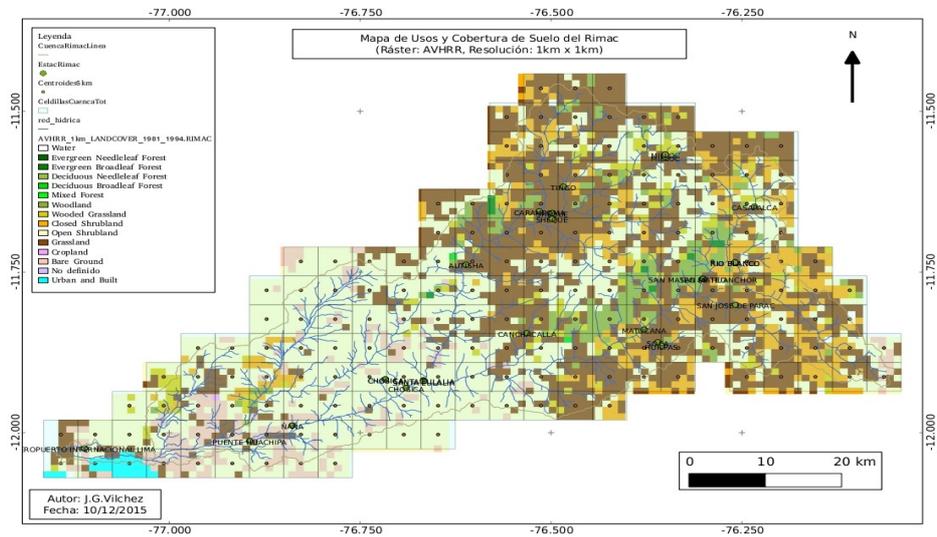




Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI



Estudio en relación al Plan Operativo Institucional 2015

Aplicación de los modelos WRF y VIC para modelización hidrológica en la cuenca del río Rímac

Parte 1. Configuración de modelos y preparación de los archivos de entrada

Autor

José Guillermo Vilchez Shapiama

Modelador numérico

Dependencia

Dirección de Meteorología Aplicada (DMA)

Dirección General de Meteorología (DGM)

SENAMHI

Diciembre 2015



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología
e Hidrología - SENAMHI

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI

Estudio en relación al Plan Operativo Institucional 2015

Aplicación de los modelos WRF y VIC para modelización hidrológica en la cuenca del río Rímac

Parte 1. Configuración de modelos y preparación de los archivos de entrada

Autor

José Guillermo Vilchez Shapiama

Modelador numérico

Dependencia

Dirección de Meteorología Aplicada (DMA)

Dirección General de Meteorología (DGM)

SENAMHI

Diciembre 2015



Contenido

.....	6
Resumen.....	7
Capítulo 1: Introducción.....	8
1.1. Motivación.....	8
1.2. Objetivo general.....	8
1.3. Objetivos específicos.....	8
1.4. Planteamiento del problema.....	9
1.5. Estructura del proyecto.....	9
Capítulo 2: Fundamentos teóricos.....	10
2.1. Impacto de los escenarios del clima futuro sobre las cuencas hidrológicas.....	10
2.2. Ciclo hidrológico y balance de agua.....	10
2.3. Modelización hidrológica y tipos de modelos hidrológicos.....	11
2.3.1. Modelos concentrados.....	11
2.3.2. Modelos distribuidos.....	12
2.4. El modelo hidrológico VIC y su acoplamiento con GCMs.....	13
2.5. Escenarios del IPCC.....	14
2.6. GCMs vs RCMs.....	17
2.7. Datos globales operacionales de pronóstico del GFS y datos de análisis del GDAS.....	17
2.8. Downscaling.....	18
2.8.1. Downscaling estadístico.....	19
2.8.2. Downscaling dinámico.....	20
Capítulo 3. Descripción de modelos.....	22
3.1 WRF.....	22
3.1.1 Introducción.....	22
3.1.2 Desarrollo y aplicaciones.....	22
3.1.3 Componentes principales del sistema WRF.....	22
3.1.3.1 Sistema de preprocesamiento (WPS).....	22
3.1.3.2 Sistema de procesamiento (ARW).....	24
3.1.3.3 Unidad de posprocesamiento (UPP).....	24
3.1.4 Representación de los esquemas físicos.....	25
3.1.4.1 Esquemas de microfísica.....	25
3.1.4.2 Esquemas cúmulos.....	27
3.2 VIC.....	29
3.2.1 Introducción.....	29
3.2.2 Componentes del modelo VIC.....	29
3.2.2.1 Cobertura de vegetación.....	30
3.2.2.2 Capas de suelo.....	31
3.2.2.3 Precipitación líquida.....	31
3.2.2.4 Evapotranspiración.....	31
3.2.2.5 Infiltración y escorrentía superficial.....	32
3.2.2.6 Escorrentía subsuperficial.....	34
3.2.2.7 Modo de balance de agua del VIC.....	35
3.2.2.8 Forzantes meteorológicas.....	36
Capítulo 4: Área de estudio.....	37
4.1. Localización y extensión de la cuenca.....	37



4.2. Características climáticas.....	37
4.3. Condiciones meteorológicas e hidrológicas.....	38
4.3.1 Curso de río.....	38
4.3.2 Precipitación.....	38
4.3.3 Evaporación.....	40
4.3.4 Caudales.....	41
4.3.5 Humedad relativa.....	42
4.4. Características geológicas, fisiográficas y de suelo.....	44
4.5. Aspectos ambientales, demográficos y socio-económicos.....	44
Capítulo 5: Materiales y Datos.....	47
5.1 Datos de percepción remota.....	47
5.2 Datos de modelos atmosféricos globales y regionales.....	47
5.3 Datos observados.....	47
Capítulo 6: Metodología.....	48
6.1. Aplicación del modelo WRF.....	48
6.1.1 Atributos y requerimientos del modelo WRF.....	48
6.1.2 Compilación del modelo WRF.....	48
6.1.3 Compilación del WPS.....	48
6.1.4 Preparación de los datos de entrada para la simulación.....	48
6.1.5 Ejecución de modelo WRF y pos-procesamiento de datos regionalizados.....	49
6.2. Aplicación del modelo VIC.....	49
6.2.1. Generación de la malla sobre la región de estudio.....	50
6.2.1.1. Grillado.....	50
6.2.1.2. Modelo de elevación de alta resolución.....	51
6.2.2. Construcción del archivo de parámetros de suelo.....	52
6.2.2.1. Definición de los centroides de la grilla en el archivo de parámetros de suelo.....	52
6.2.2.2. Definición de las celdas activas de ejecución en el archivo de parámetros de suelo.....	52
6.2.2.3. Definición de propiedades hidráulicas de suelo en la cuenca.....	52
6.2.2.4 Cálculo de la conductividad hidráulica saturada (Ksat).....	52
6.2.2.5 Cálculo de los exponentes de la ecuación de Campbell (EXPT).....	53
6.2.2.6 Cálculo de las elevaciones de las celdas de grilla (ELEV).....	53
6.2.2.7 Cálculo de la velocidad del flujo de base máximo (DsMax).....	53
6.2.3. Construcción de los archivos de vegetación.....	53
6.2.3.1 Construcción del archivo de librería de vegetación.....	53
6.2.3.2 Construcción del archivo de parámetros de vegetación.....	54
6.2.4. Construcción del archivo de forzantes meteorológicas.....	54
Capítulo 7: Evaluación de forzantes meteorológicas en puntos de grilla cercanos a algunas estaciones de observación.....	56
7.1 Análisis de los cambios estacionales y anuales en la temperatura máxima proyectada por los escenarios regionalizados a 5km usando el modelo WRF en el periodo futuro (2016-2045) en relación al periodo histórico (1981-2010).....	56
7.2 Precipitación.....	58
Capítulo 8: Conclusiones y Perspectivas.....	65
8.1 Conclusiones.....	65
8.2 Perspectivas.....	65



Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Clasificación de los modelos hidrológicos de cuenca limitada.....	13
Ilustración 2. Clasificación de los escenarios SRES. (IPCC).....	16
Ilustración 3. Esquema del flujo de datos entre los programas del WPS.....	24
Ilustración 4. Esquema del flujo de trabajo del WRF-ARW versión 3.....	25
Ilustración 5. Esquema del flujo de trabajo del WRF-ARW versión 3.....	26
Ilustración 6. Flujo esquemático de los procesos del modelo VIC.....	31
Ilustración 7. Representación esquemática del modelo de dos capas.....	31
Ilustración 8. Componentes de energía en las celdas y capas de suelo.....	33
Ilustración 9. Curva de capacidad de infiltración.....	34
Ilustración 10. Representación esquemática del flujo de base de Arno.....	35
Ilustración 11. Índice del Niño Oceánico dado por la NOAA.....	40
Ilustración 12. Precipitación mensual acumulada en algunas estaciones de la parte más baja de la cuenca del río Rímac.....	40
Ilustración 13. Precipitación mensual acumulada en algunas estaciones de la parte más alta de la cuenca del río Rímac.....	41
Ilustración 14. Aforo del río Rímac, medido en Seque y Tamboraque (SEDAPAL).....	42
Ilustración 15. Caudales medidos en Sheque y La Atarjea (SEDAPAL).....	43
Ilustración 16. Humedad relativa en algunas estaciones de cuenca del río Rímac.....	44
Ilustración 17. Evaporación mensual registradas en las estaciones de Campo de Marte y Ñaña.....	44
Ilustración 18. Población total por provincias en el Dpto. Lima (INEI,2009).....	47
Ilustración 19. Producción per cápita de agua potable en Lima (INEI).....	47
Ilustración 20. Principales centrales hidroeléctricas en el Rímac (EDEGEL).....	47
Ilustración 21. Producción anual de metales en Lima (INEI).....	47
Ilustración 22. Delimitación de la cuenca del río Rímac y generación de la grilla (~ 5km por 5km).....	51
Ilustración 23. Modelo de elevación digital utilizado en la cuenca del río Rímac.....	52
Ilustración 24. Mapa de Usos de Suelo y Cobertura de Vegetación en la cuenca del río Rímac.....	55
Ilustración 25. Distribución altitudinal de estaciones de la cuenca del río Rímac.....	58
Ilustración 26. Distribución de Tmax estacional y anual en los periodos histórico (Txh) y futuro (Txf) en algunas estaciones de la cuenca del río Rímac.....	58
Ilustración 27. Cambios en Tmax estacional y anual en algunas estaciones de la cuenca del río Rímac.....	58
Ilustración 28. Cambios en Tmax anual en los periodos histórico (Txh) y futuro (Txf) en algunas estaciones de la cuenca del río Rímac.....	58
Ilustración 29. Comparación entre series de precipitación mensual modelizadas (WRF) y observadas en algunas estaciones del Rímac.....	60
Ilustración 30. Diagramas de Taylor indicando los valores de SD, Correlación y RMSE de las series modelizadas (WRF) y de las observaciones en algunas estaciones del Rímac.....	61
Ilustración 31. Diagramas de dispersión entre la lluvia mensual acumulada modelizada y observada en las estaciones evaluadas del Rímac.....	63
Ilustración 32. Diagramas de caja de la lluvia mensual acumulada observada y modelizada (WRF) en las estaciones evaluadas del Rímac.....	64
Ilustración 33. Distribuciones de frecuencia relativa porcentual de las ocurrencias de lluvia mensual acumulada observada y modelizada (WRF) en las estaciones evaluadas del Rímac.....	65



Indice de Tablas

Tabla 1. Principales forzantes conductoras para los cuatro escenarios SRES para el 2100.....	16
Tabla 2. Opciones de Microfísica.....	25
Tabla 3. Opciones de parametrizaciones cúmulus.....	27
Tabla 4. Producción anual en el 2004 de algunas compañías mineras en el Rímac.....	45
Tabla 5. Configuración del sistema y las librerías instaladas en la estación de trabajo.....	49



Resumen

En esta investigación se presenta los avances realizados en el tema de modelización meteorológica e hidrológica acoplado usando los modelos WRF-VIC en la cuenca del Rímac a una escala espacial aproximada de 5km x 5km para un período de análisis que corresponde a los datos de forzamiento meteorológico de dos periodos: 1981-2005 y 2016-2045. Estos datos meteorológicos de precipitación y temperatura han sido regionalizados a partir de un escenario de cambio climático global de alto forzamiento radiativo utilizando el modelo atmosférico WRF y han sido verificados con los datos de estaciones de observación en la cuenca del Rímac.

