGIS.

Cuadro 4. Descripción de los archivos con las características del terreno para la malla fina.

<b>Latitud.nc,</b>	contiene la latitud central de cada celda de la malla fina, en grados decimales.
<b>Longitud,</b>	contiene la latitud central de cada celda de la malla fina, en grados decimales.
<b>MDE06.nc,</b>	contiene la elevación del terreno central de cada celda de la malla fina, en metros.
<b>F_Dir06_50.nc,</b>	contiene la dirección del flujo.
<b>F_Can06_50.nc,</b>	contiene la red de canales de corriente.
<b>F_Ord06_50.nc,</b>	contiene el orden <i>Strahler</i> que corresponde a cada trayecto de la red de canal de corriente.
<b>Lake-9999.nc,</b>	contiene información de los lagos y embalses presentes en el dominio de trabajo.
<b>Est02.nc,</b>	contiene la ubicación de los puntos de control para los que se guarda en un archivo el gasto simulado.
<b>RETDEPRFAC.nc,</b>	contiene el factor de la profundidad de retención de agua sobre la superficie.
<b>OVROUGHRTFAC.nc,</b>	contiene el factor de escalamiento de la rugosidad del terreno para el flujo superficial.

Proceder a editar el programa “*ncks\_file\_concatenator.csh*” que se encuentra en el directorio **Netcdf-Hydro/**. El programa aplica operadores de archivos netCDF (NCO) para concatenar los archivos con los datos de las características del terreno para la malla fina. Indicar el nombre de los archivos que contienen las características del terreno, tal como se muestra en la sección con las líneas sombreadas que aparecen en la figura 30, y guardar los cambios. Aplicar el comando:

**\$ gedit *ncks\_file\_concatenator.csh***



```
#!/bin/sh
# Script to append individual netcdf files together into a single file using ncks
# Usage: ./ncks_file_concatenator.sha
# Output: A single WRF-Hydro input file called 'Fulldom_hires_netcdf_file.nc' that contains
# all the individual high-res
# netcdf file layers.
#
# Notes: This script is frequently used to concatenate the individual netcdf file layers
# that are generated for use as
# the 'routing grids' in WRF-Hydro. You will first need to 'unzip' the zipfile that is
# created from either the stand-alone
# routing grid tool or the one downloaded from the ArcGIS WRF-Hydro pre-processing web
# service first to create the individual# file layers that will be concatenated. This script
# also erases those individual layers when finishing so be sure to keep
# your original zip file.
# Developed: 12/1/2012, D. Gochis

### EDIT THESE FILENAMES AS NEEDED...
outfile="Fulldom_hires_netcdf_file.nc"
file1="MDE06.nc"
file2="F_Dir06.nc"
file3="F_Can06_50.nc"
file4="F_Ord06_50.nc"
file5="gw.nc"
file6="RETDEPRTFAC.nc"
file7="OVRROUGHRTFAC.nc"
file8="Lake-9999.nc"
file9="Est02.nc"
file10="Lat.nc"
file11="Lon.nc"

### NO EDITS NECESSARY BELOW HERE ####
echo $file1
ncks $file1 $outfile
echo $file2
ncks -A $file2 $outfile
echo $file3
ncks -A $file3 $outfile
echo $file4
ncks -A $file4 $outfile
echo $file5
ncks -A $file5 $outfile
echo $file6
```

Figura 30. Contenido del programa “ncks\_file\_concatenator.csh”. La sección sombreada es la que se debe modificar.

Una vez que se editó el programa “*ncks\_file\_concatenator.csh*” y se guardan los cambios, aplicar el comando `./` para ejecutarlo, tal como se muestra en la figura 31 en la cual además se incluye una sección con la ejecución del programa.

```
[smn1@smn NetCDFSMN]$ ./ncks_file_concatenator.csh
MDE06.nc
F_Dir06.nc
F_Can06_50.nc
F_Ord06_50.nc
```

Figura 31. Ejecución del programa “*ncks\_file\_concatenator.csh*”.

Al concluir el programa, revisar que se haya generado en el directorio **Netcdf-Hydro/** el archivo concatenado (figura 32). Aplicar el comando:

**`$ ls -l Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc`**

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/Netcdf-Hydro
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 780976940 Jul 1 2016 Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc
```

Figura 32. Listado del archivo en el que se concatenaron las características del terreno para la malla fina.

Para concluir con esta sección, copiar con el comando **`$cp`** el archivo concatenado al directorio donde se corre el WRF-Hydro, tanto para el caso acoplado (figura 33) como para el desacoplado (figura 34) del WRF, y listar el archivo copiado con el comando **`$ls -lg`**, tal como se muestra en las mismas figuras.

```
-bash-4.1$ cp Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas/DOMAIN/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas/DOMAIN/
total 2401196
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 312955 May 11 12:28 6lbsn_msk.txt
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 312955 May 11 12:28 basn_msk1k_frng_ohd.txt
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 780976940 May 28 10:03 Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc
```

Figura 33. Listado del archivo concatenado que se copió al directorio donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/Netcdf-Hydro
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cp Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc /storage/array2/wrfhidro/WRF/acoplado/WRFV3/zChiapas/DOMAIN/
-bash-4.1$
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg /storage/array2/wrfhidro/WRF/acoplado/WRFV3/zChiapas/DOMAIN/
total 2039228
-rw-r--r-- 1 wrfhidro      312955 Apr 22  2015 61bsn_msk.txt
-rw-r--r-- 1 wrfhidro      312955 Apr 22  2015 basn_msk1k_frng_ohd.txt
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 250903540 Apr 22  2015 Fulldom_hires_hydrofile_ohd_new_basns_w_cal_params_full_domain.nc
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 780976940 Jul  1  2016 Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc
```

Figura 34. Listado del archivo concatenado que se copió al directorio donde se corre el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF.

## 2.3. Correr el WRF para generar los datos atmosféricos de entrada al WRF-hydro en modo desacoplado

El WRF-Hydro para correr utiliza datos atmosféricos, pre-procesados en el formato de entrada al modelo (Gochis, *et al.*, 2015), provenientes de datos observados o de cualquier modelo atmosférico; para la corrida del caso piloto se utilizaron los datos generados con el modelo WRF.

En las siguientes subsecciones se describe el archivo de control “*namelist.input*” y los pasos para correr los ejecutables del WRF para generar los datos atmosféricos de entrada al modelo WRF-Hydro en modo desacoplado.

### 2.3.1. Ingresar al directorio del WRF

Abrir una terminal de trabajo en la sesión del usuario. Ingresar con el comando **\$cd** al directorio **WRF/** y listar su contenido con el comando **\$ls -lg**, tal como se muestra en la figura 35.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cd WRF/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 44
drwxrwxr-x 3 wrfhidro  4096 Apr 18 20:35 acoplado
drwxr-xr-x 8 wrfhidro  4096 Jun 15 13:04 ARWpost
drwxrwxr-x 4 wrfhidro  4096 May  3 19:37 desacoplado
drwxrwxr-x 2 wrfhidro  4096 Jul  1  2016 Netcdf-Hydro
drwxrwxr-x 4 wrfhidro  4096 May 26 14:11 ProcesamientoSalidas
drwxrwxr-x 4 wrfhidro  4096 Jul  1  2016 RespaldoProgramas
drwxr-xr-x 8 wrfhidro 20480 Jun 28 21:34 WPS
```

Figura 35. Listado del directorio **WRF/** donde se encuentran el subdirectorio **desacoplado/** para correr el WRF.

Ingresar al directorio **desacoplado/** con el comando **\$cd** y listar su contenido. Aplicar los comandos:

```
$ cd desacoplado/
```

```
$ ls -lg
```

En el directorio se encuentran por separado dos subdirectorios (figura 36): i) el subdirectorio **WRFV3/** en el que se corre el WRF para generar los datos atmosféricos de entrada al WRF-Hydro y ii) el subdirectorio **hydro/** donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 8
drwxr-xr-x 17 wrfhidro 4096 May 11 12:02 hydro
drwxr-xr-x 18 wrfhidro 4096 May 3 22:46 WRFV3
```

Figura 36. Listado del directorio **desacoplado/** donde se corre el WRF-Hydro y el WRF desacoplados en directorios por separado.

Ingresar al directorio **WRFV3/** donde se corre el WRF y listar su contenido. Aplicar el comando **\$cd** como se muestra en la figura 37. Los archivos aparecen con texto de color negro y los directorios con texto en azul.

```
-bash-4.1$ cd WRFV3/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 2272
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 4096 Feb 18 2015 arch
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 3019 Feb 14 2014 clean
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 16188 Jul 11 2014 compile
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 49432 Feb 19 2015 compile.log
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 33451 May 3 2014 configure
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 20664 May 3 21:22 configure.wrf
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 20556 May 3 21:21 configure.wrf.backup
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 20575 Mar 3 2015 configure.wrf_ok
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 4096 May 3 21:43 dyn_em
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 4096 Feb 18 2015 dyn_exp
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 4096 Feb 18 2015 dyn_nmm
drwxr-xr-x 16 wrfhidro 4096 Feb 18 2015 external
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 12288 May 3 21:33 frame
drwxr-xr-x 9 wrfhidro 4096 Feb 18 2015 hydro
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 24576 May 3 21:25 inc
drwxr-xr-x 2 wrfhidro 20480 May 3 21:43 main
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 38801 Aug 8 2014 Makefile
```

Figura 37. Ingreso al directorio **WRFV3/** donde se corre el WRF y listado del contenido.

Ingresar al directorio **run/** donde se encuentran los programas ejecutables para correr el WRF. Listar los archivos ejecutables y el archivo de control del WRF ("*namelist.input*") con el comando **\$ls -lg**, tal como se presenta en la figura 38. Los archivos aparecen en texto de color negro, el acceso directo a los programas ejecutables aparece en texto azul, los archivos de control y los programas ejecutables originales aparecen en texto en verde.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/WRFV3
-bash-4.1$ cd run/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg *exe namelist.input*
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 4403 May  3 21:43 namelist.input
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 5196 May  3 21:21 namelist.input.backup
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 5196 Mar  3 23:35 namelist.input.txt
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro  17 May  3 21:43 ndown.exe -> ../main/ndown.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro  15 May  3 21:43 nup.exe -> ../main/nup.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro  16 May  3 21:43 real.exe -> ../main/real.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro  14 May  3 21:43 tc.exe -> ../main/tc.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro  15 May  3 21:42 wrf.exe -> ../main/wrf.exe
```

Figura 38. Ingreso al directorio **run/** y listado de los programas ejecutables para correr el WRF.

### 2.3.2. Generar los archivos con las condiciones iniciales y de frontera para el WRF

Revisar que en el directorio **run/** se cuente con los archivos de datos con las condiciones geográficas y meteorológicas (archivos "*met\_em.d0\**") para los tres dominios, generados con el programa "*metgrid.exe*" del WPS. Listar los archivos "*met\_em.d0\**" (figura 39) con el comando:

**\$ ls -lg met\_em.d0\***

```
-bash-4.1$ ls -lg met_em.d0*
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-20_00:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-20_06:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-20_12:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-20_18:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-21_00:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-21_06:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-21_12:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-21_18:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-22_00:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-22_06:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-22_12:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-22_18:00:00.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 257373624 Jul  1 2016 met_em.d01.2010-09-23_00:00:00.nc
```

Figura 39. Sección del listado de los archivos meteorológicos que son entrada para el WRF.

En caso de que no se cuente con los archivos listados en la figura 39, proceder a generarlos con los pasos que se indican en la **sección 2.1.4**.

Editar el archivo "*namelist.input*" de control del WRF (comentado en el apéndice 1 de este anexo), para modificar las opciones de acuerdo con las condiciones de la simulación, por ejemplo las fechas de las corridas, los dominios, las opciones físicas y dinámicas a considerar por el modelo WRF. Aplicar el comando:

**\$ gedit namelist.input**

Después de editar y guardar los cambios en el archivo de control "*namelist.input*" y guardar los cambios, continuar con la ejecución del programa "*real.exe*" en el directorio **run/** para generar los archivos con las condiciones iniciales y de frontera para el WRF. Aplicar el comando **\$mpirun** para correr el programa ejecutable con los procesadores establecidos por el usuario, tal como se ejemplifica en la figura 40 para el caso de un equipo con cuatro procesadores.

```
[rene@wrf-hydro ~]$ cd WRF/desacoplado/WRFV3/zChiapas/
[rene@wrf-hydro zChiapas]$ mpirun -np 4 ./real.exe
starting wrf task      0 of          4
starting wrf task      1 of          4
starting wrf task      2 of          4
starting wrf task      3 of          4
```

Figura 40. Ejecución del programa "*real.exe*" con cuatro procesadores de un equipo de cómputo.

Editar el archivo "*rsl.error.0000*" en el directorio **run/** cuando concluya la ejecución del programa "*real.exe*" para revisar que en la última línea del archivo aparezca un mensaje similar al de la figura 41. Aplicar el comando:

**\$ gedit rsl.error.0000**

```
d03 2010-09-15_00:00:00 Timing for output      0 s.
d03 2010-09-15_00:00:00 Timing for loop #    1 =    1 s.
d01 2010-09-23_00:00:00 real_em: SUCCESS COMPLETE REAL_EM INIT
```

Figura 41. Mensaje en la última línea del archivo "*rsl.error.000*" cuando concluye la ejecución del programa "*real.exe*".

Una vez que concluye satisfactoriamente la ejecución del programa "*real.exe*", revisar que se hayan generado en el directorio **run/** los archivos con las condiciones iniciales para cada uno de los tres dominios y las condiciones de frontera, tal como se lista en la figura 42. Aplicar el comando:

**\$ ls -lg wrfinput\_d0\* wrfbdy\_d01**

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/WRFV3/zChiapas
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg wrfinput_d0* wrfbdy_d01
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 627500916 Jun 30 16:35 wrfbdy_d01
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 407916412 Jun 30 16:30 wrfinput_d01
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 331109384 Jun 30 16:36 wrfinput_d02
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 91477628 Jun 30 16:36 wrfinput_d03
```

Figura 42. Listado de los archivos con las condiciones iniciales y las condiciones de frontera para correr el WRF en modo desacoplado, generados con el programa “real.exe”.

En caso de que no aparezca el mensaje de la figura 41 o no se hayan generado los archivos listados en la figura 42, revisar el archivo “real.log” para identificar posibles causas de errores para su atención.

### 2.3.3. Correr el WRF

Una vez que se dispone de los archivos con las condiciones iniciales y de frontera en el directorio **run/**, se procede a correr el modelo WRF en modo desacoplado del WRF-Hydro para realizar la simulación atmosférica. Aplicar el comando **\$mpirun** para correr el programa “wrf.exe” con varios procesadores del equipo de cómputo, tal como se ejemplifica en la figura 43 para el caso de cuatro procesadores.

```
[rene@wrf-hydro zChiapas]$ mpirun -np 4 ./wrf.exe
starting wrf task          0 of          4
starting wrf task          2 of          4
starting wrf task          3 of          4
starting wrf task          1 of          4
```

Figura 43. Ejecución del programa “wrf.exe” con cuatro procesadores de un equipo de cómputo.

Editar el archivo “rsl.error.0000” en el directorio **run/** cuando concluya la ejecución del programa “wrf.exe”. Revisar que en la última línea del archivo aparezca el mensaje de la figura 44. Aplicar el comando:

**\$ gedit rsl.error.0000**

```
Timing for Writing wrfout_d01_2010-09-23_00:00:00 for domain      1:  0.62807 elapsed
seconds
d01 2010-09-23_00:00:00 wrf: SUCCESS COMPLETE WRF
```

Figura 44. Mensaje en la última línea del archivo “rsl.error.0000” cuando concluye la ejecución del programa “wrf.exe”.

Una vez que concluye satisfactoriamente la ejecución del programa “*wrf.exe*”, revisar que se hayan generado los archivos con los datos de la simulación atmosférica horaria para los tres dominios (figura 45) definidos en el archivo “*namelist.input*”. Aplicar el comando de despliegue:

**\$ ls -lg wrfout\_d0\***

```
-bash-4.1$ ls -lg wrfout_d0*
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  6 20:40 wrfout_d01_2010-09-20_00:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  6 21:49 wrfout_d01_2010-09-20_03:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  6 23:01 wrfout_d01_2010-09-20_06:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  7 00:11 wrfout_d01_2010-09-20_09:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  7 01:22 wrfout_d01_2010-09-20_12:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  7 02:33 wrfout_d01_2010-09-20_15:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  7 03:45 wrfout_d01_2010-09-20_18:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  7 04:56 wrfout_d01_2010-09-20_21:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  7 06:07 wrfout_d01_2010-09-21_00:00:00
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1149623352 Jun  7 07:18 wrfout_d01_2010-09-21_03:00:00
```

Figura 45. Sección del listado de los archivos con los datos de la simulación atmosférica horaria del WRF, generados con el programa “*wrf.exe*”.

La nomenclatura del nombre de los archivos es “*wrfout\_d0N\_YYYY-MM-DD\_HH:mm:ss*”, donde *N* indica el número del dominio, *YYYY* es el año, *MM* es el mes, *DD* es el día, *HH* es la hora *Z*, *mm* son los minutos y *ss* son los segundos.

En caso de que no aparezca el mensaje de la figura 44 o no se hayan generado los archivos listados en la figura 45, revisar el archivo “*wrf.log*” para identificar posibles causas de errores para su atención.

## 2.4. Correr el WRF-Hydro en modo desacoplado

En la presente sección se describen los pasos a seguir para correr el WRF-Hydro en modo desacoplado para generar la simulación del gasto o caudal en las cuencas de interés.

### 2.4.1. Ingresar al directorio donde se corre el WRF-Hydro

Ingresar al directorio **hydro/** donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado y listar su contenido. Aplicar el comando **\$cd** con la ruta completa donde se encuentra el directorio **hydro/**, como se muestra en la figura 46. Los archivos aparecen con texto en color negro, los directorios con texto en lila, el acceso directo a archivos aparecen en texto azul, los archivos de configuración y compilación del sistema hydro aparecen en verde.

```
-bash-4.1$ cd /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 256
drwxr-xr-x  2 wrfhidro  4096 May 15  2015 arc
-rwxr-xr-x  1 wrfhidro   322 May 15  2015 compile_offline_Noah.csh
-rwxr-xr-x  1 wrfhidro   467 May 15  2015 compile_offline_NoahMP.csh
-rwxr-xr-x  1 wrfhidro  3506 May 15  2015 configure
drwxr-xr-x  7 wrfhidro  4096 May 15  2015 CPL
drwxr-xr-x  2 wrfhidro  4096 May  3 20:03 Data_Rec
drwxr-xr-x  2 wrfhidro  4096 May 15  2015 Doc
drwxr-xr-x  2 wrfhidro  4096 May  3 20:03 HYDRO_drv
lrwxrwxrwx  1 wrfhidro    16 May  3 20:03 LandModel -> Land_models/Noah
lrwxrwxrwx  1 wrfhidro    12 May  3 20:03 LandModel_cpl -> CPL/Noah_cpl
drwxr-xr-x  4 wrfhidro  4096 May 15  2015 Land_models
drwxr-xr-x  2 wrfhidro  4096 May  3 20:03 lib
-rw-r--r--  1 wrfhidro 17222 May 15  2015 log
-rw-rw-r--  1 wrfhidro  863 May  3 20:02 macros
-rw-r--r--  1 wrfhidro  788 May 15  2015 Makefile
```

Figura 46. Listado de los archivos y subdirectorios contenidos en el directorio **hydro/** donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado.

A continuación, ingresar con el comando **\$cd** al directorio **Run/** donde se encuentra el programa ejecutable para correr el WRF-Hydro en modo desacoplado. Listar el programa ejecutable con el comando **\$ls -lg** y copiarlo con el comando **\$cp** al directorio donde se corre el WRF-Hydro para la subcuenca de La Sierra, tal como se muestra en la figura 47.

```
-bash-4.1$ cd Run/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg *exe
lrwxrwxrwx  1 wrfhidro    18 May  3 20:03 wrf_hydro.exe -> wrf_hydro_Noah.exe
-rwxrwxr-x  1 wrfhidro 3237863 May  3 20:03 wrf_hydro_Noah.exe
-rwxr-xr-x  1 wrfhidro 3807973 May 15  2015 wrf_hydro_NoahMP.exe
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cp wrf_hydro_Noah.exe ../zChiapas/
```

Figura 47. Programa ejecutable “wrf\_hydro\_Noah.exe” copiado al directorio **zChiapas/**, que es donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado.

Ingresar con el comando **\$cd** al directorio **zChiapas/** para correr el modelo WRF-Hydro para la subcuenca de La Sierra. Listar el contenido como se muestra en la figura 48. Los archivos aparecen en texto de color negro, los archivos de parámetros y el ejecutable en texto en verde.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cd zChiapas/
-bash-4.1$ ls -lg *exe *namelist*
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 4082 Jun 3 17:53 hydro.namelist
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 1557 Jun 14 09:10 namelist.hrlas
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 1299 May 11 12:07 namelist.hrlas.Noah
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 10931 May 11 12:07 README.namelist.Noah
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro 18 May 11 12:02 wrf_hydro.exe -> wrf_hydro_Noah.exe
-rwxrwxr-x 1 wrfhidro 3237863 May 11 12:07 wrf_hydro_Noah.exe
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 3807973 May 11 12:02 wrf_hydro_NoahMP.exe
```

Figura 48. Ingreso al directorio donde se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado y listado de parte del contenido.

### 2.4.2. Verificar que se cuenta con los datos de entrada al WRF-Hydro

Copiar los archivos de parámetros con terminación \*.TBL del directorio **WRF\_Hydro\_v3.0\_FRNG\_test\_case/Noah\_LSM/**, que se encuentran como parte del archivo “*WRF\_Hydro\_v3.0\_FRNG\_test\_case.tar.gz*” del caso de prueba en la página del WRF-Hydro.

El WRF-Hydro utiliza dos conjuntos de datos para correr en modo desacoplado; los terrestres y los atmosféricos.

Los datos atmosféricos se obtienen con el WRF, tal como se describe en la [sección 2.3](#). Los datos terrestres que utiliza el WRF-Hydro son de dos clases; i) los generados con el programa “*geogrid.exe*” del WPS para el dominio 3, tal como se describe en la [sección 2.1.2](#); los datos terrestres deben tener la misma resolución espacial que la de los datos atmosféricos de entrada (celdas de 750 mts), y ii) los generados con ArcGIS para una malla fina del terreno (celdas de 30 mts) y concatenados en un archivo con los pasos que se indican en la [sección 2.2](#).

Copiar al directorio **zChiapas/DOMAIN/**, con el comando **\$cp**, los datos del terreno correspondientes a la resolución de la malla de los datos atmosféricos para el dominio 3, generado con el programa “*geogrid.exe*” del WPS que se encuentran en el directorio **WRF/WPS/**. Revisar que se haya copiado el archivo listándolo con el comando **ls -lg**, tal como se muestra en la figura 49.

```
-bash-4.1$ cd /storage/array2/wrfhidro/WRF/WPS/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cp geo_em.d03.nc /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas/DOMAIN/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cd /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas/DOMAIN/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg geo_em.d03.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 23760828 May 11 12:28 geo_em.d03.nc
```

Figura 49. Listado del archivo del terreno “*geo\_em.d03.nc*” para el dominio 3 copiado al directorio **DOMAIN/** en el que se colocan los datos terrestres para el WRF-Hydro.

A continuación, copiar al directorio **zChiapas/DOMAIN/** el archivo “*wrfinput\_d03*” con las condiciones atmosféricas iniciales para el dominio 3, generado con el programa “*real.exe*” del WRF desacoplado en el directorio **desacoplado/WRF/run/**, con los pasos indicados en la **sección 2.3.2**. Listar que se cuente con el archivo copiado en el directorio actual con el comando ***\$ls -lg***, tal como se muestra en la figura 50.

```
-bash-4.1$ cd /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/WRFV3/zChiapas/  
-bash-4.1$  
-bash-4.1$ cp wrfinput_d03 /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas/DOMAIN/  
-bash-4.1$  
-bash-4.1$ cd /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas/DOMAIN/  
-bash-4.1$  
-bash-4.1$ ls -lg wrfinput_d03  
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 91477628 May 22 12:35 wrfinput_d03
```

Figura 50. Listado del archivo “*wrfinput\_d03*” con las condiciones iniciales del dominio 3 copiado al directorio **DOMAIN/** en el que se colocan los datos terrestres para el WRF-Hydro.

Revisar que se cuente con el archivo “*Fulldom\_hires\_netcdf\_file.nc*” que contiene la información de las características del terreno para la malla fina (figura 51). En caso de que no se encuentre el archivo, proceder a generarlo y copiarlo con los pasos descritos en la **sección 2.2**.

```
-bash-4.1$ pwd  
/storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas/DOMAIN  
-bash-4.1$  
-bash-4.1$ ls -lg Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc  
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 780976940 May 28 10:03 Fulldom_hires_netcdf_file_1000_11.nc
```

Figura 51. Listado del archivo de con los datos en la malla fina del terreno contenido en el directorio **DOMAIN/**

### **2.4.3. Ajustar las opciones en los archivos de control para correr el WRF-Hydro**

El WRF-Hydro cuando se corre en modo desacoplado tiene dos archivos de control (“*hydro.namelist*” y “*namelist.hrlidas*”) que se deben editar y modificar cada vez que se corra un experimento o un pronóstico. La descripción de las opciones en los archivos de control se encuentra en el apéndice 2 del presente anexo.

El archivo “*hydro.namelist*” controla la simulación del tránsito superficial, sub-superficial y el caudal con el WRF-Hydro, y el archivo “*namelist.hrlidas*” controla las opciones para correr el modelo de superficie del terreno Noah que es activado por el WRF-Hydro para calcular las variables de flujo y estado de calor/humedad en el terreno que son entrada a los módulos del WRF-Hydro.

Una vez que se cuenta con los datos atmosféricos y terrestres que son entrada al WRF-Hydro, ingresar con el comando **\$cd** a la ruta completa del directorio **zChiapas/** en el que se corre el WRF-Hydro en modo desacoplado y listar los archivos de control con el comando **\$ls -l**, tal como se muestra en la figura 52.

```
-bash-4.1$ cd /storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg *namelist*
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 4082 Jun  3 17:53 hydro.namelist
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 1557 Jun 14 09:10 namelist.hrl das
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 1299 May 11 12:07 namelist.hrl das.Noah
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 10931 May 11 12:07 README.namelist.Noah
```

Figura 52. Ingreso al directorio **zChiapas/** en el que se corre el WRF-Hydro desacoplado, y listado de los archivos de control.

Editar el archivo de control “*hydro.namelist*” (comentado en el apéndice 2) para fijar las opciones con las que corre el WRF-Hydro. Aplicar el comando **\$gedit hydro.namelist**. Guardar los cambios y cerrar el archivo. En la figura 53 se muestra una sección del contenido del archivo.

```
&HYDRO_nlist

!!!! SYSTEM COUPLING !!!!
!Specify what is being coupled: 1=HRLDAS (offline Noah-LSM), 2=WRF, 3=NASA/LIS,
4=CLM
sys_cpl = 1

!!!! MODEL INPUT DATA FILES !!!
!Specify land surface model gridded input data file...(e.g.: "geo_em.d03.nc")
GEO_STATIC_FLNM = "DOMAIN/geo_em.d03.nc"

!Specify the high-resolution routing terrain input data file...(e.g.:
"Fullldom hires hydrofile.nc"
! MAAC GEO_FINEGRID FLNM = "DOMAIN/
Fullldom hires hydrofile ohd new basns w cal_params full_domain.nc"
GEO_FINEGRID_FLNM = "DOMAIN/Fullldom_hires_netcdf_file.nc"
```

Figura 53. Sección del archivo de control “*hydro.namelist*” del WRF-Hydro.

- Indicar en el archivo de control “*hydro.namelist*” que el WRF-Hydro se corre en modo desacoplado del WRF asignando 1 a la variable *sys\_cpl*. Con esto el WRF-Hydro se corre forzado con el LSM Noah. La descripción de otras opciones en el archivo de control se incluyen en el apéndice 2.

A continuación, editar el archivo de control “*namelist.hrlidas*” (comentado en el apéndice 2) para fijar las opciones con las que corre el LSM Noah activado por el WRF-Hydro. En la figura 54 se muestra una sección del contenido del archivo. Aplicar el comando **\$gedit *namelist.hrlidas***

```
&NOAHLSTM_OFFLINE

HRLDAS_CONSTANTS_FILE = "DOMAIN/wrfinput_d03"
INDIR = './forcing'

! OUTDIR = './hrlidas_output/"

START_YEAR = 2010
START_MONTH = 09
START_DAY = 17
START_HOUR = 00
START_MIN = 00

! RESTART_FILENAME_REQUESTED = 'RESTART.2013091206_DOMAIN3'
! RESTART_FILENAME_REQUESTED = 'RESTART.2010091612_DOMAIN3'
```

Figura 54. Sección del archivo de control “*namelist.hrlidas*” del WRF-Hydro.

#### 2.4.4. Ajustar los valores en los archivos de parámetros del WRF-Hydro

El WRF-Hydro cuenta con archivos para ajustar parámetros físicos que inciden en la simulación hidrológica. En la consultoría se realizaron pruebas de sensibilidad (experimentos) en los que se ajustaron los parámetros relacionados con la red de canales de corriente en el archivo “*CHANPARAM.TBL*”, contenidos en el directorio **zChiapas/**. En cada experimento se ajustaron los valores del coeficiente de rugosidad de *Manning* para los canales en los que fluye el caudal. Al final del nombre del archivo de parámetros que se lista en la figura 55 se denota con la extensión *\_exp* cada uno de los experimentos realizados. En el informe de la consultoría se describen los experimentos y los resultados del caudal simulado para cada experimento.

```
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 461 Jun  3 17:54 CHANPARAM.TBL
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 461 Jun 14 09:25 CHANPARAM.TBL_Exp01_exp08-SMN
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 462 May 28 14:18 CHANPARAM.TBL_Exp02_exp07-SMN
```

Figura 55. Listado de los archivos de parámetros “CHANPARAM.TBL” correspondientes a los experimentos.

El contenido del archivo de parámetros “CHANPARAM.TBL” se muestra en la figura 56.

Channel Parameters				
StreamOrder				
	'Bw	HLINK	ChSSlp	MannN'
10,1,				
1,	1.5,	0.02,	3.0,	0.50
2,	3.0,	0.02,	1.0,	0.35
3,	8.0,	0.02,	0.5,	0.20
4,	35.,	0.03,	0.18,	0.15
5,	55.,	0.03,	0.05,	0.10
6,	75.,	0.03,	0.05,	0.08
7,	110.,	0.03,	0.05,	0.05
8,	70.,	0.10,	0.05,	0.03
9,	80.,	0.30,	0.05,	0.02
10,	100.,	0.30,	0.05,	0.01

Figura 56. Contenido del archivo de parámetros “CHANPARAM.TBL”.

- La primera columna es el orden *Strahler* de la corriente que se obtiene al procesar el MDE del INEGI con ArcGIS para generar la capa de información de la Orden de *Strahler* de cada tramo de los canales de corriente
- La columna “BW” es el ancho del fondo del canal (en metros).
- “HLINK” es la profundidad inicial del agua en el canal (en metros), los desarrolladores del WRF-Hydro recomiendan utilizar valores pequeños y permitir que el modelo alcance su propio equilibrio después de varias horas de simulación.
- “ChSSlp” es la pendiente del costado del canal.
- “MannN” es el coeficiente de rugosidad de *Manning* para el orden de corriente respectivo.

- En caso de que se necesite modificar los valores en diferentes archivos de parámetros revisar el manual técnico del WRF-Hydro (Gochis, *et al.*, 2015) para conocer el detalle de los archivos y realizar los cambios.

### 2.4.5. Correr el WRF-Hydro

Una vez que se ajustan las opciones en los archivos de control del WRF-Hydro (“hydro.namelist” y “namelist.hrlidas”) y en el archivo de parámetros en el directorio **zChiapas/**, se procede a correr el modelo WRF-Hydro desacoplado para realizar la simulación hidrológica. Aplicar el comando **\$mpirun** para correr el programa “wrf\_hydro\_Noah.exe” con el conjunto de

procesadores del equipo de cómputo, tal como se ejemplifica en la figura 57 para el caso de cuatro procesadores.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro/WRF/desacoplado/hydro/zChiapas
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg *.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhidro      18 May 11 12:02 wrf_hydro.exe -> wrf_hydro_Noah.exe
-rwxrwxr-x 1 wrfhidro 3237863 May 11 12:07 wrf_hydro_Noah.exe
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 3807973 May 11 12:02 wrf_hydro_NoahMP.exe
-bash-4.1$
-bash-4.1$ mpirun -np 4 ./wrf_hydro_Noah.exe
```

Figura 57. Ejecución del programa “wrf\_hydro.exe” utilizando cuatro procesadores de un equipo de cómputo.

Editar el archivo “diag\_hydro.00000” en el directorio **zChiapas/** cuando concluya la ejecución del programa “wrf\_hydro\_Noah.exe”. Revisar que en la última línea del archivo aparezca el mensaje de la figura 58. Aplicar el comando:

**\$ gedit diag\_hydro.00000**

```
end calling output functions
The model finished successfully.....
```

Figura 58. Mensaje de la última línea del archivo “diag\_hydro.00000” cuando concluye la ejecución del programa “wrf\_hydro.exe”.

Una vez que concluye satisfactoriamente la ejecución del programa “wrf\_hydro.exe”, revisar que se hayan generado los archivos con los datos de la simulación hidrológica horaria (figura 59). Aplicar el comando de despliegue **\$ls -l**

**\$ ls -lg frxst\_pts\_out.txt 201009\***

```
-bash-4.1$ cd zExp01_20min_60ProcDom01
-bash-4.1$ ls -lg frxst_pts_out.txt 2010092*
-rw-r--r-- 1 wrfhidro      1908 May 22 12:47 201009200000.CHANOBS_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 13616240 May 22 12:47 201009200000.CHRTOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 223110508 May 22 12:47 201009200000.CHRTOUT_GRID3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro   3035156 May 22 12:47 201009200000.LSMOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 1115637452 May 22 12:47 201009200000.RTOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro   8575148 May 22 12:47 2010092000.LDASOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro      1908 May 22 12:55 201009200100.CHANOBS_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 13616240 May 22 12:55 201009200100.CHRTOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 223110508 May 22 12:55 201009200100.CHRTOUT_GRID3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro   3035156 May 22 12:54 201009200100.LSMOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 1115637452 May 22 12:55 201009200100.RTOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro   8575148 May 22 12:55 2010092001.LDASOUT_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro      1908 May 22 13:05 201009200200.CHANOBS_DOMAIN3
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 13616240 May 22 13:05 201009200200.CHRTOUT_DOMAIN3
```

Figura 59. Sección del listado de los archivos con los datos de la simulación hidrológica generados con el programa “wrf\_hydro.exe”.

Los archivos que resultan de la simulación hidrológica, listados en la figura 59, representan:

- “YYYYMMDDHHmm.CHANOBS\_DOMAIN3” Contiene la simulación del gasto, en formato netCDF, para los puntos de control (celdas que representan la ubicación de las estaciones hidrométricas), definidos como parte de las capas de información del terreno para la malla fina. Donde: YYYY es el año, MM es el mes, DD es el día, HH es la hora Z, mm son los minutos y ss son los segundos.
- “YYYYMMDDHHmm.CHRTOUT\_DOMAIN3” Contiene los resultados de la simulación del gasto, en formato netCDF, en las celdas que representan los canales de corriente, que se incluyen como parte de las capas de información del terreno para la malla fina.
- “*frxst\_pts\_out.txt*” Contiene los resultados de la simulación del caudal y elevación, en formato ASCII, para los puntos de control (celdas que representan la ubicación de las estaciones hidrométricas), definidos como parte de las capas de información del terreno para la malla fina. En la figura 60 se muestra una sección del contenido del archivo.

Frequency (min)	Date and Time	Control Point ID	Longitude (degrees)	Latitude (degrees)	Flow (m³/s)	Elevation (m)	Other
3600	2010-09-16 12:00:00	0	-96.62810	19.32440	0.000	0.000	0.030
3600	2010-09-16 12:00:00	1	-96.37250	19.36410	0.000	0.000	0.030
3600	2010-09-16 12:00:00	2	-96.55330	19.40100	0.000	0.000	0.030
3600	2010-09-16 12:00:00	3	-96.38030	19.42120	0.000	0.000	0.030
3600	2010-09-16 12:00:00	4	-96.57850	19.49500	0.000	0.000	0.030
7200	2010-09-16 13:00:00	0	-96.62810	19.32440	0.284	10.042	0.030
7200	2010-09-16 13:00:00	1	-96.37250	19.36410	0.306	10.819	0.032
7200	2010-09-16 13:00:00	2	-96.55330	19.40100	0.070	2.470	0.043
7200	2010-09-16 13:00:00	3	-96.38030	19.42120	0.134	4.743	0.032
7200	2010-09-16 13:00:00	4	-96.57850	19.49500	0.068	2.401	0.026
10800	2010-09-16 14:00:00	0	-96.62810	19.32440	0.342	12.075	0.033
10800	2010-09-16 14:00:00	1	-96.37250	19.36410	0.279	9.863	0.030
10800	2010-09-16 14:00:00	2	-96.55330	19.40100	0.066	2.329	0.042
10800	2010-09-16 14:00:00	3	-96.38030	19.42120	0.137	4.838	0.033
10800	2010-09-16 14:00:00	4	-96.57850	19.49500	0.058	2.051	0.024
14400	2010-09-16 15:00:00	0	-96.62810	19.32440	0.345	12.181	0.034
14400	2010-09-16 15:00:00	1	-96.37250	19.36410	0.299	10.576	0.031
14400	2010-09-16 15:00:00	2	-96.55330	19.40100	0.050	1.775	0.036
14400	2010-09-16 15:00:00	3	-96.38030	19.42120	0.139	4.899	0.033
14400	2010-09-16 15:00:00	4	-96.57850	19.49500	0.055	1.946	0.023

Figura 60. Sección del archivo “*frxst\_pts\_out.txt*”.

La primera columna representa la frecuencia con la que se guardan los resultados, en minutos, la segunda columna es la fecha y hora, la tercer columna representa el identificador del punto de control que coincide con el de una estación hidrométrica, la cuarta columna es la longitud, en grados decimales, la quinta columna es la latitud, en grados decimales, la sexta columna es

el gasto, en metros cúbicos sobre segundo, la séptima columna es el gasto, en pies cúbicos sobre segundo, la última columna es la elevación del espejo de agua en el punto de control.

## 2.5. Correr el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF

En esta sección se describen los pasos para correr el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF.

### 2.5.1. Ingresar al directorio donde se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF

Abrir una terminal de trabajo en la sesión del usuario. Ingresar con el comando **\$cd** al directorio **WRF/** y listar su contenido con el comando **\$ls -lg**, tal como se muestra en la figura 61.

```
-bash-4.1$ pwd
/storage/array2/wrfhidro
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cd WRF/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 44
drwxrwxr-x 3 wrfhidro 4096 Apr 18 20:35 acoplado
drwxr-xr-x 8 wrfhidro 4096 Jun 15 13:04 ARWpost
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 May 3 19:37 desacoplado
drwxrwxr-x 2 wrfhidro 4096 Jul 1 2016 Netcdf-Hydro
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 May 26 14:11 ProcesamientoSalidas
drwxrwxr-x 4 wrfhidro 4096 Jul 1 2016 RespaldoProgramas
drwxr-xr-x 8 wrfhidro 20480 Jun 28 21:34 WPS
```

Figura 61. Listado del directorio **WRF/** donde se encuentra el subdirectorio **acoplado/** para correr el WRF-Hydro acoplado al WRF.

Ingresar al directorio **acoplado/** con el comando **\$cd** y listar su contenido con el comando **\$ls -lg**, tal como se muestra en la figura 62. En el directorio se encuentra el subdirectorio **WRFV3/** en el que se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF para realizar las simulaciones hidrometeorológicas.

```
-bash-4.1$ cd acoplado/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg
total 4
drwxr-xr-x 19 wrfhydro 4096 Apr 29 09:08 WRFV3
```

Figura 62. Listado del directorio **acoplado/** donde se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF.

Ingresar con el comando **\$cd** al directorio **WRFV3/** donde se corre el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF y listar el contenido del directorio con el comando **\$ls -lg** como se muestra en la figura 63. Los archivos aparecen con texto de color negro y los directorios con texto en azul.

```
-rw-rw-r-- 1 wrfhydro 616505 Apr 29 09:28 make-output
drwxr-xr-x 2 wrfhydro 28672 Apr 29 09:24 phys
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 14811 Aug 14 2014 README
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 12169 Aug 14 2014 README.DA
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 4436 Nov 15 2013 README.hydro
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 3402 Dec 30 2009 README.io_config
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 11854 Mar 24 2010 README.NMM
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 1220 Dec 21 2007 README.rsl_output
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 2094 Jan 17 2013 README.SSIB
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 4087 Mar 28 2011 README_test_cases
-rw-r--r-- 1 wrfhydro 6122 Apr 10 2014 README.windturbine
drwxr-xr-x 2 wrfhydro 4096 Apr 29 09:08 Registry
drwxr-xr-x 2 wrfhydro 4096 Apr 29 09:28 run
drwxr-xr-x 2 wrfhydro 4096 Apr 29 09:19 share
drwxr-xr-x 19 wrfhydro 4096 Apr 18 20:35 test
drwxr-xr-x 4 wrfhydro 4096 Apr 29 09:08 tools
drwxr-xr-x 4 wrfhydro 12288 Apr 19 22:08 wrf_run
drwxrwxr-x 10 wrfhydro 20480 May 22 22:06 zChiapas
```

Figura 63. Listado de los archivos y subdirectorios contenidos en el directorio **WRFV3/** donde se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF.

A continuación, ingresar al directorio **zChiapas/** donde se encuentran el archivo de control “*namelist.input*” y los programas ejecutables copiados desde el directorio **WRFV3/run/** para correr el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF. Aplicar el comando **\$cd** y listar el contenido con el comando **\$ls -lg**, tal como se muestra en la figura 64.

```
-bash-4.1$ cd ..
-bash-4.1$
-bash-4.1$ cd zChiapas/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg *exe namelist.input
-rwxr-xr-x 1 wrfhydro 4295 May 2 11:30 namelist.input
lrwxrwxrwx 1 wrfhydro 25 Apr 20 20:15 real.exe -> ../../WRFV3/main/real.exe
lrwxrwxrwx 1 wrfhydro 24 Apr 20 20:00 wrf.exe -> ../../WRFV3/main/wrf.exe
```

Figura 64. Listado de los programas ejecutables en el directorio **run/** usados para correr el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF.

### 2.5.2. Verificar que se cuenta con los datos de entrada al WRF-Hydro acoplado al WRF

Revisar que en el directorio **zChiapas/** se cuente con los archivos de datos con las condiciones meteorológicas (archivos “*met\_em.d0N*”) para los tres dominios, para ello aplicar los pasos de la **sección 2.3.2**.

Copiar los archivos de parámetros CHANPARAM.TBL, HYDRO.TBL y LAKEPARAM.TBL del directorio **WRF\_Hydro\_v3.0\_FRNG\_test\_case/Noah\_LSM/**, que se encuentran como parte del archivo “*WRF\_Hydro\_v3.0\_FRNG\_test\_case.tar.gz*” del caso de prueba en la página del WRF-Hydro, y revisar que se cuente con los dos conjuntos de datos terrestres que son entrada al WRF-Hydro acoplado al WRF: i) los generados con el programa “*geogrid.exe*” del WPS para el dominio 3, tal como se describe en la **sección 2.1.2**; son los datos terrestres generados con el WPS para el dominio 3 tienen una resolución espacial de 750 mts, y ii) los generados con ArcGIS para una malla fina del terreno (celdas de 30 mts) y concatenados en un archivo con los pasos que se indican en la **sección 2.2**.

Proceder a crear el directorio **DOMAIN/** mediante la aplicación del comando **\$mkdir DOMAIN**. Copiar los datos del terreno al directorio creado, aplicar los pasos de la **sección 2.4.2**.

### 2.5.3. Ajustar las opciones en los archivos de control para correr el WRF-Hydro acoplado al WRF

El WRF-Hydro cuando se corre en modo acoplado al WRF tiene dos archivos de control (“*hydro.namelist*” y “*namelist.input*”) que se deben editar y modificar cada vez que se corra un experimento o un pronóstico. El archivo “*namelist.input*” sustituye al archivo “*namelist.hrdas*” que es utilizado por el WRF-Hydro desacoplado. La descripción de las opciones en los archivos de control se encuentra en el apéndice 1 y 2 del presente anexo.

El archivo “*hydro.namelist*” controla la simulación del tránsito superficial, sub-superficial con las que retroalimenta las condiciones de la frontera inferior del WRF, y el archivo “*namelist.input*” controla las opciones atmosféricas para correr el modelo WRF.

Una vez que se verifica la existencia de los datos atmosféricos y terrestres que son entrada al WRF-Hydro acoplado al WRF, ingresar con el comando **\$cd** a la ruta completa del directorio **zChiapas/** en el que se corre el WRF-Hydro en modo acoplado al WRF y listar los archivos de control con el comando **\$ls -lg**, tal como se muestra en la figura 65.

```
-bash-4.1$ cd /storage/array2/wrfhidro/WRF/acoplado/WRFV3/zChiapas
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg *name*
-rw-r--r-- 1 wrfhidro 3542 May 2 11:30 hydro.namelist
-rwxr-xr-x 1 wrfhidro 4295 May 2 11:30 namelist.input
```

Figura 65. Comando para ingresar al directorio **run/** en el que se corre el WRF-Hydro acoplado al WRF, y listado de los archivos de control.

Proceder a editar el archivo "*namelist.input*" (comentado en el apéndice 1 de este anexo). Modificar las opciones de acuerdo con las condiciones de la simulación, por ejemplo las fechas de las corridas, los dominios, las opciones físicas y dinámicas a considerar por el modelo WRF. Abrir y editar el archivo con el comando:

**\$ gedit namelist.input**

A continuación, editar el archivo de control "*hydro.namelist*" (comentado en el apéndice 2) para fijar las opciones con las que corre el WRF-Hydro. Aplicar el comando **\$gedit hydro.namelist**. Guardar los cambios y cerrar el archivo.

- Indicar en el archivo de control "*hydro.namelist*" que el WRF-Hydro se corre en modo acoplado al WRF asignando 2 a la variable *sys\_cpl*. La descripción de otras opciones en el archivo de control se incluyen en el apéndice 2.

#### **2.5.4. Ajustar los valores en los archivos de parámetros para el WRF-Hydro**

En el directorio **\$/storage/array2/wrfhidro/WRF/acoplado/WRFV3/zChiapas** aplicar los pasos indicados en la **sección 2.4.4** para ajustar o modificar el archivo "*CHANPARAM.TBL*" de parámetros relacionados con la red de canales de corriente que incide en la simulación hidrológica.

#### **2.5.5. Generar las condiciones iniciales y de frontera para el WRF con el acoplamiento del WRF-Hydro**

Después de editar y guardar los cambios en el archivo de control "*namelist.input*" e "*hydro.namelist*" y el archivo de parámetros "*CHANPARAM.TBL*", continuar con la ejecución del programa "*real.exe*"

En el directorio **/acoplado/WRFV3/zChiapas/** aplicar los pasos indicados en la **sección 2.3.2** para generar los archivos con las condiciones iniciales y de frontera para el WRF con el acoplamiento del WRF-Hydro.

#### **2.5.6. Correr el WRF-Hydro acoplado con el WRF**

Una vez que se generan los archivos con las condiciones iniciales y de frontera en el directorio **/acoplado/WRFV3/zChiapas**, se procede a correr el modelo WRF con el acoplamiento del WRF-Hydro para realizar la simulación hidro-meteorológica.

En el directorio **/acoplado/WRFV3/zChiapas** aplicar los pasos descritos en la **sección 2.3.3** para correr el modelo acoplado.

### 3. Referencias

- Gochis, D.J., W. Yu, D.N. Yates. (2015). *The WRF-Hydro model technical description and user's guide*, version 3.0. NCAR Technical Document. Pp. 120. Junio 10, 2016. Sitio web: [https://www.ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro](https://www.ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro)
- Institute of Global Environment and Society (IGES), 2016. Mayo 30, 2016. Sitio web: <http://iges.org/grads/>
- National Center for Atmospheric Research (NCAR), 2016. Mayo 30, 2016. Sitio web: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_sources.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources.html)
- NCAR. (2014). ARW Version 3 Modeling System User's Guide. January 2014. Mayo 30, 2016. Sitio web: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/ARWUsersGuideV3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf)
- NCAR-Research Applications Laboratory (RAL), 2016. Abril 30, 2016. Sitio web: [http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro/](http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro/)
- University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), 2016. Mayo 30, 2016. Sitio web: <http://www.ncl.ucar.edu/Download/#Download>
- UCAR-CISL Research Data Archive (RDA), 2016. Mayo 30, 2016. Sitio web: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>

## Apéndice 1. Archivo de control del WRF

En el cuadro se describen las opciones del archivo de control “*namelist.input*” del WRF. Las variables marcadas en negrita son las que se modifica por el usuario

Para conocer la descripción y configuración de las variables que aparecen sin información en el cuadro, revisar el tutorial del WRF (NCAR, 2014) y el tutorial en línea <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/>

Variable	Descripción
<b>&amp;time_control</b>	
run_days = 0,	
<b>run_hours = 120,</b>	#\$ Total de horas que comprende la simulación. En la consultoría fue del 20 de septiembre al 8 de octubre de 2010 lo que resulta en 5 días y a su vez en 120 horas.
run_minutes = 0,	
run_seconds = 0,	
<b>start_year = 2010, 2010, 2010,</b>	#\$ Año de inicio de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue 2010.
<b>start_month = 09, 09, 09,</b>	#\$ Mes de inicio de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue septiembre.
<b>start_day = 20, 20, 20,</b>	#\$ Día de inicio de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue el 20.
<b>start_hour = 00, 00, 00,</b>	#\$ Hora de inicio de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue a las 00Z.
start_minute = 00, 00, 00,	
start_second = 00, 00, 00,	
<b>end_year = 2010, 2010, 2010,</b>	#\$ Año de fin de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue 2010.
<b>end_month = 10, 10, 10,</b>	#\$ Mes de fin de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue octubre.
<b>end_day = 08, 08, 08,</b>	#\$ Día de fin de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue el 08.
<b>end_hour = 00, 00, 00, # \$</b>	Hora de fin de la simulación para los tres dominios, en la consultoría fue a las 00 Z.
end_minute = 00, 00, 00,	
end_second = 00, 00, 00,	
<b>interval_seconds = 21600</b>	#\$ Intervalo de los datos forzantes de entrada procesados con el WPS a partir del WRF, provenientes del FNL, en segundos. 21,600 equivale a seis horas.
input_from_file = .true., .true., .true.,	
history_interval = 60, 60, 60,	
frames_per_outfile = 1, 1, 1,	#\$ Opción para habilitar la escritura de salidas de la simulación del WRF con la frecuencia de tiempo establecida en la opción "history_interval". Se asigna un valor de 1 para que realice la escritura.
restart = .false.,	
restart_interval = 60000,	
io_form_history = 2	
io_form_restart = 2	

io_form_input	= 2	
io_form_boundary	= 2	
debug_level	= 0	
/		
<b>&amp;domains</b>		
time_step	= 40,	
time_step_fract_num	= 0,	
time_step_fract_den	= 1,	
max_dom	= 3,	
e_we	=500, 400, 202,	#\$ Número de nodos en la malla de los dominios en la dirección oeste-este..
e_sn	=400, 403, 223,	#\$ Número de nodos en la malla de los dominios en la dirección sur-norte.
e_vert	= 30, 30, 30,	
p_top_requested	= 5000,	
num_metgrid_levels	= 27,	
num_metgrid_soil_levels	= 4,	
dx	= 6750, 2250, 750,	#\$ Número de la celda de la malla en la dirección este-oeste.
dy	= 6750, 2250, 750,	#\$ Número de la celda de la malla en la dirección norte-sur.
grid_id	= 1, 2, 3,	
parent_id	= 0, 1, 2,	#\$ Identificador del dominio anidado.
i_parent_start	= 1, 125, 125,	#\$ Punto inicial (i) para la longitud de la esquina inferior izquierda del dominio.
j_parent_start	= 1, 96, 151,	#\$ Punto inicial (j) para la latitud de la esquina inferior izquierda del dominio.
parent_grid_ratio	= 1, 3, 3,	#\$ Relación de tamaño entre la resolución espacial de la malla de los dominios. En la consultoría fue de 1:3 entre el dominio 2 con relación al dominio 1 y entre el dominio 3 con relación al dominio 2.
parent_time_step_ratio	= 1, 3, 4,	#\$ Razón del paso en el tiempo para los dominios anidados.
feedback	= 0,	
smooth_option	= 0	
use_adaptive_time_step	= .true.	
step_to_output_time	= .true.	#\$ La opción "true" habilita que los resultados de la simulación del WRF se guarden exactamente en los intervalos de tiempo definidos en la opción "history_interval".
/		
<b>&amp;physics</b>		
mp_physics	= 3, 3, 3,	
ra_lw_physics	= 1, 1, 1,	
ra_sw_physics	= 1, 1, 1,	
radt	= 30, 15, 15,	
sf_sfclay_physics	= 1, 1, 1,	
sf_surface_physics	= 2, 2, 2,	
bl_pbl_physics	= 1, 1, 1,	

bldt	= 0, 0, 0,	
<b>cu_physics</b>	= <b>1, 0, 0,</b>	#\$ Parametrización de cúmulos definida en cada dominio. En la consultoría se utilizaron seis esquemas de parametrización.
cutd	= 5, 5, 5,	
isfflx	= 1,	
ifsnow	= 1,	
icloud	= 1,	
surface_input_source	= 1,	
num_soil_layers	= 4,	
sf_urban_physics	= 0, 0, 0,	
/		
<b>&amp;fdda</b>		
/		
<b>&amp;dynamics</b>		
w_damping	= 1,	
diff_opt	= 1, 1, 1,	
km_opt	= 4, 4, 4,	
diff_6th_opt	= 0, 0, 0,	
diff_6th_factor	= 0.12, 0.12, 0.12,	
base_temp	= 290.	
damp_opt	= 0,	
zdamp	= 5000., 5000., 5000.,	
dampcoef	= 0.2, 0.2, 0.2	
khdif	= 0, 0, 0,	
kvdif	= 0, 0, 0,	
non_hydrostatic	= .true., .true., .true.,	
moist_adv_opt	= 1, 1, 1,	
scalar_adv_opt	= 1, 1, 1,	
/		
<b>&amp;bdy_control</b>		
spec_bdy_width	= 5,	
spec_zone	= 1,	
relax_zone	= 4,	
specified	= .true., .false., .false.,	
nested	= .false., .true., .true.,	
/		
<b>&amp;grib2</b>		
/		

<b>&amp;namelist_quilt</b>	
nio_tasks_per_group = 0,	
nio_groups = 1,	
/	

## Apéndice 2. Archivos de control del WRF-Hydro

En el cuadro 2.1 se describen las opciones del archivo de control “*hydro.namelist*” del WRF-Hydro y en el cuadro 2.2 se describen las opciones del archivo “*namelist.hrlidas*”.