Se realiza una delimitación de la cuenca Rímac usando un modelo de elevación digital de alta resolución y se generan los archivos de suelo y vegetación con información combinada de datos de satélite y bases de datos globales de suelo. Asimismo, se configuran los archivos de entrada del modelo hidrológico en los formatos apropiados a través de programas de análisis y procesamiento desarrollados, así como, con el uso de las herramientas GIS.

La información consolidada a escala de la cuenca Rímac ha sido preparada y ha sido evaluada mediante estadísticos apropiados y ha demostrado ser adecuada para su uso en la modelización hidrológica con el modelo VIC.



Capítulo 1: Introducción

El reto de la caracterización meteorológica e hidrológica a escalas locales mediante la aplicación de modelos numéricos que simulan los mecanismos físicos de los procesos y la variabilidad asociada al clima que ocurre en las cuencas, constituye un desafío que muchos países han decidido adoptar debido a la capacidad para producir datos en tiempo real que pueda ser transformado en información útil para la generación de estudios e investigaciones de interés y la toma de decisión en temas de interés nacional como: gestión de riesgos naturales, gestión de los recursos hídricos y planificación ambiental en la localidad.

La modelización regional de las condiciones atmosféricas e hidrológicas permite disponer de información útil para la toma de decisiones en relación a la gestión de los recursos hídricos, energéticos, ambientales y diversas actividades económicas y sociales en cuencas hidrográficas de interés condicionados a la variabilidad del clima regional. Los impactos de la variabilidad del clima puede influir directamente en las cuencas debido a la sensibilidad que se presenta a escalas locales y puede afectar severamente muchos ámbitos del desarrollo económico y social de las localidades.

La modelización numérica meteorológica e hidrológica responde a la necesidad de contar con información en tiempo real con una metodología de trabajo consistente y aplicable a la acción directa y a la generación de productos en apoyo a las decisiones e investigación. Esto se alinea con los objetivos del SENAMHI en su afán de servicio en los temas de gestión a la respuesta meteorológica e hidrológica nacional.

Este estudio de investigación se desarrolla en relación al Plan Operativo Institucional 2015 y ha sido llevado a cabo por el autor en la Dirección de Meteorología Aplicada (DMA) del SENAMHI.

1.1. Motivación

Los esfuerzos y retos por la modelización meteorológica e hidrológica combinada constituyen metodologías y herramientas fundamentales para la disposición de datos regionalizados en tiempo real que nos permite a la institución mantenerse a la vanguardia en investigación y trabajo operativo a escalas locales. La aplicación de los modelos atmosféricos regionales que conducen a los modelos hidrológicos, asimismo, permite resolver problemas de diversa índole en temas de interés nacional asociados a los peligros meteorológicos e hidrológicos, así como planeación en temas de gestión de cuencas, hídricos y resiliencia.

1.2. Objetivo general

Implementar un sistema de modelización regional meteorológico-hidrológico a escala de cuenca que permita brindar información y datos en tiempo real para realizar estudios y productos hidrometeorológicos locales de impacto nacional.

1.3. Objetivos específicos

Etapas 1:

1.3.1 Describir los fundamentos y la metodología de la modelización hidrometeorológica regional y local, los modelos utilizados y las fuentes de datos globales y locales disponibles.

1.3.2 Realizar la delimitación de la cuenca del Rímac usando un modelo de elevación digital de alta resolución a una resolución aproximada de 5km x 5km.

1.3.3. Generar información grillada en el dominio de trabajo de la cuenca del Rímac a una escala espacial de aproximadamente 5 km x 5km.

1.3.4. Preparar los datos de entrada meteorológicos regionalizados (WRF), los datos de suelo y archivos de vegetación de la cuenca a partir de datos de satélite, así como, los archivos de



configuración del modelo VIC.

1.3.5. Evaluar los datos de entrada meteorológicos del modelo VIC para la conducción de la simulación hidrológica.

1.3.6 Preparar los programas de procesamiento y rutinas de automatización de la simulación hidrológica.

Etapas 2:

1.3.7. Realizar la simulación hidrometeorológica usando el sistema WRF-VIC.

1.3.8 Evaluar de los flujos hidrológicos y energéticos en la cuenca mediante técnicas estadísticas.

1.3.9 Investigar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Rímac y el modo en que es afectado por los cambios en la variabilidad del clima regional determinado a partir de la caracterización de la vegetación, suelos y de un escenario de forzamiento meteorológico regional.

Etapas 3:

1.3.10 Implantación del sistema de modelización meteorológico - hidrológico acoplado WRF-VIC en la DMA-DGM-SENAMHI para simulación operativa.

1.4. Planteamiento del problema

Los escenarios de cambio climático dados por el IPCC han demostrado la presencia de un cambio considerable en las condiciones atmosféricas. Estos cambios globales afectan la variabilidad del clima regional y así como también las condiciones en los regímenes regulares de los sistemas de cuenca hidrológicos: ríos, suelos, subsuelo y vegetación. Los regímenes dinámicos de estos componentes del sistema cuenca hidrológico pueden presentar una alteración en los procesos climáticos regulares caracterizados por la manifestación de eventos extraordinarios o atípicos de distinta naturaleza y que son producto de una influencia directa o indirecta del cambio climático global presente.

1.5. Estructura del proyecto

En la etapa inicial del presente proyecto de investigación se desarrolla la Implementación de la infraestructura lógica de trabajo, revisión de la literatura científica relacionada, descripción de la metodología y de las herramientas, así como las fuentes de datos utilizados y evaluación de los datos de entrada en los modelos por medio de medidas estadísticas de verificación apropiadas.

En la segunda etapa de trabajo se proyecta desarrollar la simulación acoplada piloto, la cual consiste del uso de los datos de modelo global regionalizados mediante el sistema WRF y la conducción con este forzamiento meteorológico, así como datos de suelo, vegetación, entre otros, obtenidos de procesamiento de datos globales satélite interpolados, hacia la simulación de los balances hidrológicos y energéticos a nivel de cuenca usando el modelo hidrológico distribuido VIC. En esta etapa se pretende, asimismo, evaluar los caudales modelizados y los regímenes hídricos utilizando las técnicas estadísticas apropiadas.

La etapa final de este proyecto consiste en implantar el sistema de pronóstico operacional de modelización meteorológica e hidrológica en la DMA-SENAMHI que permita brindar los servicios necesarios y productos a los usuarios internos y externos de la institución.



Capítulo 2: Fundamentos teóricos

2.1. Impacto de los escenarios del clima futuro sobre las cuencas hidrológicas

Los escenarios del cambio climático presentados en el quinto reporte del IPCC indican un calentamiento acelerado y considerable en las condiciones atmosféricas respecto al valor climático presentado durante los últimos 50 años. Esta alteración del clima global, conducido principalmente por actividades antropogénicas, ha venido provocando impactos directos e indirectos en los sistemas naturales de escalas regionales y locales, como en la dinámica de las cuencas hidrográficas, principalmente en los regímenes de caudales de los ríos, sistemas agrícolas, comportamiento de suelos y vegetación, manifestándose a través de fenómenos inusuales y de corta duración que han ocurrido a diferentes intensidades y con una variabilidad asociada a las teleconexiones con el clima global en relación a la ocurrencia de estos eventos.

Durante los últimos 50 años, la cuenca del río Rímac (Lima, Perú), por ejemplo ha sufrido una serie de drásticas transformaciones por el uso y demanda de recursos hídricos y suelos por las actividades poblacionales, urbanas, industriales y de explotación minera, desarrolladas a lo largo de la cuenca. Estas actividades sumadas a la influencia del clima global ha generado una alteración en los regímenes naturales de la cuenca, especialmente en su comportamiento hidrológico, el cual ha manifestado episodios de descargas inusuales de altas intensidades y de corta duración, en particular en las épocas de verano costero. Estos volúmenes de descargas han alcanzado registros muy elevados en las series de caudales que han producido inundaciones en los márgenes más vulnerables del río y deslizamientos de lodo y piedras en la quebradas de las partes altas de la cuenca. La ocurrencia de estos episodios extremos de descarga a nivel hidrológico, también ha estado precedida por eventos de sequía prolongados y a un cambio en la vegetación y suelos de los valles agrícolas, y así como también, los deshielos de las cumbres de montaña occidentales y lagos ubicados en las cabeceras altas de esta cuenca.

2.2. Ciclo hidrológico y balance de agua

Los procesos involucrados en la circulación del agua desde los cuerpos de suelo y agua hacia la atmósfera y desde la atmósfera nuevamente hacia estos cuerpos, pasando a través de diferentes estados termodinámicos, es conocido como el ciclo hidrológico. Estos procesos físicos forman un movimiento continuo del agua a través del globo. Los componentes más importantes del ciclo hidrológico, lo constituyen los procesos de evapotranspiración, precipitación, interceptión, infiltración, percolación y escorrentía. La evapotranspiración toma en cuenta los procesos de evaporación del agua desde el suelo, mares, lagos, nieve y lluvia combinado con la transpiración de las plantas. La condensación es el cambio de fase del vapor de agua a líquido, La precipitación es el proceso por el cual el agua es libreada desde las nubes en forma líquida como lluvia, y sólida como granizo, nieve o escarcha, la cual llega por acción de la gravedad al suelo. La interceptión es un proceso por el cual un volumen de agua es capturado por la vegetación. La infiltración ocurre cuando una porción de la precipitación que llega a la superficie terrestre se transmite dentro del suelo. Mientras que la mezcla de suelo es la fracción del volumen de agua que permanece en las diferentes capas del suelo. La percolación es el movimiento del agua a través de las capas del suelo por empuje gravitacional o por acción de capilaridad. Por último, la escorrentía es la precipitación que llega a la superficie terrestre pero que no se infiltra al suelo. La escorrentía puede estar constituida también por nieve o hielo derretido. Finalmente, tan pronto como la escorrentía llega a un canal, este pasa a ser un río o curso de agua.



La cantidad neta de agua de un área toma en cuenta toda el agua que fluye dentro y fuera del área. El área del territorio que drena hacia un río o un curso de agua en un punto de salida dado, se conoce como una cuenca de drenaje. La ecuación de la cantidad neta de agua puede ser escrita, en su forma más simple, como

$$Q_{in} - Q_{out} = \Delta Q \quad (1)$$

donde Q_{in} es el flujo de masa de agua hacia el interior, Q_{out} , el flujo de masa de agua hacia el exterior y ΔQ el flujo neto de masa de agua en la cuenca de drenaje.

Para una cuenca de drenaje dada, la ecuación matemática del ciclo hidrológico dentro de un marco de tiempo dado que incorpora los principios de continuidad de masa y energía en sus diferentes fases es denominado como la cuota neta de agua o balance neto de agua y se expresa según

$$P - Q - ET - G = \Delta S \quad (2)$$

Donde, P es la precipitación, Q es la escorrentía superficial, ET la evapotranspiración, G la escorrentía subsuperficial y ΔS es el cambio en la cuota de agua.

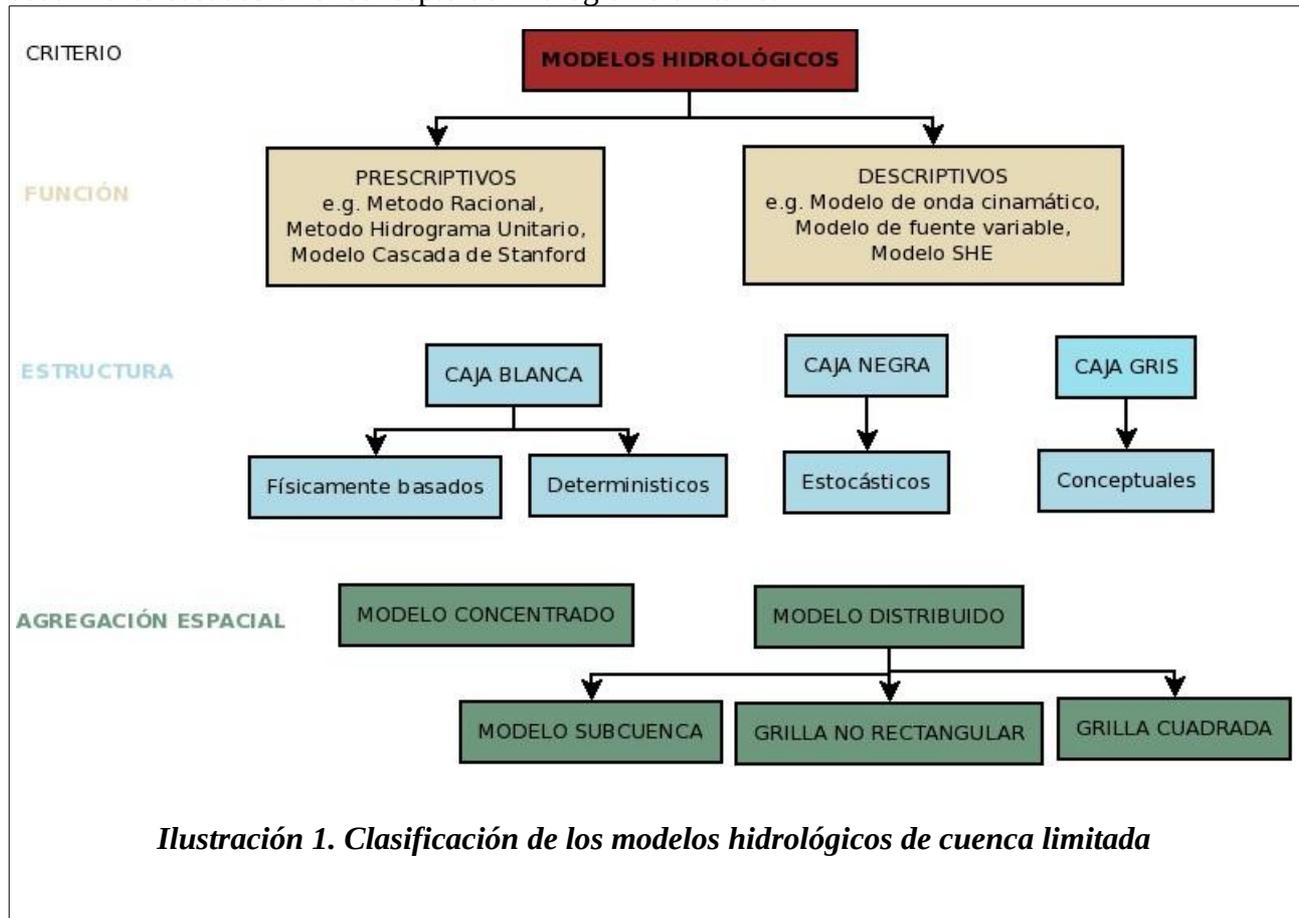
2.3. Modelización hidrológica y tipos de modelos hidrológicos

Antes de la aparición del hidrograma unitario de Sherman (1932), la modelización hidrológica era realizada de un modo empírico y basado en datos limitados. Desde la aparición del hidrograma, la modelización hidrológica se ha convertido en una ciencia basada en un uso intensivo de datos, computadores y software. Actualmente, existen modelos que cubren cada faceta de la interacción del agua con el entorno ambiental [1]. La Ilustración 1 muestra una clasificación de los modelos hidrológicos de cuenca limitada dada por Schulze en el 2002. El primer nivel de separación entre los modelos de cuenca limitada depende si el modelo incluye o no aleatoriedad en sus cálculos. Si se provee una entrada particular a un modelo determinista, siempre se produce la misma salida. Los modelos estocásticos usualmente realizan un análisis estadístico para inferir el comportamiento natural hidrológico. Los modelos distribuidos representan la distribución espacial de las variables tomando en consideración la heterogeneidad del terreno. Los modelos concentrados, sin embargo, producen resultados promediando espacialmente las variables. El tercer nivel de separación considera el tratamiento de la variación temporal dentro del modelo. Las variaciones en el flujo con cambio en el tiempo son adecuadamente simulados usando modelos de cuenca determinísticos, mientras que trabajando con modelos estocásticos se puede obtener salidas siempre diferentes. En el campo de la modelización determinística recientes esfuerzos han sido enfocados hacia el desarrollo de modelos basados en mecanismos físicos, los cuales intentan representar los procesos naturales tan realísticamente como sea posible.

2.3.1. Modelos concentrados

Estos modelos describen la cuenca como una única unidad dentro de una única entrada de precipitación (precipitación promedio). La descarga en la salida de la cuenca es descrita basada en

la dinámica global del sistema. Existen muchos modelos concentrados. Estos modelos están usualmente basados en el concepto del hidrograma unitario.



Los modelos concentrados son aquellos que comúnmente no toman en cuenta las variaciones espaciales de la precipitación, flujo de agua y otros procesos relacionados, enfocándose en entradas, salidas y valores de parámetros espacialmente promediados. Los modelos concentrados son limitados en su habilidad para representar procesos físicos debido al uso del promediado espacial de las variables. Estos modelos son incapaces de representar las complejidades de los sistemas y procesos hidrológicos. Los modelos concentrados por tanto están usualmente limitados en su aplicación a aquellas cuencas donde la variabilidad espacial no determina la salida de un evento.

2.3.2. Modelos distribuidos

En palabras de Muszik, 1996: “un verdadero modelo distribuido de un proceso es posible solo si el proceso puede ser descrito por una ecuación que tiene una solución analítica”. Este tipo de modelos están basados en condiciones físicas, lo que significa que ellos trabajan sobre la base de parámetros observados en lugar de estimaciones. Aunque la mayoría de los modelos distribuidos requieren un cierto grado de concentración o agregación, su objetivo es tomar en cuenta las variaciones espaciales de los procesos y parámetros hidrológicos. Inicialmente, las limitaciones de los modelos distribuidos provenían de la computación de una vasta cantidad de datos requeridos para ejecutar el modelo. Sin embargo, debido a los avances en los computadores y los software de modelización, la



actual limitación de los modelos falta de datos hidrológicos distribuidos disponibles (Muszik,1996). En la mayoría de los modelos distribuidos, las unidades de respuesta hidrológicas (Hydrologic Response Units, HRU) son delineadas combinando el uso de datos de topografía, propiedades de suelo, uso de suelo y otras propiedades pertinentes. Los modelos distribuidos son especialmente útiles, por ejemplo, cuando los impactos por cambios de uso de suelo van a ser estudiados o analizados espacialmente mediante la variación de las respuestas hidrológicas.

2.4. El modelo hidrológico VIC y su acoplamiento con GCMs

El modelo de capacidad de infiltración variable (*Variable Infiltration Capacity Model*, VIC) es un modelo hidrológico de macro escala para el balance de agua y energía, ha venido siendo desarrollado desde hace más de 10 años en la universidad de Washington y universidad de Princeton. La primera versión del modelo VIC ha sido descrito en detalle por Liang et al. (1994) y Liang et al. (1996). Para examinar la sensibilidad de un modelo de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés) al cambio climático, el modelo VIC fue incorporado al modelo R15 del GFDL e implementado en el GFDL y el *Max Planck Institute* (MPI) (Stamm et al. , 1994).

Xu Liang et al. (1994) en su estudio trata con la capacidad del modelo VIC para incorporar flujos de agua superficial y flujos de energía en GCMs. Un modelo hidrológico de terreno y superficie que es una generalización del modelo VIC fue descrito como adecuado para su aplicación en un GCM. El modelo VIC, el cual incorpora una descripción de dos capas de la columna de suelo, está formulado para una aplicación acoplada completa dentro de un GCM. La capa de suelo superior está caracterizada por el esquema espacialmente distribuido del VIC de capacidades de mezcla de suelo y la capa de suelo inferior es espacialmente agregada y usa el término de drenaje de Arno (Francini y Pancciani, 1991). El modelo divide el área de interés (e.g. en celdas de grilla) en N+I tipos de cobertura de superficie de terreno; para cada tipo de cobertura de terreno la fracción de raíces para la zona superior e inferior es especificada. La evaporación y transpiración son parametrizadas por la técnica de Penman y Monteith aplicada separadamente para tratar las clases de suelo y de vegetación. La evaporación del agua interceptada por la vegetación es también representada. Adicionalmente, el modelo contiene un esquema de acumulación de nieve basado en energía y una parametrización de la ablación.

El modelo VIC ha sido desarrollado con el fin de representar la resolución horizontal y heterogeneidad de submalla de un modo simple para su incorporación en los modelos globales. Empleando la infiltración y el esquema de escorrentía superficial del modelo de Xianjiang (Zhao, 1980). Además de las mejoras mencionadas a los procesos de balance de agua y energía en el modelo VIC, se han realizado esfuerzos para proveer mejores forzantes meteorológicas a través del preprocesador de datos. Usando algoritmos dados por Kimball et al. (1997), Thornton y Running (1999), y Bras(1990), un conjunto completo de variables hidrológicas es construido a partir de limitados datos conductores observados (precipitación, temperatura mínima y máxima del aire y rapidez del viento) (Nijssen et al., 2001). El marco completo de trabajo del modelo VIC ha sido descrito en detalle por Liang et al. 1994, Liang et al. 1996, Nijssen et al. 1997.

Las características principales del modelo basado en grilla VIC son la representación de la heterogeneidad de la vegetación, capas de suelo múltiples con infiltración variable, y flujo de base no lineal. Comparado a otros modelos hidrológicos de superficie de terreno, las características hidrológicas que distinguen al VIC son

(a) Su representación de la variabilidad de submalla en la capacidad neta de mezcla de suelo como una distribución espacial de probabilidad a la cual la escorrentía superficial está relacionada (Zhao et al. 1980).



(b) Su parametrización del flujo de base, la cual ocurre a partir de una zona de mezcla de suelo inferior como una recesión no lineal (Dumenil y Todini,1992).

Como ha sido discutido por Lohmann et al. (1998) la hidrología de suelo (la cuota de agua de suelo, la generación de escorrentía superficial y el drenaje de sub-superficie) tiene una influencia crítica en los balances de agua y energía de largo plazo. Las simulaciones hidrológicas usando un modelo distribuido han mostrado una tendencia decreciente para las décadas 2020 y 2050, y una considerable tendencia creciente para el 2080.

2.5. Escenarios del IPCC

El reporte especial sobre escenarios de emisiones (SRES) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) establece diferentes posibilidades futuras de desarrollo del mundo en el siglo 21, tomando en consideración los cambios posibles en diferentes factores en el futuro que se incluyen como el desarrollo económico, desarrollo tecnológico, intensidades de energía, demanda de energía, estructura del uso de la energía, disponibilidad de recursos, cambio de la población y cambio de uso de suelo. Las posibilidades de cambios en el desarrollo futuro han sido categorizadas principalmente en una forma de cuatro grandes lineamientos cuantificados como cuatro familias de escenarios denominados A1,A2,B1 y B2 (Ilustración 2). Nakicenovic y Swart (2000) han discutido en el reporte de escenarios de emisión respecto a las cuatro familias de escenarios cada una de las cuales consiste de de un número de escenarios. Hay un total de 40 escenarios diferentes construidos a través de esos cuatro grandes familias. Algunos de ellos tienen entradas armonizadas que implica que ellas comparten similares trayectorias pre-especificadas de crecimiento de población mundial y producto bruto interno (*Gross Domestic Product, GDP*). Estos están marcados por “HS” para los escenarios globalmente armonizados. Todos los escenarios de la misma familia basados en la cuantificación del lineamiento elegido por el grupo de modelización han sido marcados como “OS”. La familia A1 está dividida en cuatro grupos de escenarios que exploran desarrollos alternativos futuros en el sector energético futuro. Finalmente, uno de los escenarios armonizados está diseñado como el característico representativo de cada familia y es el escenario marcado.