Cuadro 2.1. Descripción de las opciones en el archivo “*hydro.namelist*”.

Opción	Descripción
<b>&amp;HYDRO_nlist</b> !!!! SYSTEM COUPLING !!!!	
!Specify what is being coupled: 1=HRLDAS (offline Noah-LSM), 2=WRF, 3=NASA/LIS, 4=CLM	
<b>sys_cpl = 1</b>	#\$ Define el modo en que correrá el WRF-Hydro. Un valor de 1 indica que se correrá en modo desacoplado, solo forzado con el modelo de superficie del terreno Noah y un valor de 2 que el modelo se correrá acoplado al WRF.
!!!! MODEL INPUT DATA FILES !!! !Specify land surface model gridded input data file...(e.g.: "geo_em.d03.nc")	
<b>GEO_STATIC_FLNM</b> "DOMAIN/geo_em.d03.nc" =	#\$ Se indica el directorio y el nombre del archive que tiene las características del terreno a considerar por el modelo Noah. El archivo geo_em.d03.nc se obtiene con el procesador del WPS para el dominio que cubre los datos atmosféricos que son entrada al WRF-Hydro.
!Specify the high-resolution routing terrain input data file...(e.g.: "Fulldom_hires_hydrofile.nc")	
<b>GEO_FINEGRID_FLNM</b> "DOMAIN/Fulldom_hires_netcdf_file.nc" =	#\$ Se indica el directorio y el nombre del archive que contiene información de las características del terreno para la malla fina.
!Specify the name of the restart file if starting from restart...comment out with '!' if not...	
<b>! RESTART_FILE = 'HYDRO_RST.2010-09-16_12:00_DOMAIN3'</b>	#\$ Borrar el signo “P” e indicar el archivo de reinicio en caso de que el WRF-Hydro se reinicie a partir un momento posterior para el que se cuenta con el archivo HYDRO_RST.
!!!! MODEL SETUP AND I/O CONTROL !!!! !Specify the domain or nest number identifier...(integer)	
<b>IGRID = 3</b>	#\$ Se indica el identificador del dominio anidado que corresponde a los datos del archivo geo_em.d03.nc
!Specify the restart file write frequency...(minutes)	
<b>rst_dt = 360</b>	#\$ Se indica la frecuencia, en minutos, con la que se guardarán los datos para reiniciar la corrida del WRF-Hydro, en caso de ser necesario.
!Specify the output file write frequency...(minutes)	

<b>out_dt = 60 ! minutes</b>	#\$ Se indica la frecuencia, en minutos, con la que se guardarán los resultados de la simulación del WRF-Hydro.
!Specify if output history files are to be written...(TRUE. or FALSE.)	
<b>HISTORY_OUTPUT = .TRUE.</b>	#\$ Opción para habilitar la escritura de las salidas del WRF-Hydro cuando se indica "TRUE" o no escribirlas cuando se indica "FALSE".
!Specify the number of output times to be contained within each output history file...(integer) ! SET = 1 WHEN RUNNING CHANNEL ROUTING ONLY/CALIBRATION SIMS!!! ! SET = 1 WHEN RUNNING COUPLED TO WRF!!!	
<b>SPLIT_OUTPUT_COUNT = 1</b>	#\$ Indica el número de salidas del wRF-Hydro con la frecuencia definida en la opción "out_dt" a ser guardadas en un solo archivo.
! rst_typ = 1 : overwrite the soil variables from routing restart file.	
<b>rst_typ = 0</b>	#\$ Opción para sobrescribir las variables del suelo desde un archivo de reinicio de tránsito; un valor de 0 significa que no se sobrescriban y 1 que sí lo haga.
!Restart switch to set restart accumulation variables = 0 (0=no reset, 1=yes reset to 0.0)	
<b>RSTRT_SWC = 0</b>	#\$ Opción para habilitar que se reinicien en cero las variables acumulativas cuando se asigna 1 ó que no se reinicien cuando se asigna 0 a la opción.
!Output high-resolution routing files...0=none, 1=total chan_inflow ASCII time-series, 2= hires grid and chan_inflow...	
<b>HIRES_OUT = 2</b>	#\$ Opción para habilitar el guardado y formato de las simulaciones del WRF-Hydro para la malla fina. Un valor de 0 es para no guardar, de 1 para guardar en formato ASCII, de 2 para formato netCDF.
!Specify the minimum stream order to output to netcdf point file...(integer) !Note: lower value of stream order produces more output.	
<b>order_to_write = 1</b>	#\$ Opción para indicar a partir de que orden de corriente del canal se guardaran los resultados de la simulación del gasto. En la consultoría los canales tienen hasta seis ordenes de corriente, uno se refiere al menor orden, por ejemplo arroyos.
!!!! PHYSICS OPTIONS AND RELATED SETTINGS !!!! !Switch for terrain adjustment of incoming solar radiation: 0=no, 1=yes !Note: This option is not yet active in Verion 1.0... ! WRF has this capability so be careful not to double apply the correction!!!	
<b>TERADJ_SOLAR = 0</b>	#\$ Opción para ajustar la radiación solar entrante. Asignar 0 en caso de que los datos de entrada provengan del WRF.
!Specify the number of soil layers (integer) and the depth of the bottom of each layer (meters)... ! Notes: In Version 1 of WRF-Hydro these must be the same as in the namelist.input file ! Future versions will permit this to be different.	
<b>NSOIL=4</b>	#\$ Opción para especificar el número de capas del terreno y la profundidad de cada uno, similar al definido para el WRF cuando los datos de entrada provengan de dicho modelo.
<b>ZSOIL8(1) = -0.10</b> <b>ZSOIL8(2) = -0.40</b>	

<b>ZSOIL8(3) = -1.0</b> <b>ZSOIL8(4) = -2.0</b>	
!Specify the grid spacing of the terrain routing grid...(meters)	
<b>DXRT = 30</b>	#\$ Opción para especificar la resolución espacial de la malla fina del terreno.
!Specify the integer multiple between the land model grid and the terrain routing grid...(integer)	
<b>AGGFACTRT = 25</b>	#\$ Opción para indicar la relación entre la resolución de la malla fina del terreno con la del LSM Noah o el archivo geo_em.d03.nc
!Specify the routing model timestep...(seconds)	
<b>DTRT = 2</b>	#\$ Opción para indicar el paso en el tiempo a considerar por el WRF-Hydro para resolver las ecuaciones. Los desarrolladores del WRF-Hydro en NCAR indican en el manual técnico que para un espaciamiento de la malla fina de 30 metros se consideren 2 segundos en el paso del tiempo.
!Switch activate subsurface routing...(0=no, 1=yes)	
<b>SUBRTSWCRT = 1</b>	#\$ Opción para habilitar que WRF-Hydro calcule/resuelva el tránsito sub-superficial. Un valor de 0 es para que no lo calcule y de 1 para que si lo haga.
!Switch activate surface overland flow routing...(0=no, 1=yes)	
<b>OVRTSWCRT = 1</b>	#\$ Opción para habilitar que WRF-Hydro calcule/resuelva el tránsito superficial. Un valor de 0 es para que no lo calcule y de 1 para que si lo haga.
!Switch to activate channel routing Routing Option: 1=Steepest Descent (D8) 2=CASC2D	
<b>rt_option = 1</b>	#\$ Opción para indicar el método para resolver las ecuaciones para el cálculo del tránsito superficial. Un valor de 1 es para aplicar el método de la celda con mayor desnivel.
<b>CHANRTSWCRT = 1</b>	#\$ Opción para habilitar que WRF-Hydro calcule/resuelva el gasto en la red de canales. Un valor de 0 es para que no lo calcule y de 1 para que si lo haga.
!Specify channel routing option: 1=Muskingam-reach, 2=Musk.-Cunge-reach, 3=Diff.Wave-gridded	
<b>channel_option =3</b>	#\$ Opción para indicar el método para resolver las ecuaciones para el cálculo del gasto en la red de canales.
!Specify the reach file for reach-based routing options...	
<b>route_link_f = ""</b>	
!Switch to activate baseflow bucket model...(0=none, 1=exp. bucket, 2=pass-through)	
<b>GWBASESWCRT = 0</b>	#\$ Opción para habilitar que WRF-Hydro calcule/resuelva el tránsito profundo. Un valor de 0 es para que no lo calcule.
!Specify baseflow/bucket model initialization...(0=cold start from table, 1=restart file)	
<b>GW_RESTART = 0</b>	#\$ Opción para indicar el tipo de inicialización para el cálculo del tránsito profundo.
!Groundwater/baseflow mask specified on land surface model grid... !Note: Only required if baseflow bucket model is active	

<b>gwbasmkfil</b> "DOMAIN/basn_msk1k_frng_ohd.txt"	=	#\$ Directorio y nombre del archivo con la información de los polígonos de los acuíferos en caso de que se habilite que WRF-Hydro calcule el tránsito profundo.
/		

Cuadro 2.2. Descripción de las opciones en el archivo "namelist.hrlas".

Opciones	Descripción
<b>&amp;NOAHLSTM_OFFLINE</b>	
<b>HRLDAS_CONSTANTS_FILE</b> "DOMAIN/wrfinput_d03"	= #\$ Directorio y nombre del archivo que contiene las condiciones iniciales para el dominio con los datos atmosféricos de entrada simulados con el WRF.
<b>INDIR = './forcing'</b>	#\$ Directorio donde se encuentran los datos atmosféricos de entrada, se refiere a las salidas del WRF.
<b>! OUTDIR = './hrlas_output/'</b>	
<b>START_YEAR = 2010</b>	#\$ Año de inicio de la simulación para el WRF-Hydro.
<b>START_MONTH = 09</b>	#\$ Mes de inicio de la simulación para el WRF-Hydro.
<b>START_DAY = 20</b>	#\$ Día de inicio de la simulación para el WRF-Hydro.
<b>START_HOUR = 00</b>	#\$ Hora de inicio de la simulación para el WRF-Hydro.
<b>START_MIN = 00</b>	#\$ Minuto de inicio de la simulación para el WRF-Hydro.
<b>! RESTART_FILENAME_REQUESTED</b> <b>'RESTART.2013091206_DOMAIN3'</b>	= #\$ En caso de que la simulación se reinicie, borrar el signo "!" e indicar el nombre del archivo con los datos terrestres para el reinicio.
<b>KHOUR = 120</b>	#\$ Duración de la simulación del WRF-Hydro en modo desacoplado al WRF, en horas. Considerar dos horas adicionales a las indicadas (una de inicio y una de fin).
<b>FORCING_Timestep = 3600</b>	#\$ Frecuencia de tiempo, en segundos, de los datos atmosféricos de entrada. Una hora corresponden a 3600 segundos.
<b>NOAH_Timestep = 60</b>	#\$ Paso en el tiempo para la solución de las ecuaciones por el modelo de superficie del terreno Noah.
<b>OUTPUT_Timestep = 3600</b>	#\$ Frecuencia de tiempo para guardar los resultados del Noah, en segundos.
<b>RESTART_FREQUENCY_HOURS = 6 ! 480</b>	#\$ Frecuencia de tiempo con el que se guardara el archivo de reinicio del Noah.
<b>! Split output after split_output_count output times.</b> <b>! SPLIT_OUTPUT_COUNT = 240</b>	
<b>SPLIT_OUTPUT_COUNT = 1</b>	#\$ Indica el número de salidas del Noah con la frecuencia definida en la opción "OUTPUT_Timestep" a ser guardadas en un solo archivo.
<b>NSOIL=4</b>	#\$ Opción para especificar el número de capas del terreno y la profundidad de cada uno, similar al definido para el WRF cuando los datos de entrada provengan de dicho modelo.
<b>ZSOIL(1) = -0.10</b> <b>ZSOIL(2) = -0.40</b> <b>ZSOIL(3) = -1.00</b> <b>ZSOIL(4) = -2.00</b>	
<b>ZLVL = 2.0</b>	#\$ Opción para indicar la profundidad máxima del terreno, en metros.
<b>ZLVL_WIND = 10.0</b>	#\$ Opción para indicar la altura a la que corresponden los datos viento.

IZOTLND = 0	
SFCDIF_OPTION = 0	
<b>UPDATE_SNOW_FROM_FORCING</b> <b>.TRUE.</b>	= # \$ Opción para habilitar que se actualice el valor para la nieve desde los datos de entrada.
!Specification of forcing data: 1=HRLDAS-hr format, 2=HRLDAS-min format, 3=WRF, 4=Idealized, 5=Ideal w/ Spec.Precip., 6=HRLDAS-hrly format w/ Spec. Precip	
<b>FORC_TYP = 3</b>	# \$ Opción para especificar el origen de los datos atmosféricos forzantes de entrada al Noah.
!Switch for snow data assimilation: 0=no, 1=yes	
<b>SNOW_ASSIM = 0</b>	# \$ Opción para habilitar que se considere asimilación de datos para la nieve. Un valor de 0 es para deshabilitarlo.
! for extract greenfrac	
<b>GEO_STATIC_FLNM</b> <b>"DOMAIN/geo_em.d03.nc"</b>	= # \$ Directorio y nombre del archivo que contiene las características del terreno para el Noah en el dominio con la misma resolución que los datos forzantes de entrada.
!HRLDAS_ini_typ 1: initial and parameters from frocing; 0: from wrfinput.	
<b>HRLDAS_ini_typ = 0</b>	# \$ Opción para especificar el origen de los parámetros forzantes iniciales. Un valor de 0 es para que los considere del archivo wrfinput del WRF.
/	
<b>&amp;URBAN_OFFLINE</b>	
<b>SF_URBAN_PHYSICS = 0</b>	
<b>ZLVL_URBAN = 15.0</b>	
/	

## ANEXO 2 – GUÍA PARA GENERAR LAS CAPAS DE INFORMACIÓN DE LA MALLA FINA DEL TERRENO DE ENTRADA AL WRF-HYDRO

### Índice

1.	<i>Introducción</i> .....	139
2.	<i>Procesamiento de la plantilla para la malla fina</i> .....	141
2.1.	<i>Acceder a los archivos utilizados para generar la plantilla</i> .....	141
2.2.	<i>Generar la plantilla del terreno</i> .....	141
2.2.1.	<i>Importar la malla de datos del archivo geo_em.d03.nc</i> .....	142
2.2.2.	<i>Guardar como un ráster la capa de datos de elevación</i> .....	144
2.2.3.	<i>Exportar el ráster a un archivo de datos ASCII</i> .....	147
2.2.4.	<i>Obtener la latitud/longitud (en grados decimales) de la celda de la esquina inferior izquierda para la plantilla</i> .....	147
2.2.5.	<i>Importar el archivo con las coordenadas del punto y definir la proyección como geográfica</i> 148	
2.2.6.	<i>Re-proyectar el punto a la referencia espacial especificada en el archivo geo_em.d03.nc</i> ...	152
2.2.7.	<i>Cargar el archivo con las coordenadas re-proyectadas del punto</i> .....	155
2.2.8.	<i>Editar el encabezado del archivo de datos ASCII</i> .....	156
2.2.9.	<i>Importar el archivo ASCII como una capa de información ráster</i> .....	157
2.2.10.	<i>Definir la proyección de la plantilla</i> .....	159
3.	<i>Pasos para generar las capas de información de la malla fina del terreno</i> .....	161
3.1.	<i>Acceder a los datos del MDE del INEGI</i> .....	161
3.2.	<i>Re-proyectar el MDE de INEGI a la referencia espacial de la plantilla</i> .....	162
3.3.	<i>Definir los parámetros de entorno de trabajo</i> .....	166
3.4.	<i>Recortar el MDE para la malla fina del terreno</i> .....	168
3.4.1.	<i>Generar un dominio con valor constante “1” de tipo entero</i> .....	169
3.4.2.	<i>Proyectar el dominio constante a la referencia espacial de la capa de la Plantilla</i> .....	171
3.4.3.	<i>Re-muestrear el MDE a la resolución de la malla fina del terreno</i> .....	172
3.5.	<i>Rellenar los datos de elevación del MDE de la malla fina del terreno</i> .....	173

3.6.	Generar la capa de información de la topografía en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro .....	175
3.7.	Obtener la capa de información de la dirección de flujo de salida para la malla fina del terreno	176
3.7.1.	Generar la capa de información de la dirección de flujo en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro.....	178
3.8.	Obtener el flujo de acumulación.....	179
3.9.	Obtener la capa de información de la red de canales de corriente para la malla fina del terreno	181
3.9.1.	Generar la capa de información de la red de canales de corriente en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro .....	183
3.10.	Obtener la capa de información de la orden de la corriente en la red de canales para la malla fina del terreno .....	185
3.10.1.	Generar la capa de información del orden de corriente de la red de canales de corriente en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro.....	186
3.11.	Obtener la capa de información con la ubicación de las estaciones hidrométricas en la malla fina del terreno .....	187
3.11.1.	Importar el archivo con las coordenadas de los puntos de control.....	188
3.11.2.	Re-proyectar los puntos de control a la referencia espacial de la plantilla.....	192
3.11.3.	Cargar el archivo con las coordenadas re-proyectadas de los puntos .....	195
3.11.4.	Verificar la ubicación de los puntos de control sobre la red de canales de corriente.....	196
3.11.5.	Convertir a ráster el archivo con los puntos de control.....	197
3.11.6.	Generar la capa de información con la ubicación de los puntos de control en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro.....	198
3.12.	Obtener la capa de información Lagos/Embalses.....	200
3.12.1.	Capa con valores constantes -9999.....	200
3.12.2.	Acceder a la información de lagos/embalses.....	202
3.12.3.	Importar en ArcGIS la capa de lagos/embalses.....	202
3.12.4.	Re-proyectar la capa de los lagos/embalses a la referencia espacial de la plantilla .....	206
3.12.5.	Generar la capa ráster de los lagos en las cuencas de trabajo .....	209
3.12.6.	Generar la capa de información de los lagos en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro .....	211
3.13.	Actualizar la capa de información de la red de canales de corriente cuando hay lagos/embalses presentes	213
3.13.1.	Generar una máscara invertida de la capa de lagos.....	214

3.13.2.	<i>Multiplicar la máscara invertida de la capa de lagos por la capa de la red de canales de corriente</i>	215
3.13.3.	<i>Editar los valores en las celdas sobre la red de canales de corriente que están a la salida de los lagos</i>	219
3.13.4.	<i>Generar la capa de información de la red de canales de corriente, modificada con los objetos de lago, en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro</i>	224
3.14.	<i>Obtener la capa de información de la latitud y longitud de la malla fina del terreno</i>	226
3.14.1.	<i>Definir los parámetros del ambiente de trabajo para generar las capas de información del archivo de la malla fina del terreno</i>	226
3.14.2.	<i>Generar un dominio con valor constante "1" de tipo flotante</i>	228
3.14.3.	<i>Proyectar el dominio constante a la referencia espacial de la capa de la Plantilla</i>	230
3.14.4.	<i>Definir nuevas variables en el archivo con valores constantes de tipo flotante</i>	232
3.14.5.	<i>Calcular los valores de la latitud y longitud</i>	233
3.14.6.	<i>Generar la capa de información de la latitud y longitud de la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro</i>	235
4.	<i>Conversión de las capas de información a formato NetCDF</i>	236

## Listado de figuras

Figura 1. Diagrama para el procesamiento de las capas de información con las características del terreno para una malla fina.....	139
Figura 2. Obtención del archivo “encabezado.txt” que incluye los metadatos del archivo “geo_em.d03.nc” . .....	141
Figura 3. Inicio de sesión en ArcGIS.....	142
Figura 4. Ingreso a la caja de herramientas de ArcGIS.....	142
Figura 5. Opciones completadas para importar el archivo “geo_em.d03.nc” con formato netCDF. ....	143
Figura 6. Despliegue de la capa de información “HGT_M_Layer” generada con la herramienta “Crear capa ráster NetCDF” .....	144
Figura 7. Despliegue de las opciones para exportar la capa de información “HGT_M_Layer” generada con la herramienta “crear capa ráster NetCDF” .....	145
Figura 8. Opciones completadas para para exportar la capa de información “HGT_M_Layer” generada con la herramienta “crear capa ráster NetCDF” . ....	146
Figura 9. Despliegue de la capa de información “Altura” generada después de exportar la capa “HGT_M_Layer” . ....	146
Figura 10. Selección y llenado de la opción para exportar a un archivo ASCII la capa de información “Altura” . .....	147
Figura 11. Sección “global attributes” del archivo “encabezado.txt” con las variables de latitud/longitud identificadas. ....	148
Figura 12. Archivo con las coordenadas del punto para la esquina inferior izquierda de la capa “HGT_M_Layer” . ....	148
Figura 13. Opción para agregar el archivo con las coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “HGT_M_Layer” . ....	149
Figura 14. Opciones para agregar el archivo con las coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “HGT_M_Layer” . ....	150
Figura 15. Selección de la coordenada geográfica que se le asigna a las coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “HGT_M_Layer” . ....	151
Figura 16. Capa de información “Eventos Puntos.txt” generada durante la importación del archivo con la coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “HGT_M_Layer” .....	152
Figura 17. Selección y completado de la opción para re-proyectar las coordenadas de la capa “Eventos Puntos.txt” .....	152
Figura 18. Selección del sistema geográfico al que se re-proyectan las coordenadas de la capa “Eventos Puntos.txt” .....	153
Figura 19. Sección “global attributes” del archivo “encabezado.txt” con las variables para la re-proyección geográfica. ....	154
Figura 20. Definición de los valores para la re-proyección geográfica de las coordenadas de la capa “Eventos Puntos.txt” .....	155
Figura 21. Opción completada para agregar el punto con la referencia espacial proyectada. ....	156

Figura 22. Archivo “Altura-ASCII.txt” original (a) y con los datos modificados en la sección sombreada (b). .....	156
Figura 23. Obtención de los valores para la variable “xllcenter” y “yllcenter” a incluir en el archivo “Altura-ASCII.txt” .....	157
Figura 24. Sección “global attributes” del archivo “encabezado.txt” con la información del tamaño de celda del archivo “geo_em.d03.nc” .....	157
Figura 25. Opción completada para importar el archivo “Altura-ASCII.txt” .....	158
Figura 26. Despliegue de la capa de información “Plantilla_LSM” generada con la herramienta “De ASCII a ráster” .....	159
Figura 27. Selección y completadode la opción para definir la proyección de la capa “Plantilla_LSM” .....	159
Figura 28. Selección de la opción “Importar” para definir la proyección de la capa “Plantilla_LSM” .....	160
Figura 29. Selección del archivo “Punto_Pry.shp” con la coordenada re-proyectada. ....	160
Figura 30. Sitio oficial de los datos del MDE del INEGI. INEGI, 2016. <a href="http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx">http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx</a> .....	161
Figura 31. Descarga del archivo con el MDE del INEGI para el área seleccionada por el usuario. INEGI, 2016. <a href="http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx">http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx</a> .....	162
Figura 32. Ícono para añadir datos y capas de información en ArcGIS. ....	163
Figura 33. Archivo ráster del MDE del INEGI desplegado en ArcGIS. ....	163
Figura 34. Opciones completadas para re-proyectar la referencia espacial de la capa ráster del MDE del INEGI. ....	164
Figura 35. Selección de la opción “Importar” para definir la proyección de la capa del MDE del INEGI. ....	165
Figura 36. Selección del archivo “Punto_Pry.shp” con la coordenada re-proyectada. ....	165
Figura 37. Despliegue de la capa “MDE_Pry” con la proyección Mercator. ....	166
Figura 38. Menú para ingresar a las opciones de configuración de “Entornos” .....	167
Figura 39. Opciones de configuración definida para el entorno. ....	167
Figura 40. Opción para añadir datos y capas de información en ArcGIS. ....	168
Figura 41. Archivo ráster “MDE_Pry” del MDE de INEGI desplegado en ArcGIS. ....	169
Figura 42. Opción completada para crear una capa ráster con valores constantes de tipo entero. ....	170
Figura 43. Despliegue de la capa de información “Dom_Cte_1s” generada con la herramienta “Crear ráster constante” .....	171
Figura 44. Opción para definir la proyección de la capa “Dom_Cte_1s” .....	171
Figura 45. Despliegue de la calculadora de capas ráster para re-muestrear el MDE a la resolución de la malla fina del terreno. ....	172
Figura 46. Despliegue de la capa de información “MDE” con resolución de 100 mts, sobrepuesta a la capa de información con mayor extensión espacial descargada del sitio oficial del INEGI. ....	173
Figura 47. Opciones completadas para el relleno de sumideros en la capa “MDE” .....	174
Figura 48. Despliegue de la capa de información “MDE_Final” con los sumideros rellenos. ....	174
Figura 49. Calculadora de algebra de mapas con la declaración de la condicional para cambiar los valores “NoData” a “0” en la capa “MDE_Final” .....	175
Figura 50. Despliegue de la capa de información “MDE_Hy” con la topografía de la malla fina del terreno. .....	176

Figura 51. Orientación para representar la dirección de flujo que calcula ArcGIS. ....	176
Figura 52. Opción para generar la capa con la dirección de flujo de salida en la malla fina del terreno. ....	177
Figura 53. Ejemplo del despliegue de la capa de información “F_Dir” generada con la herramienta “Dirección de flujo” .....	178
Figura 54. Opción para reclasificar valores en una capa ráster. ....	179
Figura 55. Opción completada para generar la capa con la acumulación de flujo en la malla fina del terreno. ....	180
Figura 56. Ejemplo del despliegue de la capa de información “F_Acum” generada con la herramienta “Acumulación de flujo” .....	181
Figura 57. Calculadora de algebra de mapas con la condicional para generar la capa de información de la red de canales de corriente para la malla fina del terreno. ....	182
Figura 58. Ejemplo del despliegue de la capa de información “F_Can”, con los canales de corriente representados por las líneas en color verde. ....	183
Figura 59. Opción completada para reclasificar valores en una capa ráster. ....	184
Figura 60. Opción completada para generar la capa con la orden de la corriente de la red de canales en la malla fina del terreno. ....	185
Figura 61. Ejemplo del despliegue de la capa de información “F_Ord” generada con la herramienta “Clasificación de arroyos” .....	186
Figura 62. Opción completada para reclasificar valores en una capa ráster. ....	187
Figura 63. Contenido del archivo de texto con las coordenadas de los puntos de control. ....	188
Figura 64. Opción para agregar el archivo con las coordenadas de los puntos de control. ....	189
Figura 65. Opciones para agregar el archivo con las coordenadas de los puntos de control. ....	190
Figura 66. Selección de la coordenada geográfica que se le asigna a las coordenadas de los puntos de control. ....	191
Figura 67. Capa de información “Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt” generada durante la importación del archivo con la coordenadas de los puntos de control. ....	192
Figura 68. Selección y complementación de la opción para re-proyectar las coordenadas de la capa “Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt” .....	192
Figura 69. Selección del sistema geográfico al que se re-proyectan las coordenadas de la capa “Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt” .....	193
Figura 70. Sección “global attributes” del archivo “encabezado.txt” con las variables para la re-proyección geográfica. ....	194
Figura 71. Definición de los valores para la re-proyección geográfica de las coordenadas de la capa “Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt” .....	195
Figura 72. Opción completada para agregar archivo “Est_Pry.shp” con las coordenadas re-proyectadas de la capa “Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt” .....	195
Figura 73. Ajuste de la visualización de los datos en el área de trabajo. ....	196
Figura 74. Capa con la ubicación de los puntos de control sobrepuesta a la capa del orden de corriente de la red de canal de corrientes. ....	197
Figura 75. Opción completada para convertir un archivo de punto a ráster. ....	198
Figura 76. Opciones completadas para reclasificar valores en una capa ráster. ....	199

Figura 77. Despliegue de la capa de información “ <i>Est_Rst_Hy</i> ” generada con la herramienta “ <i>Reclasificar</i> ”.	200
Figura 78. Opciones completadas en la calculadora de algebra de mapas para generar una capa con valores constantes de -9999.	201
Figura 79. Despliegue de la capa de información “ <i>Lago_Hy-9999</i> ” con valores constantes de -9999.	202
Figura 80. Selección y descarga de la capa de información de un lago desde el sitio Web del Mapa digital de México del INEGI. INEGI, 2016. <a href="http://gaia.inegi.org.mx/">http://gaia.inegi.org.mx/</a>	202
Figura 81. Opción completada para importar en ArcGIS la capa con información de un lago en formato KML.	203
Figura 82. Ejemplo del despliegue de la capa del lago importado con ArcGIS.	204
Figura 83. Opción completada para convertir un archivo con información de un lago, de tipo polígono a ráster.	205
Figura 84. Despliegue de la capa “ <i>Lago01_Rst</i> ” con el lago en formato ráster, sobrepuesto al polígono del lago.	206
Figura 85. Opciones completadas para re-proyectar la referencia espacial de la capa ráster de un lago en las cuencas de trabajo.	207
Figura 86. Selección de la opción “ <i>Importar</i> ” para definir la proyección de la capa ráster de un lago en las cuencas de trabajo.	207
Figura 87. Selección del archivo “ <i>Punto_Pry.shp</i> ” con la coordenada re-proyectada.	208
Figura 88. Ejemplo del despliegue de la capa “ <i>Lago01_Pry</i> ” con la proyección <i>Mercator</i> .	209
Figura 89. Ejemplo de dos lagos dentro de un dominio ficticio ubicados sobre la red de canales de corriente.	209
Figura 90. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “ <i>Lago_Ind-01</i> ”.	210
Figura 91. Despliegue de la capa de información “ <i>Lago_Ind-01</i> ” generada con la herramienta “ <i>Reclasificar</i> ”.	211
Figura 92. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “ <i>Lago_Ind-01</i> ”.	212
Figura 93. Despliegue de la capa de información “ <i>Lago_Hy</i> ” generada con la herramienta “ <i>Reclasificar</i> ”.	213
Figura 94. Representación esquemática de la red de canal de corrientes y dos lagos sobrepuestos.	214
Figura 95. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “ <i>Lago_NoData</i> ”.	214
Figura 96. Despliegue de la capa de información “ <i>Lago_NoData</i> ” generada con la herramienta “ <i>Reclasificar</i> ”.	215
Figura 97. Multiplicación de la capa de la máscara del lago invertido por la capa de información de la red de canal de corrientes.	216
Figura 98. Despliegue de la capa de información “ <i>F_Can_Lag-Msk</i> ”. Las líneas moradas se representan la red de canales, el área en blanco representa el lago y el área en verde representa valores constantes de -9999.	217
Figura 99. Opción completada para convertir la capa ráster de la red de canales y lagos a un archivo <i>shapefile</i> de punto.	218
Figura 100. Despliegue de la capa de información “ <i>F_Can_Pto</i> ”. Los puntos representan el <i>shapefile</i> en formato de punto, las líneas moradas se representan la red de canales, el área en blanco representa el lago y el área en verde representa valores constantes de -9999.	219

Figura 101. Menú con las opciones para editar la capa de la red de canales de tipo punto. ....	220
Figura 102. Opciones a activar para editar la capa de la red de canales de tipo punto. ....	221
Figura 103. Opciones para guardar los cambios en las celdas que se encuentran sobre la red de canales de corriente a la salida de los lagos. ....	222
Figura 104. Opción completada para convertir el archivo <i>shapefile</i> de punto, con la red de canales y lagos, a una capa ráster. ....	223
Figura 105. Despliegue de la capa de información “ <i>F_Can_Lago</i> ” con la red de canales que consideran los lagos y el índice correspondiente al lago. ....	224
Figura 106. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “ <i>F_Can_Lago</i> ”. ....	225
Figura 107. Despliegue de la capa de información “ <i>F_Can_Lago_Hy</i> ” generada con la herramienta “ <i>Reclasificar</i> ”. ....	226
Figura 108. Menú para ingresar a las opciones de configuración de “ <i>Entornos</i> ”. ....	227
Figura 109. Opciones de configuración definida para el entorno con base en las características del MDE para las cuencas de trabajo. ....	228
Figura 110. Opciones completadas para crear una capa ráster con valores constantes de tipo flotante. ....	229
Figura 111. Despliegue de la capa de información “ <i>Dom_Cte_1s_Fl</i> ” generada con la herramienta “ <i>Crear ráster constante</i> ”. ....	230
Figura 112. Opción completada para definir la proyección de la capa “ <i>Dom_Cte_1s_Fl</i> ”. ....	231
Figura 113. Opción completada para convertir la capa ráster del dominio constante de tipo flotante a un archivo <i>shapefile</i> de punto. ....	232
Figura 114. Opción completada para agregar una nueva variable al archivo <i>shapefile</i> de punto con valores constantes de tipo flotante. ....	233
Figura 115. Menú con las opciones para editar la capa con los valores constantes de tipo flotante. ....	234
Figura 116. Menú con las opciones para calcular la geometría de la latitud de la variable “ <i>Lat</i> ”. ....	234
Figura 117. Selección de las opciones para calcular la geometría de la latitud de la variable “ <i>Lat</i> ”. ....	235
Figura 118. Opción completada para convertir el archivo <i>shapefile</i> de punto, con la información de la latitud y longitud, a una capa ráster. ....	236
Figura 119. Opción completada para convertir los archivos ráster a formato netCDF. ....	238

## 1. Introducción

En la guía se detallan los pasos (figura 1) para generar las capas de información del terreno para una malla fina (menor a 100 metros de resolución), que son entrada al WRF-Hydro, a partir de las recomendaciones del manual técnico de los desarrolladores del WRF-Hydro (Gochis *et al.*, 2015) y mediante la aplicación de las funciones hidrológicas del software ArcGIS *Geographic Information System* (GIS) de ESRI® V10.1 o mayor.

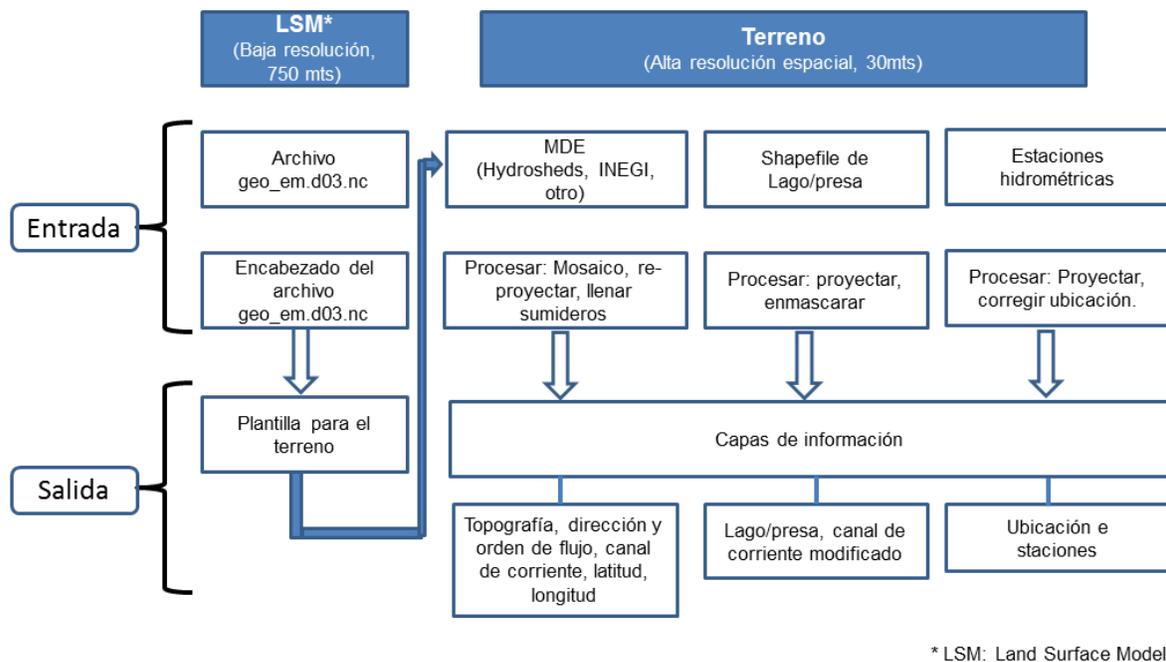


Figura 1. Diagrama para el procesamiento de las capas de información con las características del terreno para una malla fina.

Con ArcGIS se genera un archivo con la plantilla utilizada para procesar los archivos con la información de las características del terreno para una malla fina (<100 mts). Las capas del terreno con las características del terreno son:

- Latitud
- Longitud
- Topografía
- Dirección de flujo
- Canal de corriente
- Orden del flujo

- Lago
- Ubicación de estaciones de monitoreo
- Factor de la profundidad de retención de agua sobre la superficie, con valor de 1.0 por default.
- Factor de escalamiento de rugosidad para el flujo superficial, con valor de 1.0 por default.

La plantilla se obtiene del procesamiento del archivo “*geo\_em.d03.nc*” con las características del terreno para una malla de 750 mts de resolución. El archivo se genera con el Sistema de Pre-procesamiento del WRF (WPS<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés), tal como se detalla en el Anexo 1.

La plantilla se utiliza para hacer coincidir la extensión espacial y la proyección del sistema coordinado de la malla fina del terreno con la malla del modelo de superficie del terreno (LSM) Noah, así como para establecer la fracción/relación proporcional del tamaño de las celdas entre ambas mallas.

Con la plantilla y a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) del INEGI, con resolución de 30 metros, se generan los archivos con las características del terreno para la malla de fina 30 metros. Las secciones que incluye la guía son:

- Procesamiento de la plantilla para la malla fina
- Procesamiento de las capas de información del terreno para la malla fina del terreno

---

<sup>1</sup> Revisar el capítulo 3 del documento ARW. Version 3 Modeling System User’s Guide, disponible en: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html)

## 2. Procesamiento de la plantilla para la malla fina

### 2.1. Acceder a los archivos utilizados para generar la plantilla

Generar el archivo “*geo\_em.d03.nc*” con formato netCDF en el equipo de cómputo con sistema operativo (SO) GNU/Linux, para el dominio que incluye las cuencas de trabajo. Aplicar los pasos indicados en el Anexo 1.

Una vez que se cuenta con el archivo “*geo\_em.d03.nc*”, dentro del directorio en el que se genere el archivo proceder a obtener el encabezado de los metadatos que describen los datos que contiene el archivo “*geo\_em.d03.nc*”, tal como se muestra en la figura 2. Aplicar la el comando:

```
$ ncdump -c geo_em.d03.nc > encabezado.txt

-bash-4.1$ cd WRF/WPS/
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg geo_em.d0*
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 105953152 Jul  1 13:06 geo_em.d01.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro  86002868 Jul  1 13:06 geo_em.d02.nc
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro  23760828 Jul  1 13:06 geo_em.d03.nc
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ncdump -c geo_em.d03.nc > encabezado.txt
-bash-4.1$
-bash-4.1$ ls -lg encabezado.txt
-rw-rw-r-- 1 wrfhidro 13702 Jul  6 2016 encabezado.txt
```

Figura 2. Obtención del archivo “*encabezado.txt*” que incluye los metadatos del archivo “*geo\_em.d03.nc*”.

Guardar en un USB el archivo “*geo\_em.d03.nc*” y “*encabezado.txt*”, generados en el equipo de cómputo con SO GNU/Linux, y copiarlos al equipo de cómputo con SO Windows, en la carpeta de trabajo **Plantilla/** creada para su procesamiento en ArcGIS.

### 2.2. Generar la plantilla del terreno

Ingresar a la aplicación del paquete ArcGIS, instalado en su sistema de cómputo con SO Windows y abrir la aplicación, tal como se muestra en la figura 3.

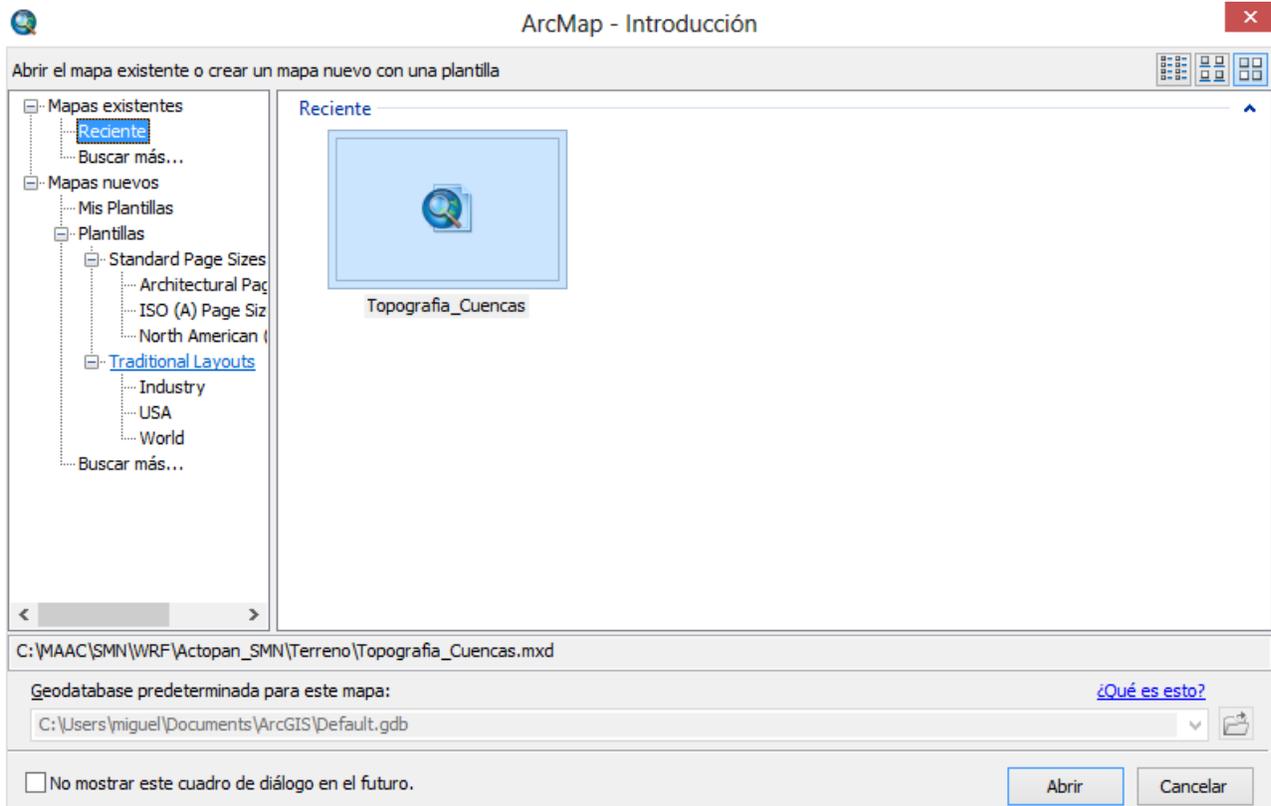


Figura 3. Inicio de sesión en ArcGIS.

Abrir el menú con la caja de herramientas de ArcGIS, marcada con círculo en la figura 4, en el que se encuentran las funciones para generar la plantilla y los archivos con las características del terreno para la malla fina.

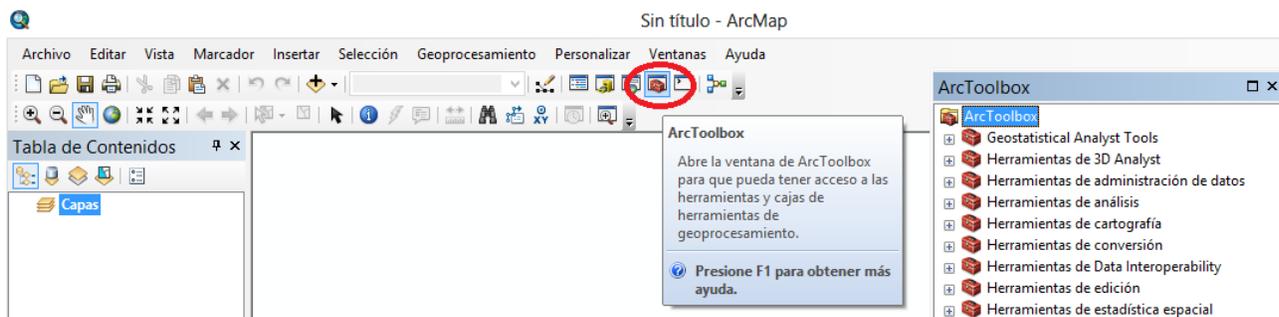


Figura 4. Ingreso a la caja de herramientas de ArcGIS.

### 2.2.1. Importar la malla de datos del archivo *geo\_em.d03.nc*

Crear una capa de información a partir del archivo “*geo\_em.d03.nc*”. Seleccionar del menú “**Herramientas de multidimensión (Multidimension Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de

ArcGIS, la opción “***Crear capa ráster NetCDF (Make NetCDF Ráster Layer, en inglés)***”, tal como se muestra en la figura 5.

En la ventana de diálogo “*Crear capa ráster a NetCDF*” definir las opciones tal como se indica en la figura 5. Seleccionar como archivo de entrada el archivo “*geo\_em.d03.nc*” que guardó en el equipo de cómputo, en la opción “*variable*” seleccionar la capa de información de elevación del terreno (HGT\_M). En la opción “*Dimensión X*” seleccionar la dirección “*west-east*”. En la opción “*Dimensión Y*” seleccionar dirección “*south-north*”. Mantener sin cambios el resto de las opciones y dar clic en el botón “*Aceptar*”.

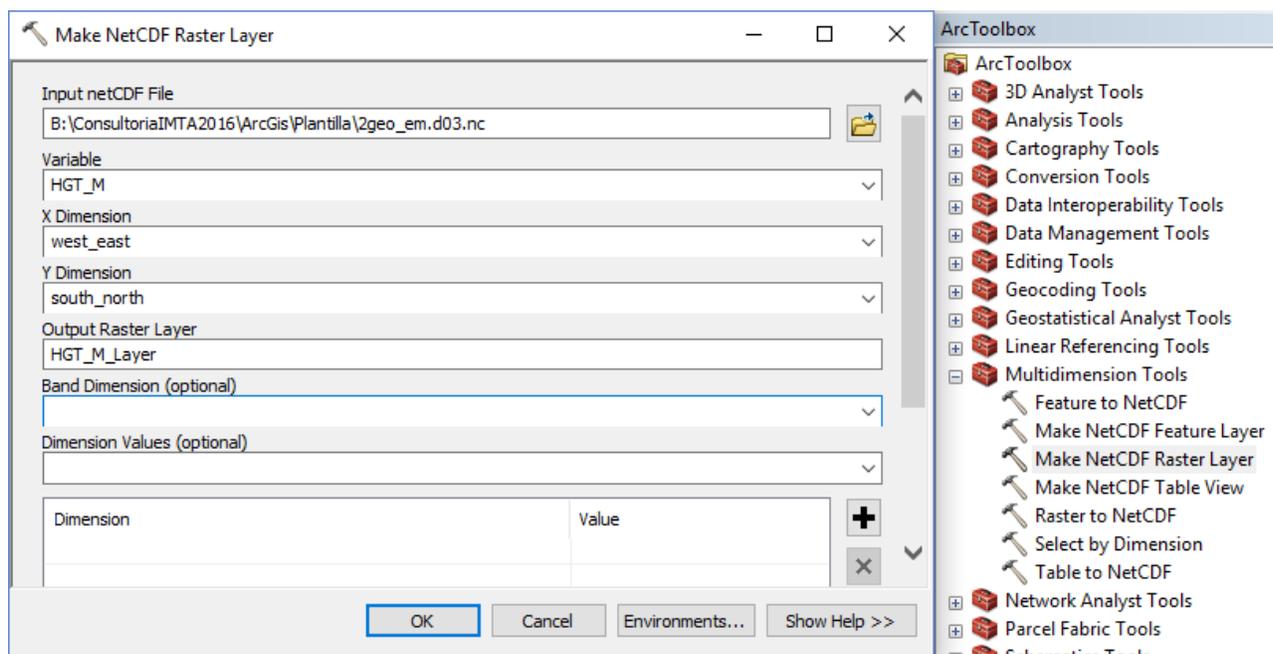


Figura 5. Opciones completadas para importar el archivo “*geo\_em.d03.nc*” con formato netCDF.

Al concluir la ejecución de la herramienta “***crear capa ráster NetCDF (Make NetCDF Ráster Layer, en inglés)***”, se despliega una capa de información con la elevación, como la que se muestra de ejemplo en la figura 6.

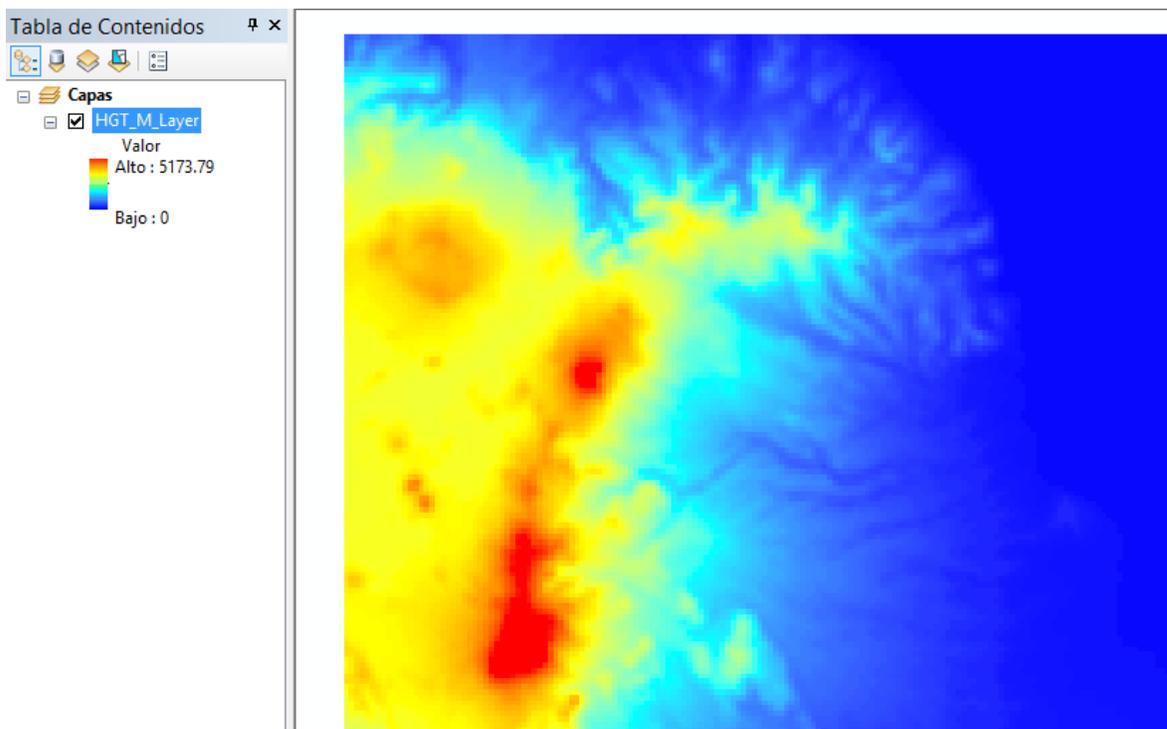


Figura 6. Despliegue de la capa de información “*HGT\_M\_Layer*” generada con la herramienta “*Crear capa ráster NetCDF*”.

### 2.2.2. Guardar como un ráster la capa de datos de elevación

A continuación seleccionar el nombre de la capa de información importada “*HGT\_M\_Layer*” en el paso previo. Dar clic derecho sobre el nombre de la capa y del menú que se despliegue seleccionar la opción “*Datos (Data, en inglés)*” y a continuación seleccionar “*Exportar Datos... (Export Data..., en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 7.

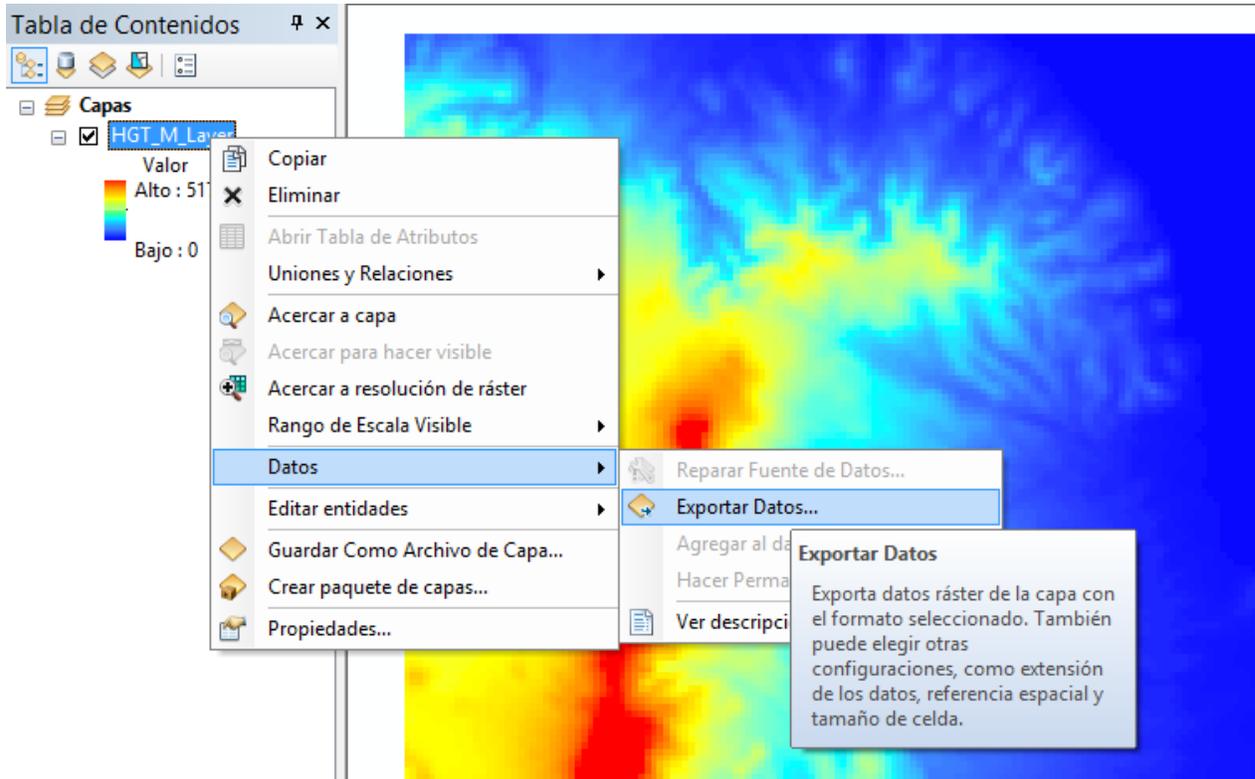


Figura 7. Despliegue de las opciones para exportar la capa de información “*HGT\_M\_Layer*” generada con la herramienta “*crear capa ráster NetCDF*”.

En la ventana de diálogo que se abra definir las opciones tal como se presenta en la figura 8. Activar la opción “*Tamaño de ráster (columnas, filas)*”. Indicar la carpeta en la que se guardarán los resultados. En el menú “*Formato*” seleccionar la opción GRID. Indicar el nombre para la capa que se exporte, ejemplo “*Altura*”. Dar clic en el botón “*Guardar*”.

En la ventana en la que aparece con el mensaje “*Desea añadir los datos exportados al mapa como una capa*” de clic al botón “*Si*”.

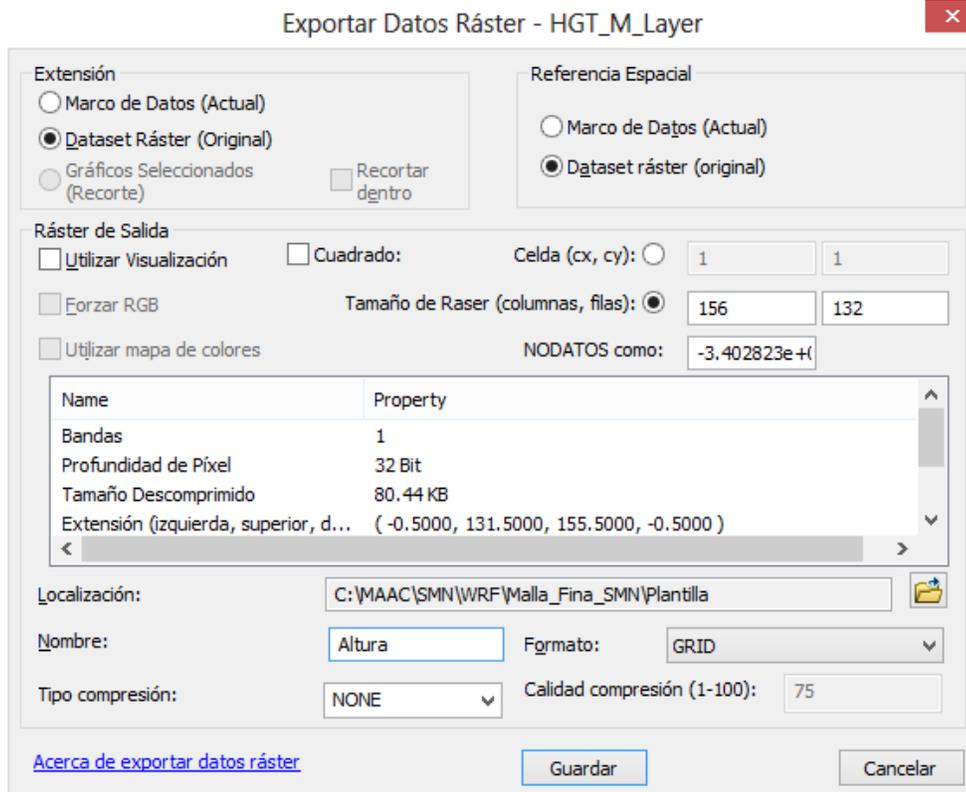


Figura 8. Opciones completadas para para exportar la capa de información “HGT\_M\_Layer” generada con la herramienta “crear capa ráster NetCDF”.

Al concluir la ejecución para exportar la capa de información “HGT\_M\_Layer”, se despliega la capa de información “Altura”, tal como se muestra en la figura 9.

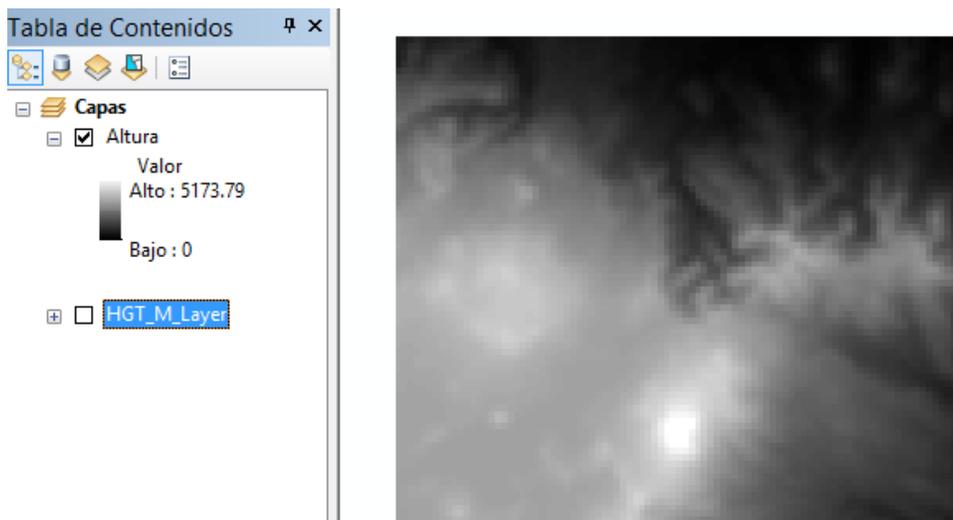


Figura 9. Despliegue de la capa de información “Altura” generada después de exportar la capa “HGT\_M\_Layer”.

### 2.2.3. Exportar el ráster a un archivo de datos ASCII

A continuación, exportar la capa ráster de información “**Altura**” a un archivo de texto con formato ASCII. Seleccionar del menú “Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)” de la caja de herramientas de ArcGIS la opción “De ráster (From Ráster, en inglés)” y a continuación seleccionar “De ráster a ASCII (Ráster to ASCII, en inglés)” tal como se muestra en la figura 10.

En la ventana definir las opciones tal como se indica en la figura 10. Seleccionar en la opción “Ráster de entrada” la capa “**Altura**” que se generó en el paso previo. En la opción “Archivo ráster ASCII de salida” indicar la carpeta y el nombre del archivo (por ejemplo “**Altura-ASCII**”) en el que se guardarán los datos. Dar clic en el botón “Aceptar”.

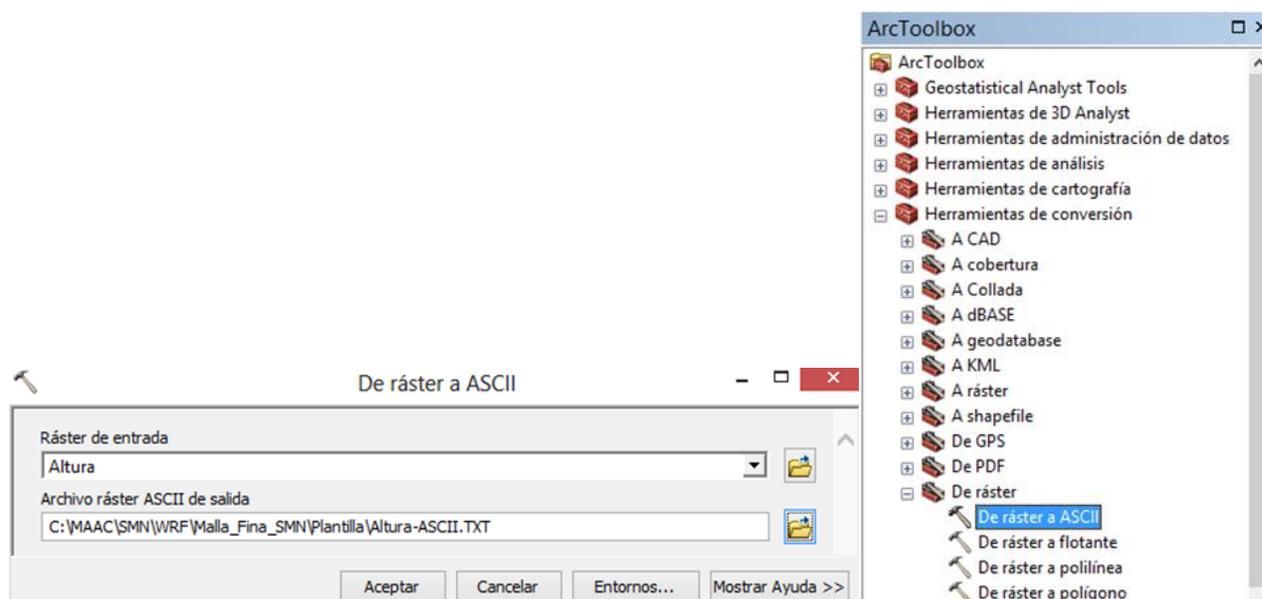


Figura 10. Selección y llenado de la opción para exportar a un archivo ASCII la capa de información “**Altura**”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)”, se genera el archivo de texto “**Altura-ASCII**”.

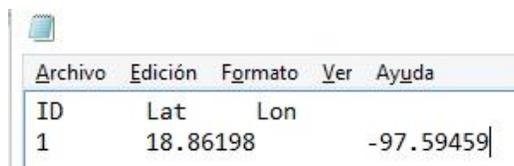
### 2.2.4. Obtener la latitud/longitud (en grados decimales) de la celda de la esquina inferior izquierda para la plantilla

Abrir el archivo “**encabezado.txt**” con un editor de textos, como *wordpad*. Seleccionar el primer valor de las variables “*corner\_lats*” y “*corner\_lons*” que se encuentran en la sección “*global attributes*” del archivo, tal como se muestra en la figura 11.

```
// global attributes:
:TITLE = "OUTPUT FROM GEOGRID V3.6" ;
:SIMULATION_START_DATE = "0000-00-00_00:00:00" ;
:WEST-EAST_GRID_DIMENSION = 157 ;
:SOUTH-NORTH_GRID_DIMENSION = 133 ;
:corner_lats = 18.86198f, 20.06445f, 20.06445f,
18.86198f, 18.86198f, 20.06445f, 20.06445f, 18.86198f,
18.85737f, 20.06902f, 20.06902f, 18.85737f, 18.85737f,
20.06902f, 20.06902f, 18.85737f ;
:corner_lons
= -97.59459f, -97.59459f, -96.08556f, -96.08556f, -97.59946f,
-97.59946f, -96.08069f, -96.08069f, -97.59459f, -97.59459f, -9
6.08556f, -96.08556f, -97.59946f, -97.59946f, -96.08069f, -96.
08069f ;
```

Figura 11. Sección “global attributes” del archivo “encabezado.txt” con las variables de latitud/longitud identificadas.

Abrir el paquete Excel e incluir los valores de las variables “corner\_lats” y “corner\_lons”. Incluir un encabezado para indicar el contenido de las columnas: identificador de los datos, la latitud y la longitud, tal como se muestra en la figura 12. Guardar en un archivo (por ejemplo “Punto.txt” con formato de tabulación) los cambios y guardar el archivo.



ID	Lat	Lon
1	18.86198	-97.59459

Figura 12. Archivo con las coordenadas del punto para la esquina inferior izquierda de la capa “HGT\_M\_Layer”.

### 2.2.5. Importar el archivo con las coordenadas del punto y definir la proyección como geográfica

Proceder a importar el archivo con las coordenadas, creado en el paso previo. En la barra del menú principal dar clic en “Archivo”. Seleccionar la opción “Añadir datos (Add Data, en inglés)”, posteriormente seleccionar “Agregar datos XY...(Add XY Data, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 13.

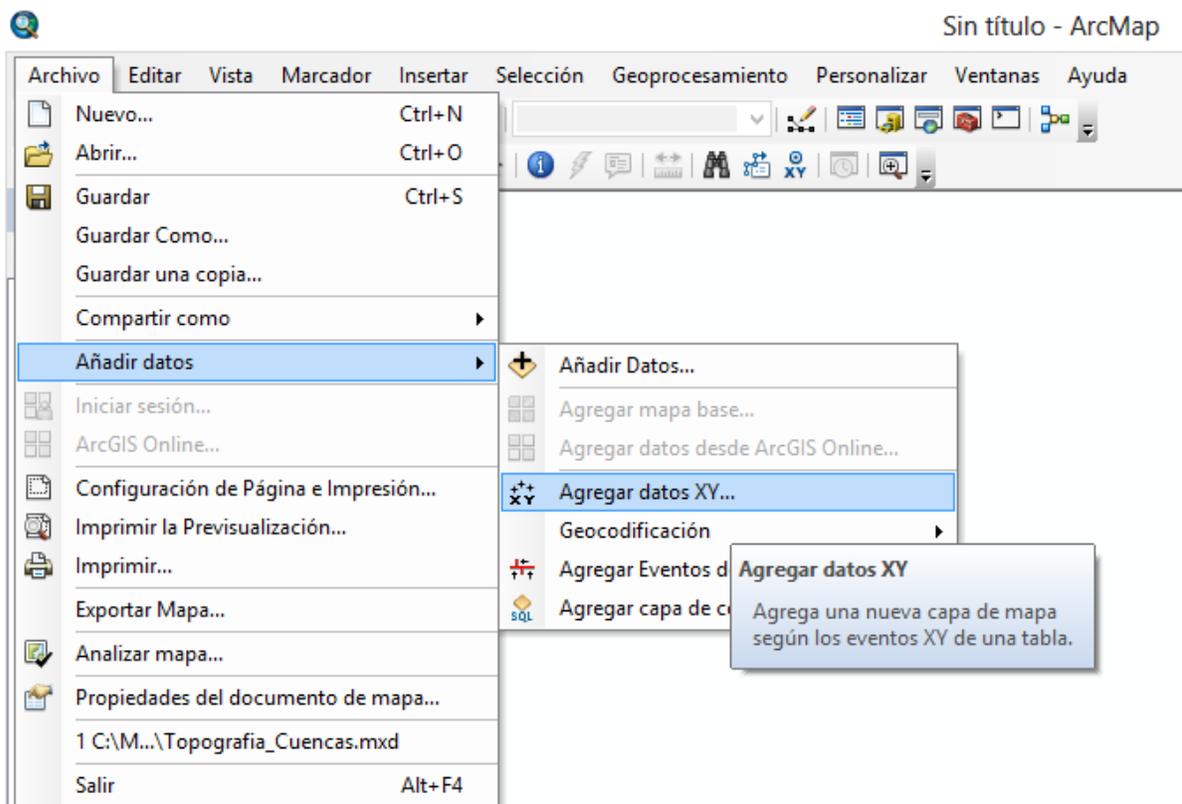


Figura 13. Opción para agregar el archivo con las coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “HGT\_M\_Layer”.

En la ventana de diálogo “Agregar datos XY” que se abra definir las opciones tal como se presenta en la figura 14. Seleccionar el archivo con las coordenadas del punto (ej. “Punto.txt”). En la opción “Campo X” seleccionar la variable “Lon”. En la opción “Campo Y” seleccionar la variable “Lat”. Dar clic en el botón “Editar”.

**Agregar datos XY** ✕

Una tabla que contiene datos de coordenadas X e Y se puede agregar al mapa como una capa

Elija una tabla del mapa o busque otra tabla:

Punto.txt 📁

Especifique los campos para las coordenadas X, Y y Z:

Campo X: Lon

Campo Y: Lat

Campo Z: <Ninguno>

Sistema de coordenadas de las coordenadas de entrada

Descripción:

Sistema de coordenadas desconocido

Mostrar Detalles Editar...

Avisar si la capa resultante tiene funcionalidades restringidas

[Acerca de la adición de datos XY](#) Aceptar Cancelar

Figura 14. Opciones para agregar el archivo con las coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa "HGT\_M\_Layer".

Se despliega una ventana de diálogo "Propiedades de referencia espacial" en la que se define la coordenada geográfica a asignar a la coordenada del punto. Seleccionar la opción "Sistemas de coordenadas geográficas". De las opciones que se desplieguen, seleccionar la opción "Mundial". De las opciones con las proyecciones geográficas, seleccionar la opción "WGS 1984", tal como se muestra en la figura 15. Dar clic en el botón "Aceptar". Posteriormente, dar clic en el "Aceptar" en la ventana de diálogo "Agregar datos XY".

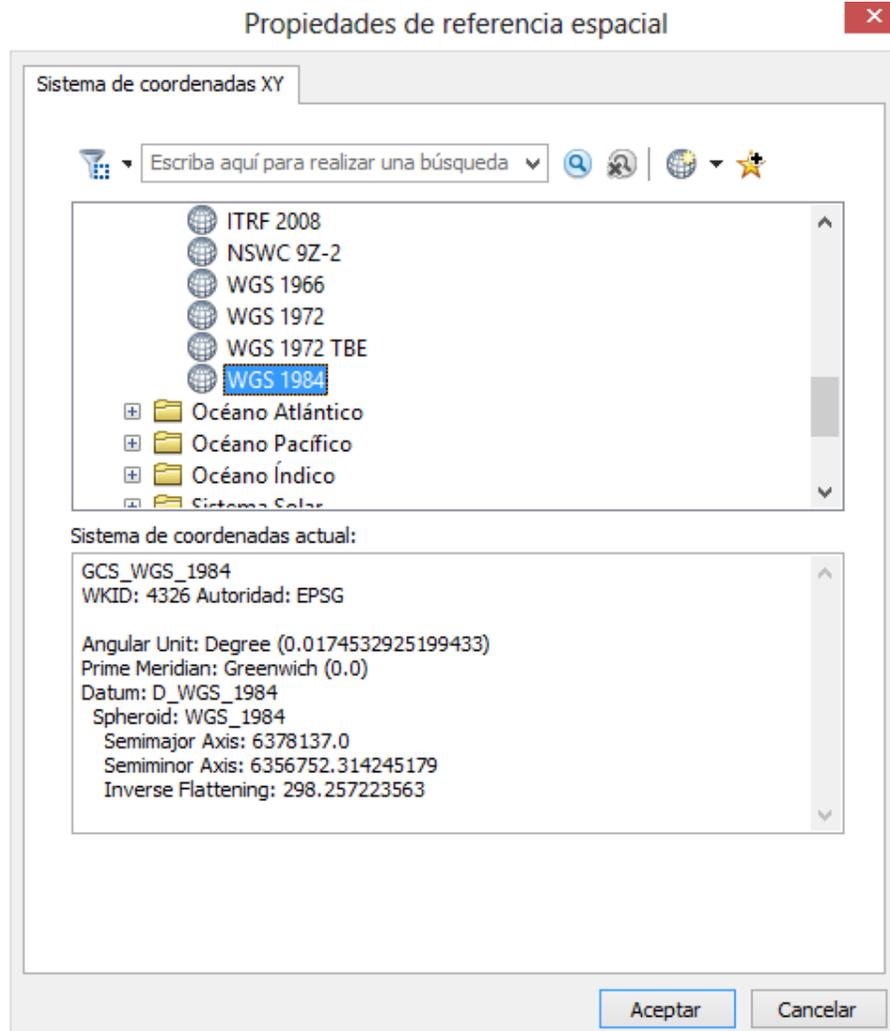


Figura 15. Selección de la coordenada geográfica que se le asigna a las coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “*HGT\_M\_Layer*”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Agregar datos XY...(Add XY Data, en inglés)*”, se despliega la capa de información con “*Eventos Puntos.txt*”, tal como se muestra en la figura 16.

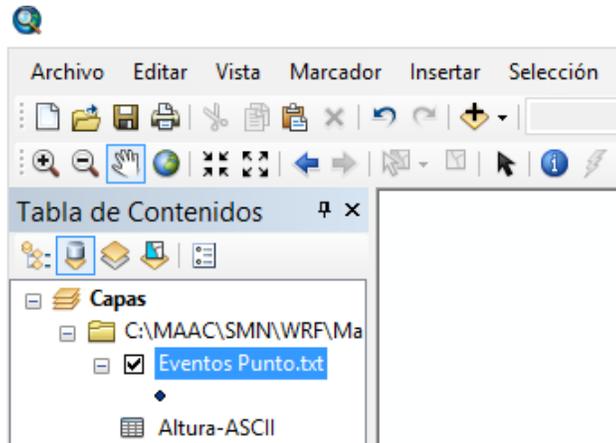


Figura 16. Capa de información “*Eventos Puntos.txt*” generada durante la importación del archivo con la coordenadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “*HGT\_M\_Layer*”.

### 2.2.6. *Re-proyectar el punto a la referencia espacial especificada en el archivo geo\_em.d03.nc*

Re-proyectar las coordenadas geográficas de la capa “*Eventos Puntos.txt*”. Seleccionar del menú “*Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*Proyecciones y Transformaciones (Projections and Transformations, en inglés)*”, posteriormente seleccionar “*Feature*” y “*Proyectar (Project, en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 17.

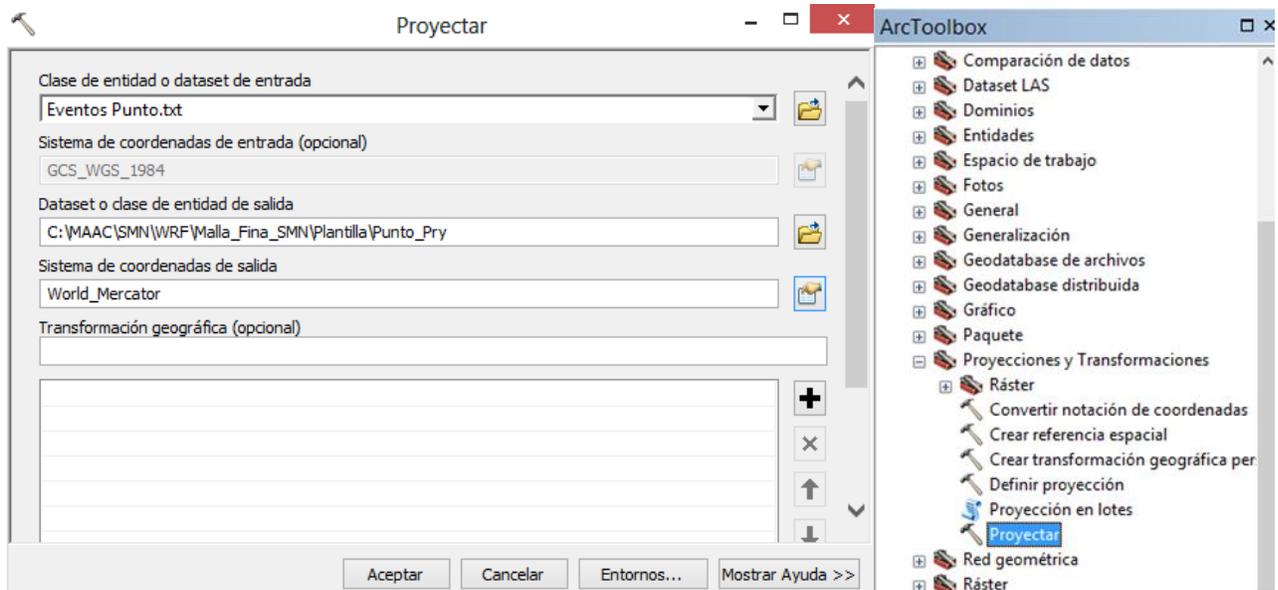


Figura 17. Selección y completado de la opción para re-proyectar las coordenadas de la capa “*Eventos Puntos.txt*”.

En la ventana de diálogo “Proyectar” definir las opciones tal como se indica en la figura 17. Seleccionar en la opción “Clase de entidad o dataset de entrada” la capa de información “**Eventos Puntos.txt**”. En la opción “Dataset o clase de entidad de salida” seleccionar la carpeta y el nombre del archivo con las coordenadas re-proyectadas (ejemplo “**Punto\_Pry**”). Dar clic en la opción “Sistema de coordenadas de salida”.

Se despliega la ventana de diálogo “Propiedades de referencia espacial”. Seleccionar la opción “Sistemas de coordenadas proyectadas”. A continuación seleccionar la opción “Mundial”. Del listado de proyecciones, seleccionar la opción “Mercator (mundial)”, tal como se muestra en la figura 18. La proyección Mercator coincide con la proyección utilizada en el WPS y el WRF, definida en el archivo “*namelist.wps*”, revisar el anexo 1 con la descripción de las opciones del archivo.

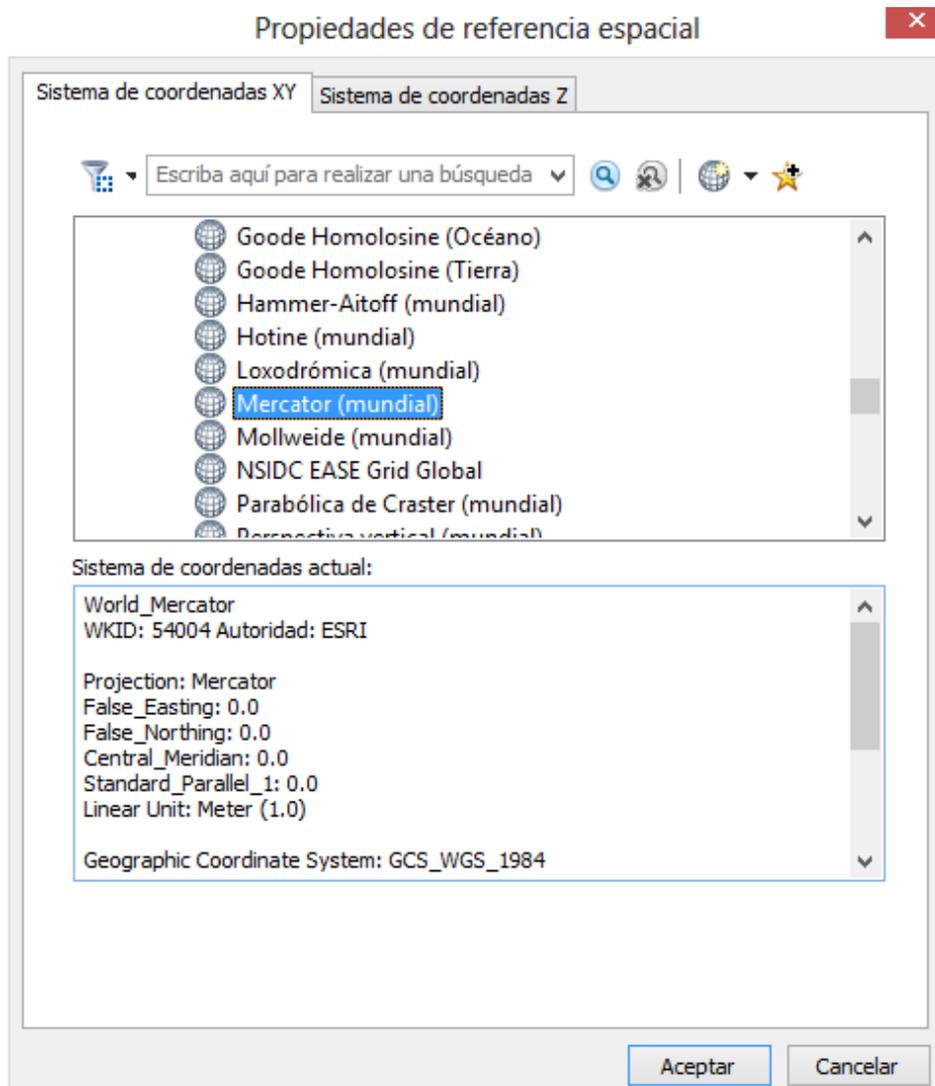


Figura 18. Selección del sistema geográfico al que se re-proyectan las coordenadas de la capa “**Eventos Puntos.txt**”.

Dar doble clic a la opción “*Mercator (mundial)*” y asignar los valores a las opciones “*Central\_Meridian*” y “*Standard\_Parallel\_1*” de acuerdo con la información de los atributos globales y proyección espacial del archivo “*encabezado.txt*” del archivo “*geo\_em.d03.nc*”, tal como se muestra en la figura 19. En la figura 20 se muestran los datos completados para la proyección *Mercator*.

Dar clic en el botón “*Aceptar*”, posteriormente en la ventana de diálogo “*Propiedades de referencia espacial*” dar clic en el botón “*Aceptar*” y a continuación dar clic en el botón “*Aceptar*” en la ventana de diálogo “*Proyectar*” (figura 17).

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Proyectar (Project, en inglés)*”, se genera el archivo “*Punto\_Pry.shp*”, en la carpeta que se indicó en la opción “*Dataset o clase de entidad de salida*”, en la ventana de diálogo “*Proyectar*”.

```
// global attributes:
      :TITLE = "OUTPUT FROM GEOGRID V3.6" ;
      :SIMULATION_START_DATE = "0000-00-00_00:00:00" ;
      :CEN_LAT = 19.46432f ;
      :CEN_LON = -96.84007f ;
      .
      .
      .
      :TRUELAT1 = 22.5f ;
      :TRUELAT2 = 0.f ;
      :MOAD_CEN_LAT = 22.49999f ;
      :STAND_LON = -102.f ;
      :POLE_LAT = 90.f ;
      :POLE_LON = 0.f ;
```

Figura 19. Sección “*global attributes*” del archivo “*encabezado.txt*” con las variables para la re-proyección geográfica.

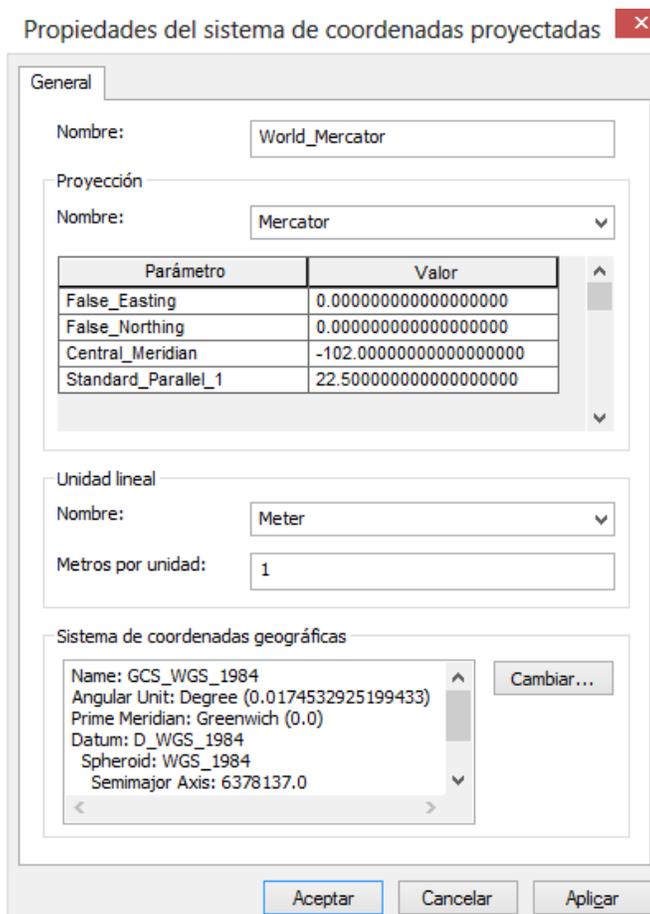


Figura 20. Definición de los valores para la re-proyección geográfica de las coordenadas de la capa “**Eventos Puntos.txt**”.

### 2.2.7. Cargar el archivo con las coordenadas re-proyectadas del punto

Proceder a cargar el archivo “**Punto\_Pry.shp**” que contiene las coordenadas re-proyectadas del punto de la esquina inferior izquierda de la capa “**HGT\_M\_Layer**”. Seleccionar del menú “**Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Entidades (Features, en inglés)**”, posteriormente seleccionar “**Agregar coordenadas XY (Add XY Coordinates, en inglés)**”, tal como se muestra en la figura 21.

En la ventana de diálogo “**Agregar coordenadas XY**” definir las opciones tal como se indica en la figura 21. Seleccionar en la opción “**Entidad de entrada**” el archivo “**Punto\_Pry.shp**”, con la ruta completa de la carpeta en la que se encuentra. Dar clic en el botón “**Aceptar**”.

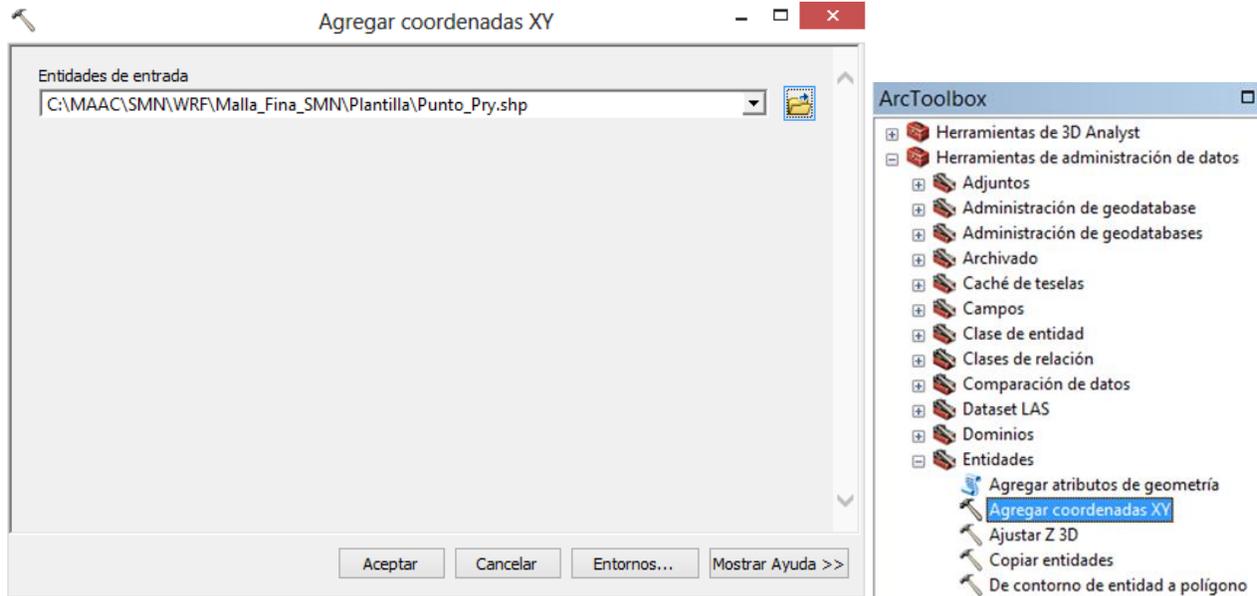


Figura 21. Opción completada para agregar el punto con la referencia espacial proyectada.

### 2.2.8. Editar el encabezado del archivo de datos ASCII

A continuación, abrir con un editor de texto el archivo “**Altura-ASCII.txt**”, generado en la [sección 2.2.3](#), y ajustar los valores para *xllcenter*, *yllcenter* y *cellsize*, como se muestra en la figura 22.

**Nota:** Los parámetros *xllcorner* y *yllcorner* se cambian a *xllcenter* y *yllcenter* para especificar que los valores de las coordenadas representan el valor central de la celda de malla de la esquina inferior izquierda de la malla de la plantilla. Los valores para *xllcenter* y *yllcenter* son en unidades de metros y son relativos a la proyección “*Mercator*”.

<code>ncols</code>	156	(A)	<code>ncols</code>	156	(B)		
<code>nrows</code>	132		<code>nrows</code>	132			
<code>xllcorner</code>	-0.5		<code>xllcenter</code>	453300.167132			
<code>yllcorner</code>	-0.5		<code>yllcenter</code>	1964101.770742			
<code>cellsize</code>	1		<code>cellsize</code>	1000			
<code>NODATA_value</code>	-9999		<code>NODATA_value</code>	-9999			
466.9332	405.1216	515.5789	621.5162	466.9332	405.1216	515.5789	621.5162
475.267	503.1455	532.0154	516.7065	475.267	503.1455	532.0154	516.7065
386.7993	259.0261	194.2232	215.4356	386.7993	259.0261	194.2232	215.4356
314.7324	384.5101	444.2386	457.3203	314.7324	384.5101	444.2386	457.3203

Figura 22. Archivo “**Altura-ASCII.txt**” original (a) y con los datos modificados en la sección sombreada (b).

Los valores de *xllcenter*, *yllcenter* se obtienen de la información de descripción de la capa “**Punto\_Pry**” con las coordenadas proyectadas. Dar doble clic sobre el nombre de la capa. En la ventana de diálogo “*Propiedades de capa*” que se despliegue seleccionar la pestaña “*Fuente*” y tomar nota de los valores de la extensión superior e izquierda, que se marcan en elipses en la figura 23.

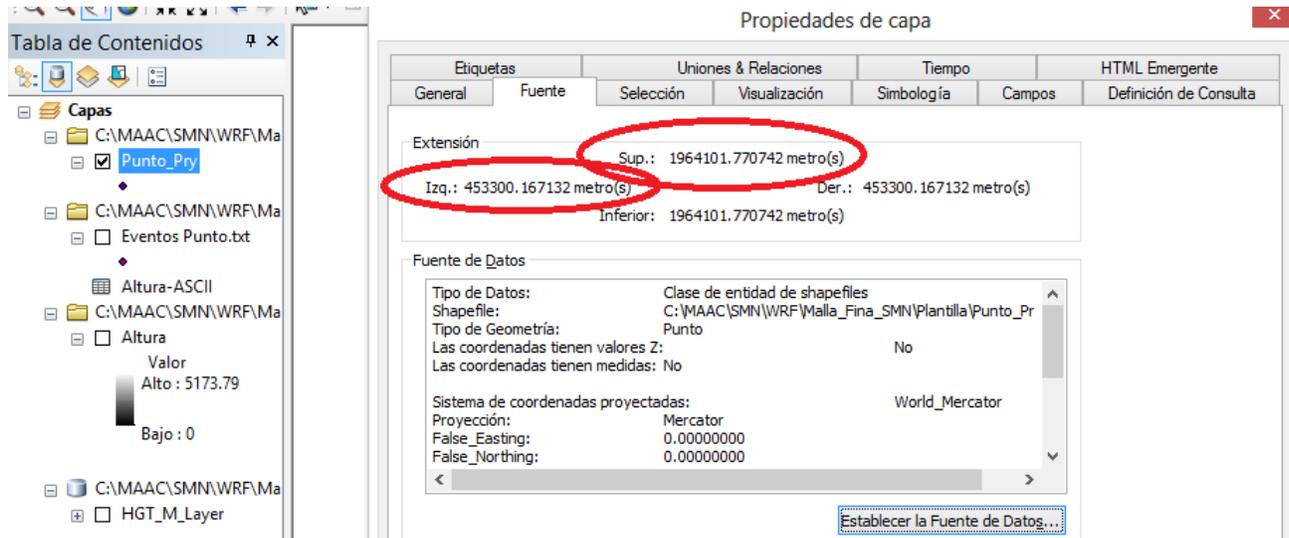


Figura 23. Obtención de los valores para la variable “*xllcenter*” y “*yllcenter*” a incluir en el archivo “*Altura-ASCII.txt*”.

Los datos del tamaño de la celda “*cellsize*” se obtienen las variables DX y DY que se encuentra en la sección “*global attributes*” del archivo “*encabezado.txt*” del archivo “*geo\_em.d03.nc*”, tal como se muestra en la figura 24.

```
// global attributes:
      :TITLE = "OUTPUT FROM GEOGRID V3.6" ;
      :SIMULATION_START_DATE = "0000-00-00_00:00:00" ;
      :WEST-EAST_GRID_DIMENSION = 157 ;
      :SOUTH-NORTH_GRID_DIMENSION = 133 ;
      .
      .
      .
      :DX = 1000 .f ;
      :DY = 1000 .f ;
```

Figura 24. Sección “*global atributes*” del archivo “*encabezado.txt*” con la información del tamaño de celda del archivo “*geo\_em.d03.nc*”.

### 2.2.9. Importar el archivo ASCII como una capa de información ráster

Una vez que se edita y guarda los cambios aplicados en el archivo “*Altura-ASCII.txt*”, importar en ArcGIS el archivo como una capa ráster. Seleccionar del menú “Herramientas de conversión”

(Conversion Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “A ráster (To Ráster, en inglés)”, y posteriormente la opción “De ASCII a ráster (ASCII to Ráster, en inglés)” tal como se muestra en la figura 25.

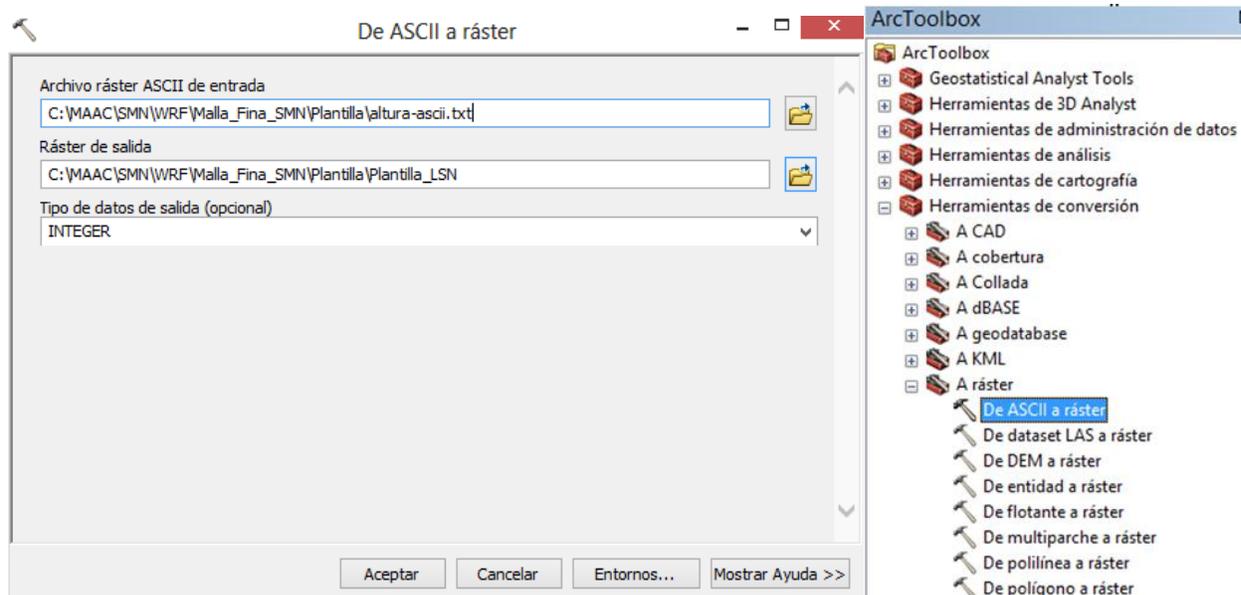


Figura 25. Opción completada para importar el archivo “*Altura-ASCII.txt*”.

En la ventana de diálogo “*De ASCII a ráster*” definir las opciones tal como se indica en la figura 25. En la opción “*Archivo ráster ASCII de entrada*” seleccionar el archivo con la información de la elevación en formato ASCII. En la opción “*Ráster salida*” indicar el nombre y la carpeta del de la capa de información a crear, ejemplo “*Plantilla\_LSM*”. Mantener sin cambios el resto de las opciones y dar clic en el botón “*Aceptar*”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*De ASCII a ráster (ASCII to Ráster, en inglés)*”, se despliega la capa de información con la elevación, tal como se muestra en la figura 26.

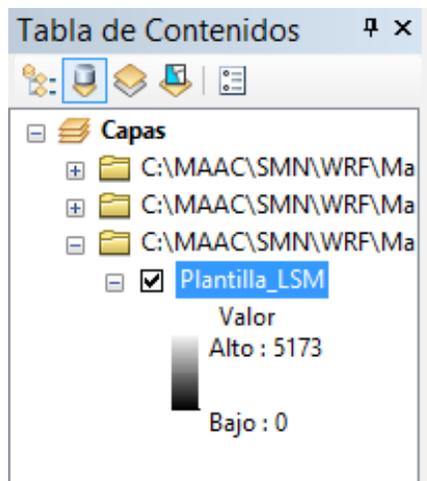


Figura 26. Despliegue de la capa de información “*Plantilla\_LSM*” generada con la herramienta “*De ASCII a ráster*”.

### 2.2.10. Definir la proyección de la plantilla

Definir la proyección para la capa de información “*Plantilla\_LSM*”. Seleccionar del menú “*Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*Proyecciones y transformaciones (Projections and Transformations, en inglés)*” y a continuación seleccionar la opción “*Definir proyección (Define Projection, en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 27.

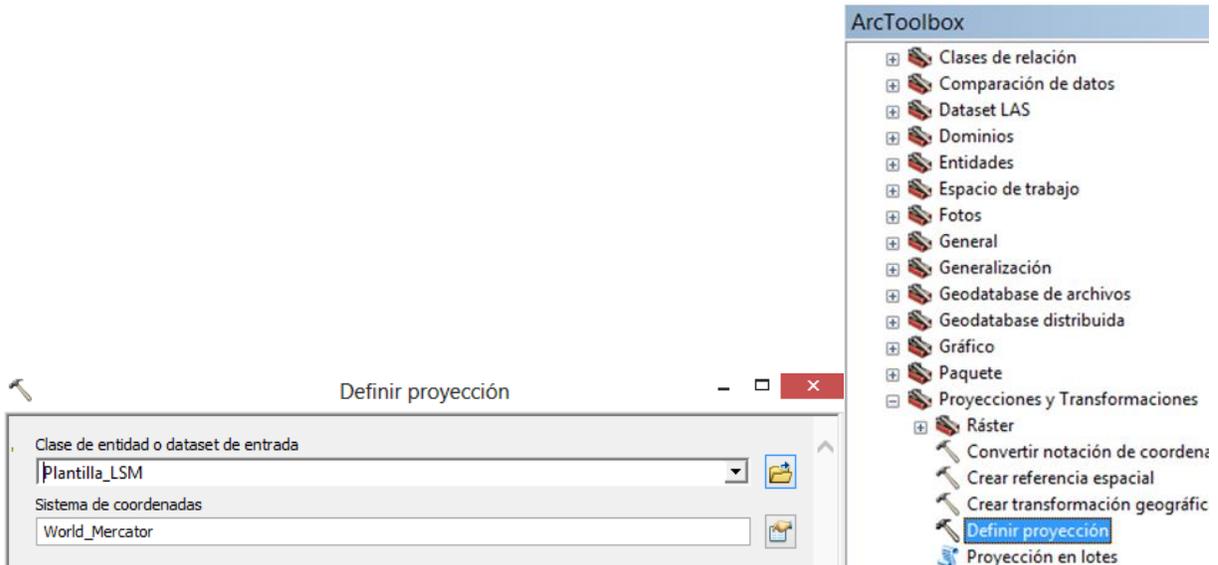


Figura 27. Selección y completado de la opción para definir la proyección de la capa “*Plantilla\_LSM*”.

En la ventana de diálogo “*Definir proyección*” definir las opciones tal como se indica en la figura 27. Seleccionar “*Plantilla\_LSM*” como capa de entrada. Dar clic en la opción “*Sistema de coordenadas*”.

Se despliega la ventana de diálogo “*Propiedades de referencia espacial*”. Seleccionar la opción “*Importar*” como se muestra en la figura 28.

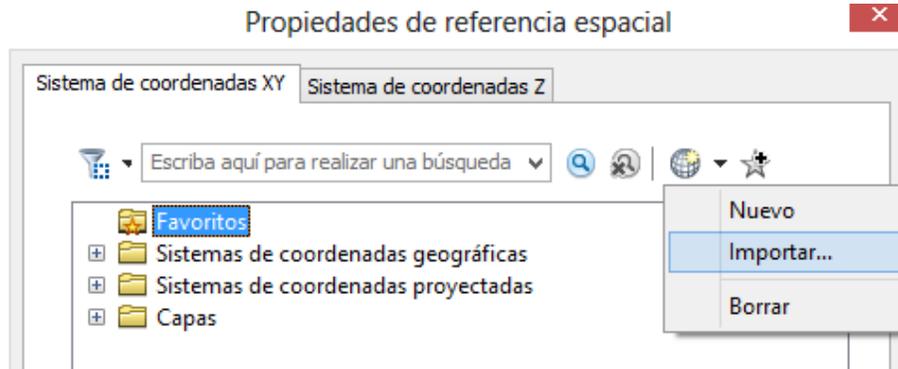


Figura 28. Selección de la opción “Importar” para definir la proyección de la capa “Plantilla\_LSM”.

En la ventana que se despliegue (figura 29) “Buscar datasets o sistemas de coordenadas”, seleccionar el archivo “Punto\_Pry.shp” con las coordenadas re-proyectadas del punto que se encuentra en la carpeta **Plantilla/**, generado en la sección 2.2.6. Dar clic en el botón “Aceptar”, posteriormente en la ventana de diálogo “Propiedades de referencia espacial” dar clic en el botón “Aceptar” y a continuación de clic en el botón “Aceptar” en la ventana de diálogo “Definir proyección” (figura 36).

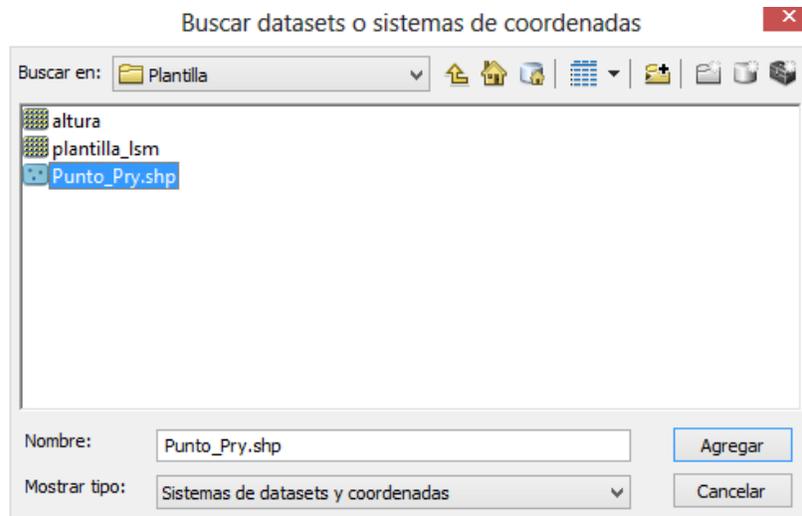


Figura 29. Selección del archivo “Punto\_Pry.shp” con la coordenada re-proyectada.

Al concluir la ejecución de la herramienta “Definir proyección (Define Projection, en inglés)”, se obtiene la plantilla “**Plantilla\_LSM**” a utilizar para generar los archivos con la información de las características del terreno para una malla fina (< 100 mts).

### 3. Pasos para generar las capas de información de la malla fina del terreno

#### 3.1. Acceder a los datos del MDE del INEGI

Acceder y descargar los datos del Modelo Digital de Elevación (MDE) del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) versión 2.0 del INEGI, con resolución de 30 metros para el área que defina el usuario, tal como se muestra en las opciones dentro del círculo en la figura 30.

Los datos del CEM del INEGI tienen una proyección geográfica WGS 1984 y están disponibles en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx> también se encuentran con resolución de 15, 30, 60, 90 y 120 metros.

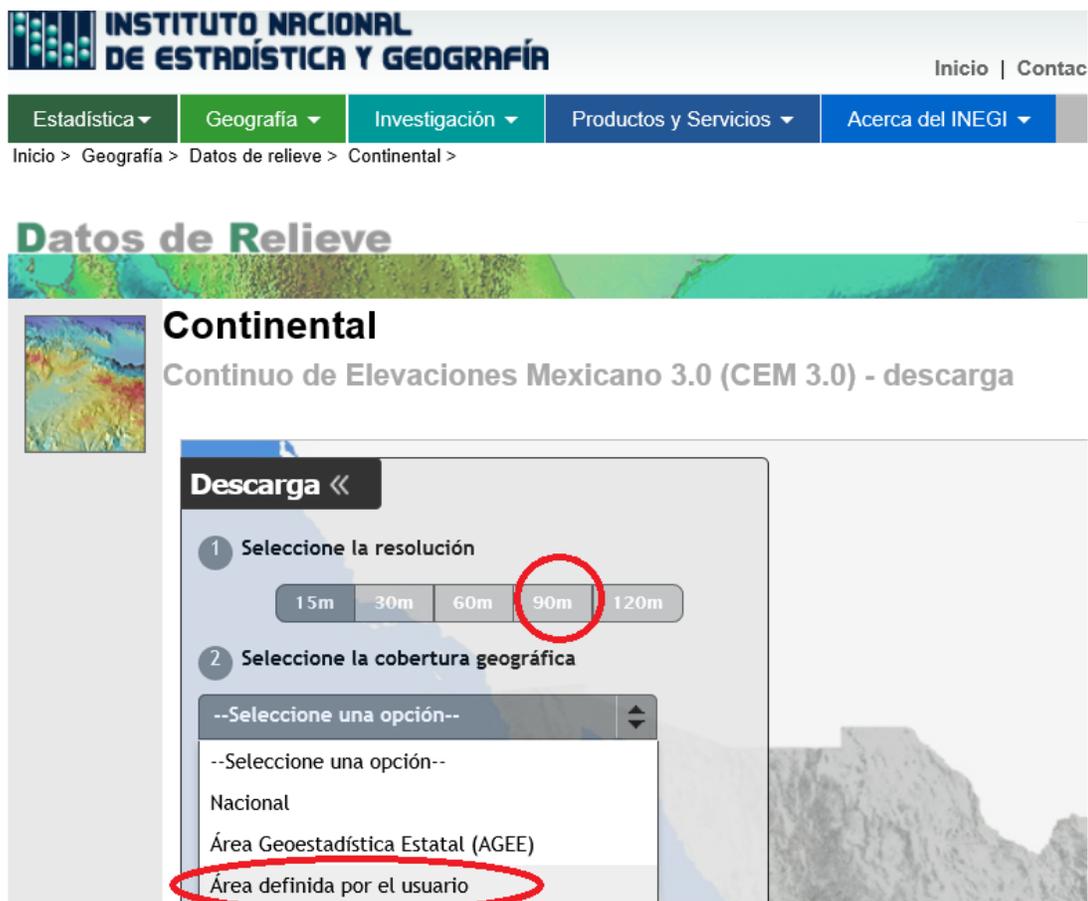


Figura 30. Sitio oficial de los datos del MDE del INEGI. INEGI, 2016. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>

Guardar el archivo del MDE del INEGI (figura 31) en una nueva carpeta que denomine **MDE\_INEGI**. El formato del archivo es TIF.