La Tabla 1, adaptada a partir del SRES muestra un resumen de los principales forzantes para los cuatro escenarios SRES marcados para el 2100 si no se indica de otro modo. Los números entre paréntesis muestran el rango a través de todos los otros escenarios a partir de la misma familia de escenarios como está indicado. (las regiones IND incluyen países industrializados y DEV aquellos países en desarrollo).

El conjunto de datos del escenario A2 de SRES está marcado por ser altamente heterogéneo. Este escenario particular está caracterizado por un incremento continuo en la población (Lutz,1996). La población alcanzaría los 10 billones para el 2050. Un crecimiento económico medio de hasta 2.3 GDP se esperaría para mediados del siglo 21 con énfasis en una economía regionalmente orientada. El ingreso per cápita es también considerado dentro de un rango medio comparado a los otros escenarios. Además la familia de escenarios A2 está marcado por un alto uso de la energía primaria con lento desarrollo en la tecnología. El gobierno es independiente con preservación de las identidades locales. El desarrollo económico está regionalmente orientado y el desarrollo tecnológico es relativamente lento comparado a los otros lineamientos. A partir de estos factores y usando Modelos de Mejoramiento Integrados (*Integrated Assesment Models-IAMs*) las emisiones de los principales gases de efecto invernadero han sido proyectadas para el siglo 21.

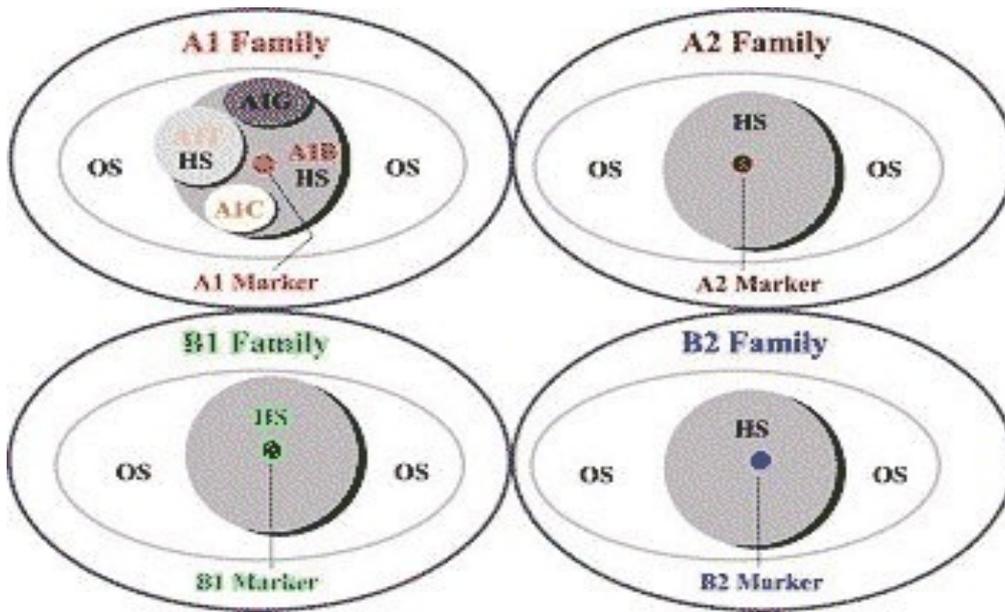


Ilustración 2. Clasificación de los escenarios SRES. (IPCC)

Las emisiones de CO₂ acumuladas para la mitad y fin del siglo 21 son proyectados a 600 y 1800GtC, respectivamente; y las concentraciones de CO₂ esperadas (en unidades de partes por millón - ppm) para la mitad y fin del siglo 21 son de alrededor de 575 y 870ppm, respectivamente. La actual concentración de CO₂ es alrededor de 380ppm. El metano y el óxido nítrico se incrementa rápidamente en el siglo 21. El dióxido de azufre se incrementa a un valor máximo poco antes de 2050 (105 MtS/año) y luego decrece en la segunda mitad del siglo (60MtS/año para el 2100) (Nakicenovi et al. 2000).



Familia Escenario	Población en billones	Crecimiento económico (GDP)(a)	Ingreso per cápita (GDP/cápita)	Uso de energía primaria	Uso de energía de hidrocarburos (b)	Cambio en el uso de suelo (c)
A1	Lutz (1996) Bajo ~7 billones 1.4 IND 5.6 DEV	Muy alto 1990- 2020: 3.3 (2.8- 3.6) 1990- 2050: 3.6 (2.9- 3.7) 1990- 2100: 2.9 (2.5- 3.0)	Muy alto IND: US\$ 107,300 (60,300- 113,500) DEV: US\$ 66,500 (41,400- 69,800)	Muy alto 2.26 (1,002-2,683)EJ Intensidad de energía bajo: 4.2 MJ/US\$(1.9-5.1)	Variado en cuatro grupos de escenarios: Petróleo: bajo a muy alto 20.8 (11.5-50.8)ZJ Gasolina: alto a muy alto 42.2 (19.7-54.9)ZJ Carbón: medio a muy alto 15.9 (4.4-68.3)ZJ	Bajo 1990-2100 3% tierras de cultivos, 6% pastizales, 2% bosques
A2	Lutz (1996) Alto ~15 billones 2.2 IND 12.9 DEV	Medio 1990-2020: 2.2 (2.0-2.6) 1990-2050: 2.3 (2.0-2.3) 1990-2100 2.3 (2.0-2.3)	Bajo en DEV Medio en IND IND: US\$ 46,200 (37,100-64,500) DEV: US\$ 11,000 (10,300-13,700)	Alto 1,717 (1,304-2,040)EJ Intensidad de energía alto: 7.1 MJ/US\$(5.2-8.9)	Dependencia del escenario Petróleo: Muy bajo a medio 17.3 (11.0-22.5)ZJ Gasolina: Bajo a alto 24.6 (18.4-35.5)ZJ Carbón: Medio a muy alto 46.8 (20.1-47.7)ZJ	Medio n.a a partir de ASF
B1	Lutz (1996) Bajo ~7 billones 1.4 IND 5.7 DEV	Alto 1990- 2020: 3.1 (2.9- 3.3) 1990- 2050: 3.1 (2.9- 3.5) 1990- 2100: 2.5 (2.5- 2.6)	Alto IND: US\$ 72,800 (65,300- 77,700) DEV: US\$ 40,200 (40,200- 45,200)	Bajo 514 (514-1,157)EJ Intensidad de energía muy bajo:1.6EJ/US\$ (1.6-3.4)	Dependencia del escenario Petróleo: Muy bajo a alto 19.6 (15.7-19.6)ZJ Gasolina: Medio a alto 14.7 (14.7-31.8)ZJ Carbón: Muy bajo a alto 13.2 (3.3-27.2)ZJ	Alto 1990-2100: -28% tierras de cultivos -45% pastizales +30% bosques
B2	UN (1998) Medio ~10 billones 1.3 IND 9.1 DEV	Medio 1990- 2020: 3.0 (2.2- 3.1) 1990- 2050: 2.8 (2.1- 2.9) 1990- 2100: 2.2 (2.0- 2.3)	Medio IND: US\$ 54,400 (42,400- 61,100) DEV: US\$ 18,000 (14,200- 21,500)	Medio 1,357 (846-1,625)EJ Intensidad de energía medio: 5.8 MJ/US\$ (4.3-6.5)	Petróleo: Bajo a medio 19.5 (11.2-22.7)ZJ Gasolina: Bajo a medio 26.9 (17.9-26.9)ZJ Carbón: Bajo a muy alto 12.6 (12.6-44.4)	Medio 1990-2100: +22% tierras de cultivos +9% pastizales +5% bosques (d)

(a) Tasas de crecimiento exponencial dadas por el método del Banco Mundial (1999) calculadas usando diferentes años base a partir de los modelos.
(b) La disponibilidad de recursos es generalmente combinado con las tasas de cambio tecnológico específicas de los escenarios..
(c) Categorías de uso de suelo residuales y otras no son mostrados en la tabla.
(d) Datos de uso de suelo para el escenario B2 marcado tomado a partir de la ejecución del escenario AIM de uso de suelo B2

Tabla 1. Principales forzantes conductoras para los cuatro escenarios SRES para el 2100



2.6. GCMs vs RCMs

Los modelos de circulación global de la atmósfera (*Global Circulation Models* - GCMs) son capaces de simular las condiciones globales aceptablemente típicamente a escalas espaciales con rangos desde los 100km a más, así como también los promedios anuales, las escalas temporales estacionales y los procesos a escalas verticales elevadas. Las principales variables atmosféricas que se incluyen son los vientos, temperatura y presión. Mientras que para resolver los fenómenos físicos regionales de un área que ocurren a nivel de mesoescala o microescala se presenta la necesidad de producir detalles regionales bien distribuidos. Por ejemplo, para simular la hidrología de una región se necesita resolver escalas espaciales del orden de 0 a 50km, valores temporales de promedios diarios, y datos muy cerca de la superficie con evapotranspiración, escorrentía y mezcla de suelo como variables de trabajo principales. La ventaja de los modelos de circulación regional (*Regional Circulation Models* – RCMs) radica en la compensación al decremento de exactitud de los GCMs a escalas de altas resoluciones para realizar estudios de impactos locales. Un RCM puede resolver más apropiadamente muchas características de la superficie tales como la topografía de montaña compleja y líneas de costa.

Existen diferencias importantes cuando un GCM representa el mundo real (*Landman*). La representación de efectos de pequeña escala dada por el modelo (tales como la topografía), de gran importancia para la representación del clima local, puede ser pobremente representado en un GCM, sin embargo, es plausible producir simulaciones detalladas para regiones seleccionadas mediante un anidamiento de un RCM dentro de un GCM. Para incluir las condiciones de frontera laterales iniciales y dependientes del tiempo de un GCM, campos meteorológicos de gran escala son usados. El RCM es acoplado a un modelo global el cual proporciona las condiciones de frontera regularmente durante la integración del RCM. El modelo regional, asimismo, produce un mejor detalle de la distribución espacial de la temperatura y precipitación.

2.7. Datos globales operacionales de pronóstico del GFS y datos de análisis del GDAS

El *Global Forecast System* (GFS) es un sistema de pronóstico de las condiciones meteorológicas producido por los *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Muchas variables atmosféricas y de suelo están disponibles a través de este conjunto de datos desde temperatura, viento, y precipitación a mezcla de suelo y concentración de ozono atmosférico. El globo completo es cubierto por el GFS a una resolución horizontal base de 28km entre puntos de malla. Estos datos son usados para propósitos de pronóstico operativo para predecir las condiciones meteorológicas hasta 16 días en el futuro.

El sistema GFS es un modelo acoplado, compuesto por cuatro modelos separados (un modelo atmosférico, un modelo oceánico, un modelo de terreno y suelo, y un modelo de hielo marino), los cuales trabajan juntos para proporcionar una representación apropiada de las condiciones meteorológicas. Algunos cambios son regularmente realizados al modelo GFS a fin de mejorar su rendimiento y la exactitud del pronóstico.

Existen diferentes tipos de productos del GFS disponibles para su descarga a través de sus servidores oficiales. Los análisis del GFS a escalas espaciales de 0.5 grados y 1 grados, están disponibles para el período de 2004 a la fecha en ciclos de 4 ejecuciones por día (00, 06, 12, 18 UTC), con pasos de tiempo de salidas a las 00UTC y con salidas para la precipitación cada 00, 03, 06 UTC. Los pronósticos GFS tienen escalas espaciales de 0.5 grados y 1 grados y están también disponibles desde el 2004 hasta el presente, se ejecutan 4 veces por día, y el paso de tiempo de salida es 3h.