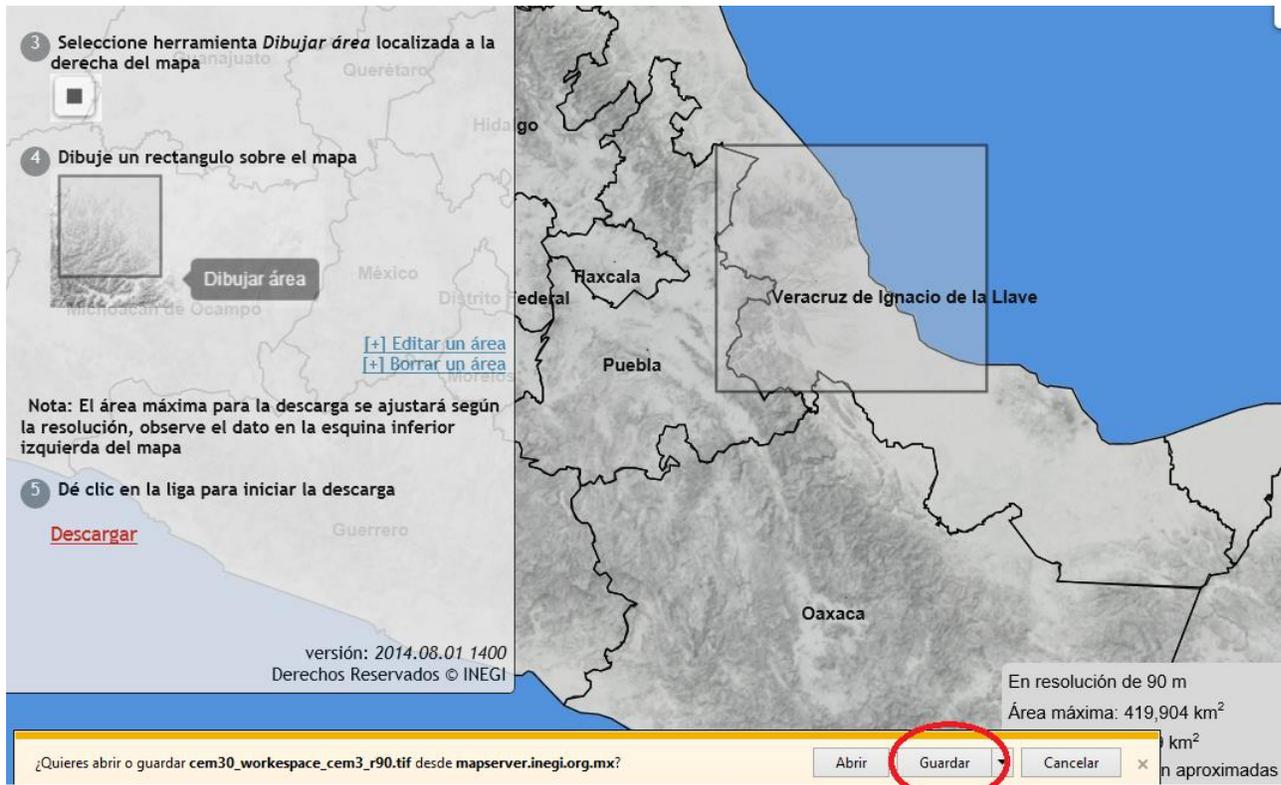


Figura 31. Descarga del archivo con el MDE del INEGI para el área seleccionada por el usuario. INEGI, 2016. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>

### 3.2. *Re-proyectar el MDE de INEGI a la referencia espacial de la plantilla*

Abrir el archivo del MDE del INEGI en ArcGIS. Dar clic en el ícono “Añadir datos”, marcado con el círculo en la figura 32.

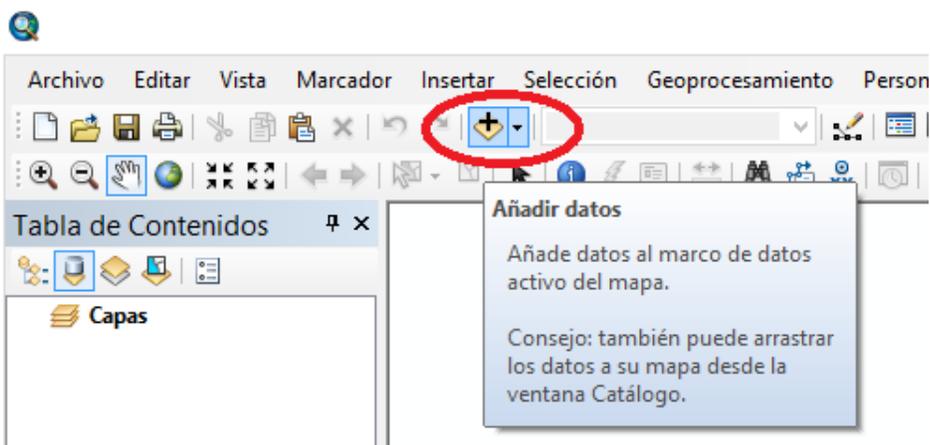


Figura 32. Ícono para añadir datos y capas de información en ArcGIS.

Seleccionar el nombre del archivo, con el que haya guardado el recorte del MDE por ejemplo **"cem30\_workspace\_cem3\_r90"**, en la ventana que se despliegue cuando se da clic en el ícono "Añadir datos". Se abrirá la capa ráster tal como se muestra en la figura 33.

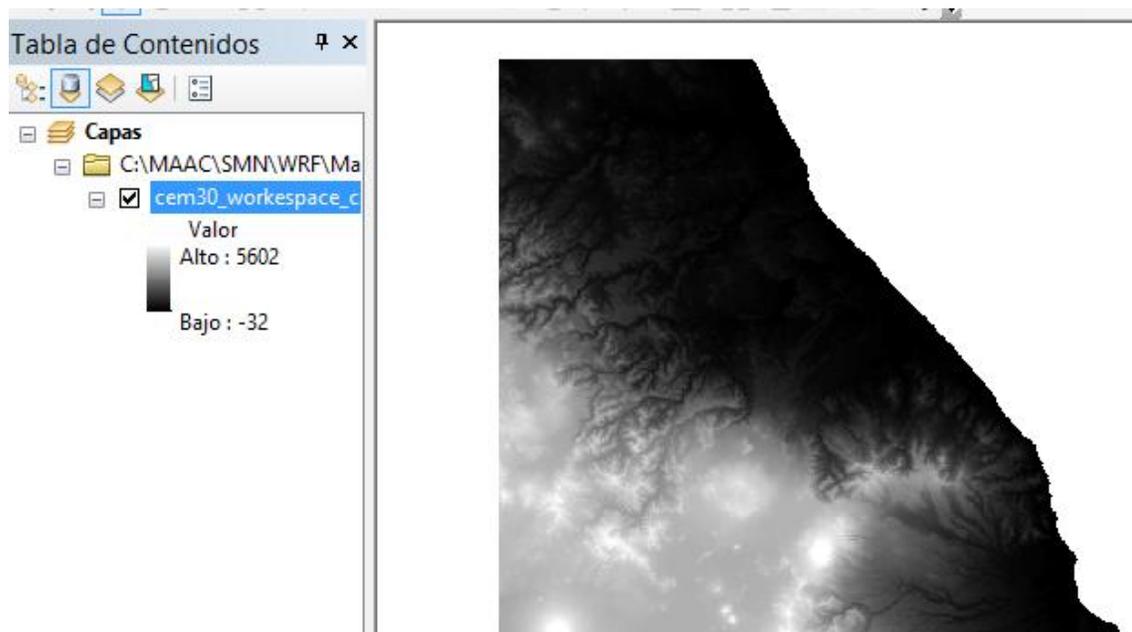


Figura 33. Archivo ráster del MDE del INEGI desplegado en ArcGIS.

Re-proyectar la proyección geográfica de la capa de información **"cem30\_workspace\_cem3\_r90"** del MDE del INEGI a la referencia de la capa **"Plantilla\_LSM"**. La capa cuenta con la proyección espacial WGS\_1984.

Seleccionar del menú ***“Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)”***, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción ***“Proyecciones y transformaciones (Projections and Transformations, en inglés)”***. A continuación seleccionar la opción ***“Ráster (Define Projection, en inglés)”*** y posteriormente seleccionar la opción ***“Proyectar ráster (Project Raster)”***, tal como se muestra en la figura 34.

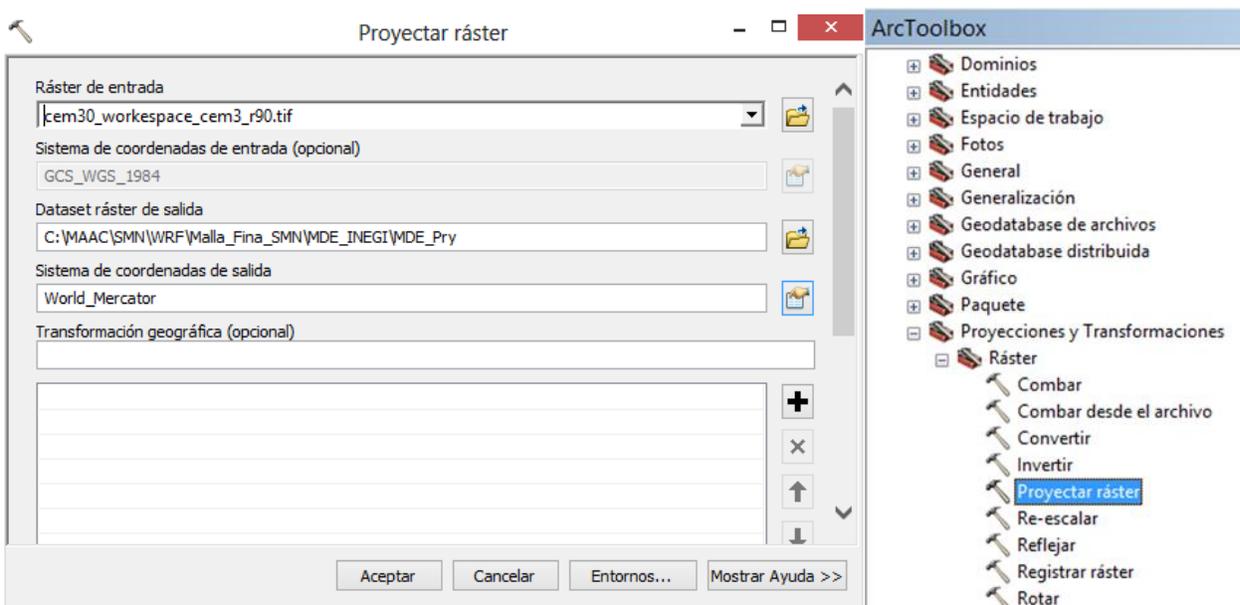


Figura 34. Opciones completadas para re-proyectar la referencia espacial de la capa ráster del MDE del INEGI.

En la ventana de diálogo ***“Proyectar ráster”*** definir las opciones tal como se ejemplifica en la figura 34. Seleccionar en la opción ***“Ráster de entrada”*** la capa de información ***“cem30\_workspace\_cem3\_r90.tif”***. En la opción ***“Dataset ráster de salida”*** seleccionar la carpeta y el nombre del archivo con las coordenadas re-proyectadas (ejemplo ***“MDE\_Pry”*** en la carpeta ***MDE\_INEGI/***). Dar clic en la opción ***“Sistema de coordenadas de salida”***.

Se despliega la ventana de diálogo ***“Propiedades de referencia espacial”***. Seleccionar la opción ***“Importar”*** como se muestra en la figura 35.

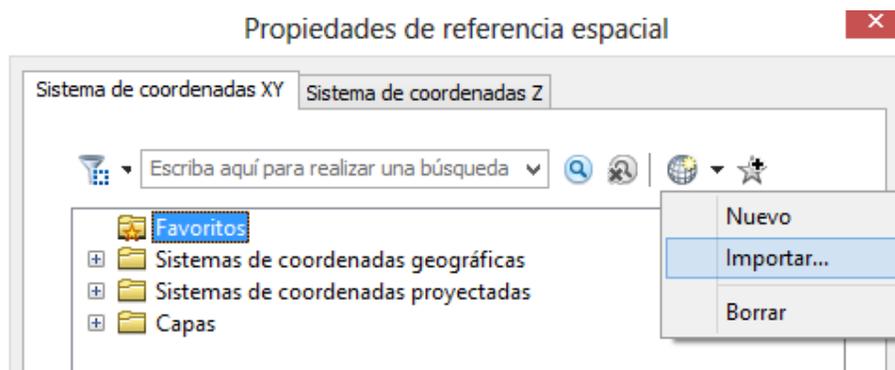


Figura 35. Selección de la opción “*Importar*” para definir la proyección de la capa del MDE del INEGI.

En la ventana que se despliegue (figura 36), seleccionar el archivo “***Punto\_Pry.shp***” con las coordenadas re-proyectadas del punto que se encuentra en el directorio **Plantilla/**, generado en la sección 2.2.6. Dar clic en el botón “*Aceptar*”, posteriormente en la ventana de diálogo “*Propiedades de referencia espacial*” dar clic en el botón “*Aceptar*” y a continuación de clic en el botón “*Aceptar*” en la ventana de diálogo “*Proyectar ráster*”, tal como se muestra en la figura 34.

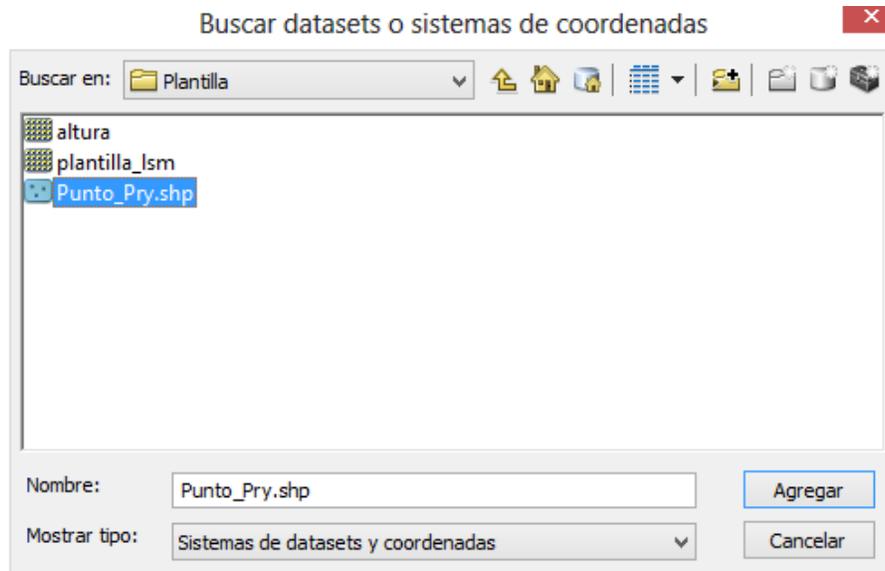


Figura 36. Selección del archivo “*Punto\_Pry.shp*” con la coordenada re-proyectada.

Al concluir la ejecución de la herramienta “***Proyectar ráster (Project Ráster)***”, se genera la capa “***MDE\_Pry***” en el que está re-proyectada a la referencia espacial *Mercator* la capa de información del MDE del INEGI (figura 37).

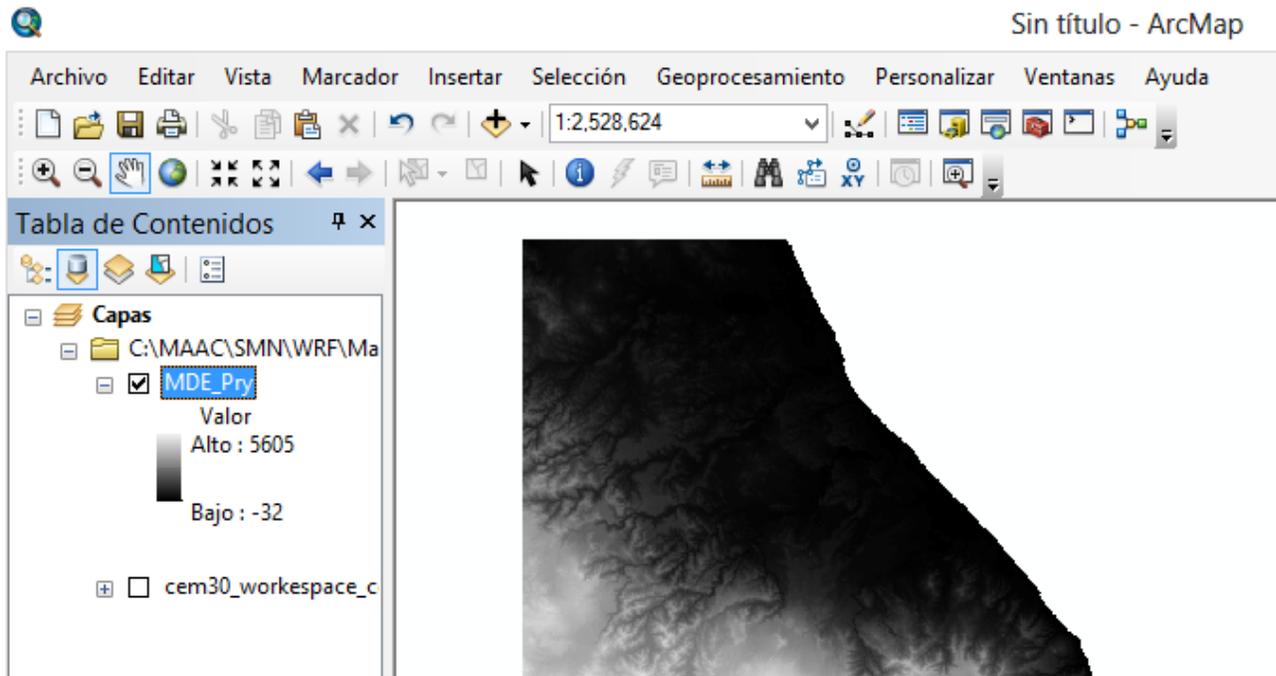


Figura 37. Despliegue de la capa “MDE\_Pry” con la proyección Mercator.

### 3.3. Definir los parámetros de entorno de trabajo

Continuar con la definición de los parámetros del entorno de ArcGIS para procesar las capas de información con las características del terreno para la malla fina (<100 metros). Se recomienda cerrar ArcGIS y volver a abrir el paquete.

En la barra del menú principal seleccionar la opción “Geoprocesamiento (Geoprocessing en inglés)” y en el listado seleccionar la opción “Entornos... (Environments..., en inglés)”, tal como se muestra en la figura 38.

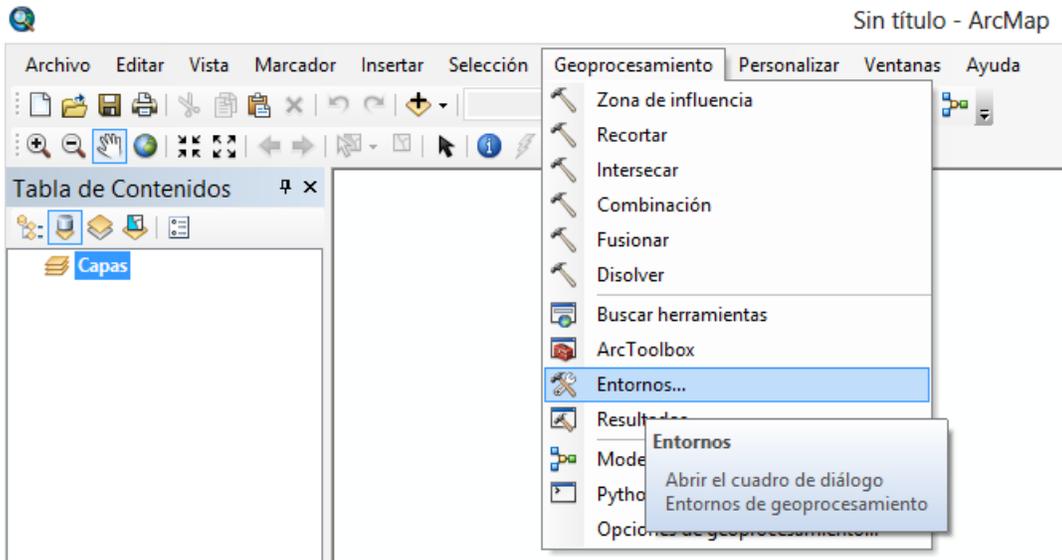


Figura 38. Menú para ingresar a las opciones de configuración de “Entornos”.

En la ventana de diálogo “Configuración del entorno” definir las opciones tal como se indica en la figura 39. Seleccionar el archivo “**Plantilla\_Ism**” con la plantilla del terreno en la opción “Extensión de procesamiento”. Seleccionar un valor para la resolución correspondiente a la malla fina (< 100 metros) en la opción “Tolerancia y resolución XY”. Dar clic en el botón “Aceptar”.

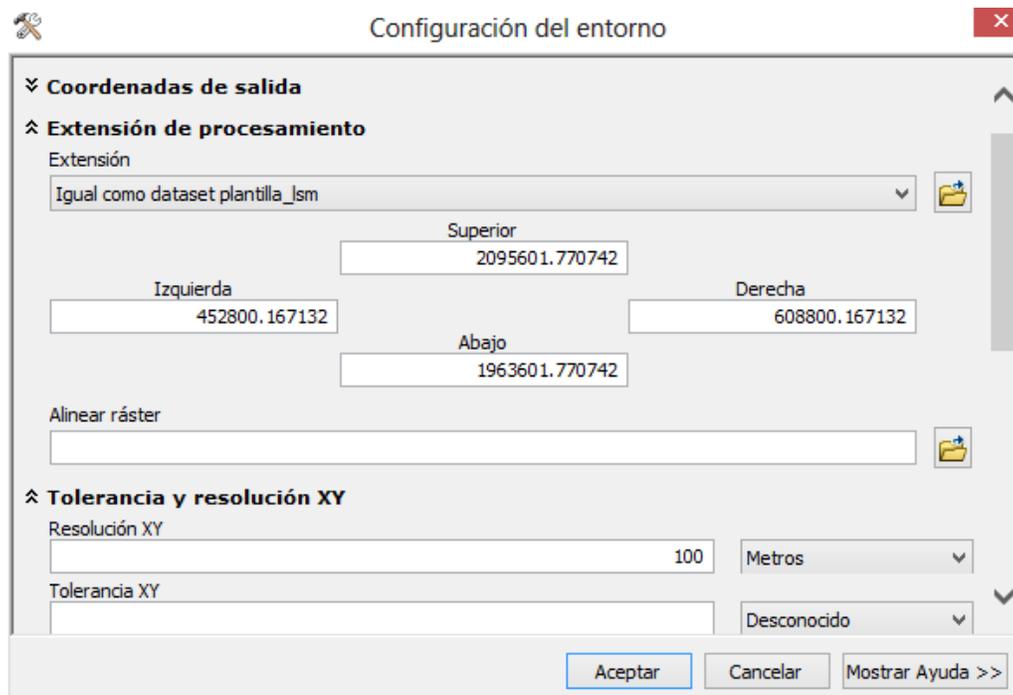


Figura 39. Opciones de configuración definida para el entorno.

### 3.4. Recortar el MDE para la malla fina del terreno

Una vez que se cuenta con los datos del MDE del INEGI proyectado a la referencia espacial de la plantilla, se procede a recortar el área que corresponde al dominio que incluya la cuenca de interés.

Abrir el archivo con la capa "**MDE\_Pry**", del MDE del INEGI en ArcGIS. Dar clic en el ícono "Añadir datos", marcado con el círculo en la figura 40.

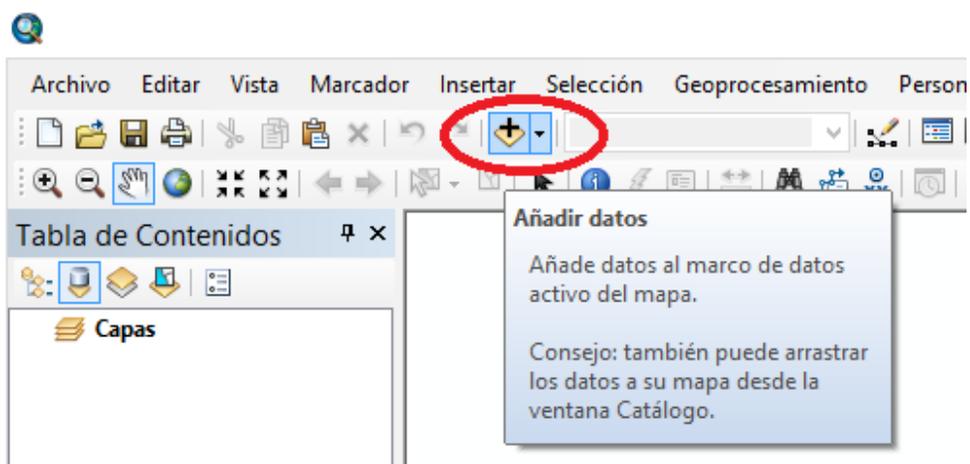


Figura 40. Opción para añadir datos y capas de información en ArcGIS.

Seleccionar el archivo "**MDE\_Pry**" en la ventana que se despliegue después de dar clic en el ícono "Añadir datos". Se abrirá la imagen del archivo tal como se muestra en la figura 41.



Figura 41. Archivo ráster “MDE\_Pry” del MDE de INEGI desplegado en ArcGIS.

Crear en el equipo de cómputo con SO Windows una nueva carpeta de trabajo para guardar los archivos procesados de la malla fina del terreno, denominar la carpeta como **Terreno/**

#### ***3.4.1. Generar un dominio con valor constante “1” de tipo entero***

Proceder a generar un dominio con valor constante de “1” de tipo “Entero”, con la misma extensión espacial que la capa de información de la Plantilla, con el fin de utilizarlo para recortar el MDE.

Seleccionar del menú “Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Creación de ráster (Raster Creation, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “Crear ráster constante (Create Constant Raster, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 42.

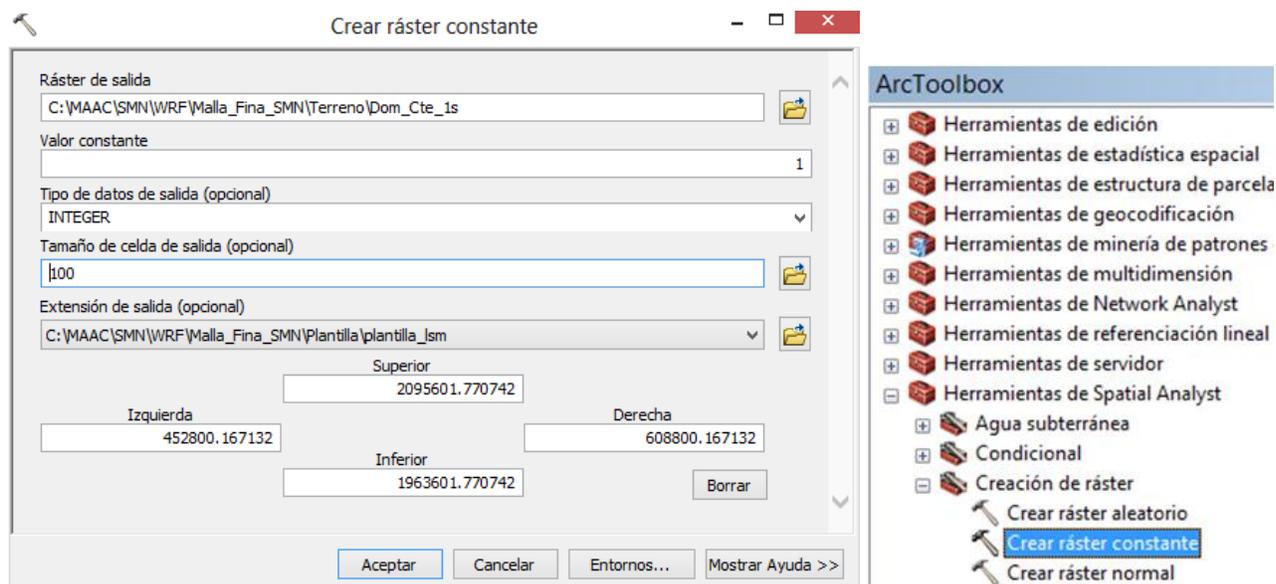


Figura 42. Opción completada para crear una capa ráster con valores constantes de tipo entero.

En la ventana de diálogo “*Crear ráster constante*” definir las opciones tal como se indica en la figura 42. Seleccionar en la opción “*Ráster de salida*” la carpeta **Terreno/** y el nombre del archivo con los valores constantes (por ejemplo “**Dom\_Cte\_1s**”). En la opción “*Valor constante*” indicar un valor de 1. En la opción “*Tamaño de la celda de salida*” indicar un valor de 30, u otro que corresponda con la resolución de la malla fina del terreno a procesar. En la opción “*Extensión de salida*” seleccionar el archivo “**plantilla\_ism**” para asegurar que la extensión espacial del dominio constante coincida con el de la plantilla del terreno. Dar clic en el botón “*Aceptar*”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “***Crear ráster constante (Create Constant Raster, en inglés)***”, se despliega la capa de información “**Dom\_Cte\_1s**” con el dominio constante (figura 43).

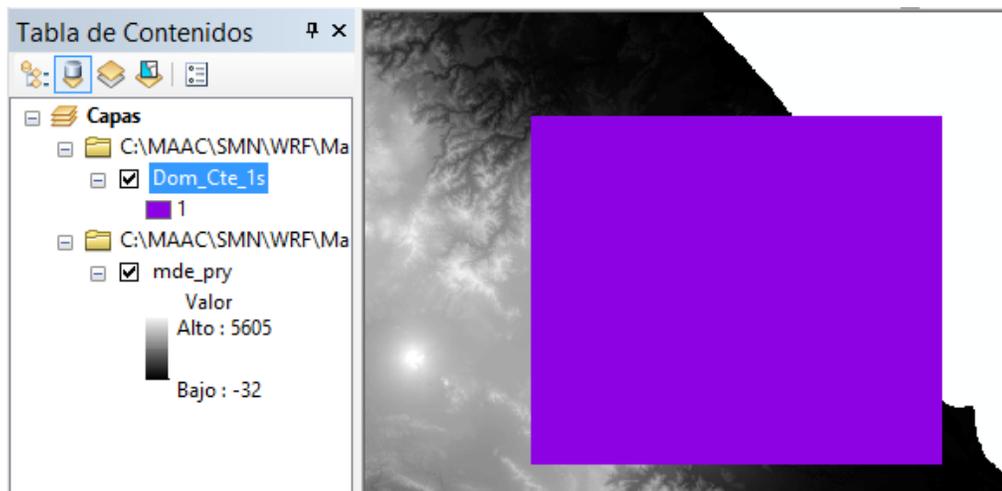


Figura 43. Despliegue de la capa de información “*Dom\_Cte\_1s*” generada con la herramienta “Crear ráster constante”.

### 3.4.2. *Proyectar el dominio constante a la referencia espacial de la capa de la Plantilla*

Una vez que se cuenta con la capa de información del dominio con valor constante de 1, proceder a proyectarla a la referencia espacial del archivo de la plantilla. Seleccionar del menú “Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Proyecciones y transformaciones (Projections and Transformations, en inglés)” y a continuación seleccionar la opción “Definir proyección (Define Projection, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 44.

Aplicar el procedimiento descrito en la sección 2.2.10 de la sección II del presente anexo para completar la proyección de la capa “*Dom\_Cte\_1s*”.

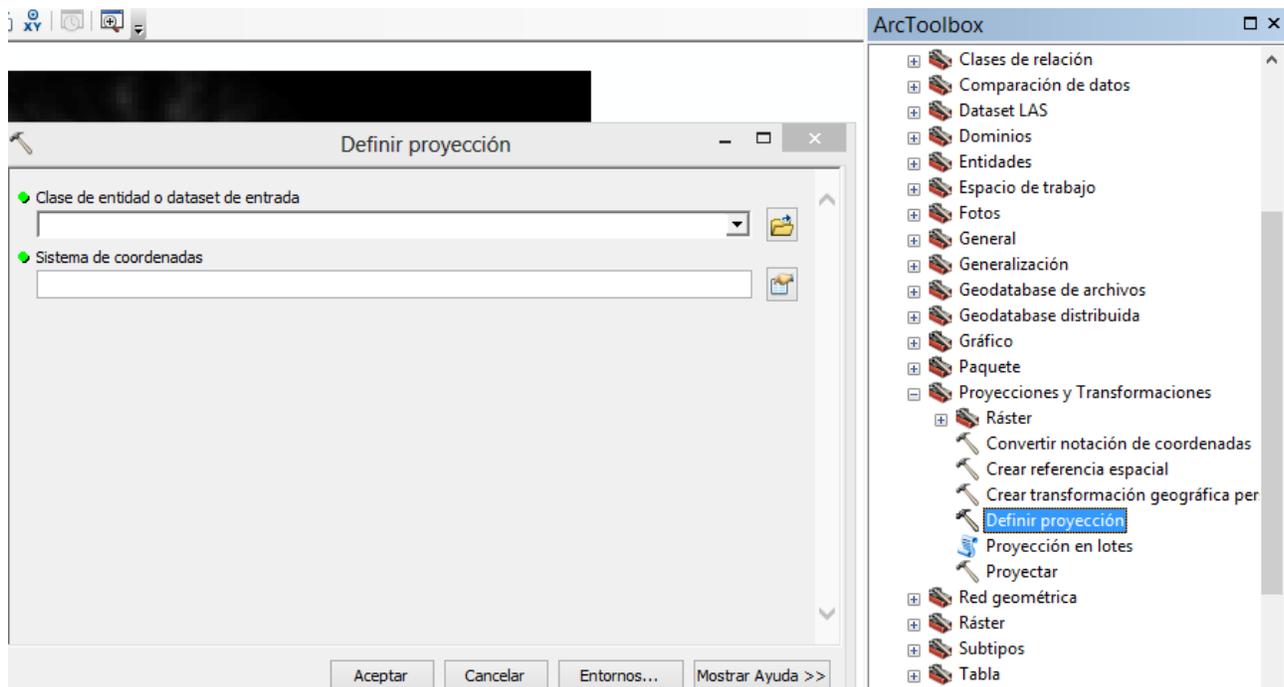


Figura 44. Opción para definir la proyección de la capa “*Dom\_Cte\_1s*”.

### 3.4.3. Re-muestrear el MDE a la resolución de la malla fina del terreno

Generar el MDE con resolución para la resolución fina (< 100 mts) para la extensión espacial definida en la capa “**pantilla\_ism**” que incluye las cuencas de interés de trabajo. Seleccionar del menú “**Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Álgebra de mapas (Map Algebra, en inglés)**”, y posteriormente la opción “**Calculadora ráster (Raster Calculator, en inglés)**” tal como se muestra en la figura 45.

Multiplicar con la calculadora las capas de información “**mde\_pry**” y “**Dom\_Cte\_1s**” (figura 45) para que se re-muestree el MDE del INEGI, en caso de que las resoluciones de las capas de información sean diferentes. La calculadora usa la técnica de re-muestreo para asignar a la celda final, definida como “**MDE**” en la opción de “**Ráster de salida**”, el valor del vecino más cercano de la celda de la capa original “**mde\_pry**”. Una vez que el centro de la celda en el dataset ráster de salida se encuentra ubicada en el ráster de entrada, la asignación del vecino más cercano determinará la ubicación del centro de celda más cercano en el ráster de entrada y asignará el valor de esa celda a la celda en el ráster de salida. La asignación de vecino más cercano no cambia ninguno de los valores de las celdas del *dataset* ráster de entrada.

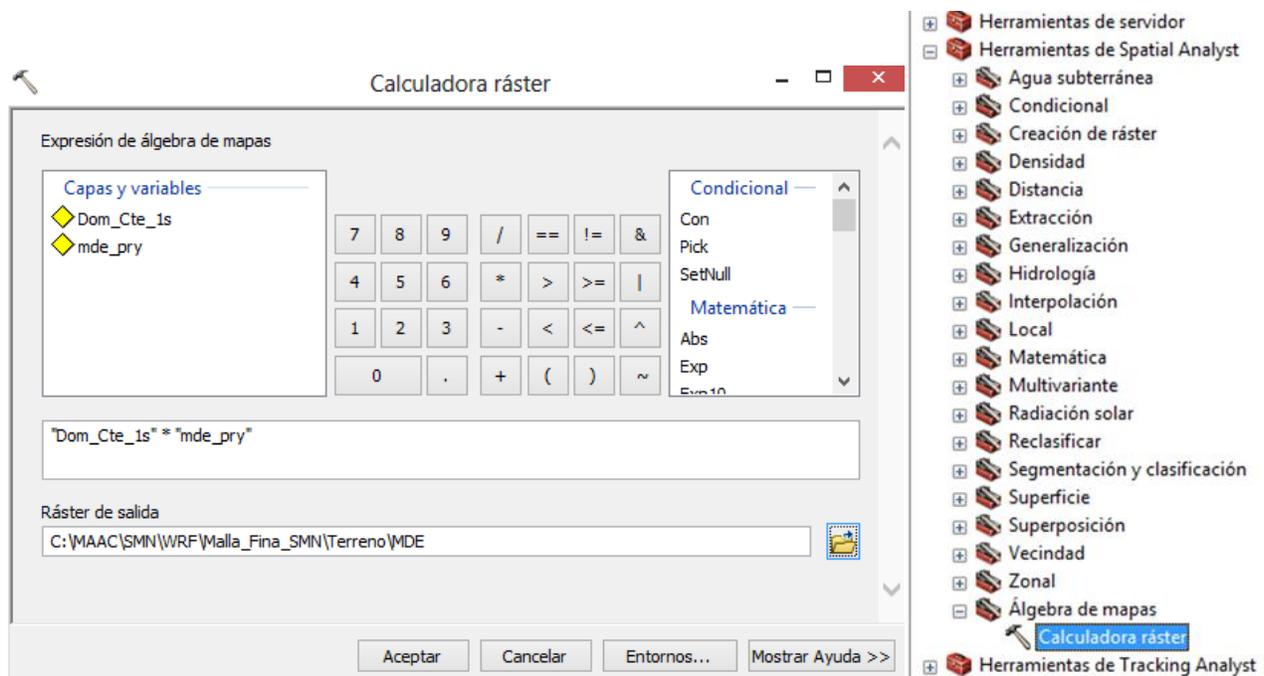


Figura 45. Despliegue de la calculadora de capas ráster para re-muestrear el MDE a la resolución de la malla fina del terreno.

Al concluir la ejecución de la herramienta “**Calculadora ráster**”, se obtiene la capa “**MDE**” del MDE del INEGI con resolución <100 mts y con las mismas características (extensión y proyección) que el archivo “**Plantilla\_ism**”, tal como se muestra en la figura 46.

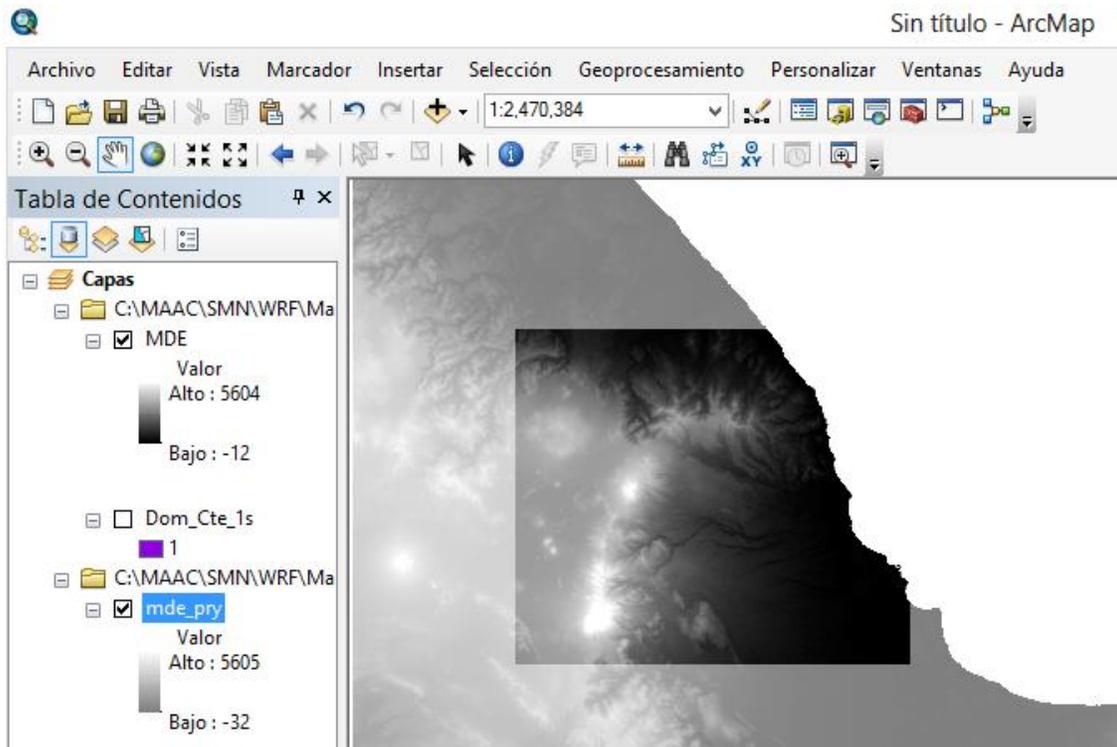


Figura 46. Despliegue de la capa de información “MDE” con resolución de 100 mts, sobrepuesta a la capa de información con mayor extensión espacial descargada del sitio oficial del INEGI.

### 3.5. Rellenar los datos de elevación del MDE de la malla fina del terreno<sup>2</sup>

Una vez que se cuenta con la capa del MDE ajustada a la resolución de la malla del terreno, se deben rellenar sumideros que representan áreas de drenaje interno que no drenan hacia afuera de las depresiones, lo que ocasiona un ciclo sin fin cuando se corre el WRF-Hydro. Seleccionar del menú “Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Hidrología (Hydrology, en inglés)”, y posteriormente la opción “relleno (Fill, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 47.

<sup>2</sup> <http://uwf.edu/zhu/gis4048/reading/hydrology.htm>

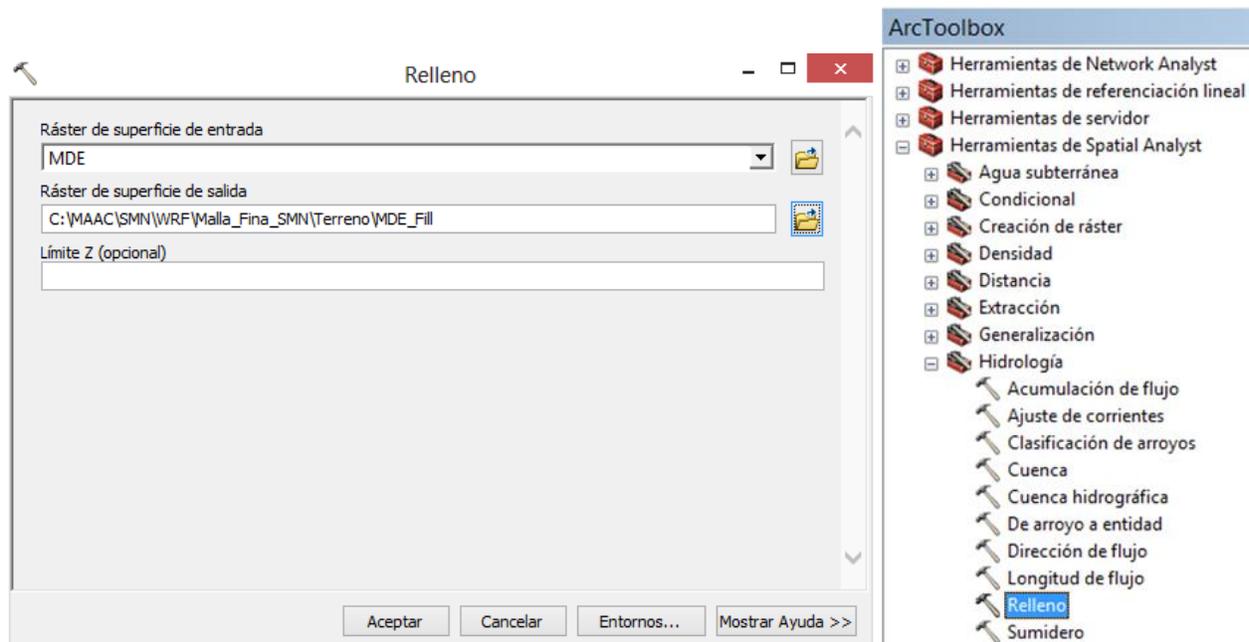


Figura 47. Opciones completadas para el relleno de sumideros en la capa “MDE”.

En la ventana de diálogo “Relleno” definir las opciones tal como se indica en la figura 47. Seleccionar en la opción “Ráster se superficie de entrada” la capa de información “MDE”. Definir en la opción “Ráster de superficie de salida” el nombre de la capa de salida “MDE\_Final”. Dar clic en el botón “Aceptar”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “relleno (*Fill, en inglés*)”, se obtiene el MDE con resolución <100 mts rellenado en los sumideros, tal como se muestra en la figura 48.



Figura 48. Despliegue de la capa de información “MDE\_Final” con los sumideros rellenos.

### 3.6. Generar la capa de información de la topografía en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro

Una vez que se cuenta con la capa de información del MDE para la cuenca de trabajo, capa "**MDE\_Final**", se deben reclasificar los valores "NoData" a "0" para evitar errores cuando la capa de información sea utilizada por el WRF-Hydro.

Seleccionar del menú "Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)", de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción "Álgebra de mapas (Map Algebra, en inglés)" y posteriormente seleccionar la opción "Calculadora ráster (Raster Calculator, en inglés)", tal como se muestra en la figura 49.

Aplicar la expresión condicional  $Con(IsNull("MDE_Final"),0,"MDE_Final")$ , con la cual se asigna un valor de "0" a las celdas con valores "NoData" y mantiene sin cambios al resto de las celdas. En la opción "Ráster de salida" indicar la carpeta y el nombre del archivo de salida (ej. **MDE\_Hy** en la carpeta **Terreno/**), tal como se muestra en la figura 49.

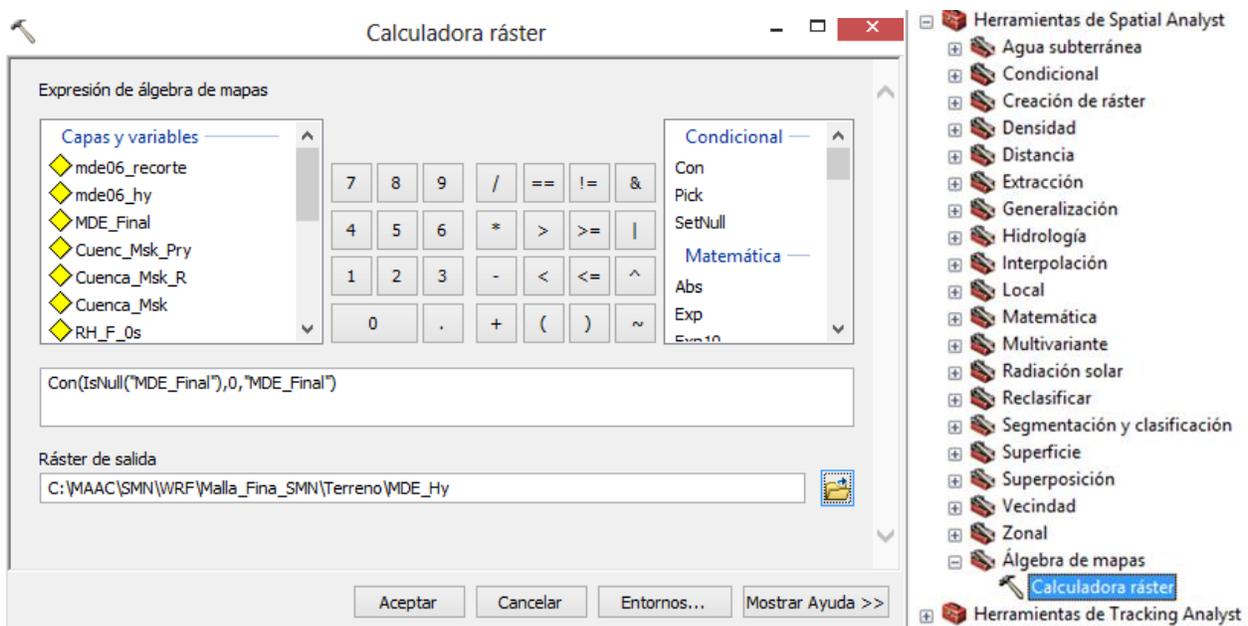


Figura 49. Calculadora de álgebra de mapas con la declaración de la condicional para cambiar los valores "NoData" a "0" en la capa "**MDE\_Final**".

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Calculadora ráster (Raster Calculator, en ingles)*”, se obtiene la capa de información “*MDE\_Hy*” con la topografía para la malla fina del terreno, tal como se muestra en la figura 50.

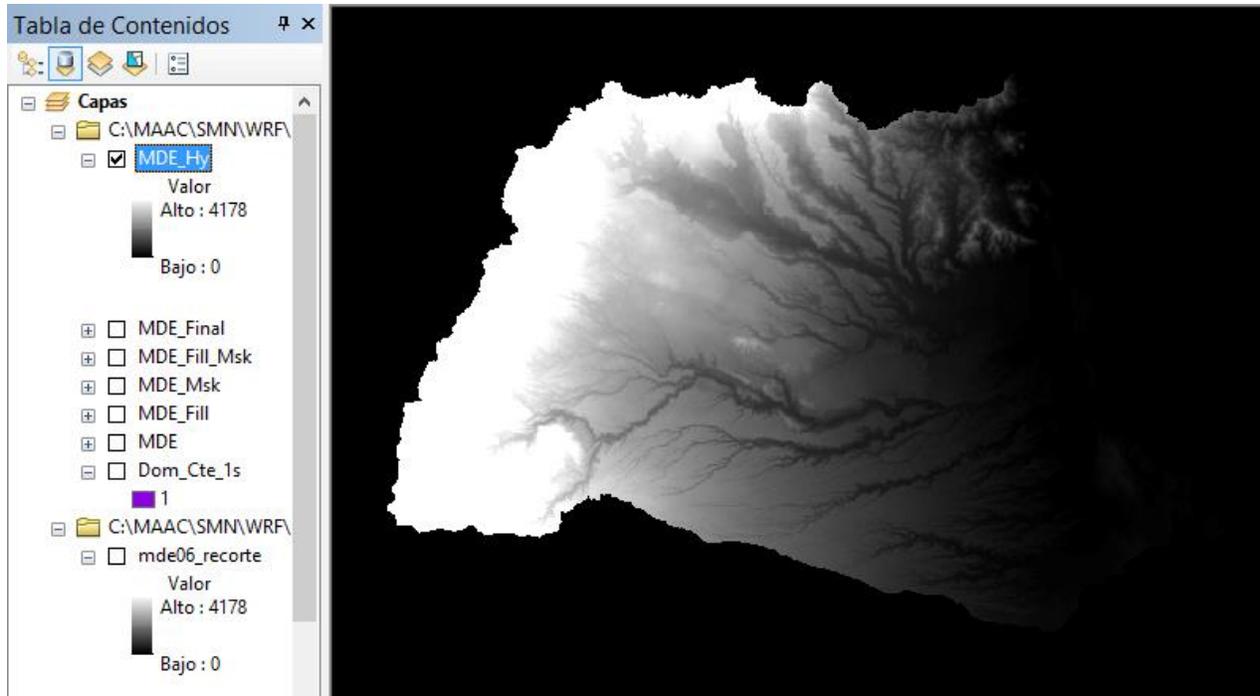


Figura 50. Despliegue de la capa de información “*MDE\_Hy*” con la topografía de la malla fina del terreno.

### 3.7. *Obtener la capa de información de la dirección de flujo de salida para la malla fina del terreno*

A partir de la capa “*MDE\_Final*”, obtenida en la [sección 3.5](#), se procesa la capa con la dirección de flujo de las celdas en la malla fina del terreno. A cada celda se le asignará un valor entero (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128) que representa la orientación<sup>3</sup> de la dirección del flujo de salida, tal como se muestra en la figura 51.

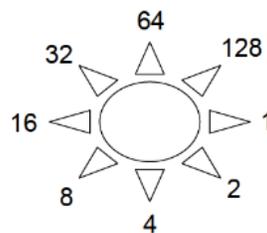


Figura 51. Orientación para representar la dirección de flujo que calcula ArcGIS.

<sup>3</sup> <http://uwf.edu/zhu/gis4048/reading/hydrology.htm>

Seleccionar del menú “Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Hidrología (Hydrology, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “Dirección de flujo (Flow Direction, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 52.

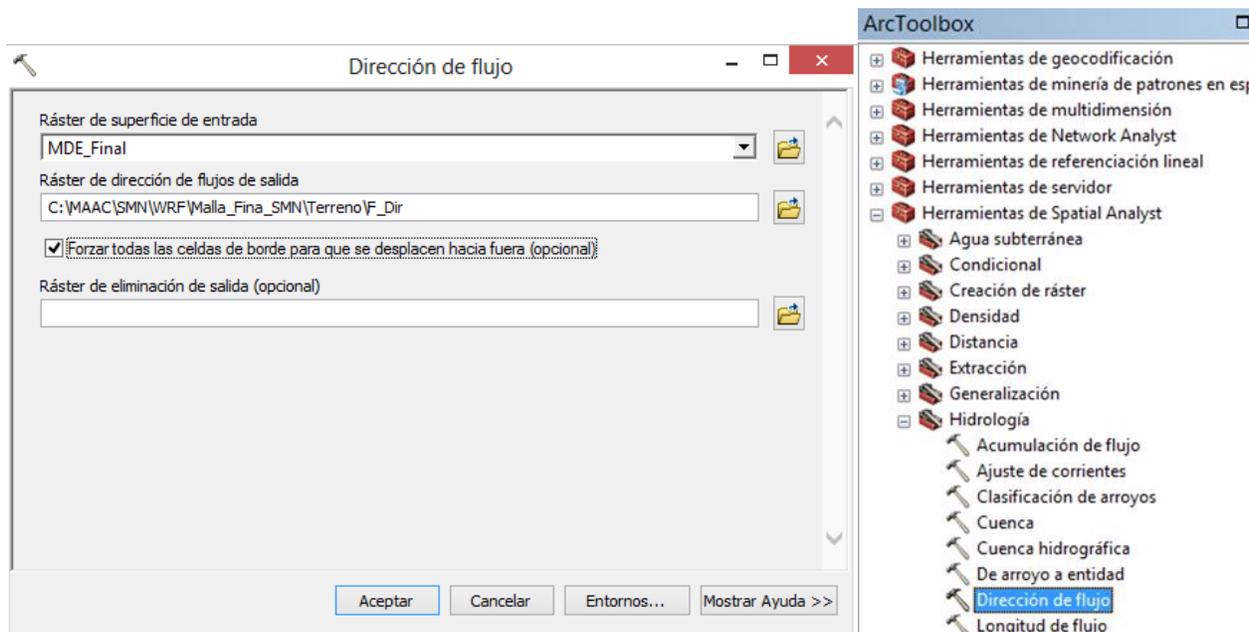


Figura 52. Opción para generar la capa con la dirección de flujo de salida en la malla fina del terreno.

En la ventana de diálogo “*Dirección de flujo*” definir las opciones tal como se indica en la figura 52. Seleccionar en la opción “*Ráster de superficie de entrada*” el nombre de la capa “**MDE\_Final**” con el MDE del INEGI para las cuencas de trabajo. En la opción “*Ráster de dirección de flujos de salida*” seleccionar la carpeta y el archivo en el que se guarde la información de la dirección de flujo de salida (por ejemplo el archivo **F\_Dir** en la carpeta **Terreno**). Activar la casilla de la opción “*Forzar todas las celdas de borde para que se desplacen hacia afuera*”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “Dirección de flujo (Flow Direction, en inglés)”, se despliega la capa “**F\_Dir**” con la información de la dirección del flujo de salida, tal como se ejemplifica en la figura 53.

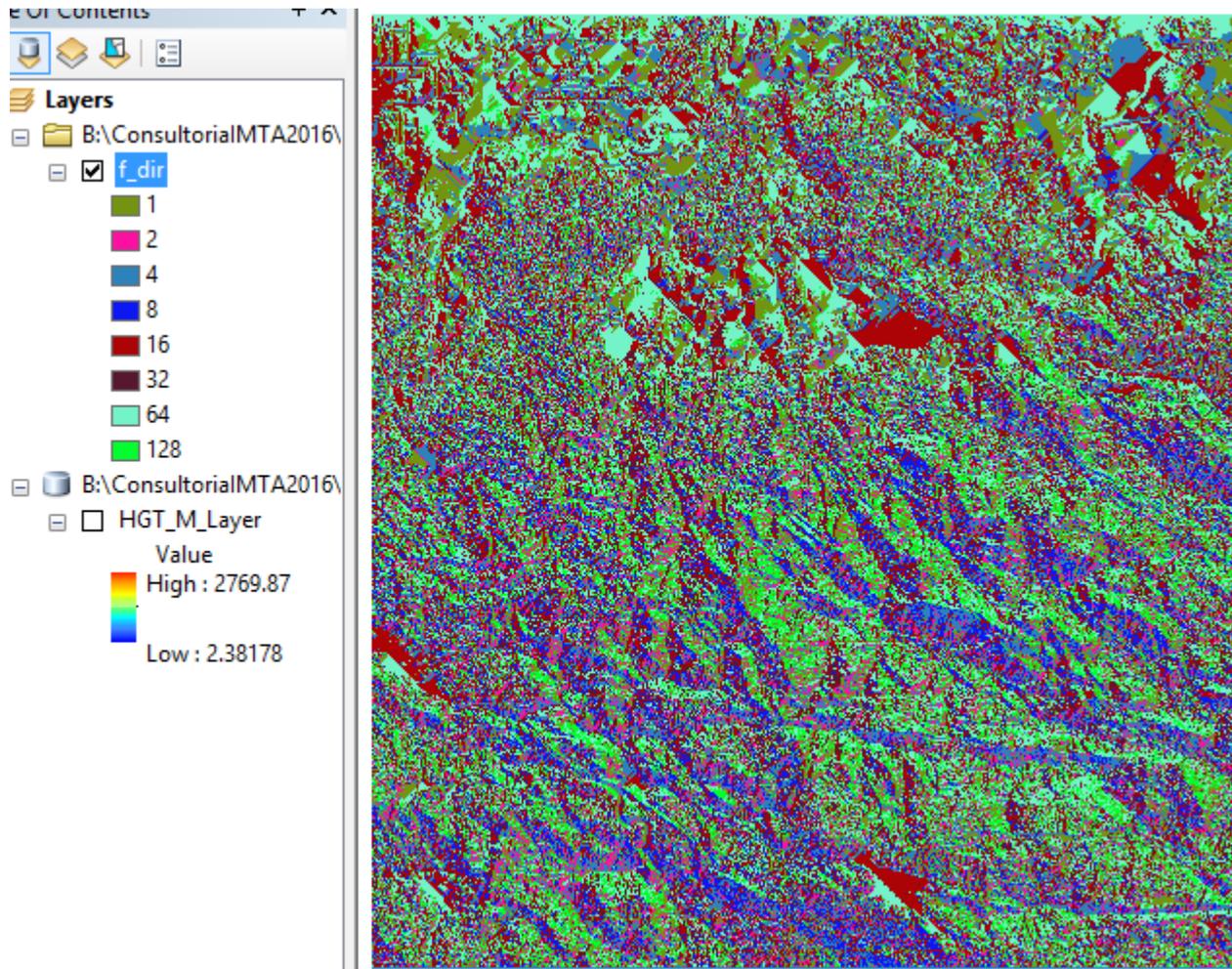


Figura 53. Ejemplo del despliegue de la capa de información “*F\_Dir*” generada con la herramienta “*Dirección de flujo*”.

### 3.7.1. Generar la capa de información de la dirección de flujo en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro

Una vez que se cuenta con la capa “*F\_Dir*” con la información de la dirección de flujo de salida, se deben reclasificar los valores “*NoData*” a “-9999” para evitar errores cuando la capa de información sea utilizada por el modelo WRF-Hydro.

Seleccionar del menú “*Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*Reclasificar (Reclass, en inglés)*” y posteriormente seleccionar la opción “*Reclasificar (Reclassify, en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 54.

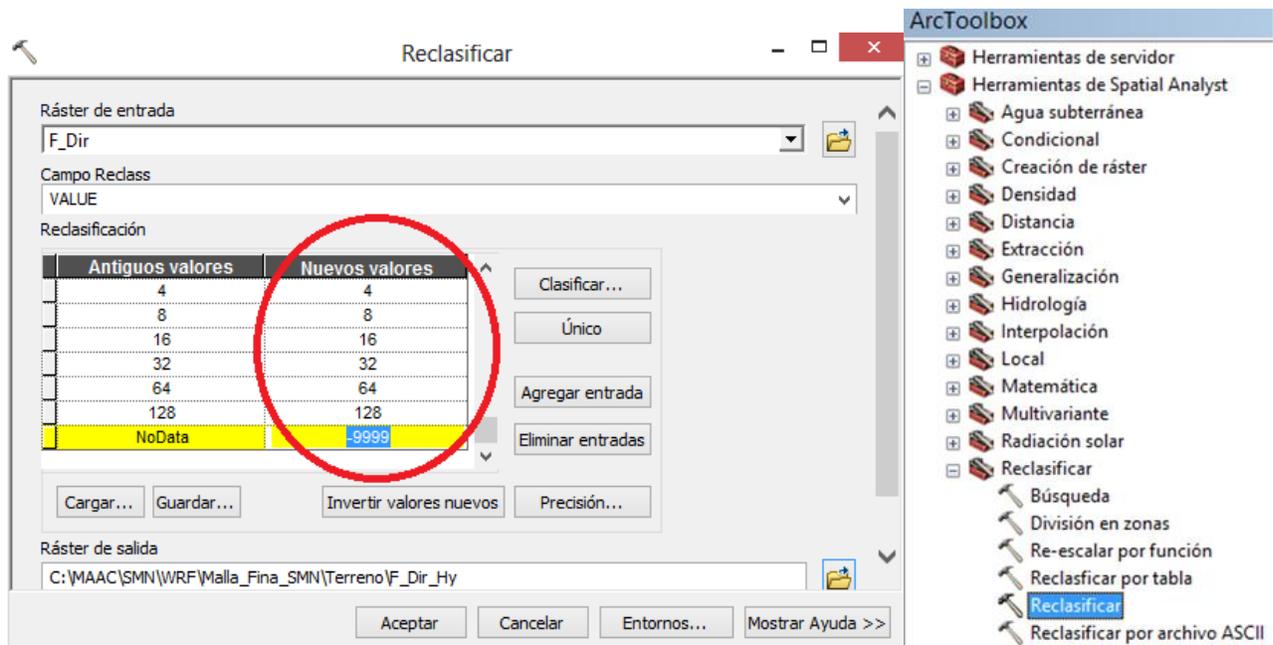


Figura 54. Opción para reclasificar valores en una capa ráster.

En la ventana de diálogo “*Reclasificar*” definir las opciones tal como se indica en la figura 54. Seleccionar en la opción “*Ráster de entrada*” la capa “*F\_Dir*” con la dirección de flujo de salida. En la opción “*Campo Reclass*” seleccionar el dato VALUE. En la opción “*Ráster de salida*” indicar la carpeta (ejemplo **Terreno**) y el nombre “*F\_Dir\_Hy*” de la capa de información con los datos reclasificados a ser usada por el WRF-Hydro. En la columna “*Nuevos valores*” asignar un valor de “-9999” al dato “*NoData*” y copiar el resto de los datos de la columna “*Antiguos valores*” a la columna “*Nuevos valores*”, tal como se indica en el círculo en la figura 54.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Reclasificar (Reclassify, en inglés)*”, se despliega la capa “*F\_Dir\_Hy*” con la información de la dirección de flujo y con valor constante de “-9999” que sustituye el valor “*NoData*”.

### 3.8. Obtener el flujo de acumulación

A partir de la capa “*F\_Dir*” se procesa la capa con el flujo de acumulación en las celdas de la malla fina del terreno. Seleccionar del menú “*Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*Hidrología (Hydrology, en inglés)*” y

posteriormente seleccionar la opción “Acumulación de flujo (Flow Accumulation, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 55.

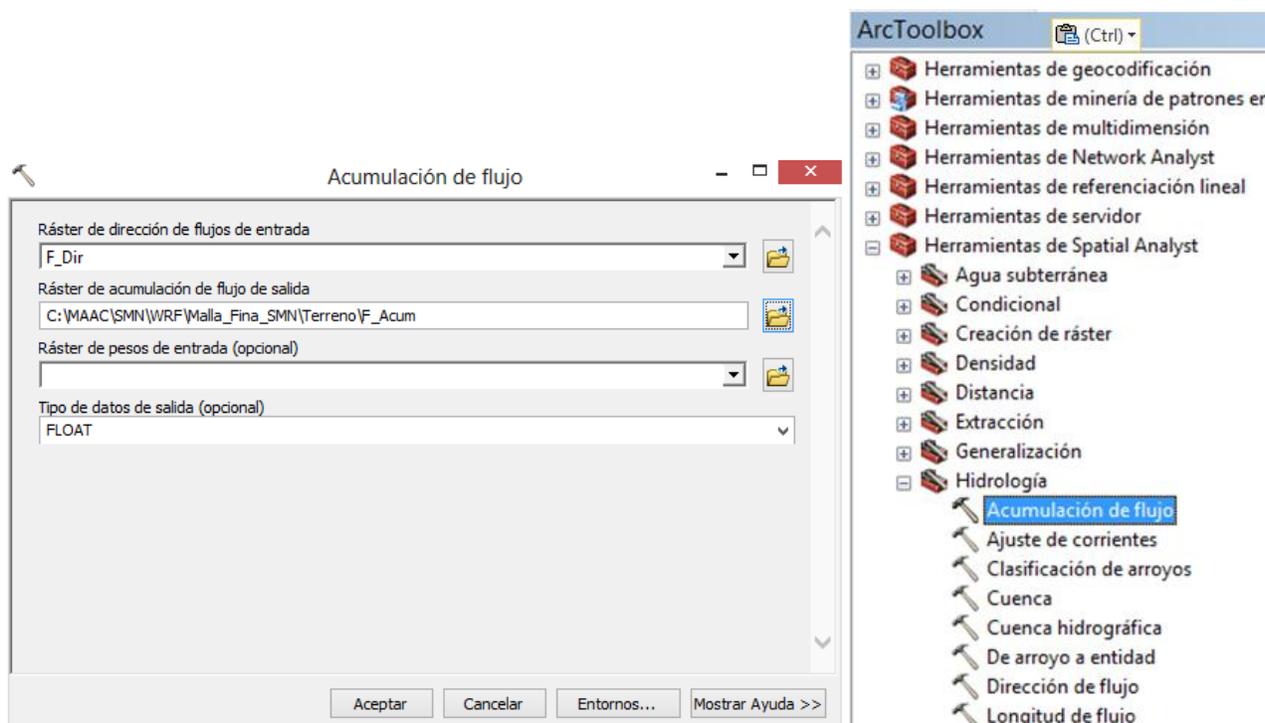


Figura 55. Opción completada para generar la capa con la acumulación de flujo en la malla fina del terreno.

En la ventana de diálogo “*Acumulación de flujo*” definir las opciones tal como se indica en la figura 55. Seleccionar en la opción “*Ráster de dirección de flujos de entrada*” el nombre de la capa “**F\_Dir**” con la información de los flujos de salida. En la opción “*Ráster de acumulación de flujo de salida*” seleccionar la carpeta y el archivo en el que se guarde la información del flujo acumulado (por ejemplo el archivo **F\_Acum** en la carpeta **Terreno**). Mantener sin cambios el resto de las opciones.

Al concluir la ejecución de la herramienta “Acumulación de flujo (Flow Accumulation, en inglés)”, se despliega la capa “**F\_Acum**” con la información del flujo acumulado, por ejemplo la de la figura 56.

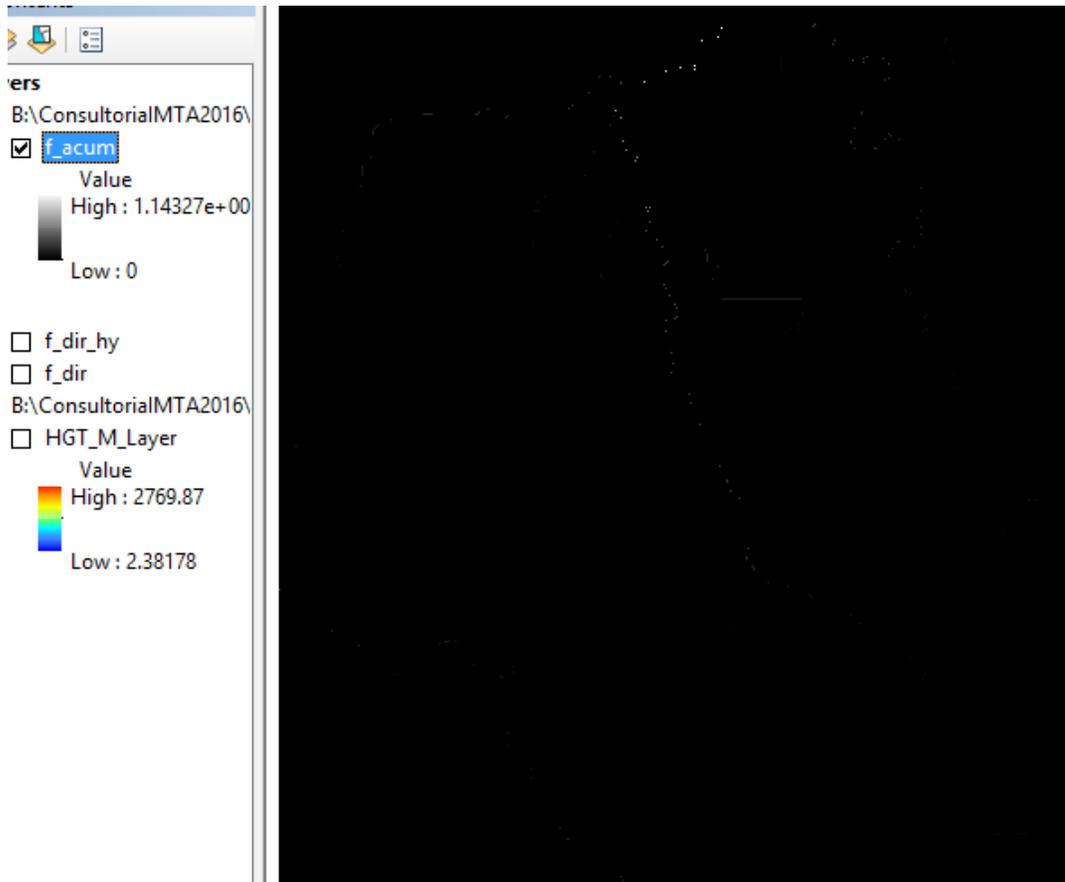


Figura 56. Ejemplo del despliegue de la capa de información “*F\_Acum*” generada con la herramienta “*Acumulación de flujo*”.

### 3.9. *Obtener la capa de información de la red de canales de corriente para la malla fina del terreno*

A partir de la capa “*F\_Acum*”, con la información del flujo acumulado en la malla fina del terreno, se procesa la capa “*F\_Can*” con la información de la red<sup>4</sup> de canales de corriente.

Seleccionar del menú “*Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*Algebra de mapas (Map Algebra, en inglés)*” y posteriormente seleccionar la opción “*Calculadora ráster (Raster Calculator, en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 57.

<sup>4</sup> <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z0000005v000000.htm>

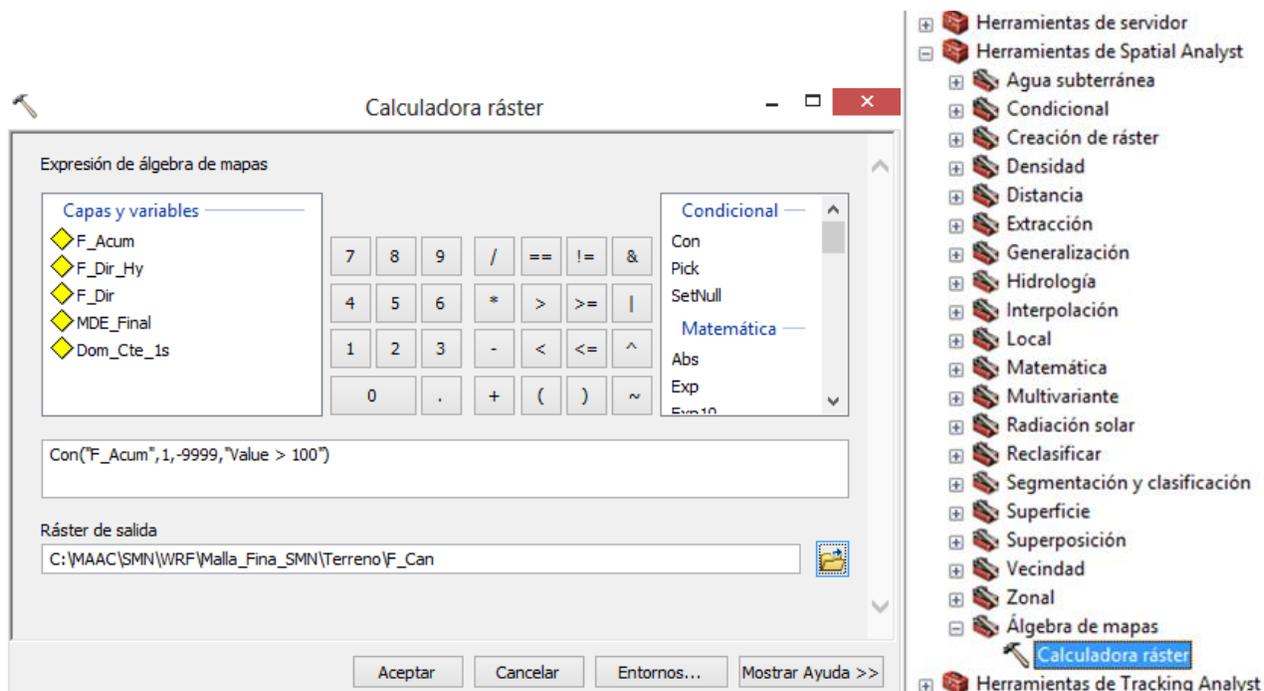


Figura 57. Calculadora de algebra de mapas con la condicional para generar la capa de información de la red de canales de corriente para la malla fina del terreno.

Especificar el umbral mínimo de flujo acumulado a partir del cual se presenta un canal de corriente. Existen pocas guías para definir el umbral en un sentido “global” debido a que el clima, suelo, geología, vegetación y procesos geomorfológicos se combinan para definir las redes de canales. Sin embargo, valores típicos varían entre 1-10 km<sup>2</sup> (100 a 10,000 celdas de 100 m<sup>2</sup>) para varios climas templados y húmedos.

km2	m2	# de celdas de 100 m2	m2	# celdas de 15 m2	M2	10 veces el # celdas de 15 m2
1	1,000,000	100	1,000,000	4,400	990,000	44,000
10	100,000,000	10,000	100,000,000	444,000	99,900,000	

Aplicar la expresión condicional *Con("F\_Acum",1,-9999,"Value > 5000")*, con lo cual asignará “1” cuando se cumpla que “Value” es mayor a 5000 y -9999 en caso contrario. En la opción “*Ráster de salida*” indicar la carpeta y el nombre del archivo de salida (ej. **F\_Can** en la carpeta **Terreno**), tal como se muestra en la figura 57.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Calculadora ráster (Raster Calculator, en inglés)*”, se despliega la capa “*F\_Can*” con la información de la red de canales de corriente, como se ejemplifica en la figura 58.

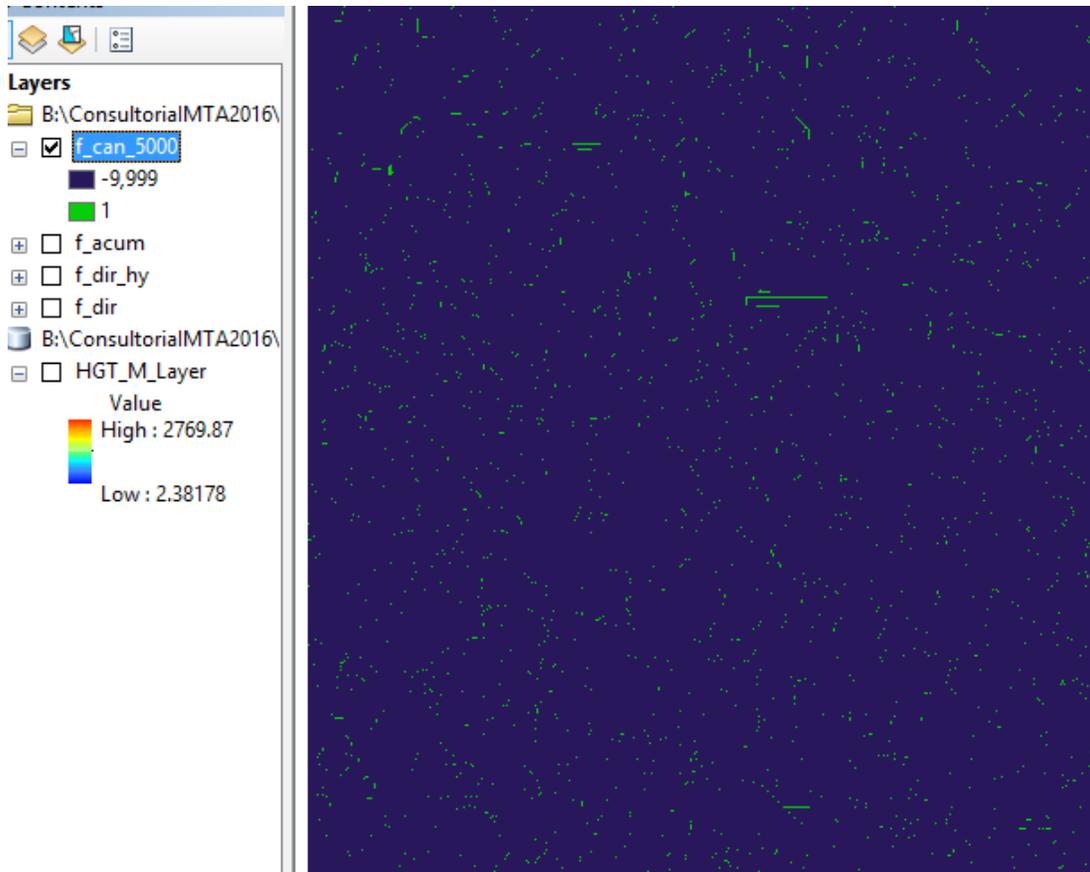


Figura 58. Ejemplo del despliegue de la capa de información “*F\_Can*”, con los canales de corriente representados por las líneas en color verde.

Se recomienda comparar y validar la red de canales generada con ArcGIS con respecto a una red hidrográfica reconocida, por ejemplo la red hidrográfica escala 1:50,000 del INEGI, para las cuencas hidrográficas de trabajo. La información se encuentra disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/Topografia/Descarga.aspx>

### ***3.9.1. Generar la capa de información de la red de canales de corriente en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro***

Una vez que se cuenta con la capa de información “**F\_Can**” de la red de canales de corriente, se deben reclasificar los valores “NoData” a “-9999” y reclasificar a “0” los valores “1”, que representan la red de canales, para evitar errores cuando la capa de información sea utilizada por el modelo WRF-Hydro.

Seleccionar del menú “**Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Reclasificar (Reclass, en inglés)**” y posteriormente seleccionar la opción “**Reclasificar (Reclassify, en inglés)**”, tal como se muestra en la figura 59.

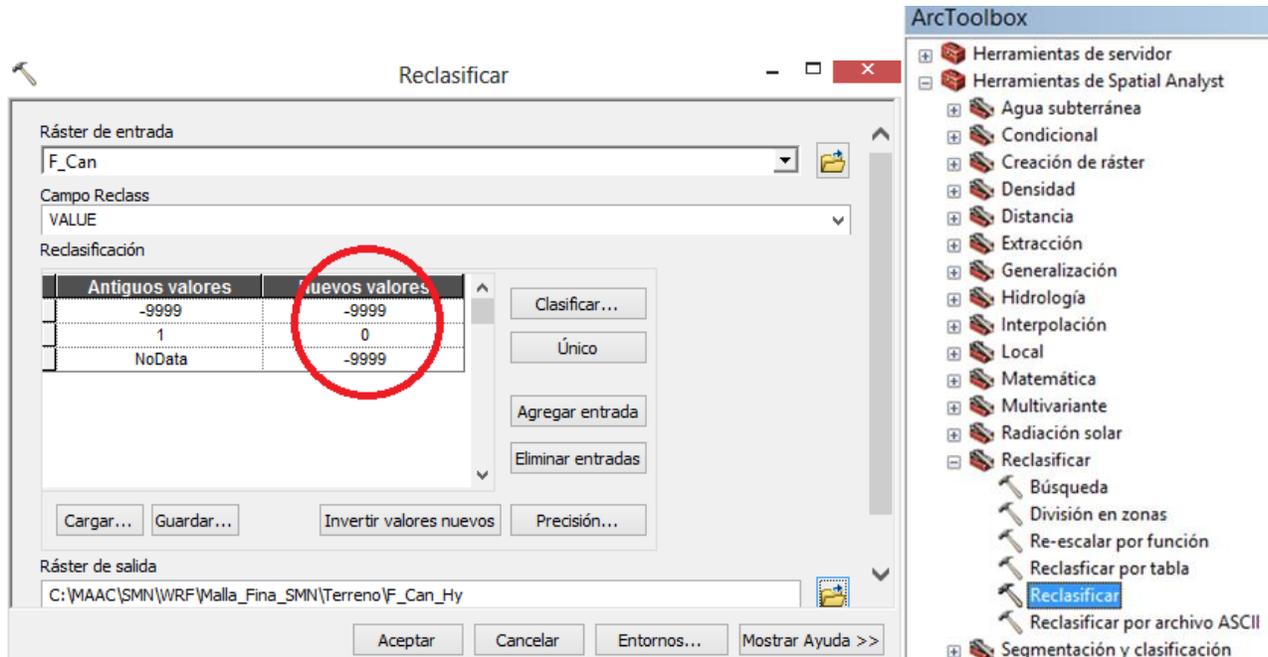


Figura 59. Opción completada para reclasificar valores en una capa ráster.

En la ventana de diálogo “**Reclasificar**” definir las opciones tal como se indica en la figura 59. Seleccionar en la opción “**Ráster de entrada**” la capa “**F\_Can**” con la información de la red de canales de corriente. En la opción “**Campo Reclass**” seleccionar el dato VALUE. En la opción “**Ráster de salida**” indicar la carpeta (ejemplo **Terreno/**) y el nombre “**F\_Can\_Hy**” de la capa de información con los datos reclasificados a ser usada por el WRF-Hydro. En la columna “**Nuevos valores**” asignar un valor de “-9999” al dato “**NoData**” y al dato “1”, asignar un valor de “0” al dato “2”, tal como se indica en el círculo en la figura 59.

Al concluir la ejecución de la herramienta “**Reclasificar (Reclassify, en inglés)**”, se despliega la capa “**F\_Can\_Hy**” con la información de la red de canales de corriente y con valor constante de “-9999” que sustituye el valor “**NoData**”.

### 3.10. Obtener la capa de información de la orden de la corriente en la red de canales para la malla fina del terreno

A partir de las capas de información “**F\_Can**”, con la información de la red de canales de corriente, y “**F\_Dir**”, con la dirección de flujo de salida, se genera la capa de información de la orden de corriente para los tramos de la red de canales de corriente.

Seleccionar del menú “Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Hidrología (Hydrology, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “Clasificación de arroyos (Stream Order, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 60.

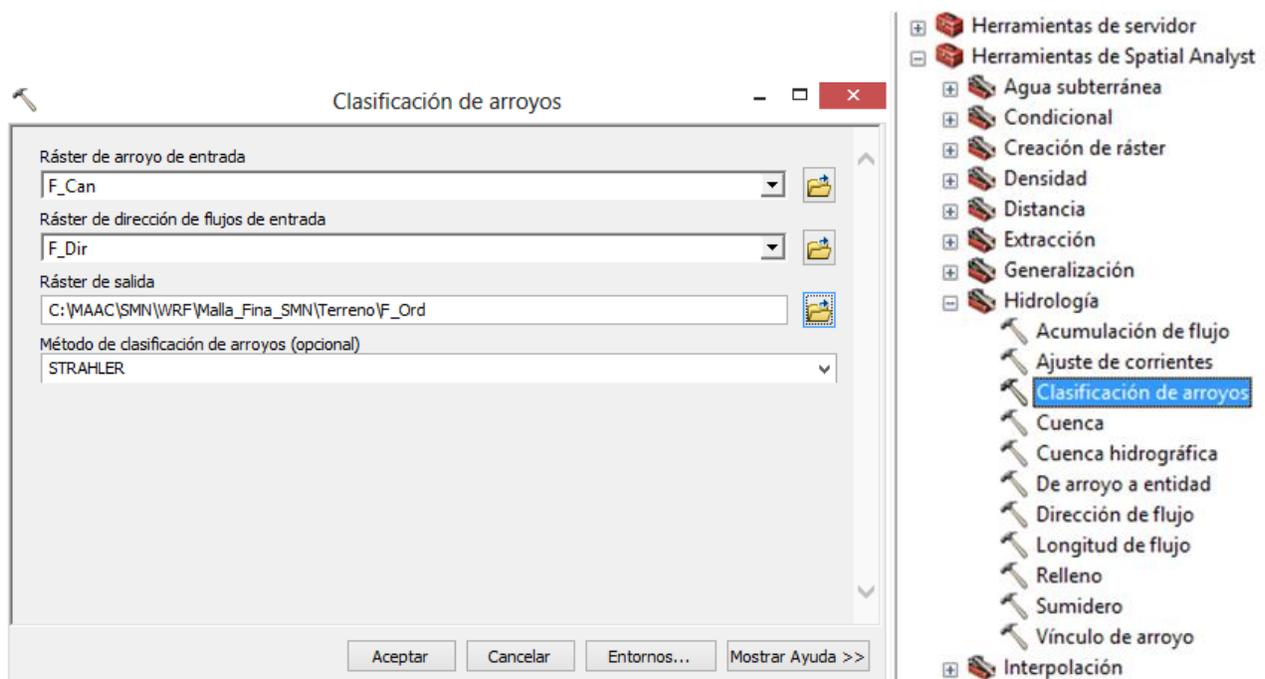


Figura 60. Opción completada para generar la capa con la orden de la corriente de la red de canales en la malla fina del terreno.

En la ventana de diálogo “*Clasificación de arroyos*” definir las opciones tal como se indica en la figura 60. Seleccionar en la opción “*Ráster de arroyo de entrada*” el nombre de la capa “**F\_Can**”, con la información de la red de canales de corriente. En la opción “*Ráster de dirección de flujos de*

*entrada*” seleccionar el nombre de la capa “**F\_Dir**”, que contiene la información de la dirección de salida de los flujos. En la opción “*Ráster de salida*” seleccionar la carpeta y el archivo en el que se guarde la información de la orden de las corrientes (por ejemplo el archivo **F\_Ord** en la carpeta **Terreno**). Seleccionar el método STRAHLER como el “*Método de clasificación de arroyos*” ya que es el que requiere el WRF-Hydro para utilizar la información.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Clasificación de arroyos (Stream Order, en inglés)*”, se despliega la capa “**F\_Ord**” con la información del orden de la corriente para cada sección de la red de canales de corriente, como la que se ejemplifica en la figura 61.

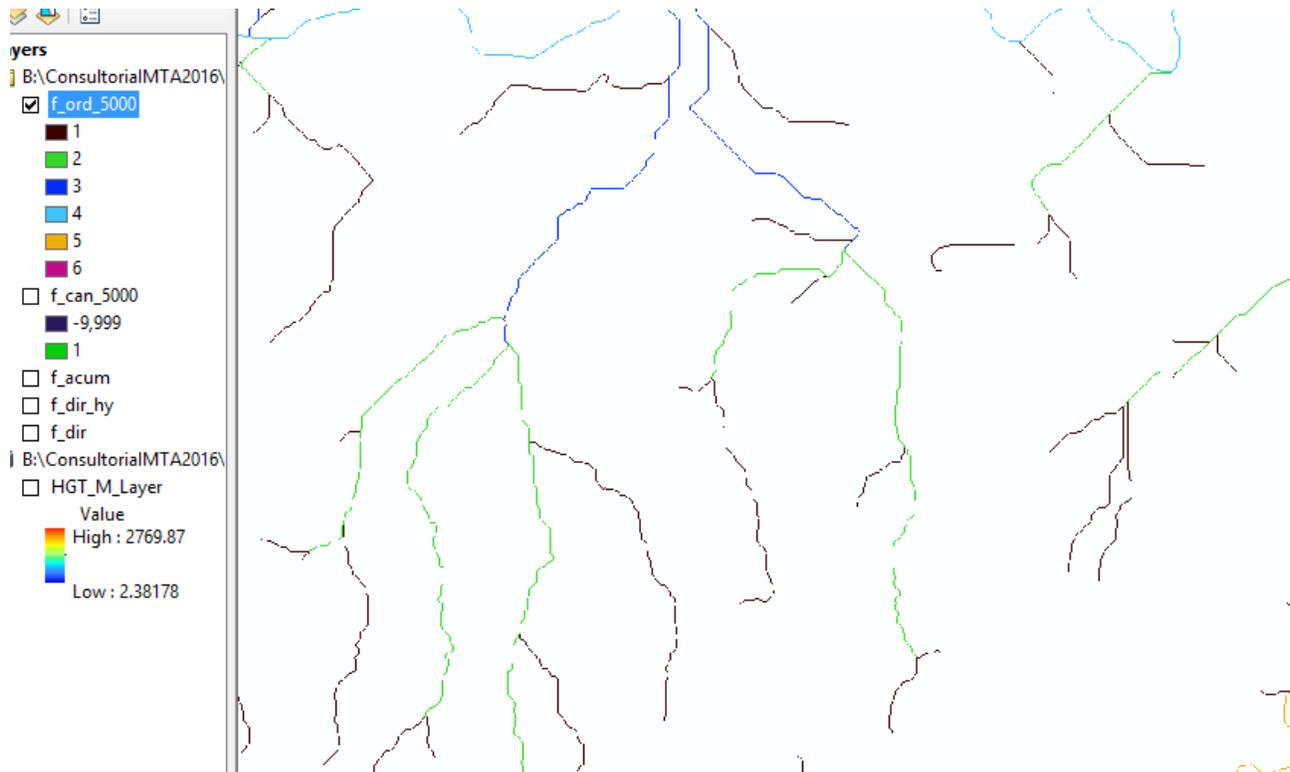


Figura 61. Ejemplo del despliegue de la capa de información “**F\_Ord**” generada con la herramienta “*Clasificación de arroyos*”.

### 3.10.1. Generar la capa de información del orden de corriente de la red de canales de corriente en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro

Una vez que se cuenta con la capa “**F\_Ord**” con la información del orden de la corriente para cada sección de la red de canales de corriente, se deben reclasificar los valores “*NoData*” a “-9999” para evitar errores cuando la capa de información sea utilizada por el modelo WRF-Hydro.

Seleccionar del menú “Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Reclasificar (Reclass, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “Reclasificar (Reclassify, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 62.

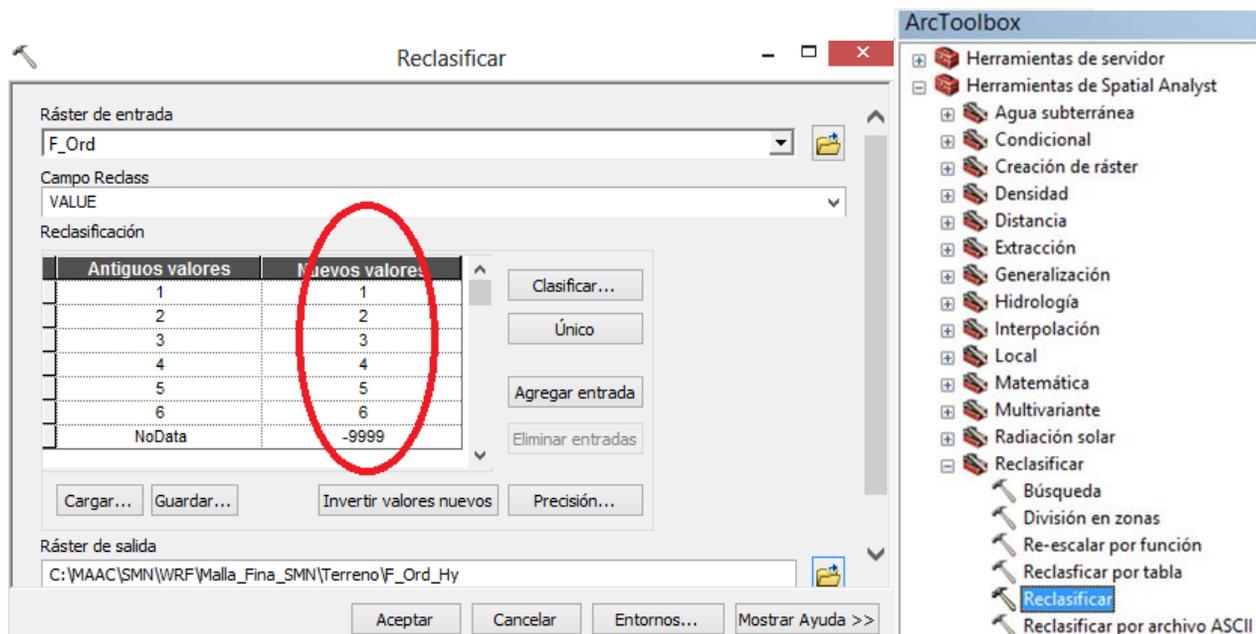


Figura 62. Opción completada para reclasificar valores en una capa ráster.

En la ventana de diálogo “*Reclasificar*” definir las opciones tal como se indica en la figura 62. Seleccionar en la opción “*Ráster de entrada*” la capa “**F\_Ord**” con la información del orden de corriente en la red de canales de corriente. En la opción “*Campo Reclass*” seleccionar el dato VALUE. En la opción “*Ráster de salida*” indicar la carpeta (ejemplo **Terreno/**) y el nombre “**F\_Ord\_Hy**” de la capa de información con los datos reclasificados a ser usada por el WRF-Hydro. En la columna “*Nuevos valores*” asignar un valor de “-9999” al dato “NoData” y mantener sin cambios el resto de los valores, tal como se indica en la elipse en la figura 62.

Al concluir la ejecución de la herramienta “Reclasificar (Reclassify, en inglés)”, se despliega la capa “**F\_Ord\_Hy**” con la información del orden de corriente de la red de canales de corriente y con valor constante de “-9999” que sustituye el valor “NoData”.

### ***3.11. Obtener la capa de información con la ubicación de las estaciones hidrométricas en la malla fina del terreno***

Con el fin de evaluar la simulación del gasto realizada por el WRF-Hydro, se tiene que indicar puntos de control sobre la red de canales de corriente para evaluar los resultados con respecto a datos medidos en estaciones hidrométricas.

Guardar en un archivo de texto, creado en Excel con separación por tabulación, las coordenadas de los puntos de control, retomados de las estaciones hidrométricas incluidas en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). En la figura 63 se muestra en ejemplo con el contenido del archivo separado por tabulación.

Clave	Lat_Modific	Lon_Modific
28003	19.3637	-96.3725
28030	19.4950	-96.5785
28108	19.4215	-96.3800
28111	19.4010	-96.5533
28125	19.3240	-96.6283

Figura 63. Contenido del archivo de texto con las coordenadas de los puntos de control.

### ***3.11.1. Importar el archivo con las coordenadas de los puntos de control***

Proceder a importar el archivo con las coordenadas de los puntos de control. En la barra del menú principal dar clic en “Archivo”. Seleccionar la opción “Añadir datos (Add Data, en inglés)”, posteriormente seleccionar “Agregar datos XY...(Add XY Data, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 64.

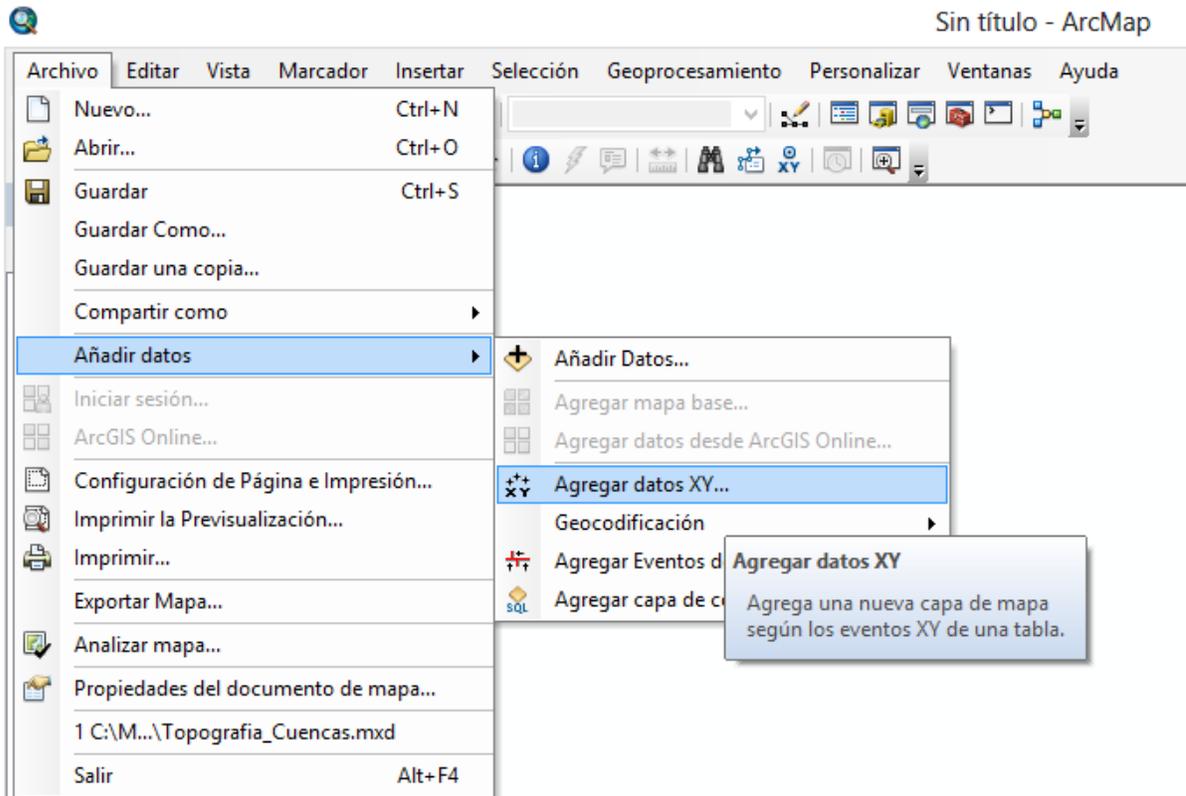


Figura 64. Opción para agregar el archivo con las coordenadas de los puntos de control.

En la ventana de diálogo “*Agregar datos XY*” que se abra definir las opciones tal como se presenta en la figura 65. Seleccionar el archivo con las coordenadas del punto (ej. “***Estaciones-Hidrometricas.txt***”). En la opción “*Campo X*” seleccionar la variable “*Lon\_Modific*”. En la opción “*Campo Y*” seleccionar la variable “*Lat\_Modific*”. Dar clic en el botón “*Editar*”.

**Agregar datos XY** ✕

Una tabla que contiene datos de coordenadas X e Y se puede agregar al mapa como una capa

Elija una tabla del mapa o busque otra tabla:

Estaciones-Hidrometricas\_ 📁

Especifique los campos para las coordenadas X, Y y Z:

Campo X: Lon\_Modific

Campo Y: Lat\_Modific

Campo Z: <Ninguno>

Sistema de coordenadas de las coordenadas de entrada

Descripción:

Sistema de coordenadas proyectadas:  
Name: World\_Mercator

Sistema de coordenadas geográficas:  
Name: GCS\_WGS\_1984

Mostrar Detalles Editar...

Avisar si la capa resultante tiene funcionalidades restringidas

[Acerca de la adición de datos XY](#) Aceptar Cancelar

Figura 65. Opciones para agregar el archivo con las coordenadas de los puntos de control.

Se despliega una ventana de diálogo “*Propiedades de referencia espacial*” en la que se define la coordenada geográfica a asignar a la coordenada del punto. Seleccionar la opción “*Sistemas de coordenadas geográficas*”. De las opciones que se desplieguen, seleccionar la opción “*Mundial*”. De las opciones con las proyecciones geográficas, seleccionar la opción “*WGS 1984*”, tal como se muestra en la figura 66. Dar clic en el botón “*Aceptar*”. Posteriormente, dar clic en el “*Aceptar*” en la ventana de diálogo “*Agregar datos XY*”.

Dar clic en el botón “*Aceptar*” en la ventana que se despliega con el mensaje “*Table does not have object-ID Field*”.

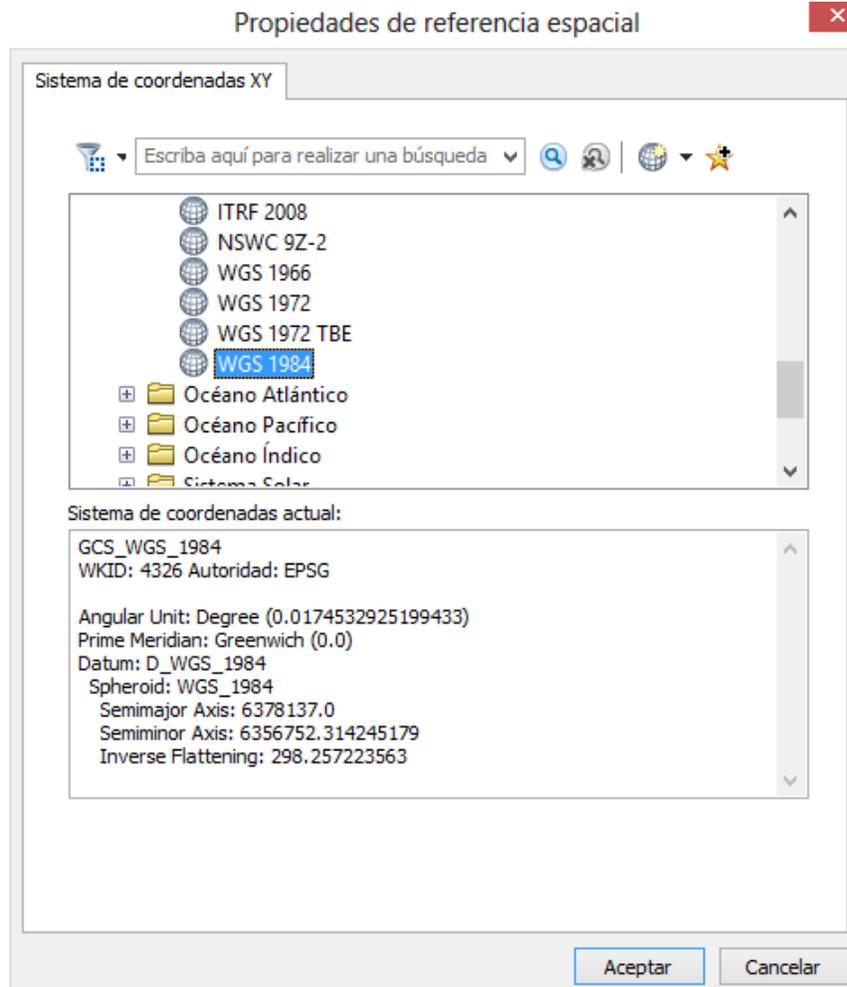


Figura 66. Selección de la coordenada geográfica que se le asigna a las coordenadas de los puntos de control.

Al concluir la ejecución de la herramienta *“Agregar datos XY...(Add XY Data, en inglés)”*, se despliega la capa de información con *“Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt”*, tal como se muestra en la figura 67.

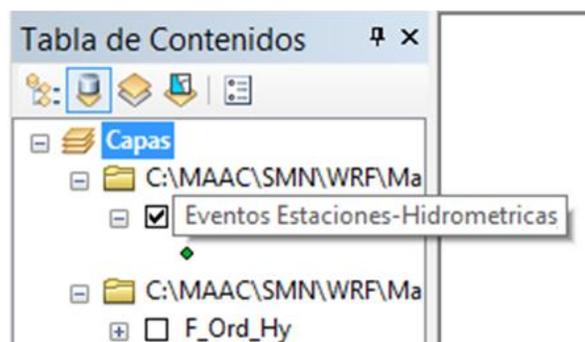


Figura 67. Capa de información “**Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt**” generada durante la importación del archivo con la coordenadas de los puntos de control.

### 3.11.2. Re-proyectar los puntos de control a la referencia espacial de la plantilla

Re-proyectar las coordenadas geográficas de la capa “**Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt**”. Seleccionar del menú “Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Proyecciones y Transformaciones (Projections and Transformations, en inglés)”, posteriormente seleccionar “Proyectar (Project, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 68.

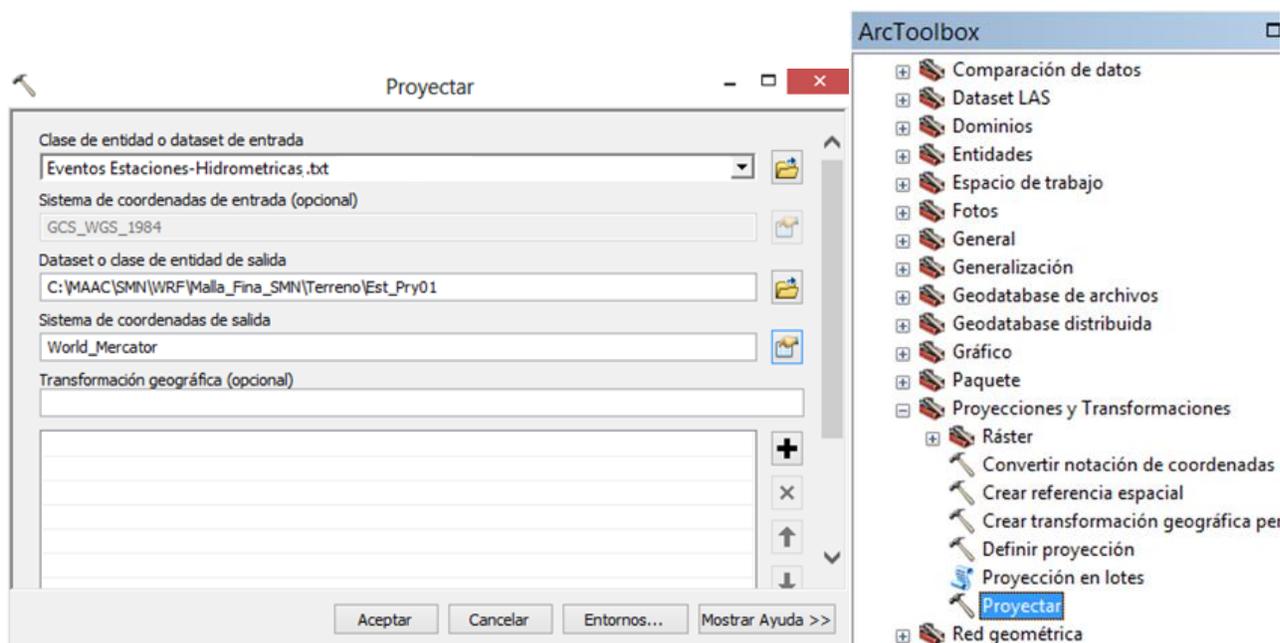


Figura 68. Selección y complementación de la opción para re-proyectar las coordenadas de la capa “**Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt**”.

En la ventana de diálogo “*Proyectar*” definir las opciones tal como se indica en la figura 68. Seleccionar en la opción “*Clase de entidad o dataset de entrada*” la capa de información “**Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt**”. En la opción “*Dataset o clase de entidad de salida*” seleccionar la carpeta y el nombre del archivo con las coordenadas re-proyectadas (ejemplo “**Est\_Pry**”). Dar clic en la opción “*Sistema de coordenadas de salida*”.

Se despliega la ventana de diálogo “*Propiedades de referencia espacial*”. Seleccionar la opción “*Sistemas de coordenadas proyectadas*”. A continuación seleccionar la opción “*Mundial*”. Del listado de proyecciones, seleccionar la opción “*Mercator (mundial)*”, tal como se muestra en la figura 69. La

proyección *Mercator* coincide con la proyección utilizada en el WPS y el WRF, definida en el archivo ***“namelist.wps”***, revisar el anexo 1 con la descripción de las opciones del archivo.