Estos datos del GFS pueden ser entonces usados en un RCM para producir pronósticos operativos a escala regional. Estos pronósticos operativos asimismo deben ser validados con información observacional en tiempo real para garantizar la correcta utilización de los datos de pronóstico obtenidos. Un sistema de asimilación de datos podría realizar esta tarea y podría contribuir a la mejora de los pronósticos en el sistema operacional.

Los *NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses* son un conjunto de datos de análisis globales operacionales a una resolución de 1 grado por 1 grado y preparados cada seis horas. Este producto es producido a partir del *Global Data Assimilation System - GDAS*, el cual continuamente colecta datos observacionales a partir del *Global Telecommunications System - GTS* y otras fuentes para realizar los análisis. Los datos FNL son producidos con el mismo modelo que el *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* utiliza en el *Global Forecast System (GFS)*, pero los datos FNL son preparados alrededor de una hora después que los GFS son inicializados. Estos datos FNL son retardados de modo que más datos observacionales puedan ser usados. El GFS es ejecutado anticipadamente a fin de soportar las necesidades de pronóstico crítico de tiempo y usa los datos FNL a partir del ciclo de las primeras seis horas como su inicialización. Los datos de análisis FNL están disponibles en la superficie a 26 niveles principales a partir de 1000mb a 10mb en la capa de frontera de la superficie y en algunas capas de niveles sigma, la tropopausa y otras. Los parámetros incluyen la presión en superficie, la presión a nivel del mar, la altura geopotencial, temperatura, temperatura en la superficie del mar, valores en suelo, cobertura de hielo, humedad relativa, viento zonal y meridional, movimiento vertical, vorticidad y ozono.

2.8. Downscaling

Aunque los GCMs son herramientas predictivas de gran valor, ellos no pueden tomar en cuenta la heterogeneidad de fina escala de la variabilidad climática debido a su gruesa resolución. Numerosas características del terreno, tales como, las montañas, cuerpos de agua, infraestructura, características de la cobertura de suelo y componentes del sistema climático, tales como, las nubes convectivas y las brisas costeras tienen escalas que son más finas que 100-500km. Tales heterogeneidades son importantes para las personas que toman decisiones, quienes requieren información sobre los impactos potenciales sobre la producción de cultivos, hidrología, distribución de especies, etc, a escalas muy finas.

Diferentes métodos han sido desarrollados para reducir la brecha entre lo que los GCMs pueden entregar y lo que la sociedad, las empresas y los interesados requieren para su toma de decisión. La derivación de la información climática a fina escala está basado en la suposición que el clima local está condicionado por las interacciones entre las características atmosféricas de gran escala (circulación, temperatura, mezcla, etc.) y las características locales (cuerpos de agua, montañas, propiedades en la superficie del suelo, etc.). Es posible modelar esas interacciones y establecer relaciones entre el clima local presente y las condiciones atmosféricas a través del proceso de escalamiento descendente o regionalización (*downscaling*). Es importante entender que el proceso de downscaling añade información a la salida gruesa del GCM de modo que la información es más realística a escala más fina, capturando la nohomogeneidades y los contrastes a escala de submalla.

El proceso de downscaling puede ser realizado sobre los aspectos espaciales y temporales de las proyecciones climáticas. El downscaling espacial se refiere a los métodos usados para derivar información climática espacial a una resolución espacial más fina a partir de un GCM de resolución gruesa. El downscaling temporal se refiere a la derivación de información temporal de fina escala a partir de la salida de escala temporal gruesa o de baja frecuencia de un GCM (e.g., secuencias de



lluvia diaria a partir de acumulados de lluvia mensuales o estacionales). Ambas aproximaciones pueden ser usadas para regionalizar las salidas mensuales de un GCM hacia información diaria localizada.

2.8.1. *Downscaling* estadístico

El *downscaling* estadístico involucra el modo de establecer relaciones empíricas entre las características atmosféricas históricas de gran escala y aquellas del clima local. Una vez que una relación ha sido determinada y validada, las condiciones atmosféricas futuras de gran escala proyectadas por los GCMs son usadas para predecir las características del clima local. Esto es, las salidas de gran escala del GCM son usadas como predictores para obtener las variables locales o predictantes. Existe un grupo heterogéneo de métodos de *downscaling* estadístico que varían en sofisticación y aplicabilidad.

Los métodos estadísticos de *downscaling* son computacionalmente menos costosos en comparación a los RCMs que requieren la modelización compleja de procesos físicos. A diferencia de los RCMs, que produce proyecciones regionalizadas a escalas de 20 – 50 km, los métodos estadísticos pueden proporcionar información climática a escala de punto de estación.

Aunque el *downscaling* estadístico es eficiente, computacionalmente poco costoso, y consiste de un grupo diverso de métodos, esta metodología contiene suposiciones inherentes

- (1) La relación estadística entre el predictor y el predictante no cambia en el tiempo.
- (2) El predictor lleva la señal del cambio del clima.
- (3) Existe una fuerte relación entre el predictor y el predictante.
- (4) El GCM simula apropiadamente el predictor.

El primer punto se conoce como la suposición de estacionariedad y postula que la relación estadística entre el predictor y el predictante permanece estable en el futuro. Aún si las relaciones basadas en las asociaciones presentes fueran sostenidas, bajo las condiciones climáticas futuras es desconocido. La segunda es la suposición que la variable de gran escala representa el sistema climático y captura cualquier cambio que podría ocurrir en el futuro. La tercera suposición implica que la intensidad de la relación debe ser inicialmente evaluada para determinar su validez. La cuarta suposición relaciona la capacidad del GCM para simular las variables climáticas observadas en el pasado así como también su evolución futura. La validación del predictor es usualmente realizada antes del uso del GCM en los esquemas de *downscaling*.

Las principales categorías de métodos de *downscaling* son tres

Métodos lineales

Establecen relaciones lineales entre los predictores y el predictante. Los métodos lineales son directos y ampliamente usados y pueden ser aplicados a un simple par predictor-predictante o campos espaciales predictores-predictantes. La más importante restricción es el requerimiento de una distribución normal de los valores del predictor y predictante, lo cual significa que estos métodos no pueden ser usados para predecir la distribución de lluvia diaria debido a que esta variable sigue típicamente una distribución no normal.

Métodos de clasificación de condiciones meteorológicas

La variable local es predecida basada en los estados atmosféricos de gran escala. Los estados atmosféricos pueden ser patrones de condiciones atmosféricas sinópticos identificables o sistemas complejos ocultos. El estado atmosférico futuro simulado por el GCM es contrastado con el estado



atmosférico histórico más similar. El estado atmosférico histórico seleccionado entonces corresponde a un valor o a una clase de valores de la variable local, las cuales son luego replicadas bajo el estado atmosférico futuro. Estos métodos son particularmente adecuados para regionalizar distribuciones no normales, tales como la precipitación diaria. Sin embargo, una gran cantidad de datos diarios observacionales (e.g. 30 años de datos diarios para la región de interés) es requerido a fin de evaluar todas las posibles condiciones atmosféricas. En adición, estos métodos son computacionalmente más demandantes en comparación a los métodos lineales debido a la gran cantidad de datos diarios analizados y generados.

Métodos de generación de condiciones meteorológicas

Estos métodos estadísticos son típicamente usados en el downscaling temporal. Por ejemplo, son usados para generar secuencias diarias de las variables atmosféricas que corresponden a promedios o acumulados mensuales o anuales. El downscaling temporal es necesario para algunos modelos de impacto que requieren datos espaciales locales a resolución diaria, que los GCMs no pueden confiablemente proveer. Los generadores de las condiciones meteorológicas producen secuencias de valores diarios, pero ya que diferentes secuencias de condiciones meteorológicas pueden ser asociados con un conjunto dado de, por ejemplo, valores mensuales, entonces múltiples secuencias son comúnmente generadas para ser posteriormente usadas en los modelos de impacto. Los métodos de generación de condiciones meteorológicas son métodos de uso intensivo de datos, requieren secuencias largas de datos diarios, y son sensibles a datos faltantes y errores de datos en el conjunto de calibración (Wilby et al., 2009). Además, solo algunos generadores de condiciones meteorológicas tienen la habilidad de tomar en cuenta la coherencia entre las variables cuando múltiples variables son predecidas, e.g., para generar una secuencia diaria de insolación que concuerda con la secuencia diaria generada de días con lluvia y días secos.

2.8.2. Downscaling dinámico

El downscaling dinámico se refiere al uso de un RCM forzado por GCM para simular las condiciones climáticas regionales. Un RCM es similar a un GCM pero tiene mayor resolución e información regional adicional, lo cual, le permite representar de un modo más conveniente el territorio local y posiblemente los procesos atmosféricos locales. El modelo global simula la respuesta de la circulación global y los cambios en la composición atmosférica a través de un gran número de procesos, pero alguno de ellos necesitan ser aproximados debido a la gruesa resolución de los modelos. Por otro lado, a resoluciones de 25 a 50km, el modelo regional es capaz de capturar algunos de los procesos de pequeña escala más realísticamente. Los campos atmosféricos (e.g. presión en superficie, viento, temperatura y humedad) simulados por el GCM alimentan las fronteras verticales y horizontales del RCM. Los datos localmente especificados y las ecuaciones físicas son luego usadas para procesar esta información y obtener salidas de las condiciones climáticas regionales. La principal ventaja de los RCMs es su habilidad para modelar los procesos atmosféricos y los cambios en la cobertura del suelo explícitamente.

Aunque se ha producido un gran avance durante la década pasada en la habilidad técnica de los RCMs para simular el clima regional, desafíos significantes y preocupaciones aun existen. Debido al pequeño tamaño de celdas de grilla, mucha información de superficie y con frecuencia más procesos son incluidos en un RCM, el número de procesos computables puede ser también muy grande. De este modo, los RCMs son computacionalmente demandantes y podrían requerir mayor tiempo de procesamiento que un GCM para computar las proyecciones (Wilby et al., 2009). Los RCMs requieren también una substancial cantidad de datos de entrada, e.g. propiedades de



superficie e información a alta frecuencia de un GCM. Adicionalmente, procedimientos de calibración complejos son con frecuencia necesarios para realizar simulaciones realísticas.

Así como los GCMs, los RCMs presentan la dificultad de simular apropiadamente la precipitación convectiva, lo cual es un problema mayor en las regiones tropicales. Muchos RCMs, asimismo, no simulan apropiadamente la precipitación extrema – un sesgo sistemático que puede empeorar si la resolución es incrementada. Correcciones estadísticas del sesgo con frecuencia son necesarias realizar para aproximar mejor las salidas del modelo a las observaciones (Brown et al., 2008). En algunos casos, finos ajustes a los esquemas convectivos pueden mejorar el realismo de la lluvia simulada, pero esos ajustes requieren experiencia substancial y reducen la portabilidad geográfica, es decir se crea una versión del modelo que está bien ajustada a una región particular.

La calidad de los resultados de un RCM también depende de la conducción de la información entregada por el GCM. Por ejemplo, si el GCM desplaza los rastros de tormentas, se producirán errores en la climatología de la precipitación dada por el RCM (Wilby et al., 2009). Adicionalmente, diferentes RCMs contienen distintos esquemas dinámicos y parámetros físicos, lo cual significa que los RCMs conducidos por el mismo GCM pueden producir diferentes resultados.

Finalmente, el tamaño de grilla de un RCM es típicamente mayor de 10km, lo cual corresponde aún a una resolución muy gruesa para realizar estudios de impacto hidrológico y agrícola, que requieren información climática más local o a escala de estación (Benestad, 2009). Para obtener resultados de alta resolución, métodos estadísticos son usados.

En todas las circunstancias, una validación del desempeño del modelo sobre el período histórico relativo a las variables de interés (e.g. temperatura y/o precipitación) debe ser realizado.