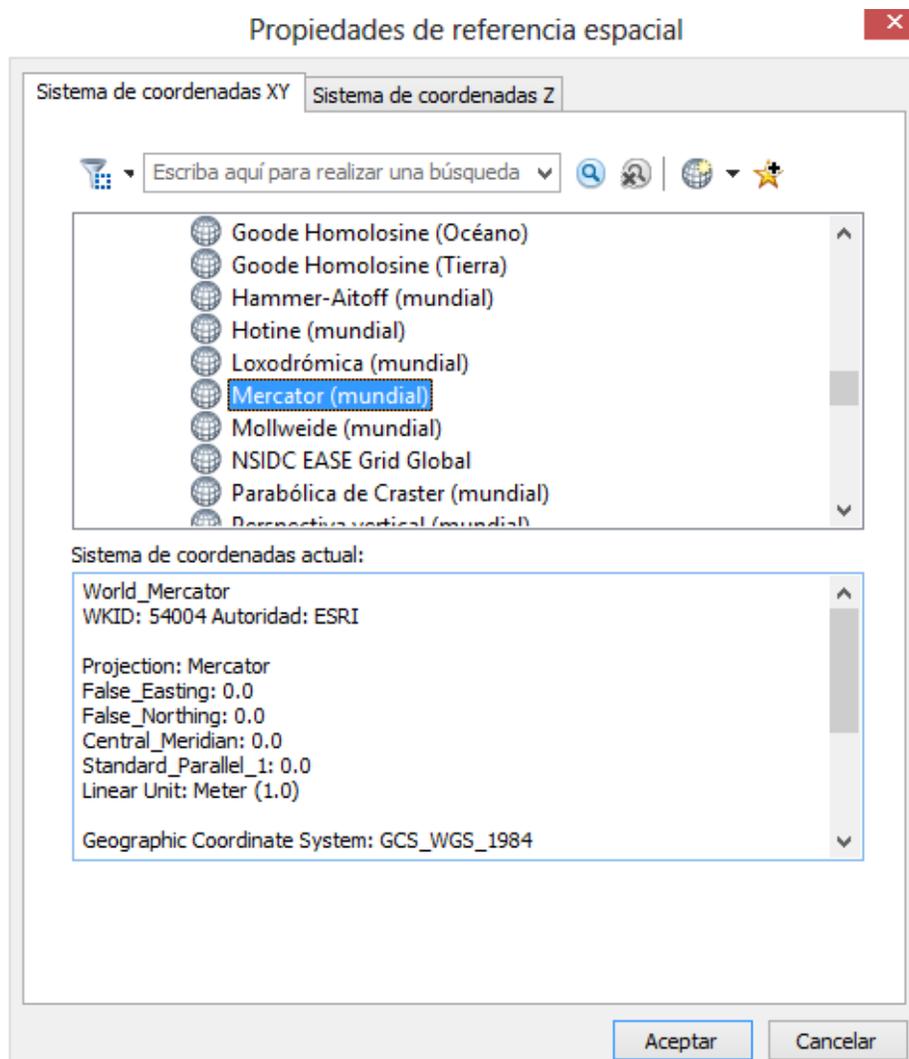


Figura 69. Selección del sistema geográfico al que se re-proyectan las coordenadas de la capa ***“Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt”***.

Dar doble clic a la opción ***“Mercator (mundial)”*** y asignar los valores de ***“Central\_Meridian”*** y ***“Standard\_Parallel\_1”*** de acuerdo con la información de los atributos globales y proyección espacial del archivo ***“encabezado.txt”*** del archivo ***“geo\_em.d03.nc”***, tal como se muestra en la figura 70. En la figura 71 se muestran los datos completados para la proyección *Mercator*.

Dar clic en el botón ***“Aceptar”***, posteriormente en la ventana de diálogo ***“Propiedades de referencia espacial”*** dar clic en el botón ***“Aceptar”*** y a continuación dar clic en el botón ***“Aceptar”*** en la ventana de diálogo ***“Proyectar”***, tal como se muestra en la figura 68.

```
// global attributes:
:TITLE = "OUTPUT FROM GEOGRID V3.6" ;
:SIMULATION_START_DATE = "0000-00-00_00:00:00" ;
:CEN_LAT = 19.46432f ;
:CEN_LON = -96.84007f ;
.
.
.
:TRUELAT1 = 22.5f ;
:TRUELAT2 = 0.f ;
:MOAD_CEN_LAT = 22.49999f ;
:STAND_LON = -102.f ;
:POLE_LAT = 90.f ;
:POLE_LON = 0.f ;
```

Figura 70. Sección “global attributes” del archivo “encabezado.txt” con las variables para la re-proyección geográfica.

Propiedades del sistema de coordenadas proyectadas ✕

General

Nombre:

Proyección

Nombre:

Parámetro	Valor
False_Easting	0.000000000000000000
False_Northing	0.000000000000000000
Central_Meridian	-102.0000000000000000
Standard_Parallel_1	22.5000000000000000

Unidad lineal

Nombre:

Metros por unidad:

Sistema de coordenadas geográficas

Name: GCS\_WGS\_1984  
Angular Unit: Degree (0.0174532925199433)  
Prime Meridian: Greenwich (0.0)  
Datum: D\_WGS\_1984  
Spheroid: WGS\_1984  
Semimajor Axis: 6378137.0

Figura 71. Definición de los valores para la re-proyección geográfica de las coordenadas de la capa “**Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt**”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “**Proyectar (Project, en inglés)**”, se genera el archivo “**Est\_Pry.shp**”, en la carpeta que se indicó en la opción “**Dataset o clase de entidad de salida**”, en la ventana de diálogo “**Proyectar**”.

### 3.11.3. Cargar el archivo con las coordenadas re-proyectadas de los puntos

Proceder a cargar el archivo “**Est\_Pry.shp**” que contiene las coordenadas re-proyectadas de los puntos de control. Seleccionar del menú “**Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Entidades (Features, en inglés)**”, posteriormente seleccionar “**Agregar coordenadas XY (Add XY Coordinates, en inglés)**”, tal como se muestra en la figura 72.

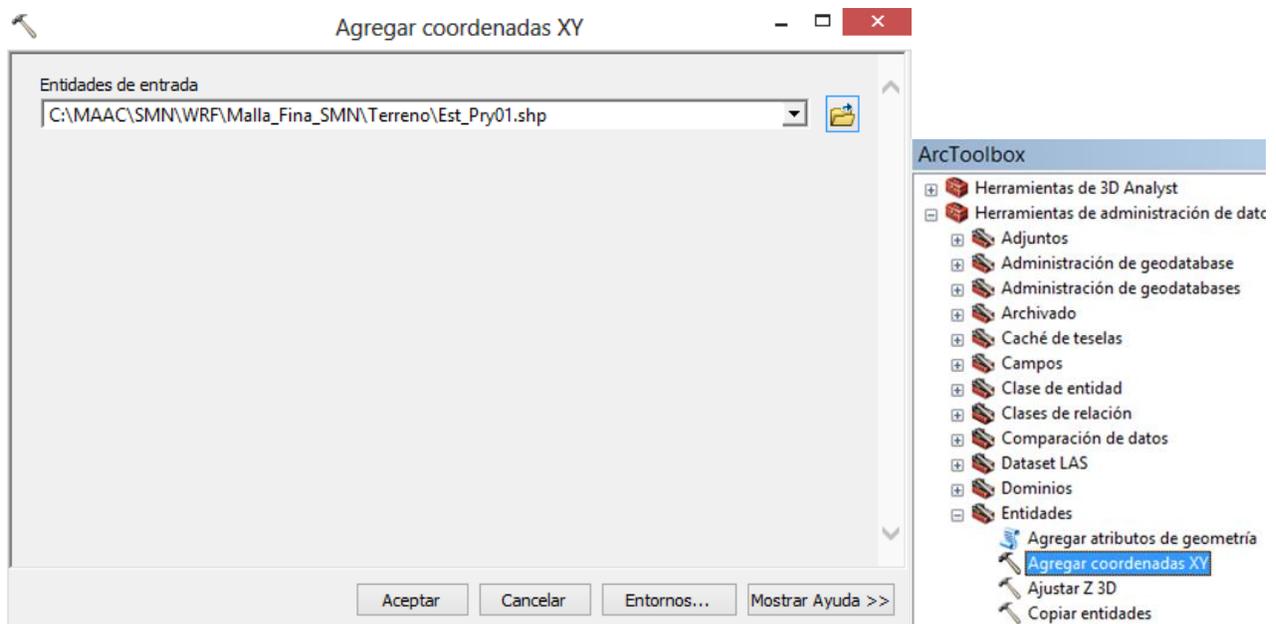


Figura 72. Opción completada para agregar archivo “**Est\_Pry.shp**” con las coordenadas re-proyectadas de la capa “**Eventos Estaciones-Hidrometricas.txt**”.

En la ventana de diálogo “Agregar coordenadas XY” definir las opciones tal como se indica en la figura 72. Seleccionar en la opción “Entidad de entrada” el archivo “**Est\_Pry.shp**”, con la ruta completa de la carpeta en la que se encuentra. Dar clic en el botón “Aceptar”.

### 3.11.4. Verificar la ubicación de los puntos de control sobre la red de canales de corriente

Ajustar las opciones del área de trabajo. Dar clic al botón derecho del ratón sobre el espacio en el que se despliegan las capas, para desplegar el menú con el que se ajustan las propiedades del área de trabajo. Seleccionar “**Propiedades del Marco de Datos ... (Data Frame Properties..., en inglés)**” (figura 73.a).

En la ventana de diálogo “Propiedades de Marco de Datos” seleccionar la pestaña “General”. En el menú “Visualización” seleccionar “Grados Decimales” (figura 73.b).

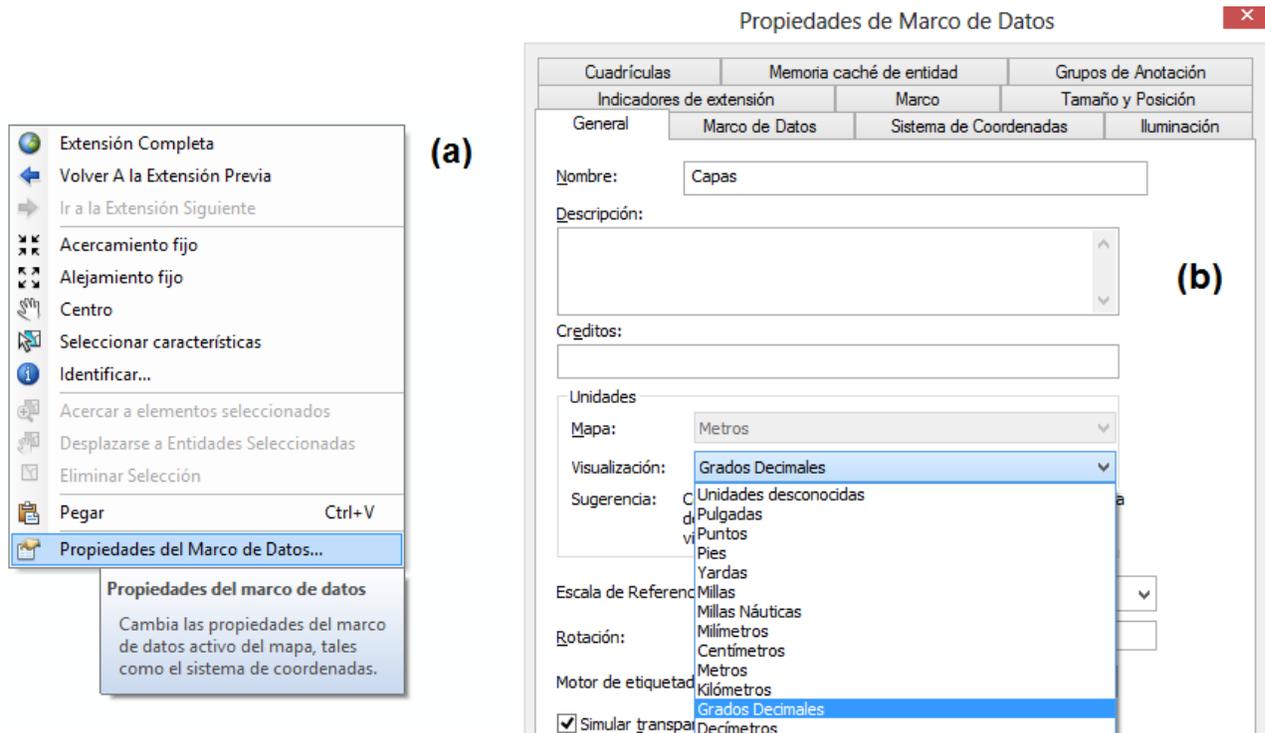


Figura 73. Ajuste de la visualización de los datos en el área de trabajo.

Desplegar la capa “**F\_Ord**” con la información del orden de flujo, y sobreponer la capa “**Est\_Pry**”. Ampliar el mapa sobre la ubicación de los puntos de control y verificar que coincida con las celdas que representan la red de canales de corriente, tal como se ejemplifica en la figura 74.



Figura 74. Capa con la ubicación de los puntos de control sobrepuesta a la capa del orden de corriente de la red de canal de corrientes.

En caso de que los puntos de control se encuentren fuera de la red de los canales de corriente, tomar nota de las coordenadas de la celda más cercana en la red del canal al punto de control, desplegados en la parte inferior izquierda de la ventana de trabajo marcada con la elipse en la figura 74. Modificar el valor de la coordenada en el archivo de texto (ej. “**Estaciones-Hidrometricas.txt**”) y repetir los pasos de la sección 3.11.1 a 13.11.4.

### 3.11.5. Convertir a ráster el archivo con los puntos de control

Proceder a convertir a ráster el archivo “**Est\_Pry.shp**” que contiene las coordenadas re-proyectadas de los puntos de control. Seleccionar del menú “Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “A ráster (To Ráster, en inglés)”, posteriormente seleccionar “De punto a ráster (Point to Ráster, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 75.

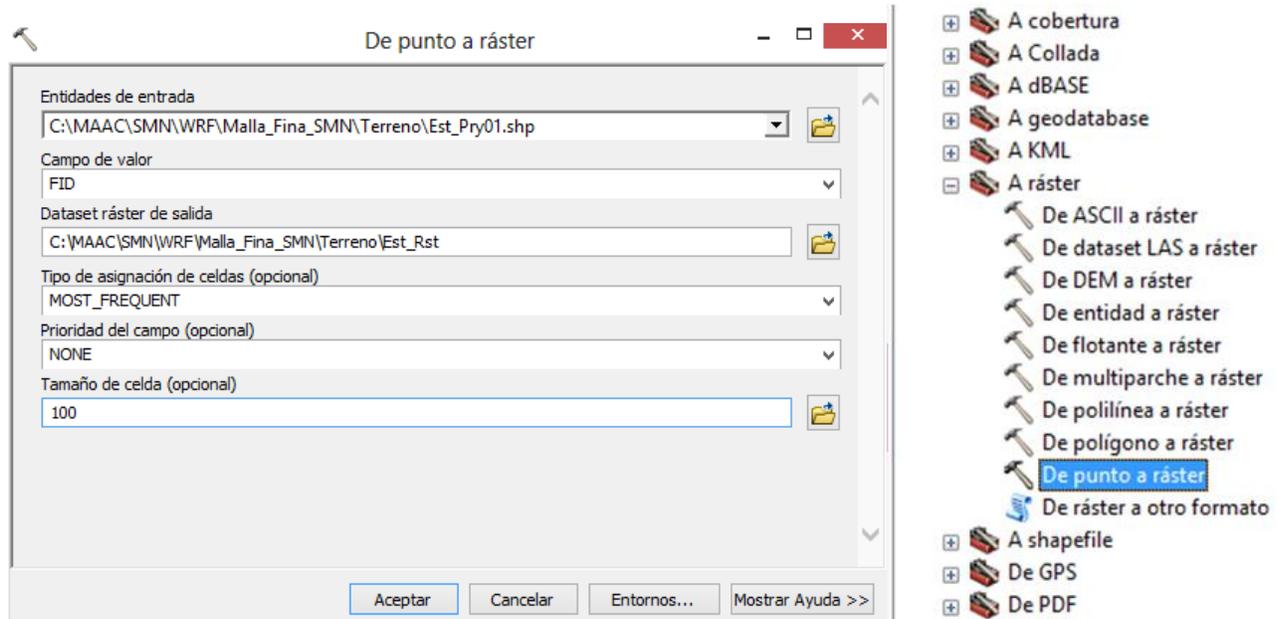


Figura 75. Opción completada para convertir un archivo de punto a ráster.

En la ventana de diálogo “*De punto a ráster*” definir las opciones tal como se indica en la figura 75. Seleccionar en la opción “*Entidades de entrada*” el archivo “**Est\_Pry.shp**”, con la ruta completa de la carpeta en la que se encuentra. En la opción “*Dataset ráster de salida*” indicar la carpeta y el nombre del archivo a generar, por ejemplo el archivo “**Est\_Rst**” en la carpeta **Terreno/**. En la opción “*Tamaño de celda*”, indicar un valor del tamaño para la celda fina, ejemplo 30 o 100 mts, el cual corresponde con la resolución de la malla fina del terreno. Dar clic en el botón “*Aceptar*”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*De punto a ráster (Point to Ráster, en inglés)*”, se genera la capa “**Est\_Rst**” con la información de la ubicación de los puntos de control.

### ***3.11.6. Generar la capa de información con la ubicación de los puntos de control en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro***

Una vez que se cuenta con la capa “**Est\_Rst**” con la información de la ubicación verificada de los puntos de control, se deben reclasificar los valores “*NoData*” a “-9999” para evitar errores cuando la capa de información sea utilizada por el modelo WRF-Hydro.

Seleccionar del menú “Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Reclasificar (Reclass, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “Reclasificar (Reclassify, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 76.

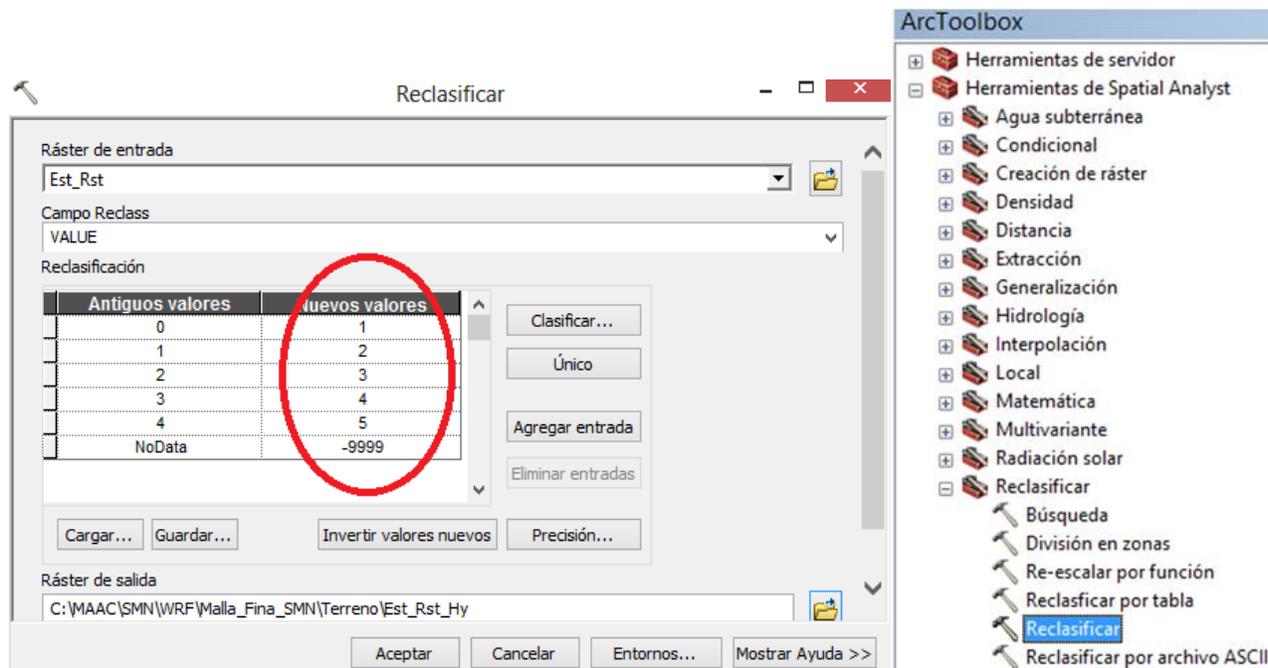


Figura 76. Opciones completadas para reclasificar valores en una capa ráster.

En la ventana de diálogo “Reclasificar” definir las opciones tal como se indica en la figura 76. Seleccionar en la opción “Ráster de entrada” la capa “Est\_Rst” con la información de la ubicación de los puntos de control. En la opción “Campo Reclass” seleccionar el dato VALUE. En la opción “Ráster de salida” indicar la carpeta (ejemplo Terreno/) y el nombre “Est\_Rst\_Hy” de la capa de información con los datos reclasificados a ser usada por el WRF-Hydro. En la columna “Nuevos valores” asignar un valor de “-9999” al dato “NoData” y mantener el resto de los datos sin cambios”, tal como se indica en el círculo en la figura 76.

Al concluir la ejecución de la herramienta “Reclasificar (Reclassify, en inglés)”, se despliega la capa “Est\_Rst\_Hy” con la información de la ubicación de los puntos de control y con valor constante de “-9999” que sustituye el valor “NoData”, representado por el área de color café en la figura 77.

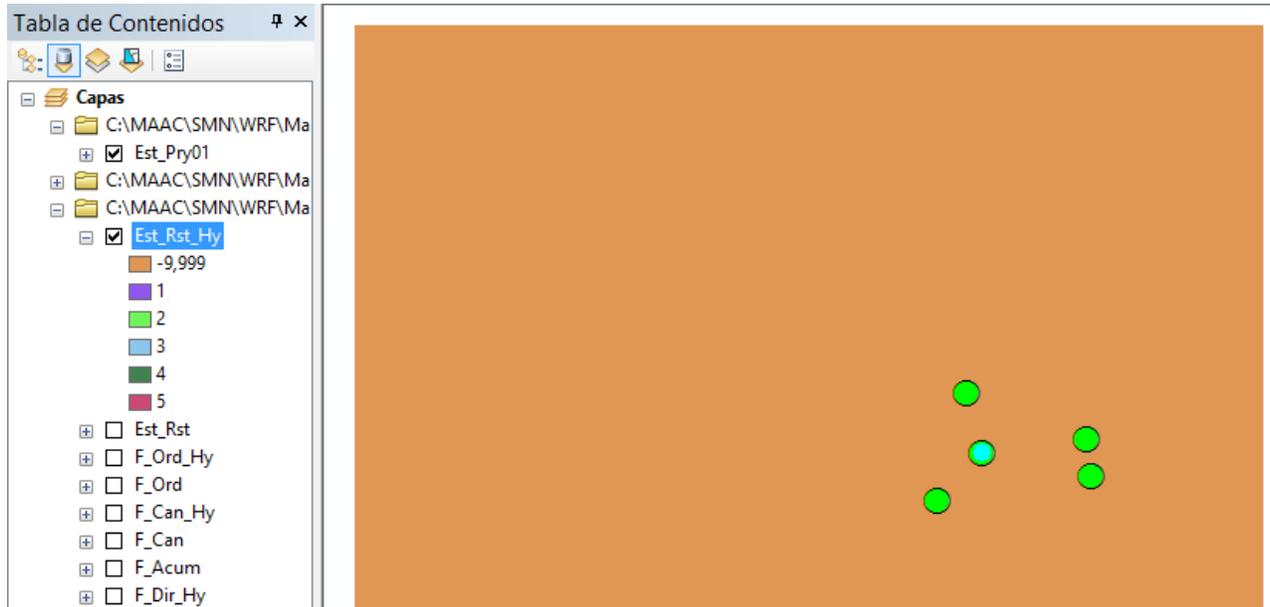


Figura 77. Despliegue de la capa de información “Est\_Rst\_Hy” generada con la herramienta “Reclasificar”.

### 3.12. Obtener la capa de información Lagos/Embalses

#### 3.12.1. Capa con valores constantes -9999

Generar la capa de información de los lagos opcionalmente si se encuentran presentes en el dominio de trabajo considerado para correr el modelo WRF-Hydro.

**Nota:** En caso de que no existan lagos/embalses en el dominio de trabajo, se debe generar una capa de información con valores constantes de “-9999”. Seleccionar del menú “Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Álgebra de mapas (Map Algebra, en inglés)”, y posteriormente la opción “Calculadora ráster (Raster Calculator, en inglés)” tal como se muestra en la figura 78.

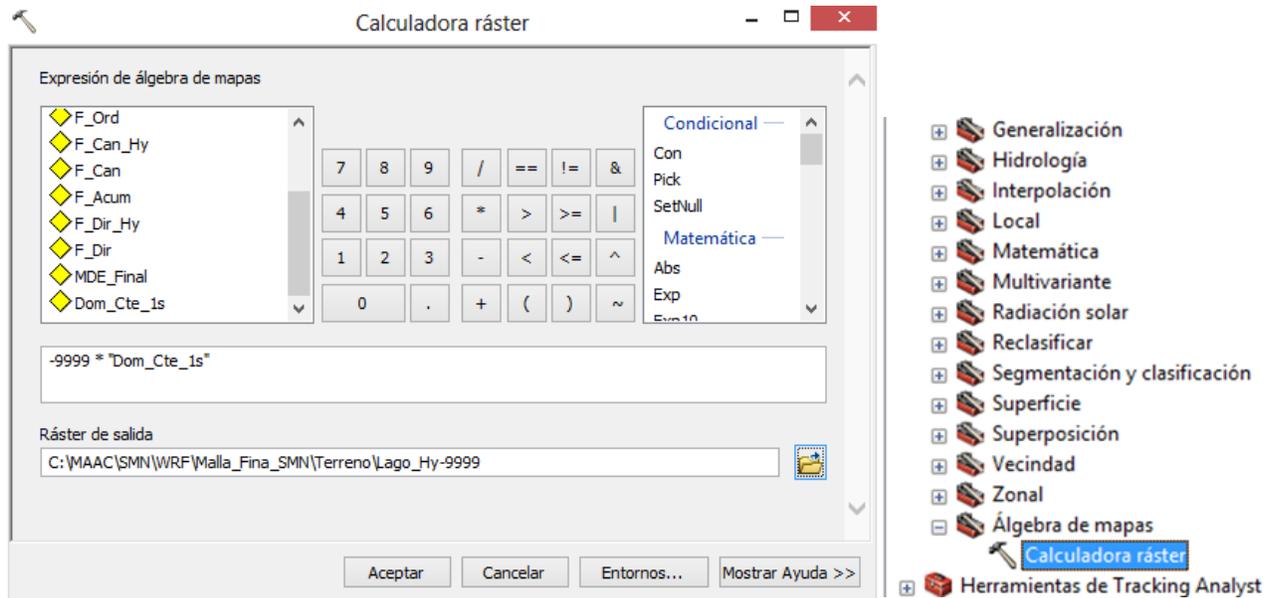


Figura 78. Opciones completadas en la calculadora de álgebra de mapas para generar una capa con valores constantes de -9999.

En la ventana de diálogo “*Calculadora ráster*” multiplicar con la calculadora de álgebra de mapas el dominio con valor entero constante de “1”, generado con los pasos de la sección 3.4.1 y 3.4.2, por un valor de “-9999”, tal como se muestra en la figura 78. En la opción “*Ráster de salida*” indicar la carpeta y el nombre del archivo que se genere, por ejemplo el archivo “**Lago\_Hy-9999**” en la carpeta **Terreno/**.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Calculadora ráster*”, se obtiene el MDE con resolución de para la malla fina y con las mismas características (extensión y proyección) que el archivo de “**plantilla\_ism**”, tal como se muestra en la figura 79.

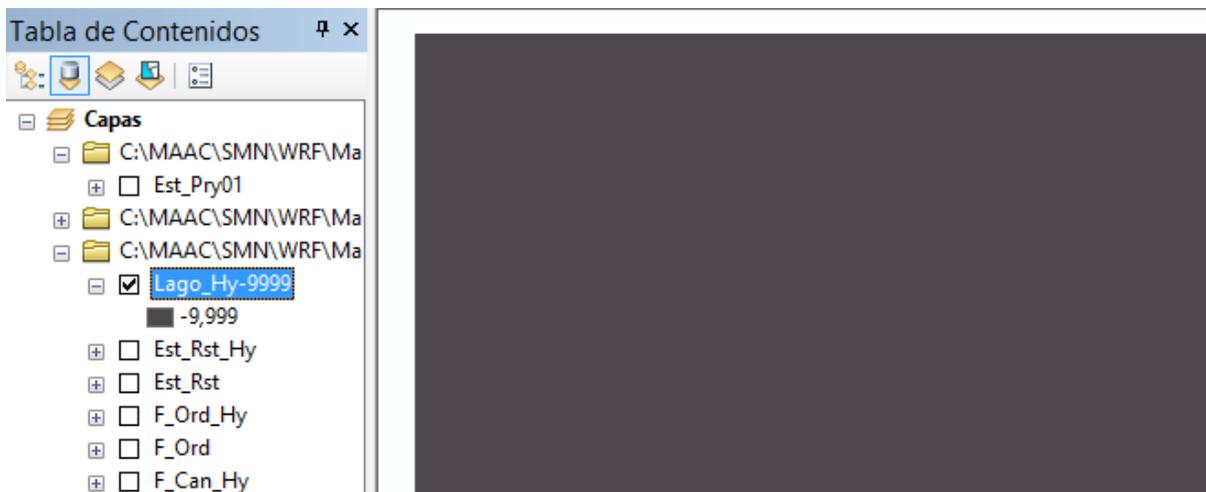


Figura 79. Despliegue de la capa de información “Lago\_Hy-9999” con valores constantes de -9999.

### 3.12.2. Acceder a la información de lagos/embalses

Si existen lagos/embalses en el dominio de trabajo, obtener una cobertura de lagos/embalses de buena calidad (ej, un shapefile).

Acceder a los datos, por ejemplo a la página del INEGI <http://gaia.inegi.org.mx/> y seleccionar un lago como objeto (figura 80). Exportar el polígono definido y guardarlo en una carpeta de trabajo, ejemplo **Lagos/**. El formato del archivo descargado es KML.

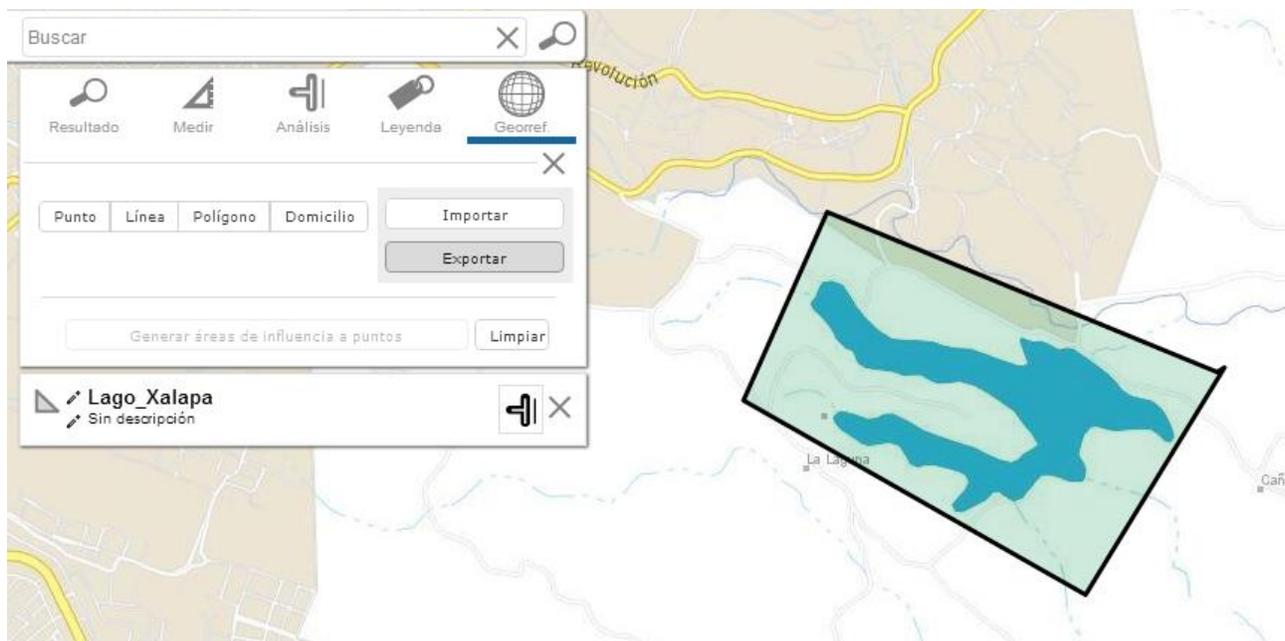


Figura 80. Selección y descarga de la capa de información de un lago desde el sitio Web del Mapa digital de México del INEGI. INEGI, 2016. <http://gaia.inegi.org.mx/>

### 3.12.3. Importar en ArcGIS la capa de lagos/embalses

Importar la capa de información del polígono del lago, para este caso conformato \*.kml. Seleccionar del menú “Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Desde KML (From KML, en inglés)” y a continuación seleccionar la opción “De KML a capa (KML to Layer, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 81.

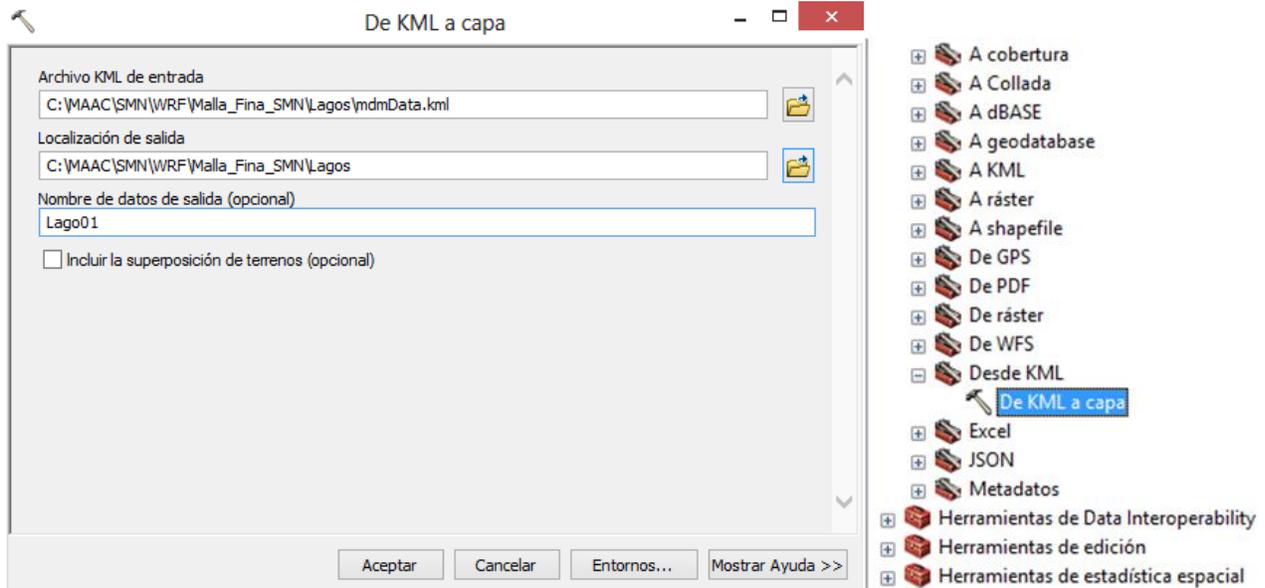


Figura 81. Opción completada para importar en ArcGIS la capa con información de un lago en formato KML.

En la ventana que se despliegue “*De KML a capa*”, definir las opciones tal como se indica en la figura 81. Seleccionar en la opción “*Archivo KML de entrada*” la capa de información con el polígono del lago, por ejemplo “***mdmData.kml***”. En la opción “*Localización de salida*” seleccionar la carpeta donde se guardarán los archivos procesados, ejemplo **Lagos/**. En la opción “*Nombre de datos de salida*” indicar el nombre del archivo con la información del polígono del lago, por ejemplo “**Lago001**”. Dar clic en el botón “*Aceptar*”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “***De KML a capa (KML to Layer, en inglés)***”, se genera la base de datos “**Lago001.gdb**”, tal como se ejemplifica en la figura 82.

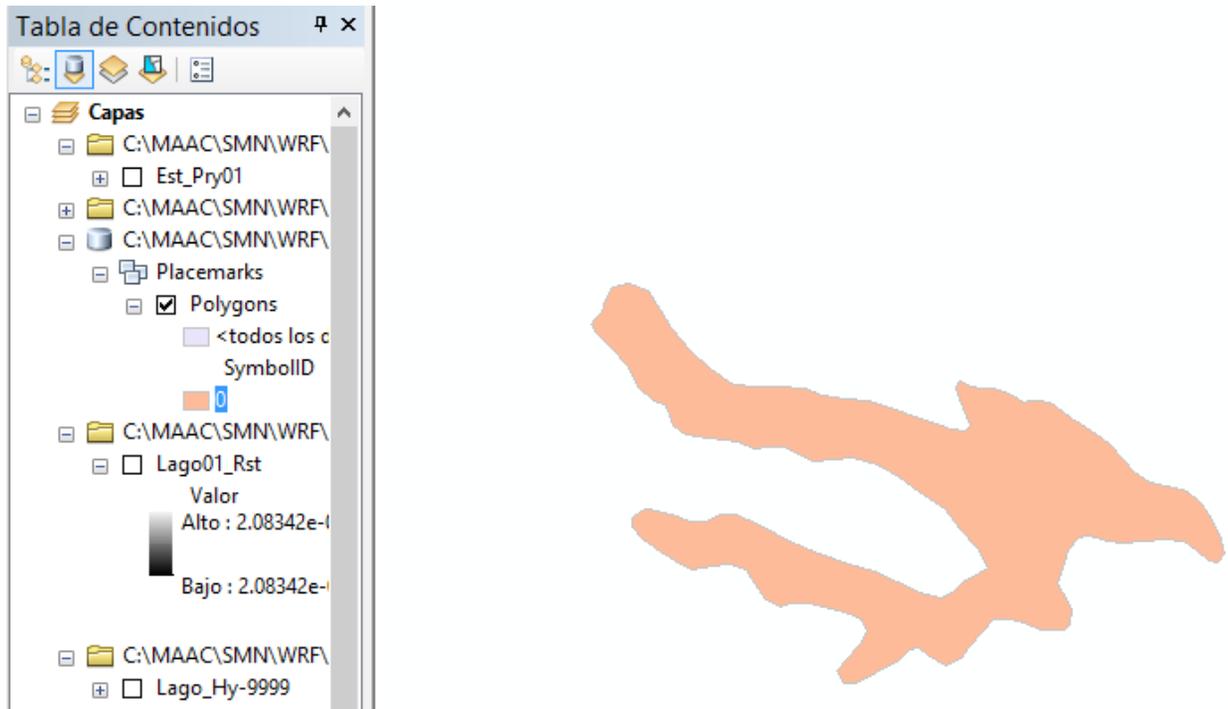


Figura 82. Ejemplo del despliegue de la capa del lago importado con ArcGIS.

Proceder a convertir la capa de información del lago del tipo polígono a ráster. Seleccionar del menú **Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)**, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción **A ráster (To Raster, en inglés)** y a continuación seleccionar la opción **De polígono a ráster (Polygon to Raster, en inglés)**, tal como se muestra en la figura 83.

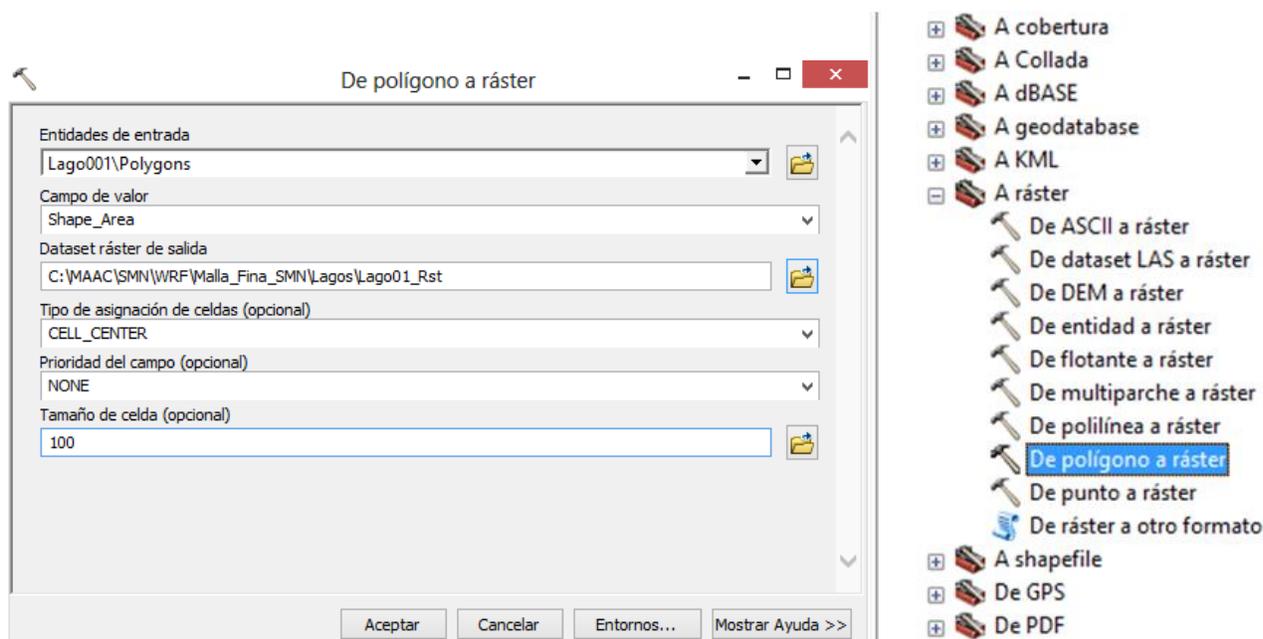


Figura 83. Opción completada para convertir un archivo con información de un lago, de tipo polígono a ráster.

En la ventana que se despliegue “*De polígono a ráster*”, definir las opciones tal como se indica en la figura 83. Seleccionar en la opción “*Entidades de entrada*” la capa de información con el polígono del lago, por ejemplo “**Polygons**”. En la opción “*Campo valor*” seleccionar “**SHAPE AREA**” del listado que se despliegue. En la opción “*Dataset ráster de salida*” indicar la carpeta y el nombre del archivo con la información del polígono, por ejemplo el archivo “**Lago01\_Rst**” en la carpeta **Lagos/**. En la opción “*Tamaño de celda*” indicar un valor de 30 o cualquier otro que corresponda a la malla fina del terreno. El resto de las opciones mantenerlas sin cambios. Dar clic en la opción “*Sistema de coordenadas de salida*”. Dar clic en el botón “**Aceptar**”.

**Nota:** Asegurarse que la extensión espacial del dominio y el tamaño de malla están correctamente definidos para que coincida con el resto de las capas de información.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*De polígono a ráster (Polygon to Ráster, en inglés)*”, se genera la capa “**Lago01\_Rst**”, tal como se muestra en la figura 84 sobrepuesta al polígono del lago (en color rosa).

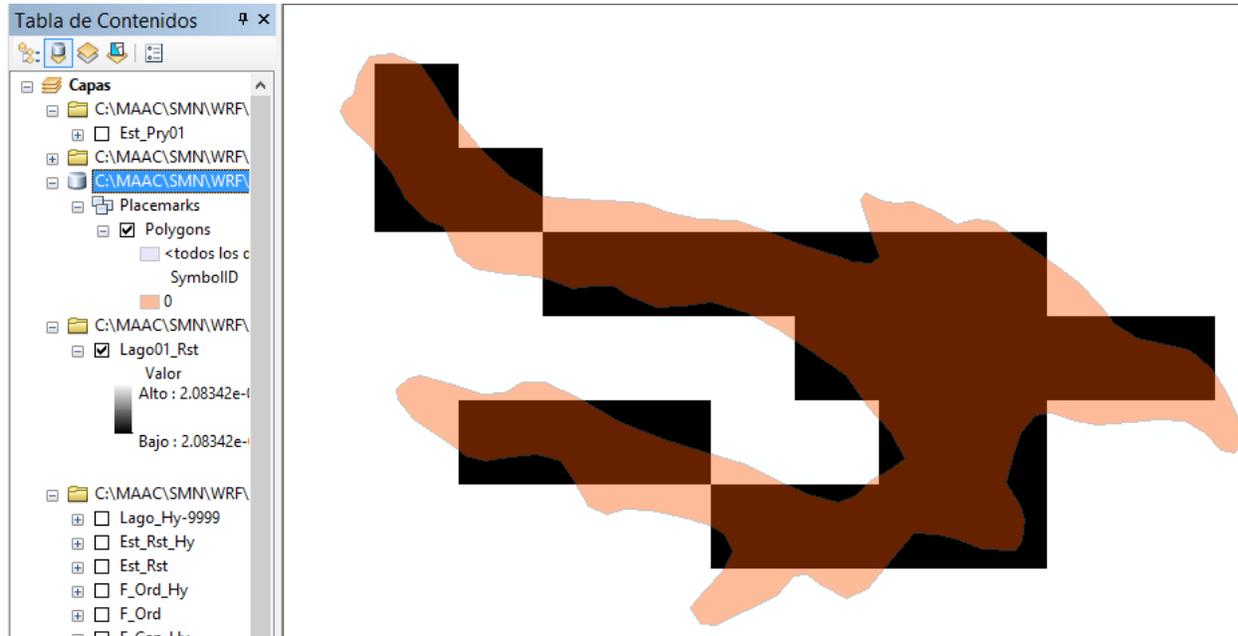


Figura 84. Despliegue de la capa “**Lago01\_Rst**” con el lago en formato ráster, sobrepuesto al polígono del lago.

**Nota:** Repetir el procedimiento indicado en la [sección 3.12.2](#) y [3.12.3](#) para el total de lagos/embalses que se encuentren en el dominio de trabajo.

### ***3.12.4. Re-proyectar la capa de los lagos/embalses a la referencia espacial de la plantilla***

Aplicar los pasos de la [sección 3.2](#) para re-proyectar la proyección geográfica de la capa de información “**Lago01\_Rst**”. La capa cuenta con la proyección espacial WGS\_1984.

Seleccionar del menú “**Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Proyecciones y transformaciones (Projections and Transformations, en inglés)**”. A continuación seleccionar la opción “**Ráster (Define Projection, en inglés)**” y posteriormente seleccionar la opción “**Proyectar ráster (Project Ráster, en inglés)**”, tal como se muestra en la figura 85.

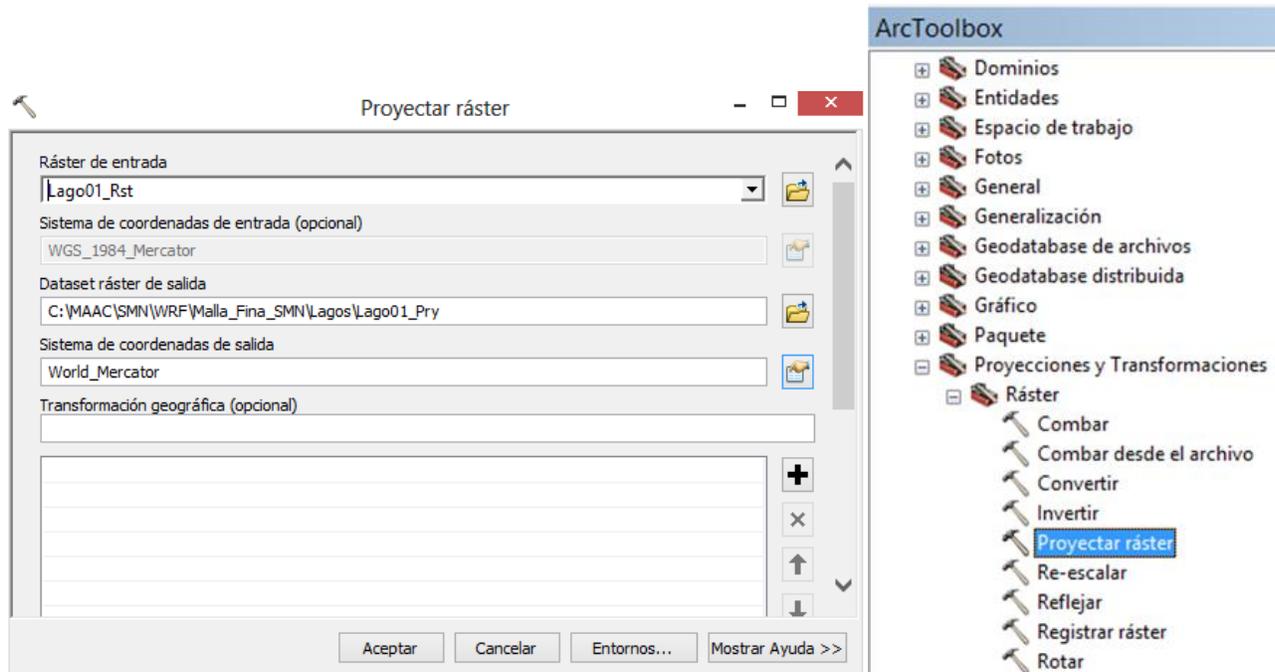


Figura 85. Opciones completadas para re-proyectar la referencia espacial de la capa ráster de un lago en las cuencas de trabajo.

En la ventana de diálogo “*Proyectar ráster*” definir las opciones tal como se indica en la figura 85. Seleccionar en la opción “*Ráster de entrada*” la capa de información “**Lago01\_Rst**”. En la opción “*Dataset ráster de salida*” seleccionar la carpeta y el nombre del archivo con las coordenadas re-proyectadas (ejemplo “**Lago01\_Pry**” en la carpeta **Lagos/**). Dar clic en la opción “*Sistema de coordenadas de salida*”.

Se despliega la ventana de diálogo “*Propiedades de referencia espacial*”. Seleccionar la opción “*Importar*” como se muestra en la figura 86.

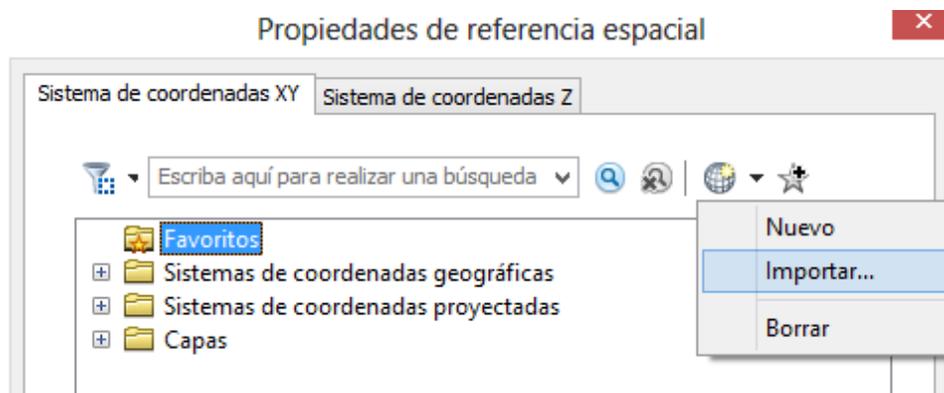


Figura 86. Selección de la opción “*Importar*” para definir la proyección de la capa ráster de un lago en las cuencas de trabajo.

En la ventana que se despliegue, seleccionar el archivo “**Punto\_Pry.shp**” con las coordenadas re-proyectadas del punto que se encuentra en el directorio **Plantilla/**, generado en la sección 2.2.6 (figura 87). Dar clic en el botón “*Aceptar*”, posteriormente en la ventana de diálogo “*Propiedades de referencia espacial*” dar clic en el botón “*Aceptar*” y a continuación de clic en el botón “*Aceptar*” en la ventana de diálogo “*Proyectar ráster*”, tal como se muestra en la figura 87.

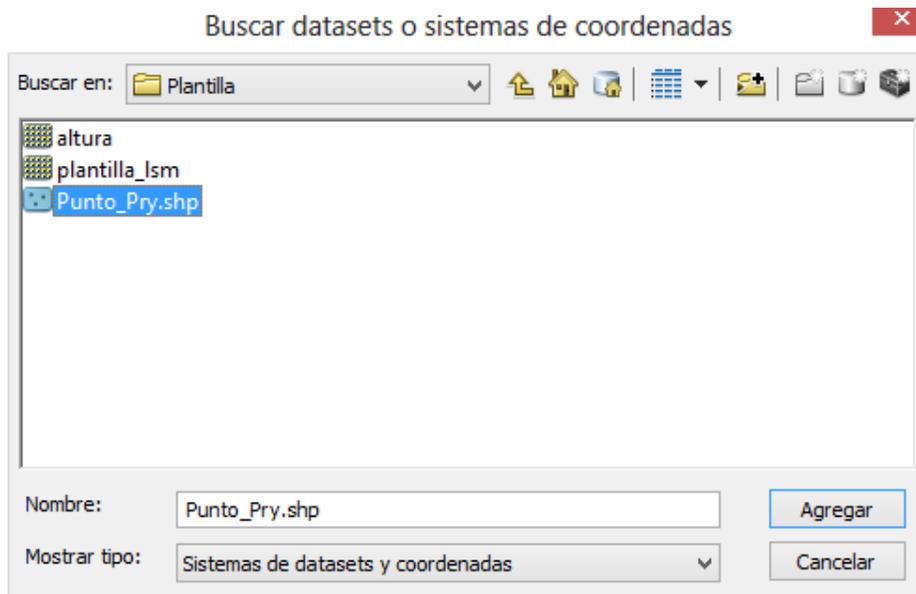


Figura 87. Selección del archivo “*Punto\_Pry.shp*” con la coordenada re-proyectada.

Al concluir la ejecución de la herramienta “***Proyectar ráster (Project Ráster)***”, se genera la capa “***Lago01\_Pry***” en el que está re-proyectada a la referencia espacial *Mercator* la capa ráster de un lago en las cuencas de trabajo, como se ejemplifica en la figura 88.

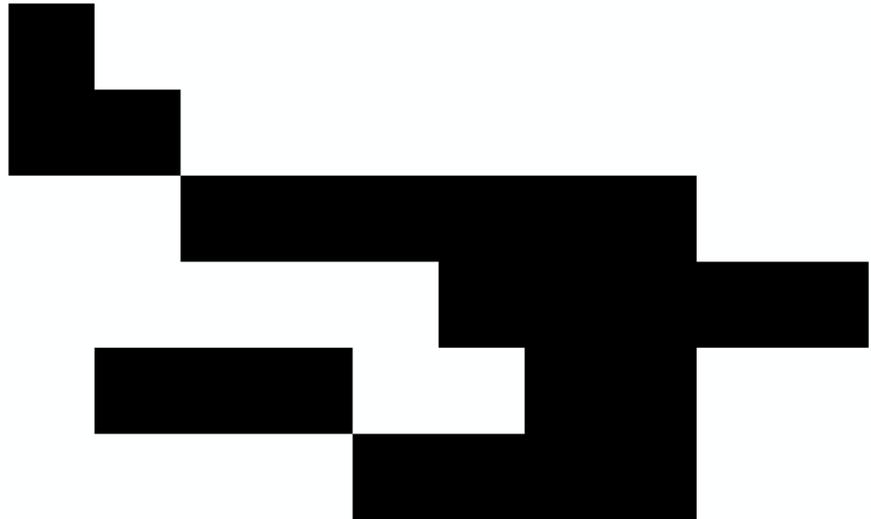
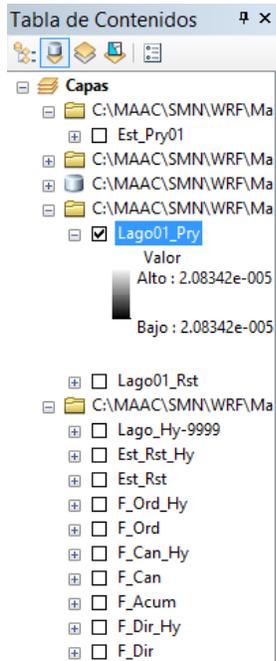


Figura 88. Ejemplo del despliegue de la capa “Lago01\_Pry” con la proyección Mercator.

### 3.12.5. Generar la capa ráster de los lagos en las cuencas de trabajo

Proceder a asignar un índice a los lagos en cada una de las capas que se procese, que inicia con el valor 1 hasta el número total de lagos que se procesen. Por ejemplo, en la figura 89 se encuentran dos lagos con su índice consecutivo que se encuentran sobre la red de canal de corriente en un dominio ficticio.

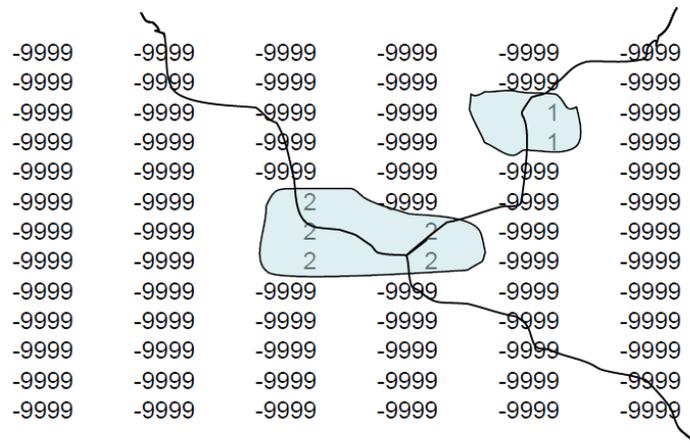


Figura 89. Ejemplo de dos lagos dentro de un dominio ficticio ubicados sobre la red de canales de corriente.

Seleccionar del menú “**Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Reclasificar (Reclass, en inglés)**” y posteriormente seleccionar la opción “**Reclasificar (Reclassify, en inglés)**”, tal como se muestra en la figura 90.

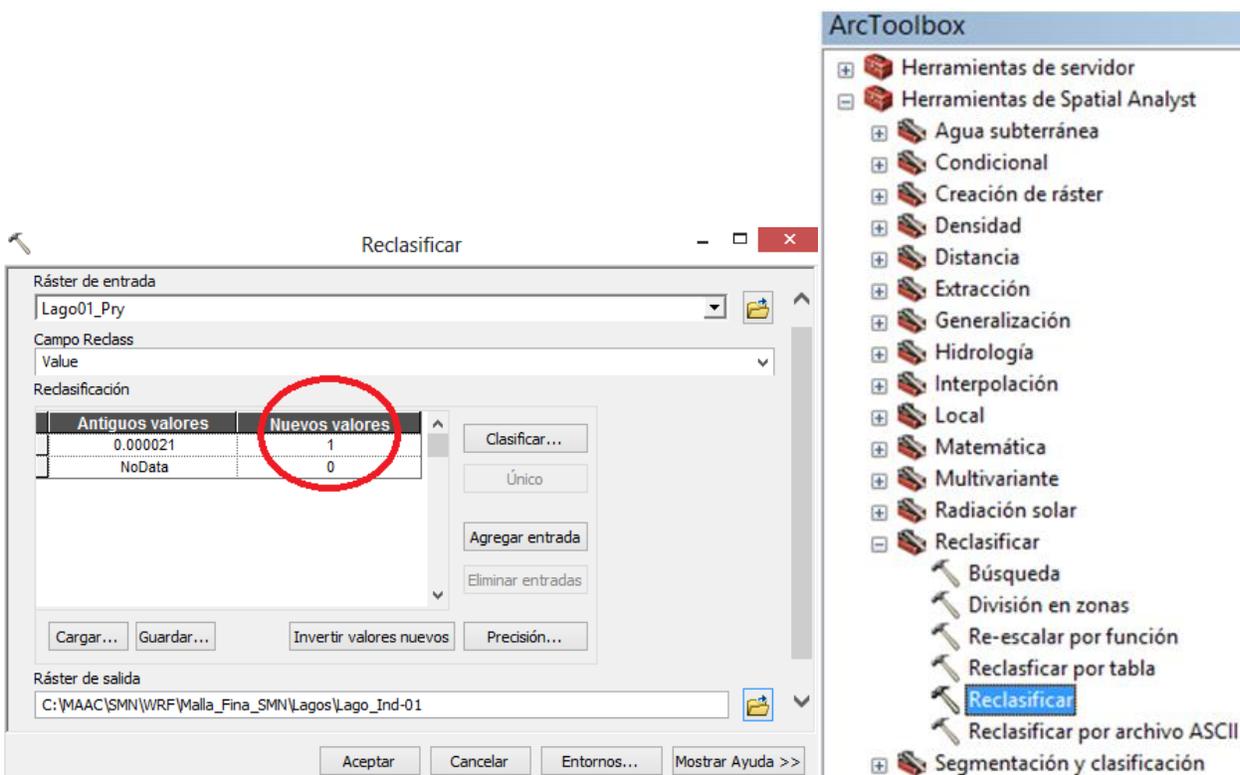


Figura 90. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “**Lago\_Ind-01**”.

En la ventana de diálogo “**Reclasificar**” definir las opciones tal como se indica en la figura 90. Seleccionar en la opción “**Ráster de entrada**” la capa de uno de los lagos, ejemplo “**Lago01\_Pry**”. En la opción “**Campo Reclass**” seleccionar el dato VALUE. En la opción “**Ráster de salida**” indicar la carpeta (ejemplo **Lagos/**) y el nombre de la capa del lago con el índice correspondiente, por ejemplo “**Lago\_Ind-01**”. En la columna “**Nuevos valores**” asignar un valor de “1” al lago, o el número consecutivo correspondiente, y cambiar a “0” la variable “**NoData**”, tal como se muestra en el círculo en la figura 90.

Al concluir la ejecución de la herramienta “**Reclasificar (Reclassify, en inglés)**”, se despliega la capa de información con valor constante de “1” en el área de la sub-cuenca, y un valor de “0” en el resto del dominio, representado por el área de color azul en la figura 91.

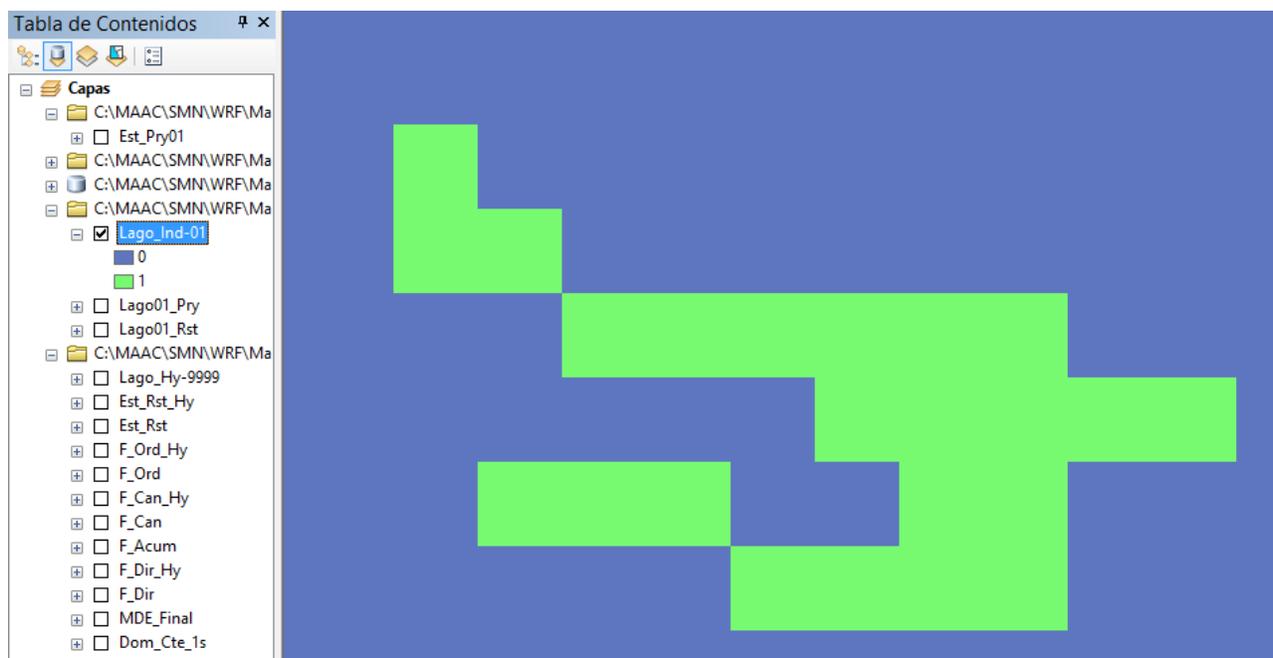


Figura 91. Despliegue de la capa de información “*Lago\_Ind-01*” generada con la herramienta “*Reclasificar*”.

**Nota:** Repetir el procedimiento para el conjunto de los lagos que se encuentran en las cuencas de trabajo.

Una vez que se cuenta con las capas de información de los lagos, sumar las capas para generar el ráster de la capa de lagos. Seleccionar del menú “*Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*Álgebra de mapas (Maps Algebra, en inglés)*” y posteriormente seleccionar la opción “*Calculadora ráster (Raster Calculator, en inglés)*”, para sumar las capas.

### 3.12.6. Generar la capa de información de los lagos en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro

Una vez que se cuenta con la capa de información que incluye los lagos procesados para el dominio de trabajo, se deben reclasificar los valores “0” a “-9999” para evitar errores cuando la capa de información sea utilizada por el modelo WRF-Hydro.

Seleccionar del menú “*Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*Reclasificar (Reclass, en inglés)*” y posteriormente seleccionar la opción “*Reclasificar (Reclassify, en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 92.

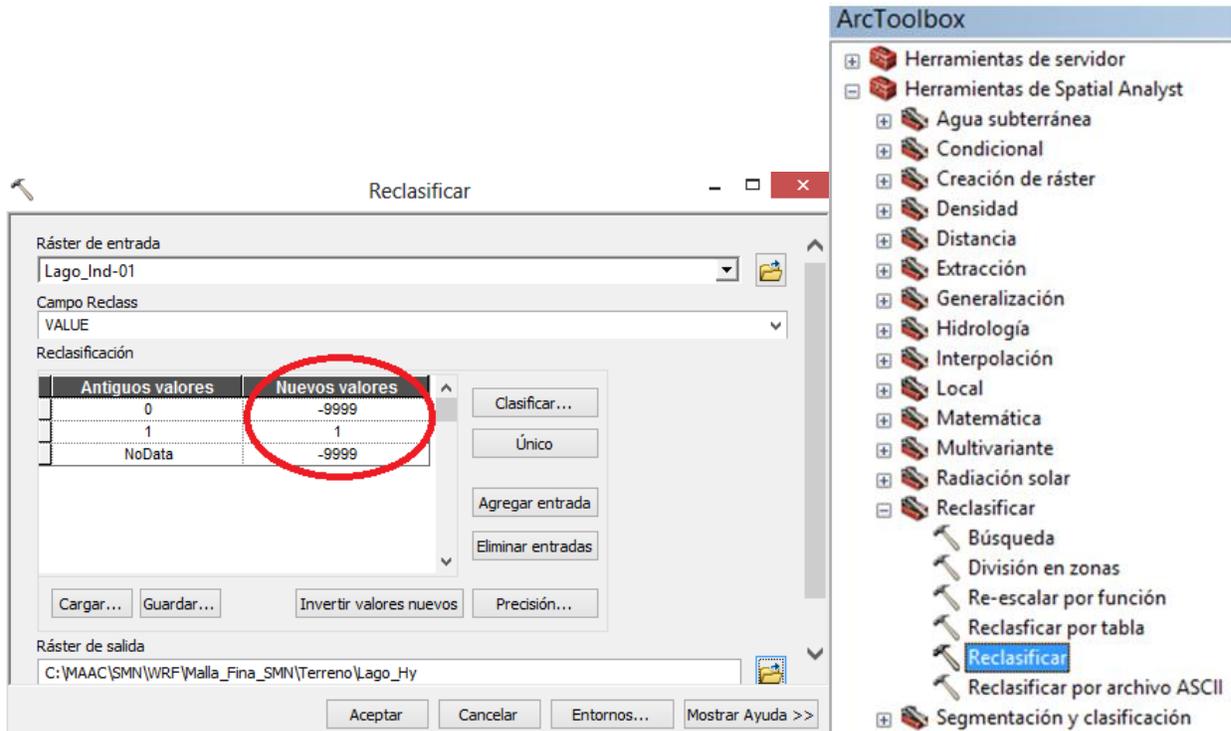


Figura 92. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “**Lago\_Ind-01**”.

En la ventana de diálogo “*Reclasificar*” definir las opciones tal como se indica en la figura 92. Seleccionar en la opción “*Ráster de entrada*” la capa “**Lago\_Ind-01**” con la información de los lagos en el dominio de trabajo. En la opción “*Campo Reclass*” seleccionar el dato VALUE. En la opción “*Ráster de salida*” indicar la carpeta (ejemplo **Terreno/**) y el nombre “**Lago\_Hy**” para la capa de información con los datos reclasificados a ser usada por el WRF-Hydro. En la columna “*Nuevos valores*” asignar un valor de “-9999” al dato “0” y al valor “NoData” y mantener el numero consecutivo del índice de los lagos que se incluyen en la capa de información. En este ejemplo solo hay un lago en la capa “**Lago\_Ind-01**”, tal como se indica en el círculo en la figura 92.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Reclasificar (Reclassify, en inglés)*”, se despliega la capa “**Lago\_Hy**” con la información de los lagos y con valor constante de “-9999” que sustituye el valor “NoData”, representado por el área de color verde en la figura 93.

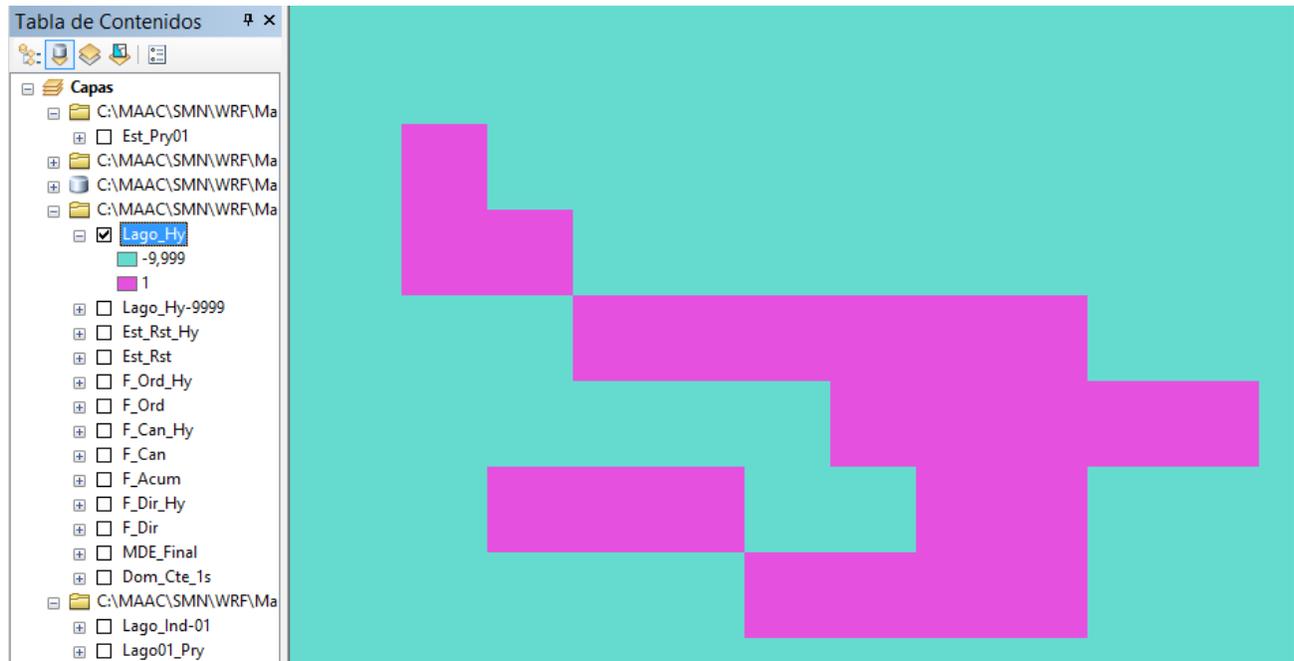


Figura 93. Despliegue de la capa de información “Lago\_Hy” generada con la herramienta “Reclasificar”.

### 3.13. Actualizar la capa de información de la red de canales de corriente cuando hay lagos/embalses presentes

En caso de que se incluya la capa con lagos/embalses se debe actualizar la capa de información de la red de canales que usará el WRF-Hydro, para que incorpore los pixeles que representan los lagos/presas. El indicador de la red de canales es “0”, este cambia a -9999 en los pixeles que representan los lagos/presas y en la salida de éstos se le asigna el valor del índice que corresponda a cada presa/lago, tal como se observa en la figura 94.

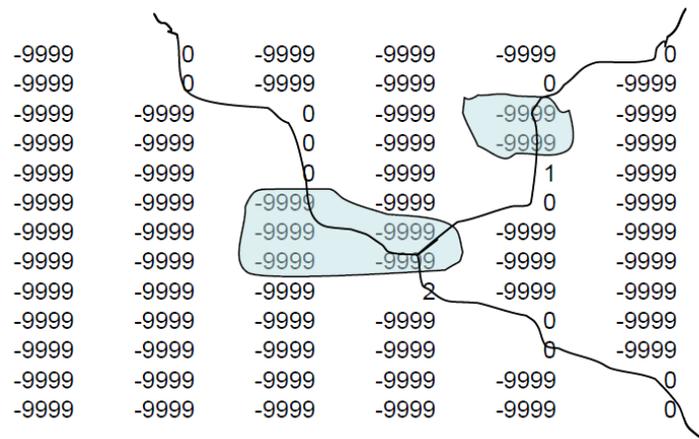


Figura 94. Representación esquemática de la red de canal de corrientes y dos lagos sobrepuestos.

### 3.13.1. Generar una máscara invertida de la capa de lagos

Crear una máscara “invertida” del lago al reclasificar las celdas que representan el lago (aquellas que tienen valores) a “NoData” y las que tienen “NoData” a valores igual a “1”. Seleccionar del menú ***Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)***, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción ***Reclasificar (Reclass, en inglés)*** y posteriormente seleccionar la opción ***Reclasificar (Reclassify, en inglés)***, tal como se muestra en la figura 95.

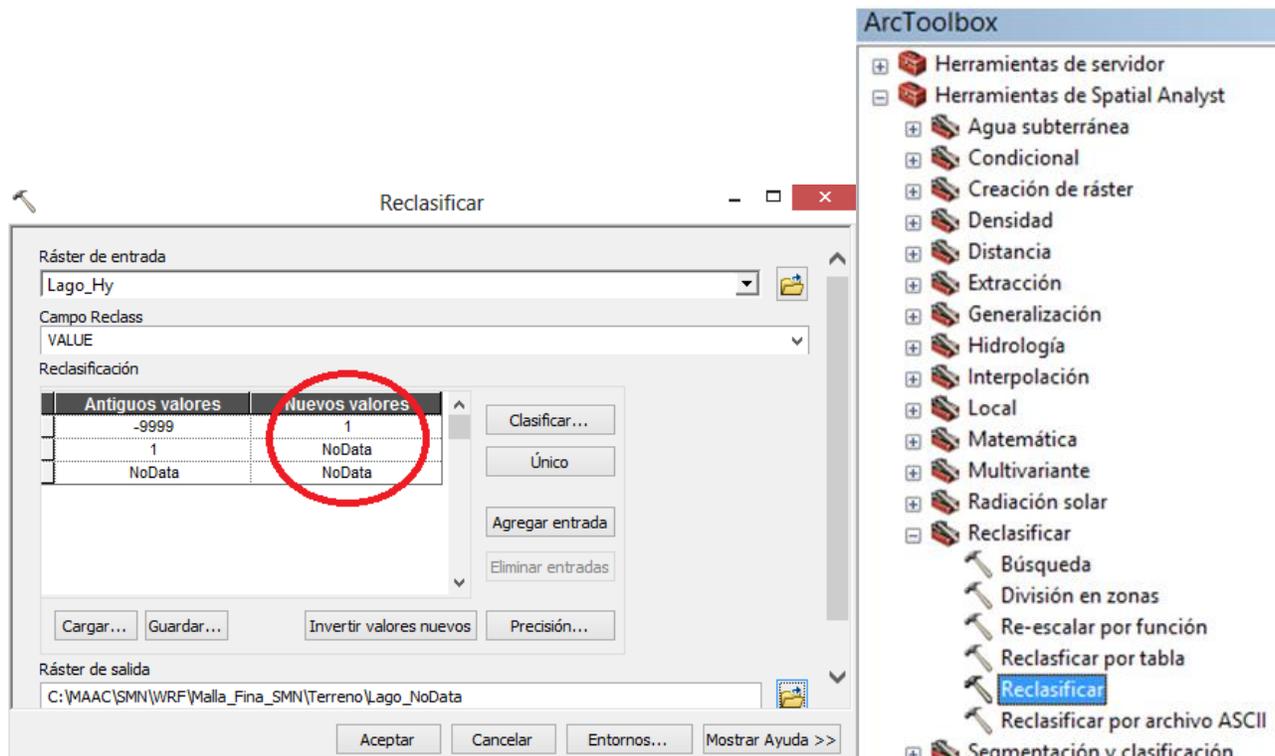


Figura 95. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “Lago\_NoData”.

En la ventana de diálogo “Reclasificar” definir las opciones tal como se indica en la figura 95. Seleccionar en la opción “Ráster de entrada” la capa “Lago\_Hy” con la información de los lagos contenidos en el dominio de trabajo, generada en la [sección 3.12.6](#). En la opción “Campo Reclass” seleccionar el dato VALUE. En la opción “Ráster de salida” indicar la carpeta (ejemplo Terreno/) y el nombre “Lago\_NoData” de la capa de información con los datos reclasificados. En la columna “Nuevos valores” asignar un valor de “1” para el caso de la fila “-9999” y asignar el dato “NoData” al resto de las filas en la columna, tal como se indica en el círculo en la figura 95.

Al concluir la ejecución de la herramienta ***Reclasificar (Reclassify, en inglés)***, se despliega la capa “Lago\_NoData” con información de no dato en los lagos y un valor constante de 1 en el resto del dominio, representado por el área de color morado en la figura 96.

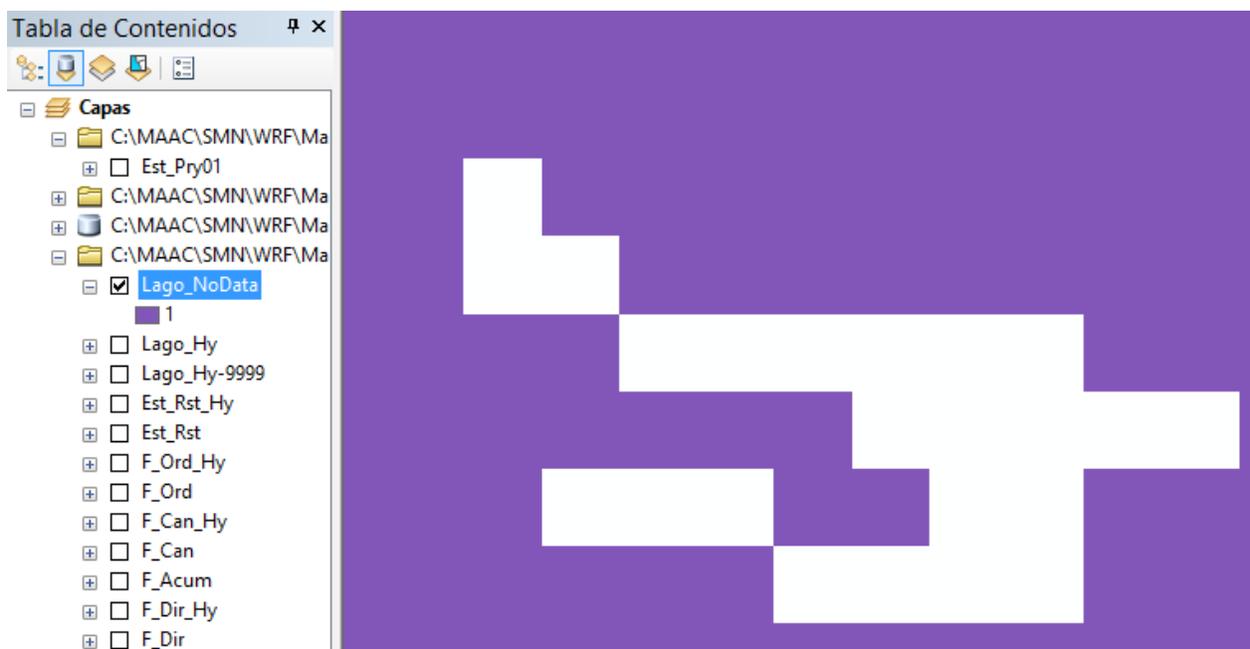


Figura 96. Despliegue de la capa de información “**Lago\_NoData**” generada con la herramienta “**Reclasificar**”.

### 3.13.2. Multiplicar la máscara invertida de la capa de lagos por la capa de la red de canales de corriente

Proceder a actualizar la red de canal de corriente al multiplicar la máscara “invertida” del lago por la capa de información de la red de canal de corriente generada (reclasificada) en la sección 3.9.1.

Seleccionar del menú “**Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Algebra de mapas (Map Algebra, en inglés)**” y posteriormente seleccionar la opción “**Calculadora ráster (Raster Calculator, en inglés)**”.

En la calculadora, seleccionar la capa de información “**Lago\_NoData**”, a continuación seleccionar el operador de multiplicación “\*”, posteriormente seleccionar la capa “**F\_Can\_Hy**”. En la opción “**Ráster de salida**” indicar la carpeta y el nombre del archivo de salida (ej. **F\_Can\_lag\_Msk** en la carpeta **Terreno**), tal como se muestra en la figura 97.

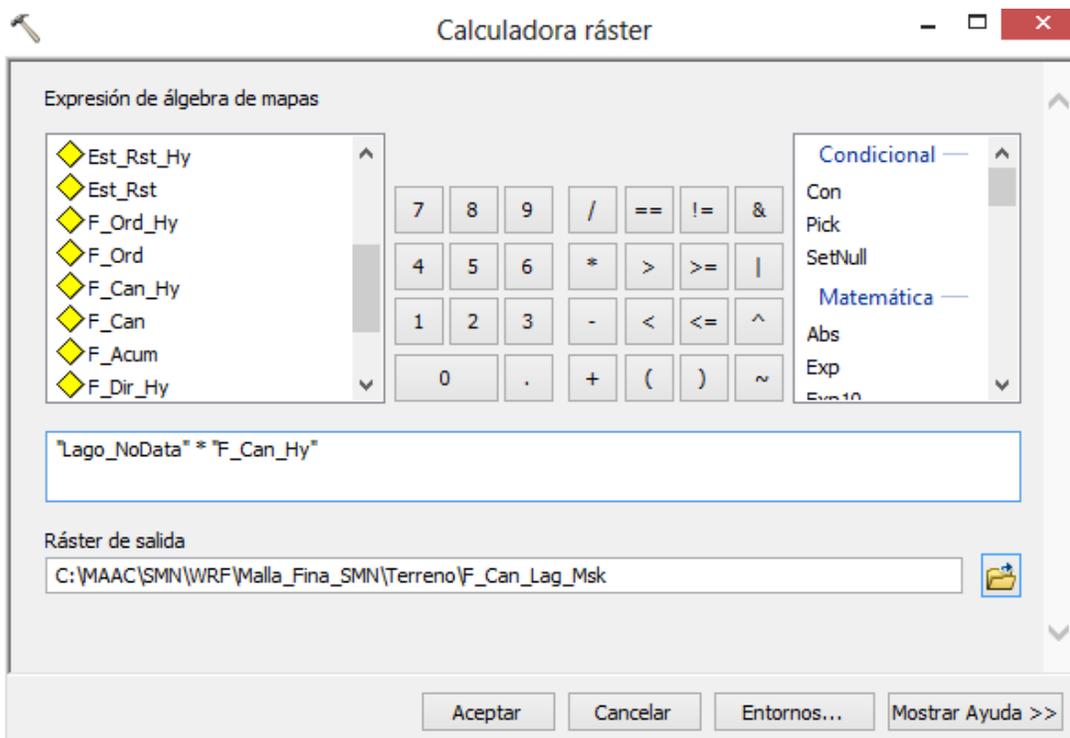


Figura 97. Multiplicación de la capa de la máscara del lago invertido por la capa de información de la red de canal de corrientes.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*Calculadora ráster*”, se obtiene el la capa “*F\_Can\_Lag-Msk*” con los lagos incluidos en la red de canal de corrientes, tal como se muestra en la figura 98. Las líneas moradas se representan la red de canales, el área en blanco representa el lago y el área en verde representa valores constantes de -9999.

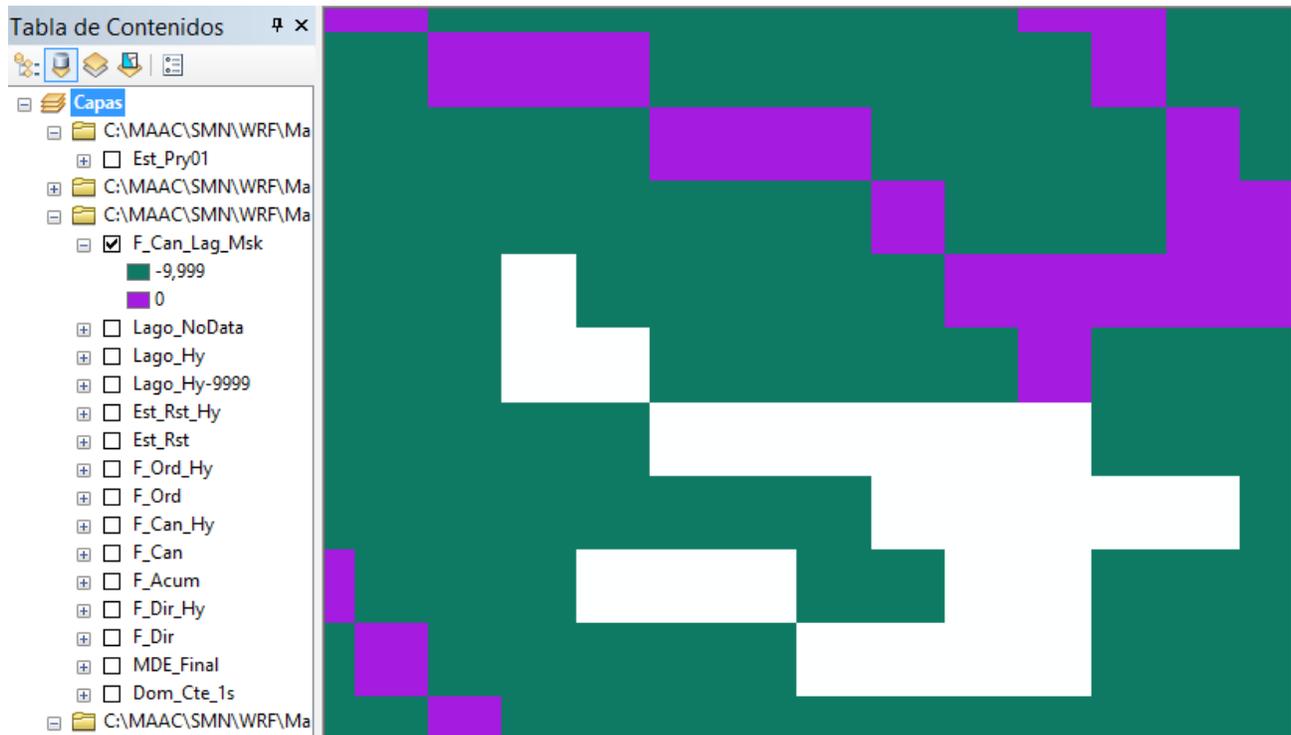


Figura 98. Despliegue de la capa de información “**F\_Can\_Lag-Msk**”. Las líneas moradas se representan la red de canales, el área en blanco representa el lago y el área en verde representa valores constantes de -9999.

Proceder a convertir la capa actualizada de información de la red de canales corriente a un *shape* de tipo punto. Seleccionar del menú “Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “De ráster (From Ráster, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “De ráster a punto (Ráster to Point, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 99.

En la ventana de diálogo “*De ráster a punto*”, seleccionar la capa de información “**F\_Can\_Lag-Msk**” en la opción “*Ráster de entrada*”, a continuación seleccionar VALUE en la opción “*Campo*”, posteriormente indicar la carpeta y el nombre del archivo de salida (ej. **F\_Can\_Pto** en la carpeta **Terreno**) en la opción “*Entidades de punto de salida*”, tal como se muestra en la figura 99. Toma varios minutos el procesamiento dependiendo del tamaño del dominio.

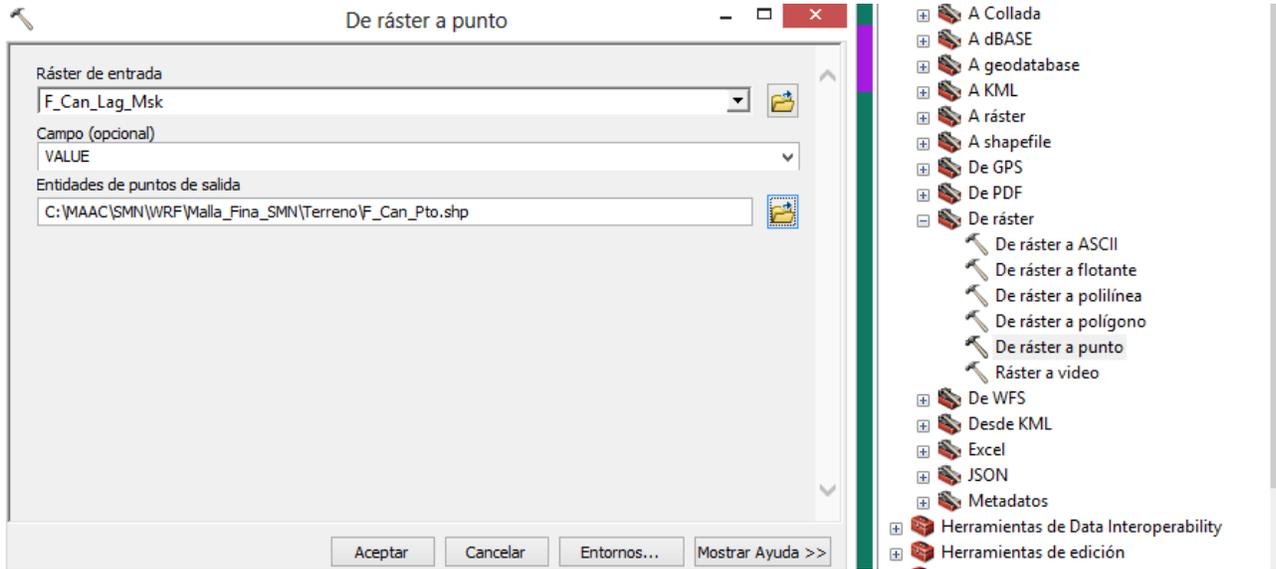


Figura 99. Opción completada para convertir la capa ráster de la red de canales y lagos a un archivo *shapefile* de punto.

Al concluir la ejecución de la herramienta ***“De ráster a punto (Ráster to Point, en inglés)”***, se obtiene la capa ***“F\_Can\_Pto”*** con la capa de los lagos incluidos en la red de canal de corrientes en el *shapefile* en formato de puntos, tal como se muestra en la figura 100. Los puntos representan la capa en formato punto, las líneas moradas representan la red de canales, el área en blanco representa el lago con valores de *“NoData”* y el área en verde representa valores constantes de *“-9999”*.

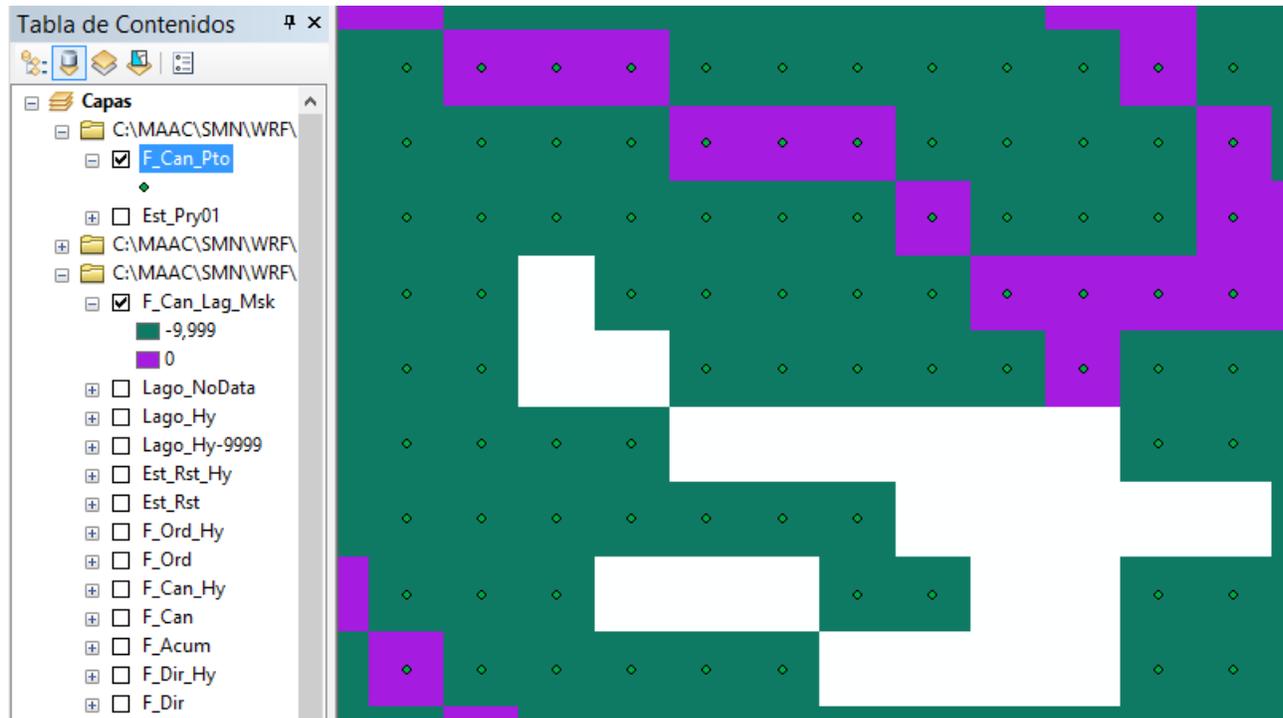


Figura 100. Despliegue de la capa de información “*F\_Can\_Pto*”. Los puntos representan el *shapefile* en formato de punto, las líneas moradas se representan la red de canales, el área en blanco representa el lago y el área en verde representa valores constantes de -9999.

### 3.13.3. Editar los valores en las celdas sobre la red de canales de corriente que están a la salida de los lagos

Editar manualmente los puntos en las celdas de la malla de la capa *shapefile* de punto “*F\_Can\_Pto*” con la información del canal de corriente, para que la celda del canal de corriente que sale del lago se le asigne el índice que le corresponda al lago. Sobreponer la capa de información del orden de flujo y la de la dirección de flujo para identificar con claridad las celdas del canal de corriente a las que se cambiará el valor de “0” al valor del índice del lago.

Dar clic con el botón del lado derecho del ratón sobre el nombre de la capa de información del *shapefile* de punto “*F\_Can\_Pto*”. Seleccionar “Editar entidades (Edit Features, en inglés)” y posteriormente seleccionar “Iniciar la edición (Start Editing, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 101. Aplicar un acercamiento sobre el lago.

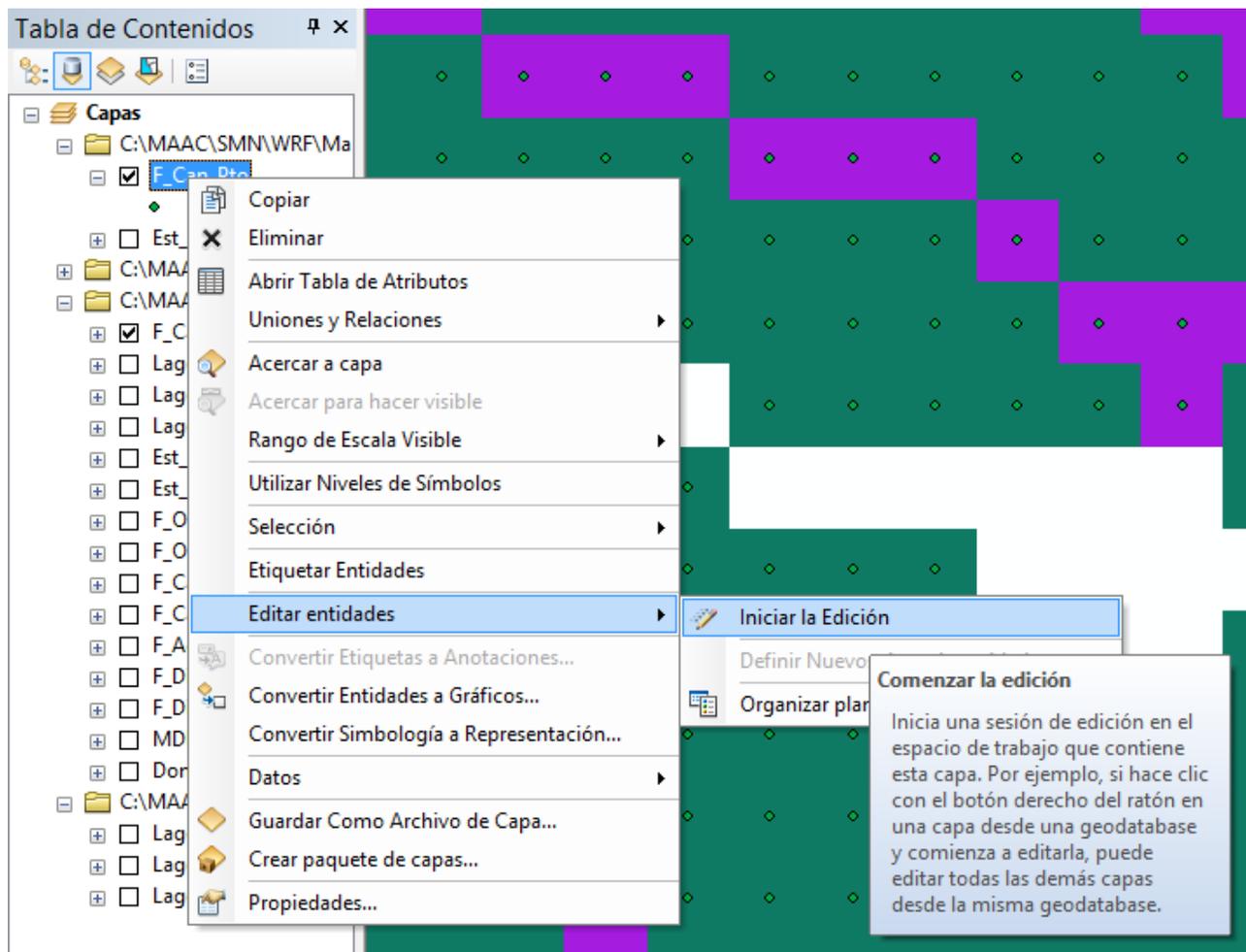


Figura 101. Menú con las opciones para editar la capa de la red de canales de tipo punto.

Activar la función “*Herramienta de edición (Edit Tool, en inglés)*” y la función “*Atributos (Attributes, en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 102. Seleccionar el punto de la celda sobre la red de canales que está a la salida del lago, apoyarse con la capa de información de dirección de flujo de salida para identificar las celdas sobre la red de canales que salen de los lagos. Cambiar el valor del pixel de “0” al valor del índice que le corresponda al lago, ejemplo “1” para el primer lago, en la variable “GRID\_CODE” en el cuadro “*Attributes*”.

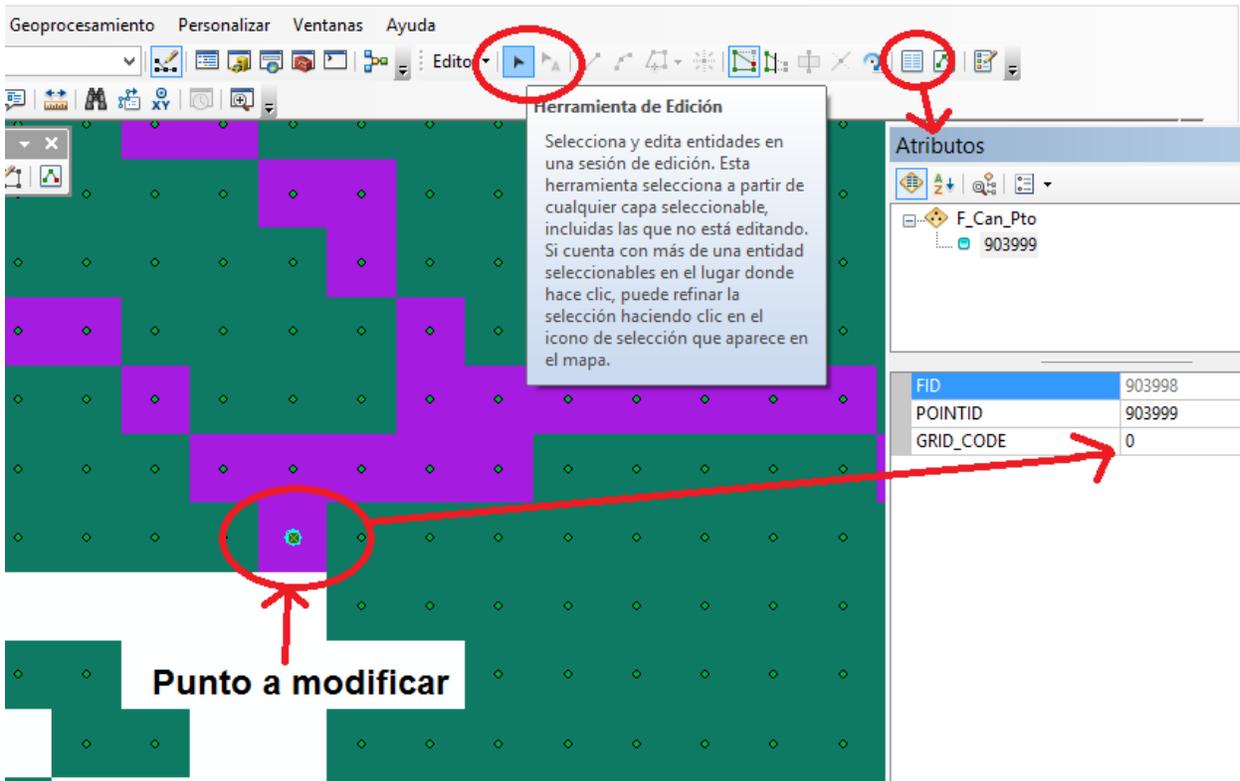


Figura 102. Opciones a activar para editar la capa de la red de canales de tipo punto.

Al concluir seleccione “Guardar modificaciones (Save Edits, en inglés)” en el menú “Editor” y seleccionar “Detener Edición (Stop Editing, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 103. Esto toma varios minutos dependiendo del tamaño de malla del dominio.

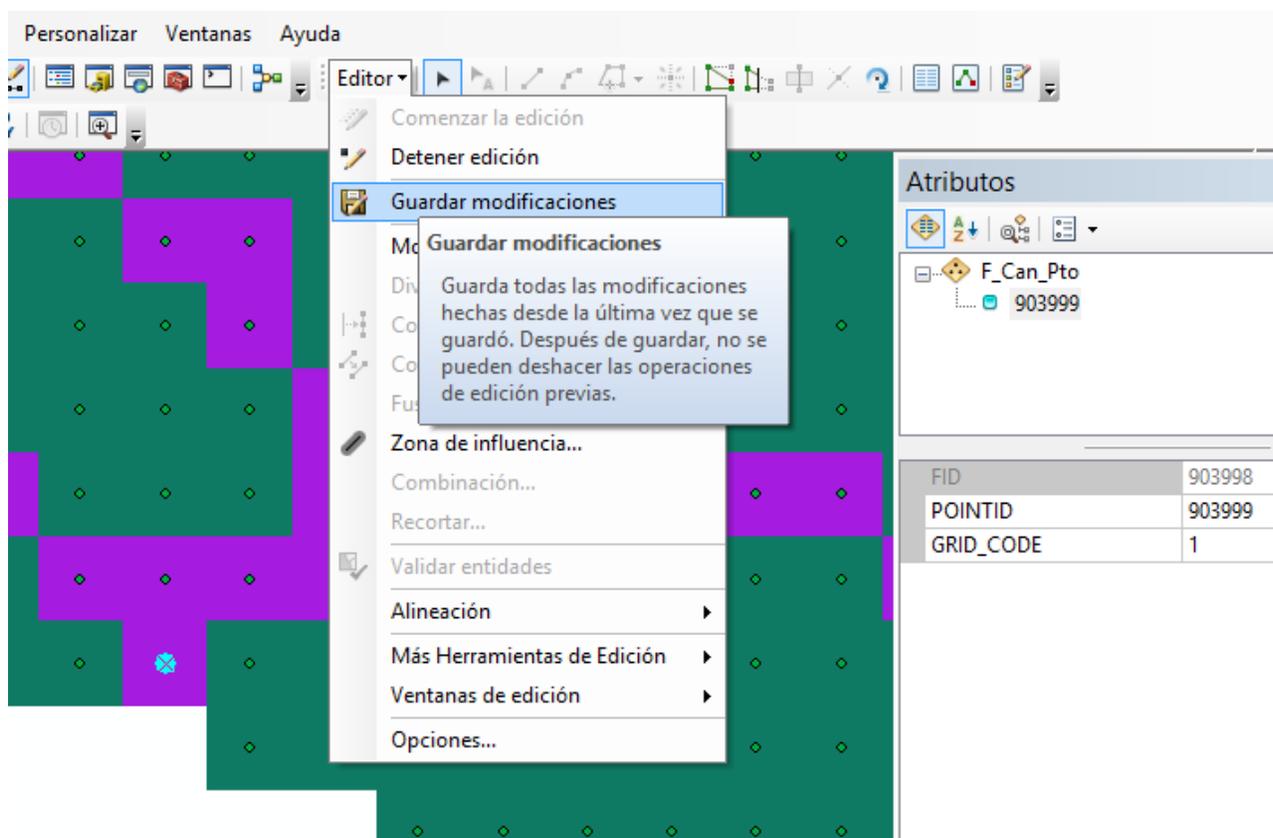


Figura 103. Opciones para guardar los cambios en las celdas que se encuentran sobre la red de canales de corriente a la salida de los lagos.

**Nota:** En caso de que existan tramos de canal trancos dentro o en el contorno del lago/embalse, sustituir los valores de los pixeles por “-9999”.

Proceder a convertir el archivo *shapefile* de punto “**F\_Can\_Pto**”, con la información modificada en las celdas sobre la red de canal de corrientes que salen de los lagos, a formato ráster. Seleccionar del menú “**Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**A ráster (To Ráster, en inglés)**” y posteriormente seleccionar la opción “**De punto a ráster (Point to Ráster, en inglés)**”, tal como se muestra en la figura 104.