Capítulo 3. Descripción de modelos

3.1 WRF

3.1.1 Introducción

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un sistema numérico de mesoescala de nueva generación de pronóstico de las condiciones atmosféricas diseñado tanto para cubrir necesidades de pronósticos operativos y de investigación atmosférica. Cuenta con múltiples núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos 3-dimensional variacional (3DVAR), y una arquitectura de software que permite paralelismo computacional y extensibilidad del sistema. El WRF está adecuado para un amplio espectro de aplicaciones a través de escalas que se extienden desde el orden de metros a cientos de kilómetros [2].

El WRF está siendo desarrollado por un gran número de centros e instituciones de los E.E.U.U. como son: NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division; the National Centers for Environment Prediction (NCEP), the Forecast Systems Laboratory (FSL), the National Severe Storms Laboratory (NSSL), and Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); the Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), and High Performance Computing Modernization Office (HPCMO) within the U.S. Department of Defense (DoD); the Federal Aviation Administration (FAA); the University of Oklahoma Center for the Analysis and Predictions of Storms (CAPS); the Environmental Protection Agency Atmospheric Modeling Division; the Atmospheric Sciences Division at the NASA Goddard Space Flight Center; y la comunidad universitaria de investigación [2].

3.1.2 Desarrollo y aplicaciones

El Advanced Research WRF (ARW) modeling system ha estado en desarrollo desde hace pocos años. El presente lanzamiento es la Versión 3, disponible desde abril de 2008. El ARW está diseñado para ser un sistema de simulación flexible del “estado del arte” atmosférico que es portable y eficiente sobre muchas plataformas de computación paralelas disponibles. El ARW es apropiado para ser usado en un amplio rango de aplicaciones a través de escalas del orden de metros a cientos de kilometros, incluyendo: simulaciones idealizadas (e.g. convección, ondas baroclínicas), investigación de parametrizaciones, investigación de asimilación de datos, investigación de pronóstico, real-time NWP, investigación de huracanes, investigación del clima regional, aplicaciones de modelo-acopladas.

La Mesoscale and Microscale Meteorology Division of NCAR está actualmente manteniendo y brindando soporte para un subconjunto del total del código WRF (Versión 3) que incluye:

WRF Software Framework (WSF), Advanced Research WRF (ARW) dynamic solver, incluyendo one-way, two-way nesting y moving nest, el sistema de Pre-procesamiento (WPS), el sistema de asimilación de datos del WRF (WRF-DA) el cual, actualmente soporta 3DVAR, 4DVAR, y capacidades híbridas de asimilación de datos, numerosos paquetes físicos contribuidos por patrocinadores del WRF y por la comunidad de investigación, diversos programas gráficos y programas de conversión para otras herramientas gráficas.

3.1.3 Componentes principales del sistema WRF

3.1.3.1 Sistema de preprocesamiento (WPS)

El WRF Preprocessing System (WPS) es un conjunto de tres programas cuya función común es

preparar la entrada al programa real para realizar simulaciones con datos reales. Cada uno de los programas realiza una etapa de la preparación: geogrid define los dominios del modelo e interpola los datos geográficos estáticos en las rejillas numéricas del modelo (grids), ungrib extrae los campos meteorológicos a partir de los archivos en formato GRIB, y metgrid interpola horizontalmente los campos meteorológicos extraídos por ungrib sobre las rejillas del modelo definidas por geogrid. La interpolación vertical de los campos meteorológicos en los niveles eta es realizado durante la ejecución del programa real.

En la Ilustración 3 se muestra un esquema del flujo de datos entre los programas que conforman el WPS. Cada uno de los programas leen parámetros de un archivo de texto común llamado namelist. En este archivo se definen los parámetros respectivos a cada etapa del preprocesamiento que definen los programas WPS. Adicionalmente, se requiere el uso de tablas de control de las operaciones realizadas por cada programa WPS, éstas tablas deben también ser definidas para cada etapa del preprocesamiento: GEOGRID.TBL, METGRID.TBL y Vtable [3]

El sistema de procesamiento del WRF posee dos núcleos dinámicos ARW y NMM y se ejecutan a través de los programas wrf.exe previo paso por la rutina real.exe que prepara las condiciones iniciales y condiciones de borde de la simulación numérica a partir de los archivos generados durante la etapa del preprocesamiento. El control de configuración del programa wrf.exe se realiza a través del archivo de configuración llamado namelist.input, donde además se puede definir el rango de épocas de la simulación, la frecuencia de escritura de datos, opciones dinámicas, opciones físicas asignadas a la ejecución consistente en la inclusión de esquemas físicos que representen de modo realístico la simulación atmosférica, y entre otros parámetros.

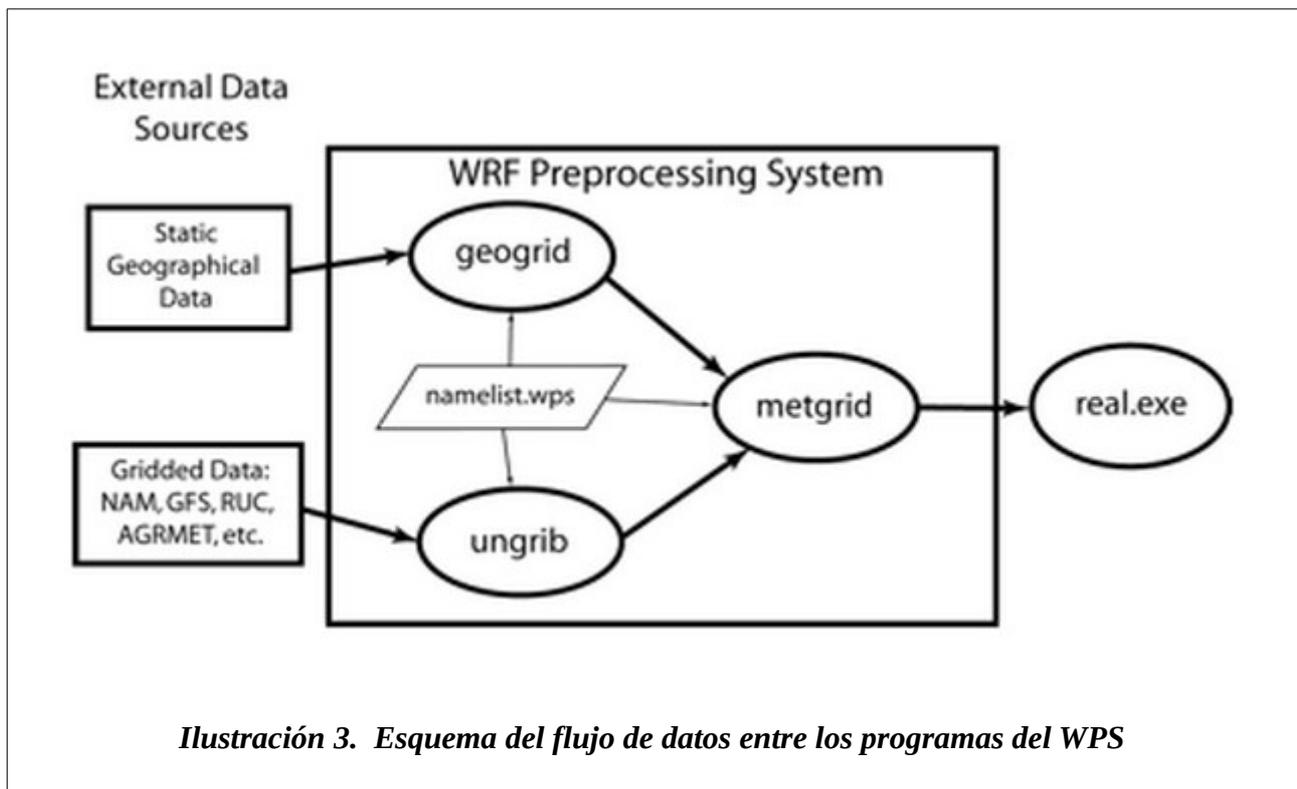


Ilustración 3. Esquema del flujo de datos entre los programas del WPS

3.1.3.2 Sistema de procesamiento (ARW)

El Advance Research WRF (ARW) es el núcleo de solución de la dinámica del sistema WRF Figura 3.2 junto con otros componentes compatibles del sistema que son usados para producir la simulación. De este modo, este esquema forma un subconjunto del WRF que engloba los esquemas físicos, opciones numéricas y dinámicas, rutinas de inicialización y un paquete de asimilación de datos (WRF-var) [2].

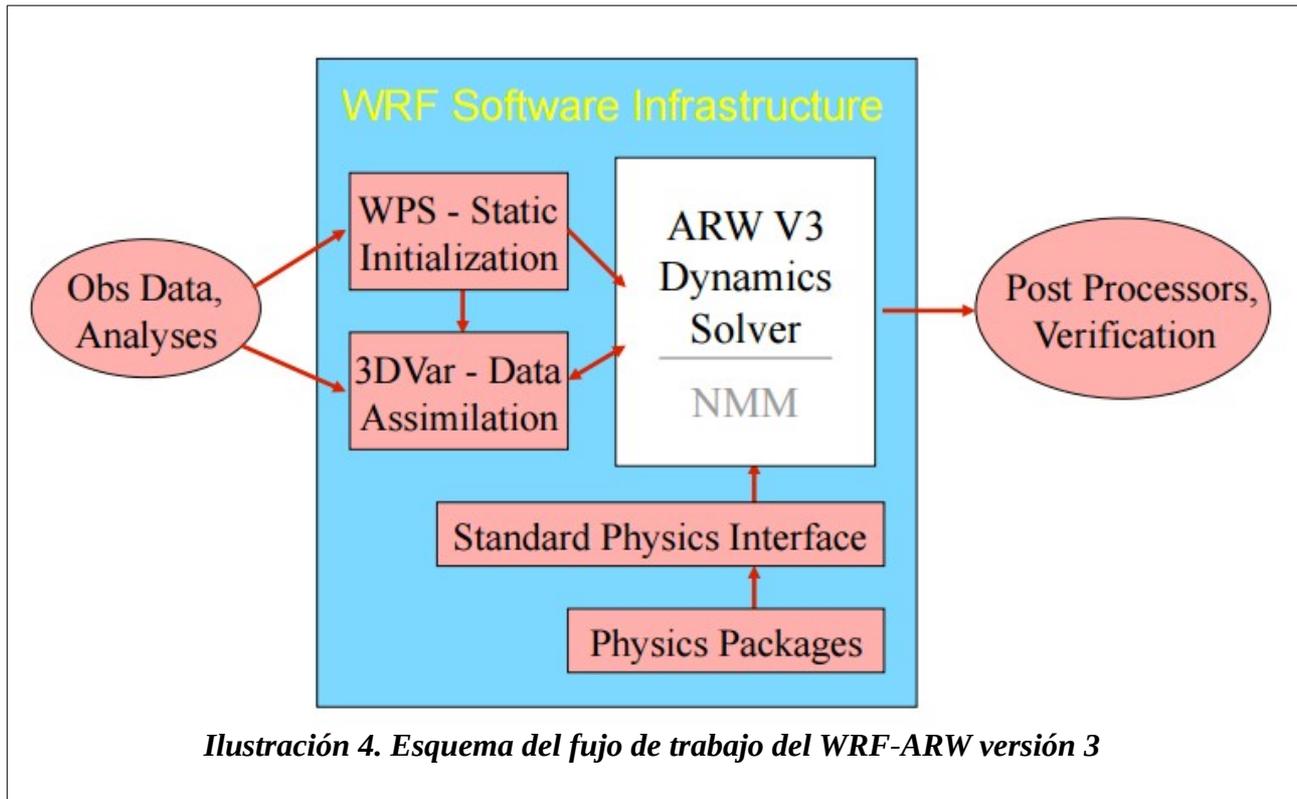
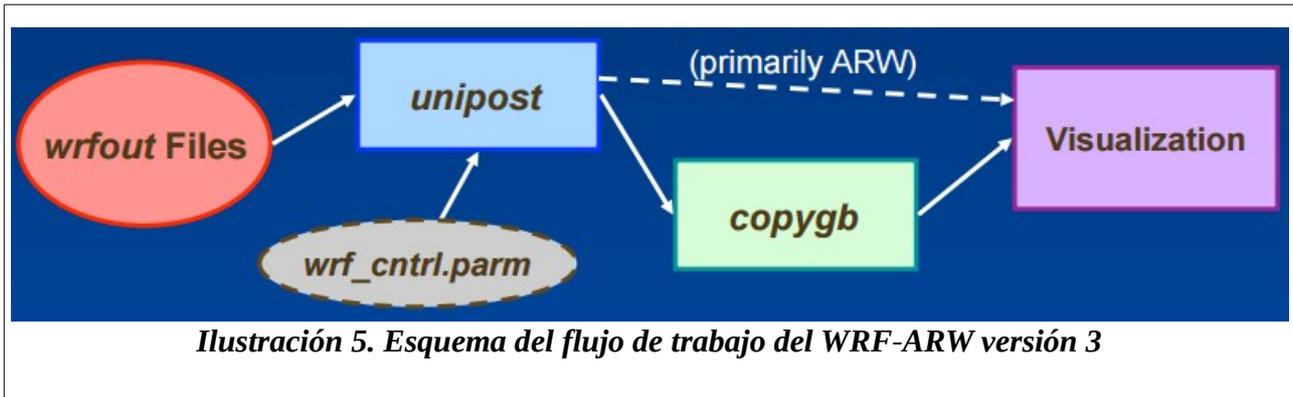