En la ventana de diálogo “**De ráster a punto**”, seleccionar la capa de información “**F\_Can\_Pto**” en la opción “**Entidades de entrada**”, a continuación seleccionar GRID\_CODE en la opción “**Campo de valor**”, posteriormente indicar la carpeta y el nombre del archivo de salida (ej. **F\_Can\_Lago** en la carpeta **Terreno**) en la opción “**Dataset ráster de salida**”. Indicar un valor correspondiente a la resolución de la celda, ejemplo 30 mts o 100 mts, en la opción “**Tamaño de celda**”, tal como se muestra en la figura 104. Toma varios minutos el procesamiento dependiendo del tamaño del dominio)

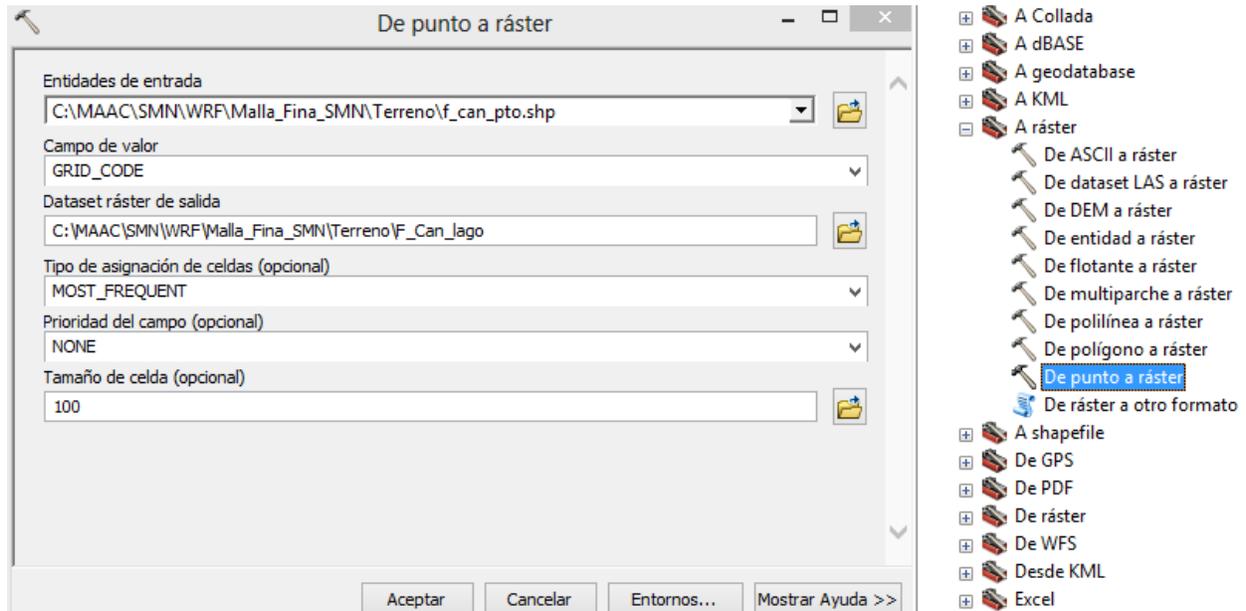


Figura 104. Opción completada para convertir el archivo *shapefile* de punto, con la red de canales y lagos, a una capa ráster.

Al concluir la ejecución de la herramienta ***“De punto a ráster (Point to Ráster, en inglés)”***, se obtiene la capa ***“F\_Can\_Lago”*** con la información de la red de canales en la que se consideran los objetos de lagos y las celdas con el índice del lago, tal como se muestra en la figura 105. Los tramos en verde representan la red de canales, el área en blanco representa el lago con valores de *“NoData”*, la celda en azul representa el índice del lago del cual sale el flujo, el área en negro representa valores constantes de *“-9999”*.

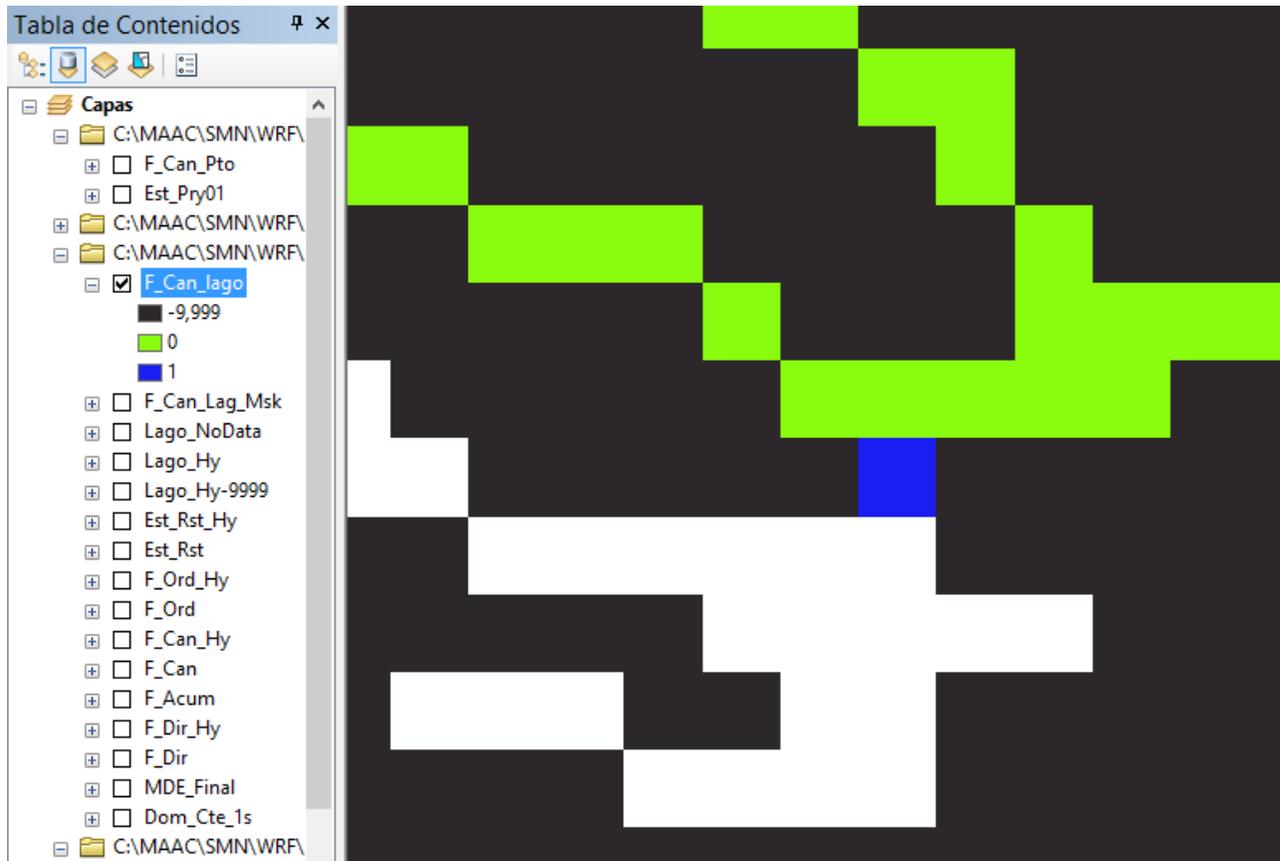


Figura 105. Despliegue de la capa de información “**F\_Can\_Lago**” con la red de canales que consideran los lagos y el índice correspondiente al lago.

### ***3.13.4. Generar la capa de información de la red de canales de corriente, modificada con los objetos de lago, en la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro***

Una vez que se cuenta con la capa de información “**F\_Can\_Lago**” con la información de la red de canales en la que se consideran los objetos de lagos y las celdas con el índice del lago, se deben reclasificar los valores “NoData” a “-9999”, para evitar errores cuando la capa de información sea utilizada por el modelo WRF-Hydro.

Seleccionar del menú “**Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)**”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “**Reclasificar (Reclass, en inglés)**” y posteriormente seleccionar la opción “**Reclasificar (Reclassify, en inglés)**”, tal como se muestra en la figura 106.

En la ventana de diálogo “Reclasificar” definir las opciones tal como se indica en la figura 106. Seleccionar en la opción “Ráster de entrada” la capa “**F\_Can\_Lago**” con la información de la red de canales de corriente modificada con los objetos de los lagos. En la opción “Campo Reclass” seleccionar el dato VALUE. En la opción “Ráster de salida” indicar la carpeta (ejemplo **Terreno/**) y el nombre “**F\_Can\_Lago\_Hy**” de la capa de información con los datos reclasificados a ser usada por el WRF-Hydro. En la columna “Nuevos valores” asignar un valor de “-9999” al dato “NoData” y copiar el resto de los datos de la columna “Antiguos valores” a la columna “Nuevos valores”, tal como se indica en el círculo en la figura 106.

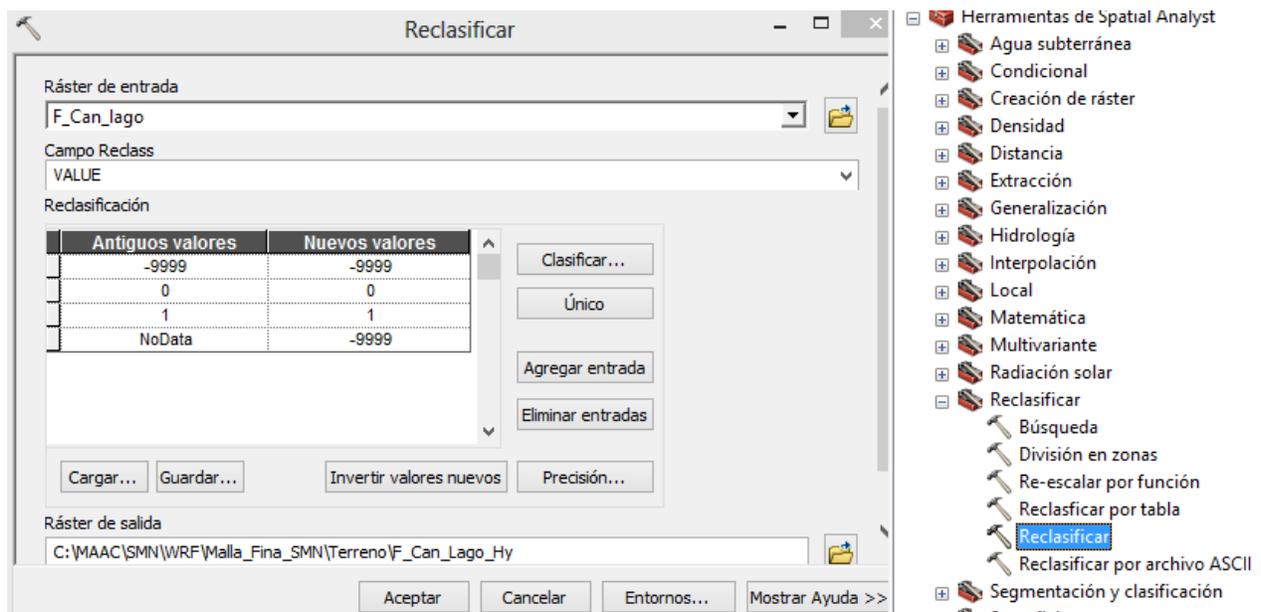


Figura 106. Opciones completadas para reclasificar valores en la capa ráster “**F\_Can\_Lago**”.

Al concluir la ejecución de la herramienta “**Reclasificar (Reclassify, en inglés)**”, se despliega la capa “**F\_Can\_Lago\_Hy**” con la información de la red de canales de corriente (en color azul) y con valor constante de “-9999” que sustituye el valor “NoData”, representado por el área de color café en la figura 107.

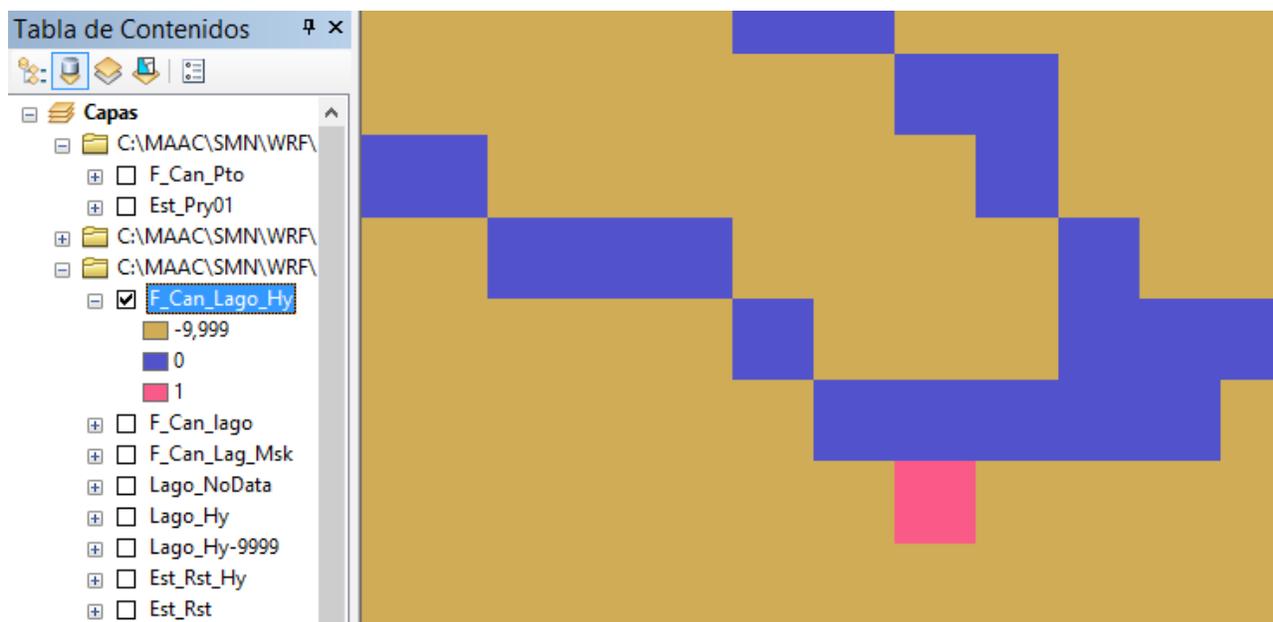


Figura 107. Despliegue de la capa de información “*F\_Can\_Lago\_Hy*” generada con la herramienta “*Reclasificar*”.

### ***3.14. Obtener la capa de información de la latitud y longitud de la malla fina del terreno***

#### ***3.14.1. Definir los parámetros del ambiente de trabajo para generar las capas de información del archivo de la malla fina del terreno***

Definir de los parámetros del entorno de ArcGIS con las características de la capa del MDE para las cuencas de trabajo, generado con los pasos de la [sección 3.4](#). Se recomienda cerrar ArcGIS y volver a abrir el paquete.

En la barra del menú principal seleccionar la opción “*Geoprocesamiento (Geoprocessing en inglés)*” y en el listado seleccionar la opción “*Entornos... (Environments..., en ingles)*”, tal como se muestra en la figura 108.

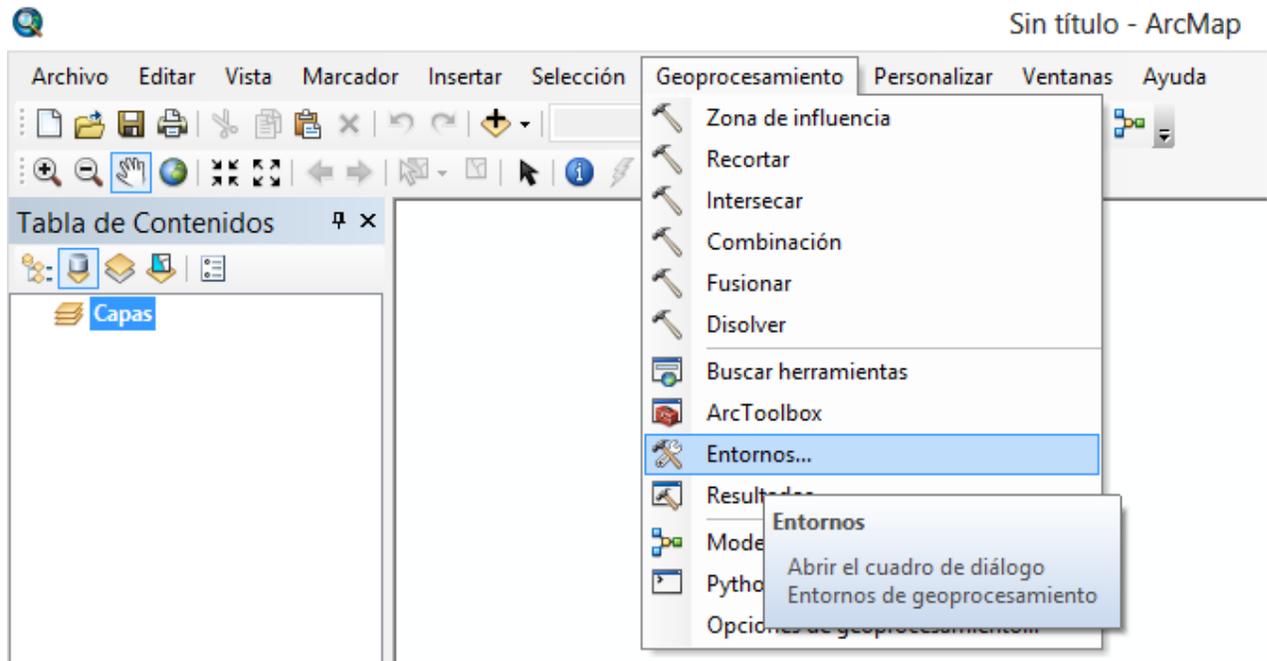


Figura 108. Menú para ingresar a las opciones de configuración de “Entornos”.

En la ventana de diálogo “*Configuración del entorno*” definir las opciones tal como se indica en la figura 109. Seleccionar el archivo “**MDE\_Final**” con el MDE del INEGI para las cuencas de trabajo en la opción “*Extensión de procesamiento*”. Definir la resolución correspondiente a la malla fina del terreno, ejemplo 30mts o 100 mts, metros en la opción “*Tolerancia y resolución XY*”. Dar clic en el botón “*Aceptar*”.

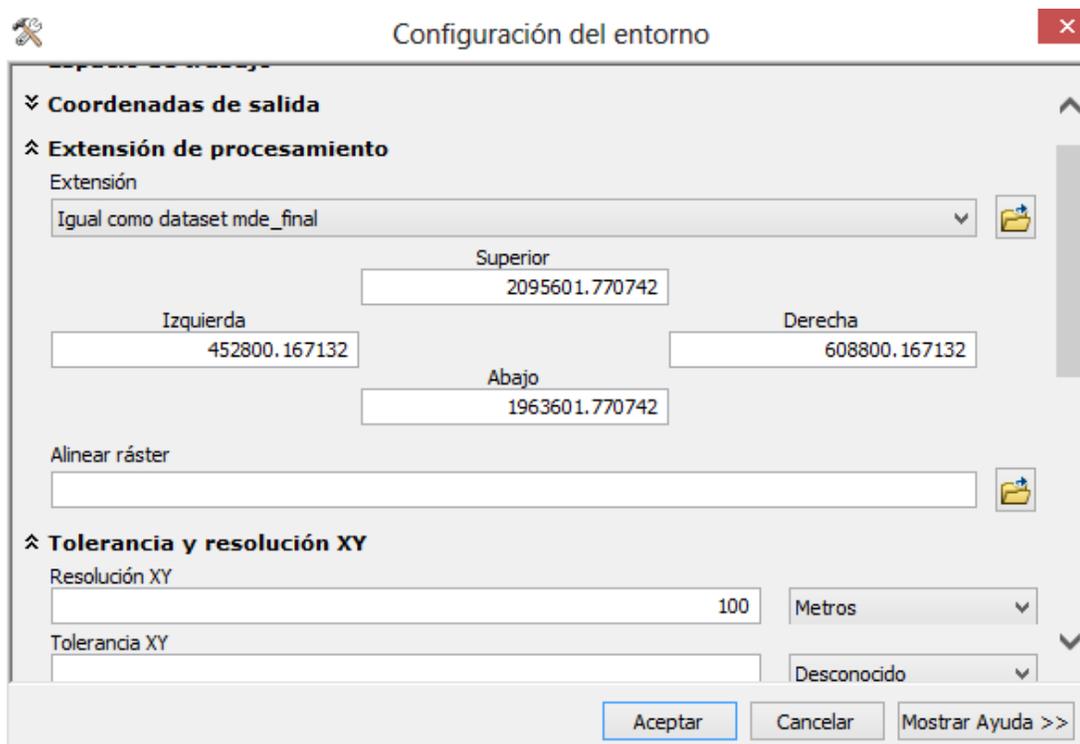


Figura 109. Opciones de configuración definida para el entorno con base en las características del MDE para las cuencas de trabajo.

### 3.14.2. Generar un dominio con valor constante “1” de tipo flotante

Proceder a generar un dominio con valor constante de “1” de tipo “flotante”, con la misma extensión espacial, resolución espacial y georeferencia que la capa de información del MDE para las cuencas de trabajo.

Seleccionar del menú ***Herramientas de Spatial Analyst (Spatial Analyst Tools, en inglés)***, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción ***Creación de ráster (Ráster Creation, en inglés)*** y posteriormente seleccionar la opción ***Crear ráster constante (Create Constant Ráster, en inglés)***, tal como se muestra en la figura 110.

En la ventana de diálogo ***Crear ráster constante*** definir las opciones tal como se indica en la figura 110. Seleccionar en la opción ***Ráster de salida*** la carpeta **Terreno/** y el nombre del archivo con los valores constantes (por ejemplo ***Dom\_Cte\_1s\_FI***). En la opción ***Valor constante*** indicar un valor de 1. En la opción ***Tipo de datos de salida*** seleccionar FLOAT. En la opción ***Tamaño de la celda de salida*** indicar un valor correspondiente a la resolución de la mal fina, ejemplo 30 mts o 100 mts. En la opción ***Extensión de salida*** seleccionar el archivo ***MDE\_Final*** para asegurar que la

extensión espacial del dominio constante coincida con la del MDE de la cuenca de trabajo. Dar clic en el botón “Aceptar”.

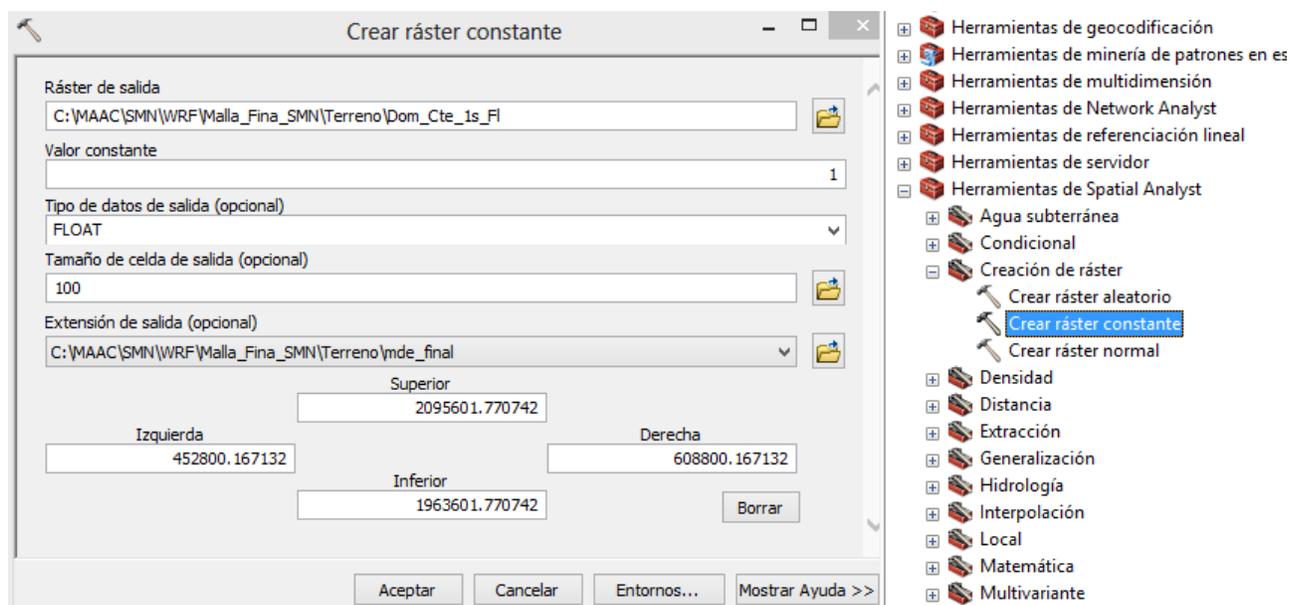


Figura 110. Opciones completadas para crear una capa ráster con valores constantes de tipo flotante.

Al concluir la ejecución de la herramienta “Crear ráster constante (Create Constant Ráster, en inglés)”, se despliega la capa “**Dom\_Ctes\_1s\_FI**” con información constante para el dominio (figura 111).

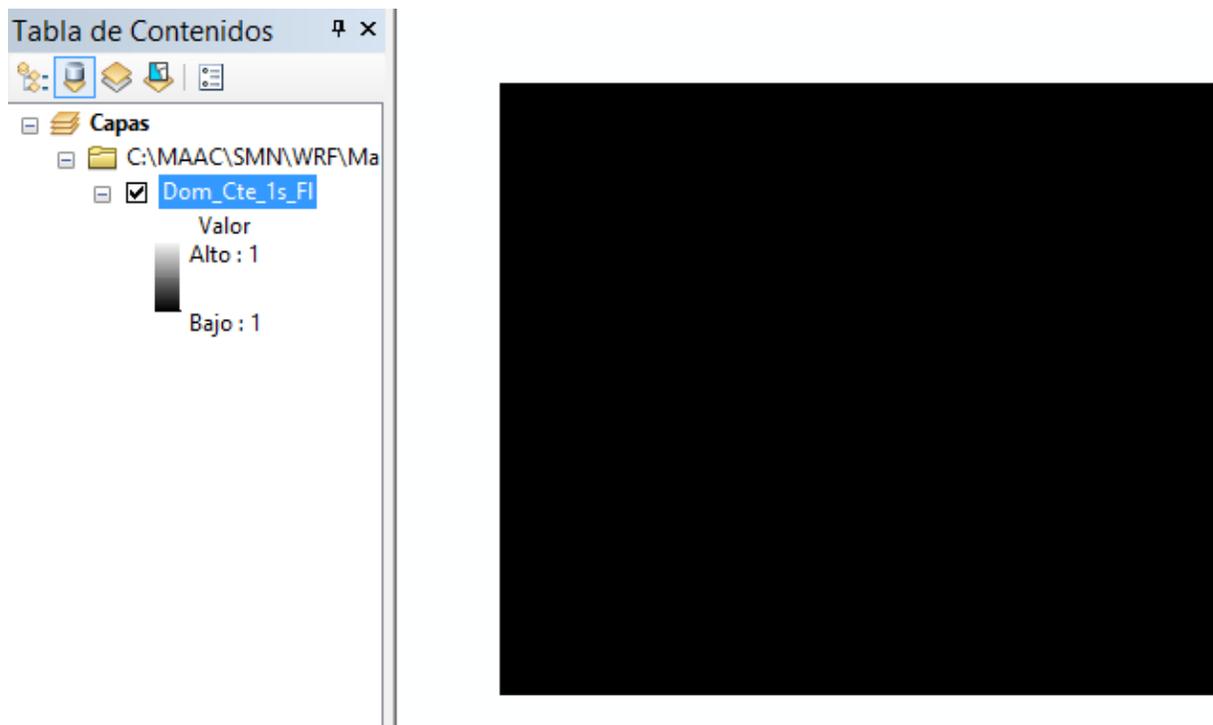


Figura 111. Despliegue de la capa de información “*Dom\_Cte\_1s\_Fl*” generada con la herramienta “Crear ráster constante”.

### 3.14.3. *Proyectar el dominio constante a la referencia espacial de la capa de la Plantilla*

Una vez que se cuenta con la capa de información del dominio con valor constante de 1 de tipo flotante, proceder a proyectarla a la referencia espacial del archivo de la plantilla. Seleccionar del menú “Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Proyecciones y transformaciones (Projections and Transformations, en inglés)” y a continuación seleccionar la opción “Definir proyección (Define Projection, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 112.

Aplicar el procedimiento descrito en la sección 3.4.2 de la sección II del presente anexo para completar la proyección de la capa “*Dom\_Cte\_1s*”.

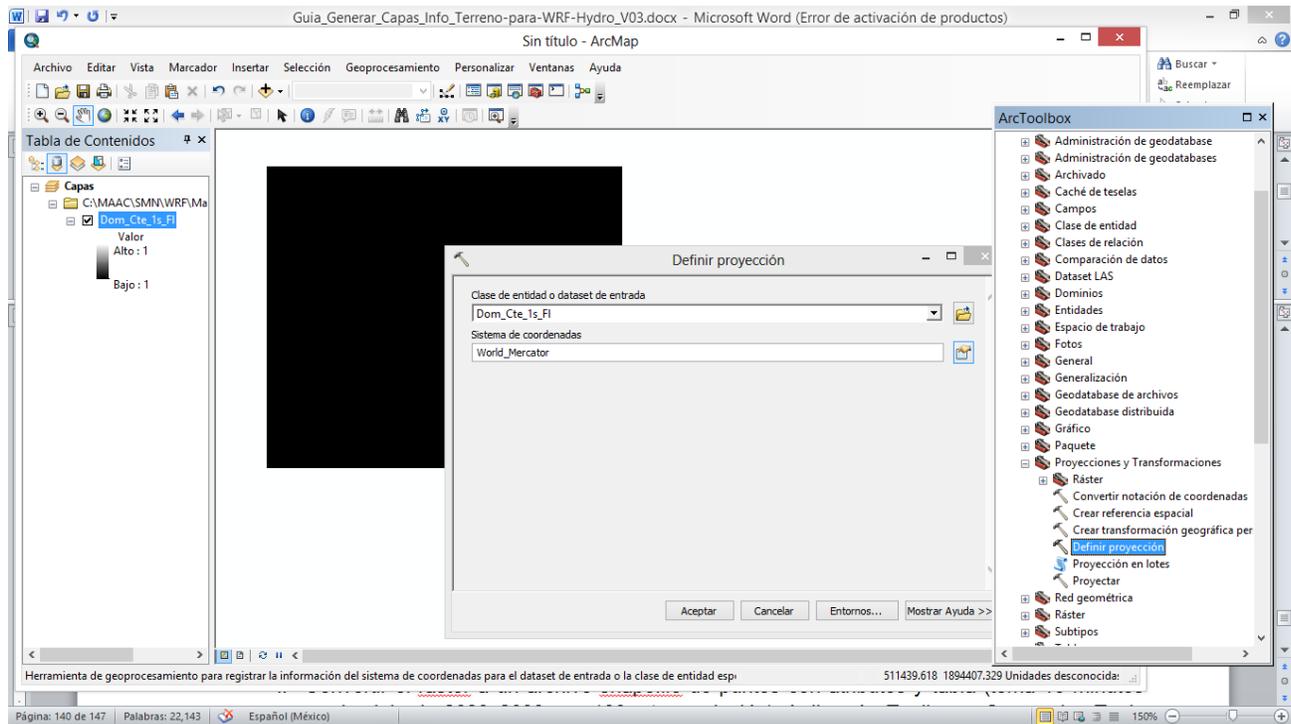


Figura 112. Opción completada para definir la proyección de la capa “*Dom\_Cte\_1s\_FI*”.

Proceder a convertir la capa con el dominio constante. Seleccionar del menú “*Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)*”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “*De ráster (From Ráster, en inglés)*” y posteriormente seleccionar la opción “*De ráster a punto (Ráster to Point, en inglés)*”, tal como se muestra en la figura 113.

En la ventana de diálogo “*De ráster a punto*”, seleccionar la capa de información “*Dom\_Cte\_1s\_FI*” en la opción “*Ráster de entrada*”, a continuación seleccionar VALUE en la opción “*Campo*”, posteriormente indicar la carpeta y el nombre del archivo de salida (ej. *Dom\_Cte\_Pto* en la carpeta *Terreno*) en la opción “*Entidades de punto de salida*”, tal como se muestra en la figura 113. Toma varios minutos el procesamiento dependiendo del tamaño del dominio.

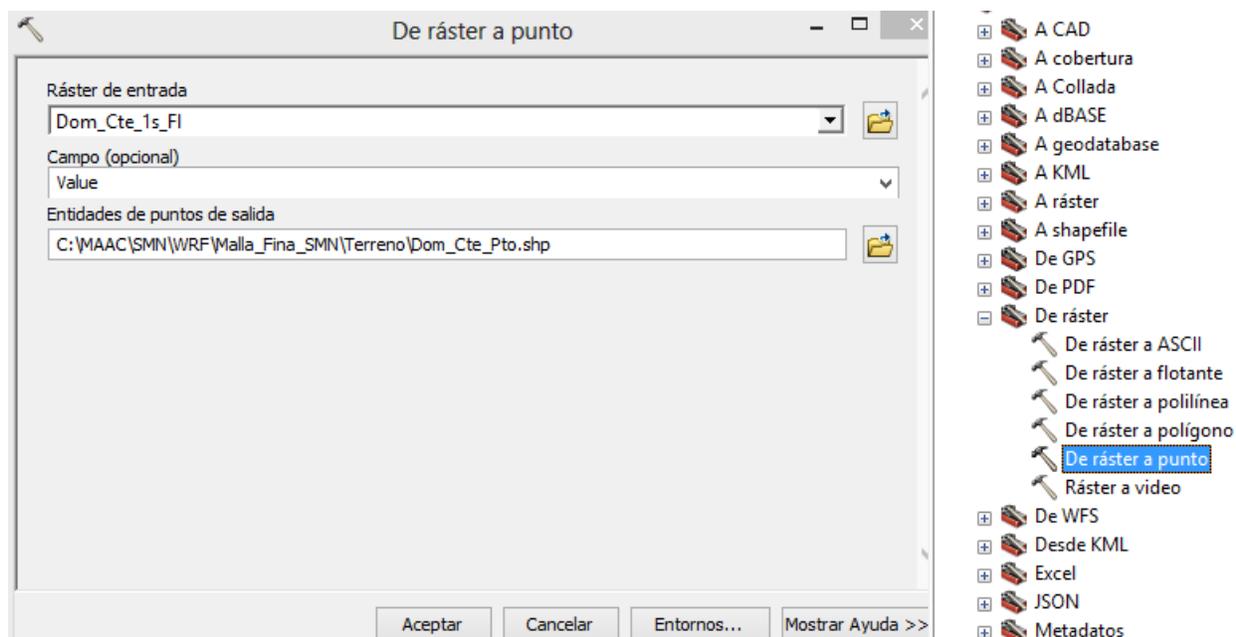


Figura 113. Opción completada para convertir la capa ráster del dominio constante de tipo flotante a un archivo *shapefile* de punto.

Al concluir la ejecución de la herramienta “De ráster a punto (Ráster to Point, en inglés)”, se obtiene la capa “**Dom\_Cte\_Pto**” con valores constantes de tipo flotante en un *shapefile* en formato de puntos.

#### 3.14.4. Definir nuevas variables en el archivo con valores constantes de tipo flotante

Definir nuevas variables en el archivo de punto creado en el paso anterior, para calcular la latitud y longitud. Seleccionar del menú “Herramientas de administración de datos (Data Management Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “Campos (Fields, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “Agregar campo (Add Field, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 114.

En la ventana de diálogo “*Agregar campo*”, seleccionar la capa de información “**Dom\_Cte\_Pto**” en la opción “*Tabla de entrada*”, a continuación indicar el nombre de la nueva variable a crear (individualmente para las variables *Lat* y *Lon*) en la opción “*Nombre de campo*”, posteriormente en la opción “*Tipo de campo*” indicar FLOAT, tal como se muestra en la figura 114. Toma varios minutos el procesamiento dependiendo del tamaño del dominio.

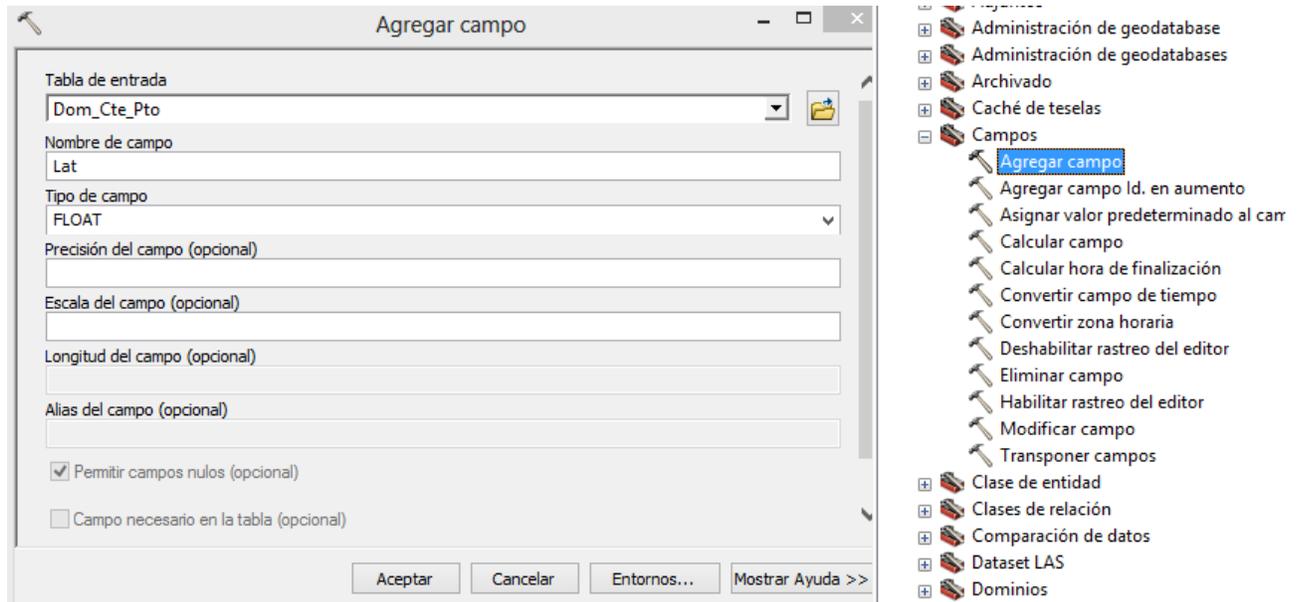


Figura 114. Opción completada para agregar una nueva variable al archivo *shapefile* de punto con valores constantes de tipo flotante.

### 3.14.5. Calcular los valores de la latitud y longitud

Dar clic con el botón del lado derecho del ratón sobre el nombre de la capa de información del *shapefile* de punto "**Dom\_Cte\_Pto**". Seleccionar "*Abrir tabla de atributos (Open Attribute Table, en inglés)*", como se muestra en la figura 115.

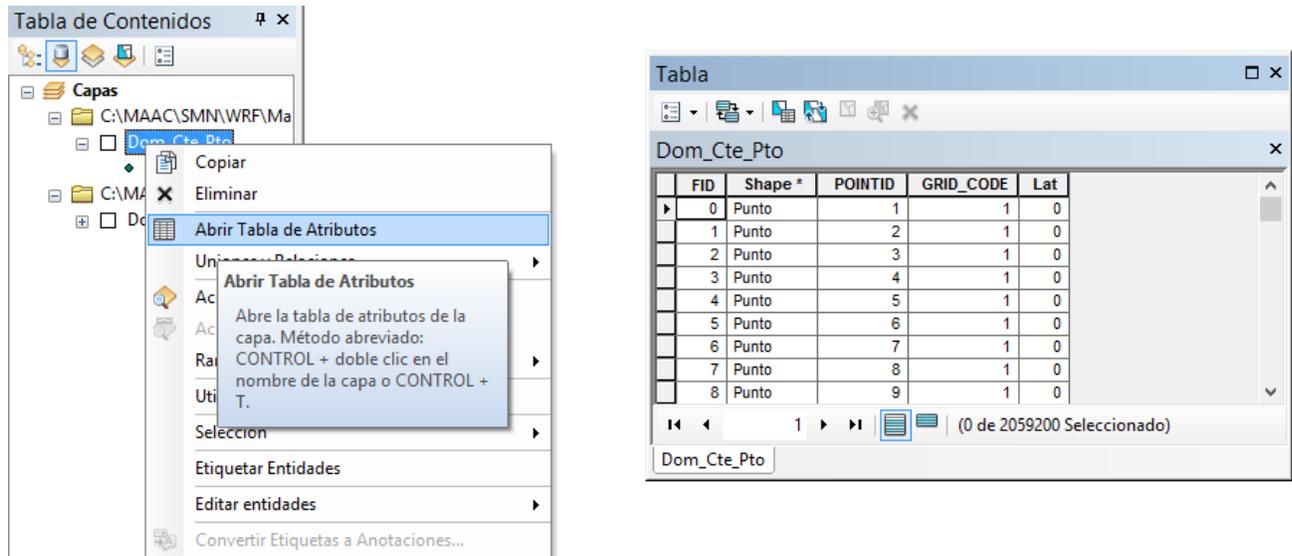


Figura 115. Menú con las opciones para editar la capa con los valores constantes de tipo flotante.

En la ventana de diálogo “Tabla” dar clic derecho sobre el nombre de la variable para la que se calculará la Latitud o Longitud y seleccionar la opción “Calcular geometría... (Calculate Geometry.... en inglés)”, tal como se muestra en la figura 116.

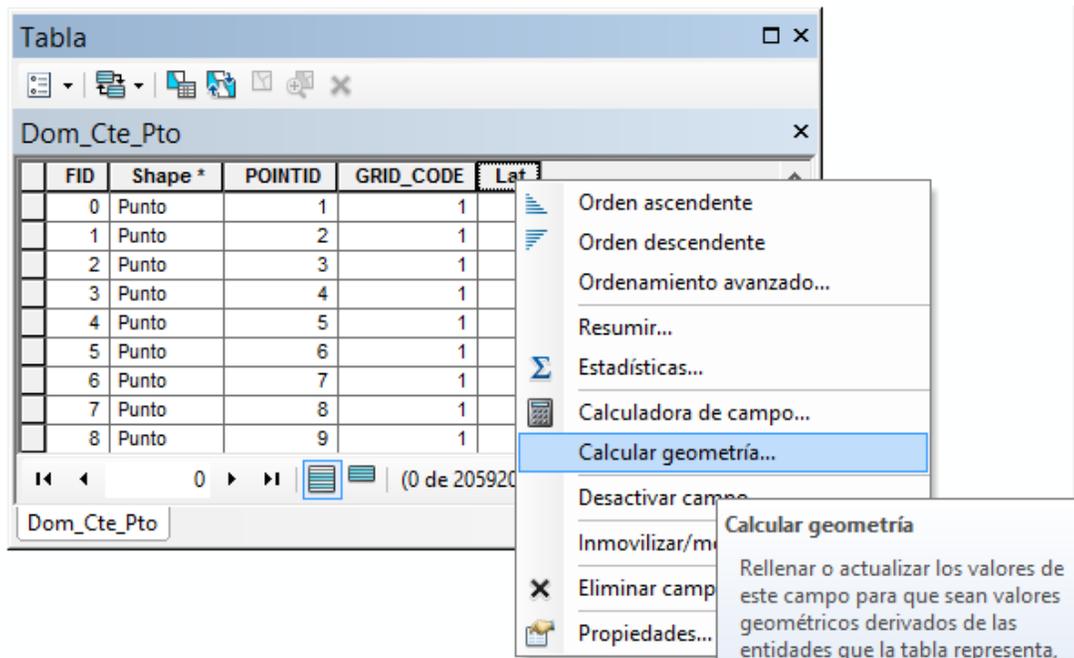


Figura 116. Menú con las opciones para calcular la geometría de la latitud de la variable “Lat”.

En el menú “Property” seleccionar “Y Coordinate of Point” para calcular Latitud y “X Coordinate of Point” para calcular la Longitud. Seleccionar “Decimal Degrees” en el menú “Units:”, tal como se muestra en la figura 117. Toma 40 minutos para procesar un dominio de 2,680x2,600 pixeles, con resolución de 100 mts.

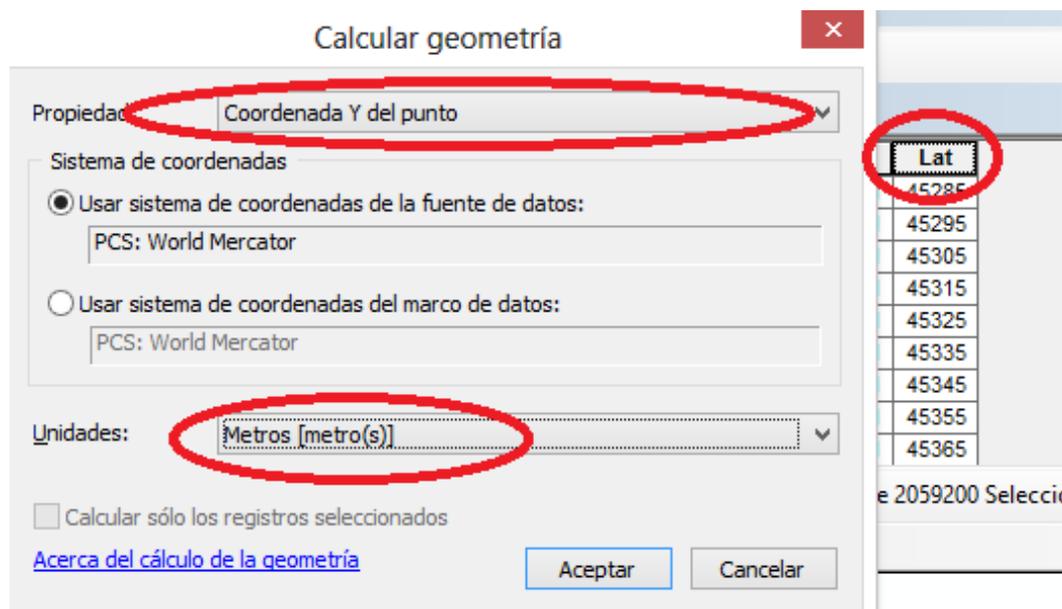


Figura 117. Selección de las opciones para calcular la geometría de la latitud de la variable “Lat”.

### 3.14.6. Generar la capa de información de la latitud y longitud de la malla fina del terreno para ser usada por el WRF-Hydro

Proceder a convertir el archivo *shapefile* de punto “**Dom\_Cte\_Pto**”, con la información de la latitud y longitud, a formato ráster. Seleccionar del menú “Herramientas de conversión (Conversion Tools, en inglés)”, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción “A ráster (To Ráster, en inglés)” y posteriormente seleccionar la opción “De punto a ráster (Point to Ráster, en inglés)”, tal como se muestra en la figura 118.

En la ventana de diálogo “*De ráster a punto*”, seleccionar la capa de información “**Dom\_Cte\_Pto**” en la opción “*Entidades de entrada*”, a continuación seleccionar la variable para la que se generará la capa ráster, ejemplo Lat o Lon, en la opción “*Campo de valor*”, posteriormente indicar la carpeta y el nombre del archivo de salida (ej. **Lat\_Hy** en la carpeta **Terreno**) en la opción “*Dataset ráster de salida*”. Indicar el valor correspondiente a la resolución de la malla fina, ejemplo 30 mts o 100 mts, en la opción “*Tamaño de celda*”, tal como se muestra en la figura 118. Toma varios minutos el procesamiento dependiendo del tamaño del dominio.

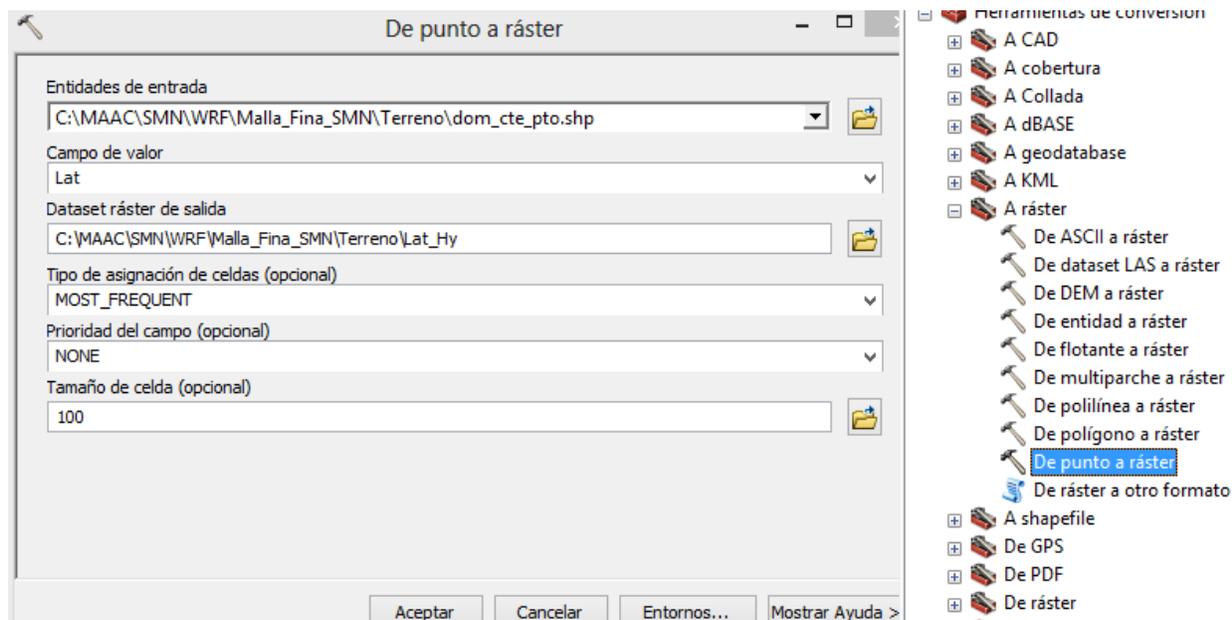


Figura 118. Opción completada para convertir el archivo *shapefile* de punto, con la información de la latitud y longitud, a una capa ráster.

Al concluir la ejecución de la herramienta “*De punto a ráster (Point to Raster, en inglés)*”, se obtiene la capa “*Lat\_Hy*” o “*Lon\_Hy*” que es usada por el modelo WRF-Hydro.

#### 4. Conversión de las capas de información a formato NetCDF

Una vez que se cuentan con las capas de información con las características del terreno para la malla fina (ej, de 30 mts o 100 mts), proceder a exportar las capas ráster a archivos con formato netCDF.

Se requiere que el nombre de las capas corresponda a como las leerá WRF-Hydro para que sean procesadas sin errores por el modelo WRF-Hydro. El nombre que debe asignarse a las variables para cada capa de información se indica en el cuadro 1.

Cuadro 1. Nombre de las capas de información para la malla fina del terreno.

Nombre de la capa de información como la lee WRF-Hydro	Indicación de la sección en la que se generan las capas
LATITUDE	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.14.
LONGITUDE	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.14.
TOPOGRAPHY	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.6. (por ejemplo la capa "MDE_Hy").
FLOWDIRECTION	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.7. (por ejemplo la capa "F_Dir_Hy").
CHANNELGRID	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.9. (por ejemplo la capa "F_Can_Hy"). En caso de que se genere la capa con lagos/embalses presentes en el dominio de trabajo, utilizar el ráster generado en los pasos de la sección 3.13. (por ejemplo la capa "F_Can_Lago_Hy")
STREAMORDER	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.10. (por ejemplo la capa "F_Ord-Hy").
frxst_pts	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.11. (por ejemplo la capa "Est_Rst_Hy").
LAKEGRID	Considerar los ráster que se generan con los pasos de la sección 3.12. (por ejemplo la capa "Lago_Hy"). En caso de que no existan lagos/embalses en el dominio de trabajo, generar la capa de información con valores de -9999. (ejemplo la capa "Lago-9999")
OVROUGHRTFAC	Establecer un valor de 1.0 por default, considerar el ráster con valores constantes de tipo flotante generado y proyectado con los pasos de la

	sección 3.14.2 y 3.14.3.
RETDEPRTFAC	Establecer un valor de 1.0 por default, considerar el ráster con valores constantes de tipo flotante generado y proyectado con los pasos de la sección 3.14.2 y 3.14.3.

Seleccionar del menú **"Herramientas de multidimensión (Multidimension Tools, en inglés)"**, de la caja de herramientas de ArcGIS, la opción **"De ráster a NetCDF (Ráster to NetCDF, en inglés)"**.

En la ventana de diálogo **"De ráster a NetCDF"** definir las opciones tal como se indica en la figura 119. Seleccionar en la opción **"Ráster de entrada"** la capa de información que se convertirá a formato NetCDF (por ejemplo la capa **"MDE\_Hy"**). En la opción **"Archivo de salida netCDF"** seleccionar la carpeta y el nombre del archivo de salida, por ejemplo el archivo **"MDE"** en la carpeta **NetCDF/**. En la opción **"Variable"** indicar el nombre correspondiente a la capa procesada, tal cual lo requiere el modelo WRF-Hydro, tal como se indica en el cuadro 1, por ejemplo **"TOPOGRAPHY"**. Mantener sin cambios el resto de las variables. Dar clic en el botón **"Aceptar"**.

Al concluir se genera el archivo con extensión **".nc"** en la carpeta **NetCDF/**

**Nota:** Repetir el procedimiento para el total de las capas de información requeridas por el WRF-Hydro.

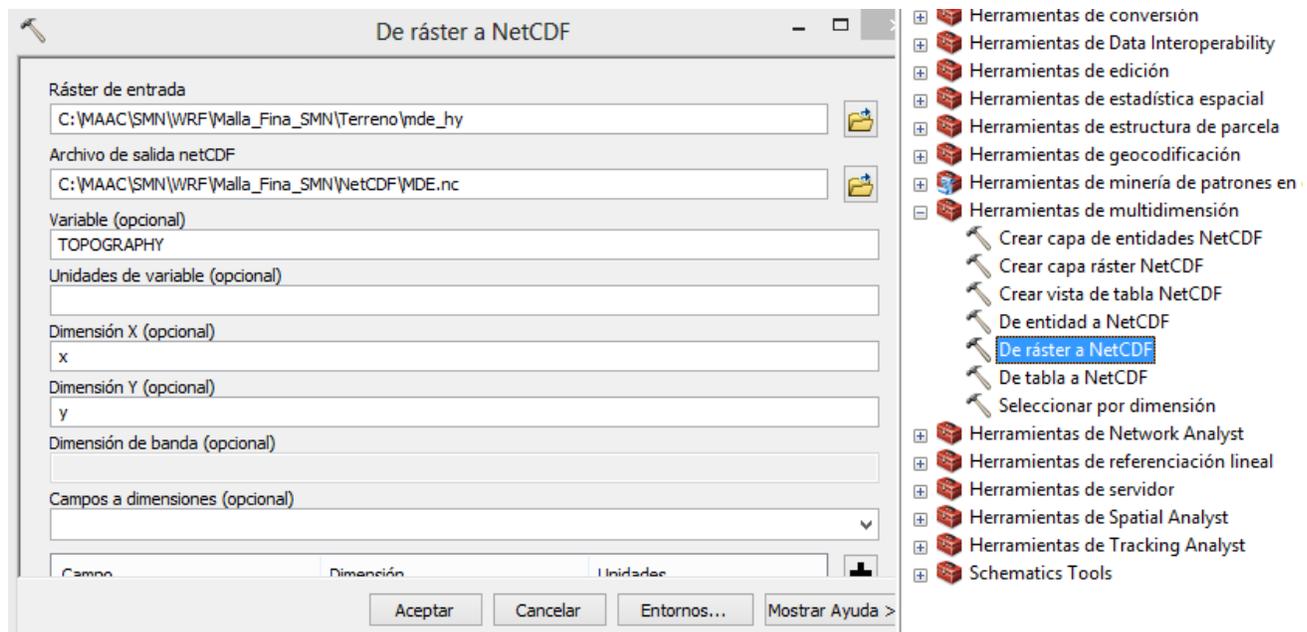


Figura 119. Opción completada para convertir los archivos ráster a formato netCDF.