Ilustración 4. Esquema del flujo de trabajo del WRF-ARW versión 3

3.1.3.3 Unidad de posprocesamiento (UPP)

El *Unified Postprocessor* (UPP) es la unidad encargada de realizar el posprocesamiento de las salidas generadas por el módulo de procesamiento del WRF (ARW). Esta unidad genera salidas en formato Gridded Binary (GRIB) de los datos simulados por el WRF y además, permite la generación de productos en cualquier sistema de proyección y cualquier tipo de grid.

La unidad de posprocesamiento (UPP) tiene dos componentes: unipost, que posprocesa las salidas crudas del WRF y copygb, que prepara estas salidas para su visualización.



3.1.4 Representación de los esquemas físicos

3.1.4.1 Esquemas de microfísica

La microfísica incluye explícitamente resolver los procesos de vapor de agua, nubes y precipitación. El modelo está en general acondicionado para acomodar cualquier número de variables de razón de mezcla de masa y otras cantidades tales como concentraciones. En la versión actual del ARW, la microfísica es llevada a cabo al final del paso de tiempo como un proceso de ajuste, de modo, que no proporciona tendencias. La razón para esto es que el ajuste de la condensación debe ser al final del paso de tiempo para garantizar que el balance de saturación final es el apropiado para la actualización de la temperatura y mezcla. Sin embargo, es importante también, tener el calor latente como forzante para la temperatura potencial durante los sub-pasos dinámicos, y esto es realizado conservando el calor microfísico como una aproximación para el siguiente paso de tiempo, como es descrito en la sección 3.1.4 de [2].

Actualmente, el proceso de sedimentación es tomado en cuenta dentro de los módulos de microfísica individuales. En el futuro, sin embargo, éste podría estar separado en una subrutina independiente para permitir que el resto de microfísica sea llamado menos frecuentemente que el paso de advección del modelo para resultados eficientes.

Scheme	Number of Variables	Ice-Phase Processes	Mixed-Phase Processes
Kessler	3	N	N
Purdue Lin	6	Y	Y
WSM3	3	Y	N
WSM5	5	Y	N
WSM6	6	Y	Y
Eta GCP	2	Y	Y
Thompson	7	Y	Y
Goddard	6	Y	Y
Morrison 2-Moment	10	Y	Y

Tabla 2. Opciones de Microfísica



La Tabla 2 muestra un resumen de las opciones que indican el número de variables de mezcla y cuando los procesos de fase de hielo y fase mixta son incluidos. Los procesos de fase de mezcla son aquellos que resultan de la interacción de las partículas de hielo y agua. Tales como la escarcha que produce granizo. Como regla general, para mallas menores que 10km, donde el arrastre podría ser resuelto, los esquemas de fase mixta deben ser usados. Para resoluciones de malla más gruesas, no es necesario incluirlos porque es probable que esos procesos sean apropiadamente resueltos.

Esquema de Kessler

El esquema de microfísica de Kessler (Kessler, 1969; ver referencias en [5]), el cual fue tomado del modelo COMMAS (Wicker y Wilhelmson, 1995; ver referencias en [5]) es un simple esquema de nubes cálidas que incluyen vapor de agua, agua de nube, y lluvia. Los procesos microfísicos incluidos son: la producción, caída y evaporación de lluvia, el crecimiento de y autoconversión de agua de nube y la producción de agua de nube desde la condensación.

WRF Single-Moment 3-class (WSM3)

El esquema de microfísica de un solo momento del WRF siguiendo los estudios de Hong et al. (2004) incluyen sedimentación de hielo y otras nuevas parametrizaciones de fases de hielo. Una mayor diferencia respecto a otras aproximaciones es que una relación de diagnóstico es usada para la concentración del número de hielo, que está basada en el contenido de masa en lugar que en la temperatura. El procedimiento computacional está descrito en Hong and Lim (2006).

Como con WSM5 y WSM6, los procesos de congelamiento y fusión son calculados durante el término de caída a los sub-pasos para incrementar exactitud en el perfil de calentamiento vertical de estos procesos. El orden de los procesos es también optimizado para reducir la sensibilidad del esquema al paso de tiempo del modelo. El esquema WSM3 predice tres categorías de hidrometeoros: vapor, agua de nube/hielo, y lluvia/nieve, el cual es también llamado un esquema de hielo simple. Este sigue a Dudhia (1989) en asumir agua de nube y lluvia para temperaturas sobre el punto de congelamiento, y hielo de nube y nieve para temperaturas debajo del punto de congelamiento. Este esquema es computacionalmente eficiente para la inclusión de los procesos de hielo, pero carece de agua super enfriada y razones de fusión graduales.

WRF Single-Moment 5-class (WSM5)

Este esquema es similar al simple esquema de hielo WSM3. Sin embargo, el vapor, lluvia, nieve, hielo de nube, y agua de nube son mantenidos en 5 diferentes arreglos. De este modo, esto permite que agua superenfriada exista, y una fusión gradual de nieve cayendo debajo de la capa de fusión. Los detalles pueden ser encontrados en Hong et al. (2004), y Hong y Lim (2006). Como con WSM6, el ajuste de saturación sigue a Dudhia (1989) y Hong et al. (1998) entrar separadamente los procesos de saturación de hielo y agua en lugar de tener una saturación combinada tal como los esquemas de Purdue Lin (above) y Goddard (Tao et al., 1989). Este esquema es eficiente a resoluciones de malla intermedias entre mallas de mesoescala y mallas de resolución de nubes.

WRF Single-Moment 6-class (WSM6)

Este esquema extiende las características presentes en el esquema WSM5 e incluye procesos de producción de granizo y sus demás procesos asociados. Algunos de los terminos relacionados a estos procesos siguen los estudios de Lim y otros (1983) [3], pero su comportamiento de fase de hielo es muy diferente debido a los cambios incluidos según Hong y otros (2004), descritos en la literatura de [5]. Un nuevo método para la representación de la rapidez de caída de partículas de fase mixta para nieve y granizo asignando una única rapidez de caída a ambos, las cuales son

ponderadas por las razones de mezcla teniendo en cuenta la rapidez de caída de los procesos de sedimentación y crecimiento es introducido también a través de este esquema de parametrización (Dudhia y otros, 2008, ver referencias [5]). El comportamiento de los esquemas WSM3, WSM5 y WSM6 difieren muy poco para resoluciones de malla gruesas (mayores a 10km), pero estos trabajan de modo muy diferente sobre mallas de orden de resolución de nubes (menores a 10km) considerando la eficiencia y el respaldo de fundamentos teóricos (Hong y Lim, 2006, ver referencias [2]).

3.1.4.2 Esquemas cúmulos

Estos esquemas son responsables para los efectos a escala de sub-malla (sub-grid-scale effects) de nubes convectivas y/o someras.

Los esquemas están destinados a representar los flujos verticales debido a corrientes ascendentes y descendentes no resueltas y al movimiento de compensación fuera de las nubes. Ellos solo operan en columnas individuales donde el esquema es activado y proporciona calentamiento vertical y perfiles de mezcla. Algunos esquemas adicionalmente proporcionan tendencias en los campos de nubes y precipitación en la columna, y futuros esquemas podrían proporcionar tendencias de momentum debido al transporte convectivo de momentum. Todos los esquemas proporcionan la componente convectiva de la precipitación en superficie.

Las parametrizaciones cúmulos son teóricamente solo válidas para dimensiones de malla gruesas, (e.g., mayores a 10 km), donde ellas son necesarias para propiamente liberar calor latente a una escala de tiempo realística en las columnas convectivas. Mientras que en relación a los remolinos convectivos (convective eddies) siendo enteramente procesos descompuestos a escala de sub-malla por dimensiones de malla más finas, algunas veces estos esquemas han demostrado ser útiles en la detección de la convección en aplicaciones de malla de 5–10 km. Generalmente, ellos no deberían ser usados cuando el modelo puede resolver los remolinos convectivos por sí mismo (e.g., ≤ 5 km grid).

La Tabla 3 resume las características básicas de las opciones de parametrización cumulus disponibles en el WRF

Scheme	Cloud Detrainment	Type of scheme	Closure
Kain-Fritsch	Y	Mass flux	CAPE removal
Betts-Miller-Janjic	N	Adjustment	Sounding adjustment
Grell-Devenyi	Y	Mass flux	Various
Grell-3	Y	Mass flux	Various

Tabla 3. Opciones de parametrizaciones cúmulos

Esquema de Kain-Fritsch (KF)

La versión modificada del esquema de Kain-Fritsch (Kain, 2004) está basada en los trabajos de Kain y Fritsch (1990) y Kain y Fritsch (1993), pero ha sido modificado con base al modelo Eta. Así



como el original esquema KF, este utiliza un simple modelo de nubes con corrientes ascendentes y descendentes de mezcla, incluyendo los efectos de detrainment (transferencia del aire de nube hacia la atmósfera que rodea la nube), *entrainment* (mezcla del aire ambiental en la nube), y esquemas de microfísica relativamente simples.

Difiere del esquema KF original en los siguientes modos:

- Una razón de *entrainment* mínima es impuesta para suprimir convección extendida en ambientes marginalmente inestables y relativamente secos.
- Convección somera (non precipitating) es permitida para cualquier corriente ascendente que no alcanza el espesor mínimo de nube para nubes precipitantes este espesor mínimo varía como una función de la temperatura de la base de la nube.
- La razón de *entrainment* se puede variar como una función de la convergencia de bajo nivel.
- Cambios en las corrientes descendentes:

La capa fuente está constituida por la completa capa profunda, espesor 150 – 200 mb justo debajo de la base de la nube.

El flujo de masa se especifica como una función de los flujos de masa de corrientes ascendentes en la base de la nube. detrainment se producen en la capa fuente de corriente ascendente y por debajo.

Esquema de Betts-Miller-Janjic (BMJ)

El esquema Betts-Miller-Janjic (BMJ) (Janjic, 1994, 2000) fue derivado a partir del esquema de ajuste convectivo de Betts-Miller (BM) (Betts, 1986; Betts and Miller, 1986). Sin embargo, el esquema BMJ difiere del esquema de Betts-Miller en varios aspectos importantes:

Los perfiles de convección profunda y la relajación del tiempo son variables y depende de la eficiencia de la nube, un parámetro no dimensional que caracteriza el régimen convectivo (Janjic, 1994). La eficiencia de nube depende del cambio de entropía, precipitación y temperatura promedio de la nube.

El perfil de mezcla de convección somera es derivado del requisito que el cambio de entropía sea pequeño y no negativo (Janjic, 1994).

El esquema BMJ ha sido optimizado sobre años de aplicaciones operacionales en el NCEP, de modo que, en adición a las diferencias conceptuales descritas, muchos detalles y/o valores de parámetros difieren de aquellos recomendados en Betts (1986) y Betts y Miller (1986).

Recientemente, se han hecho intentos para refinar el esquema para resoluciones horizontales más altas, principalmente a través de modificaciones del mecanismo de disparo/detección. En particular: Un valor base para el cambio de entropía en la nube es establecido debajo del cual la convección profunda no es detectada.

En la búsqueda de la parte superior de la nube, las mezclas de partículas ascendentes con el ambiente; y

El trabajo de la fuerza de boyancia en la partícula ascendente es requerida para exceder un umbral positivo prescrito.



3.2 VIC

3.2.1 Introducción

El *Variable Infiltration Capacity Model*-VIC (Liang, et al., 1994), es un modelo hidrológico semidistribuido que resuelve los balances hidrológicos de agua y energía y que caracteriza las cuencas hidrológicas en grillas y en múltiples capas sobre las cuales emplea información distribuida para resolver los procesos físicos en la cuenca. Originalmente, el modelo ha sido desarrollado como un esquema de transferencia suelo-vegetación-atmósfera para el propósito de representar los procesos en la superficie del terreno en los modelos de circulación general. El modelo VIC se caracteriza por que incluye la representación de la variabilidad de submalla en las clases de vegetación de la superficie del suelo, lo cual, ayuda a mejorar la representación de la heterogeneidad de la vegetación de un modo simple empleando esquemas de infiltración y escorrentía superficial, la representación de la variabilidad de submalla de la capacidad neta de mezcla de suelo como una distribución de probabilidad espacial y la representación del drenaje a partir de la zona de mezcla de suelo más baja (*baseflow*) como una recesión no lineal (Liang, et al., 1994).

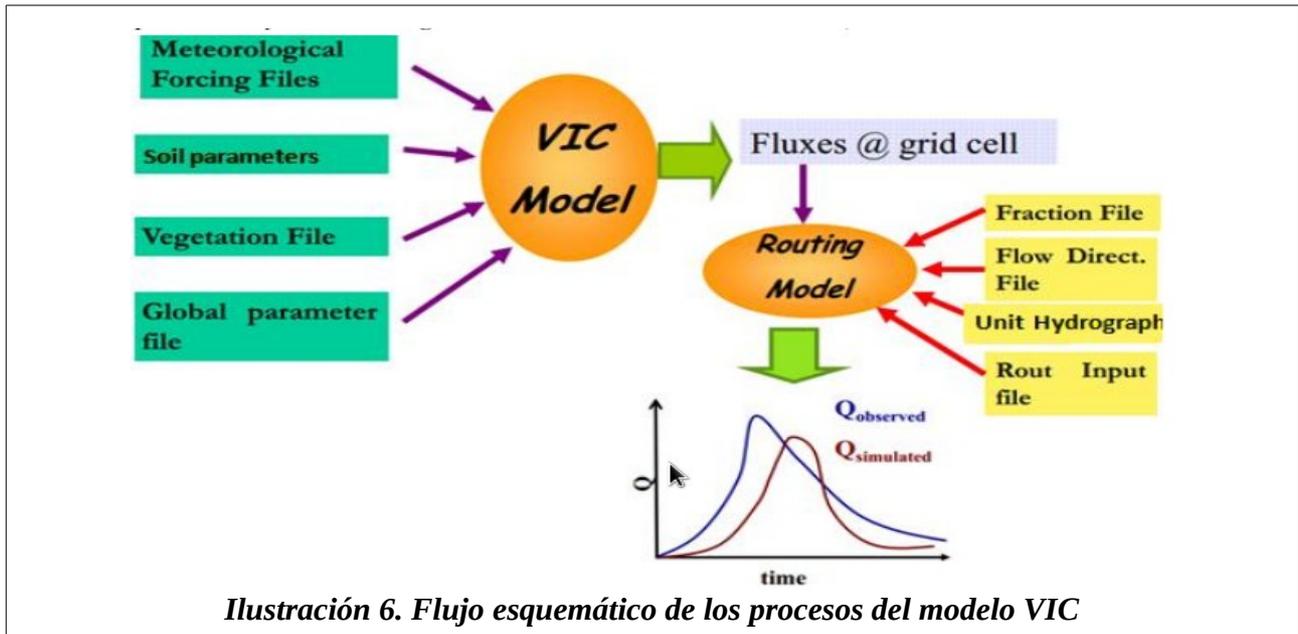
Usando la formulación de la infiltración del modelo de Xinanjiang (Zhao et al., 1980), el modelo VIC ha sido desarrollado por décadas hasta formar una familia de modelos que incluyen estructuras desde una capa simple a secuencias de tres capas, tales como, VIC-1L, VIC-2L y VIC-3L. El modelo VIC original, con una capa para representar la variación en la capacidad de infiltración dentro de las celdas de un GCM (Wood et al., 1992), ha evolucionado para consistir de una caracterización de dos capas de la columna de suelo (VIC-2L), que usa una representación aerodinámica de los flujos de calor latente y sensible en la superficie del terreno con diferentes descripciones de la evapotranspiración y la superficie del terreno (Liang et al., 1994).

El modelo VIC-2L ha sido posteriormente modificado para añadir una capa superficial delgada (VIC-3L) para capturar mejor la representación del comportamiento dinámico del contenido de mezcla de suelo. Adicionalmente, el proceso de difusión ha sido incluido en la representación de la columna de suelo (Liang et al., 1996b). Progresos posteriores han incluido mejoras en la representación de los procesos de nieve (Storck y Lettenmaier, 1999), mejoras en la parametrización del flujo de calor del suelo (Liang et al., 1999), una eficiente parametrización de precipitación de submalla (Liang et al., 1996a), mejoras para el rendimiento del modelo para regiones frías (Cherkauer and Lettenmaier, 1999), esfuerzos para incorporar una curva parabólica doble para describir la capacidad de infiltración (Jayawardena y Mahanama, 2002; Jayawardena y Zhou, 2000) y estrategias de generación de escorrentía e interacciones entre la superficie y agua subterránea mejoradas (Liang and Xie, 2001).

Actualmente la última versión del modelo es desarrollado y mantenido continuamente por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Washington. El modelo VIC es un proyecto de fuente abierta y las contribuciones en su desarrollo pueden ser incluidas a las mejoras dadas por el *University of Washington Land Surface Hydrology Group*.

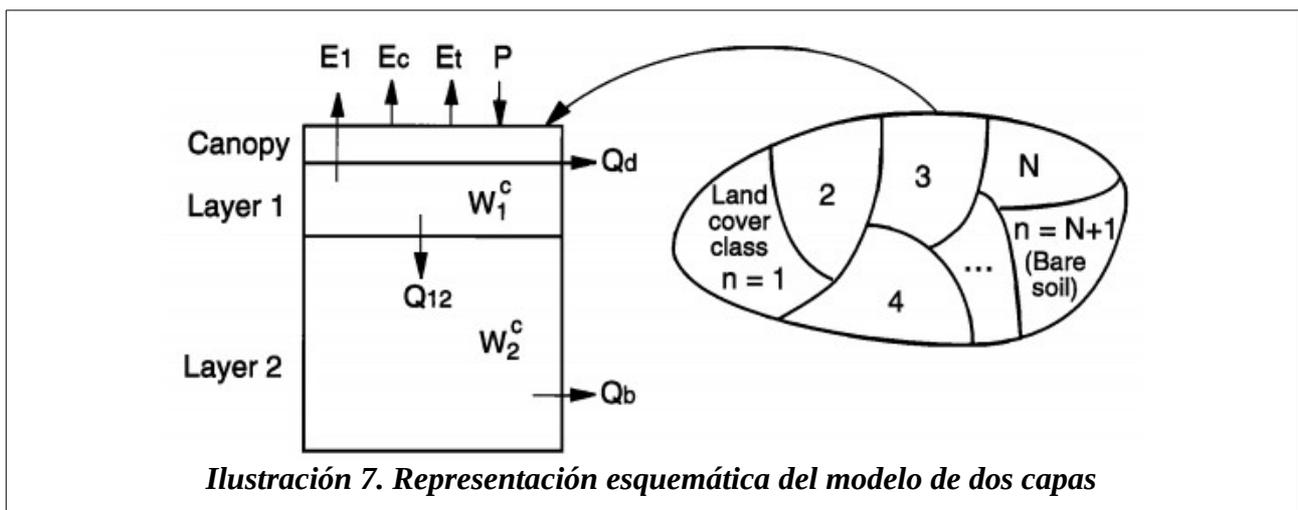
3.2.2 Componentes del modelo VIC

El modelo VIC computa la energía vertical y el flujo de mezcla en cada celda de grilla basado en la especificación en cada celda considerando las propiedades del suelo y los mosaicos de las clases de vegetación en cada celda de malla. La escorrentía resultante y el flujo de base es enrutado o direccionado via un módulo de *routing* para producir un flujo de canal continuo en puntos seleccionados dentro del dominio



3.2.2.1 Cobertura de vegetación

La superficie de cada celda de grilla es descrita por $N+1$ parcelas de cobertura de terreno, donde $n=1,2,\dots,N$ representa N diferentes parcelas de vegetación y $N+1$ representa el suelo descubierto sin clasificación. Para cada parcela de vegetación, las características de la vegetación, tales como el LAI, albedo, resistencia estomatal mínima, resistencia estructural, longitud de rugosidad, fracción relativa de raíces en cada capa de suelo y longitud de desplazamiento (en el caso del LAI) son diseñados. En el modelo la distribución de mezcla de suelo, la infiltración, el drenaje entre capas de suelo, la escorrentía superficial y la escorrentía subsuperficial son calculados para cada parcela de cobertura de suelo durante cada paso de tiempo de ejecución del modelo. Luego, para cada celda de grilla, el flujo total de calor (calor latente, calor sensible, y calor del suelo), la temperatura efectiva de superficie y la escorrentía total superficial y subsuperficial son obtenidos sumando sobre todas las parcelas de cobertura de terreno ponderadas por la cobertura fraccional.



3.2.2.2 Capas de suelo

Los parámetros requeridos por las tres capas de suelo del modelo VIC-3L son: el parámetro de infiltración, parámetro de evaporación, coeficiente de recesión del flujo base, vegetación que varía espacialmente dentro de cada celda de grilla, y mezcla de suelo en cada capa. Los parámetros de suelo son especificados para cada celda de grilla y cada capa en el archivo de parámetros de suelo definidos por el usuario para su cuenca de interés.

3.2.2.3 Precipitación líquida

El modelo VIC considera la variabilidad de submalla de la precipitación, la cual se distribuye a través de todas o a través de una porción de las celdas de grilla como una función de intensidad de precipitación líquida. La distribución de la precipitación líquida puede ser expresado como sigue

$$\mu = 1 - \exp(-a.I) \quad (3)$$

donde “I” es la intensidad de precipitación líquida y “a” un coeficiente que describe los efectos del tamaño de celda de grilla y la geografía.

3.2.2.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es calculado de acuerdo a la ecuación de Penman-Monteith. El modelo VIC considera tres tipos de evaporación (Liang et al., 1994): la evaporación de la capa de canopia (dosel forestal) de cada parcela de vegetación – E_c , la transpiración de cada una de las parcelas de vegetación- E_t , y la evaporación del suelo descubierto- E_l . Todas las unidades en mm. En consecuencia, la evapotranspiración sobre una celda de grilla es formulada según

$$E = \sum_{n=1}^N C_n \cdot (E_{c,n} + E_{t,n}) + C_{N+1} \cdot E_l \quad (4)$$

donde C_n es la cobertura fraccional de vegetación de la n ésima parcela, C_{N+1} es la fracción de suelo descubierto y además se cumple que $\sum_{n=1}^N C_n = 1$

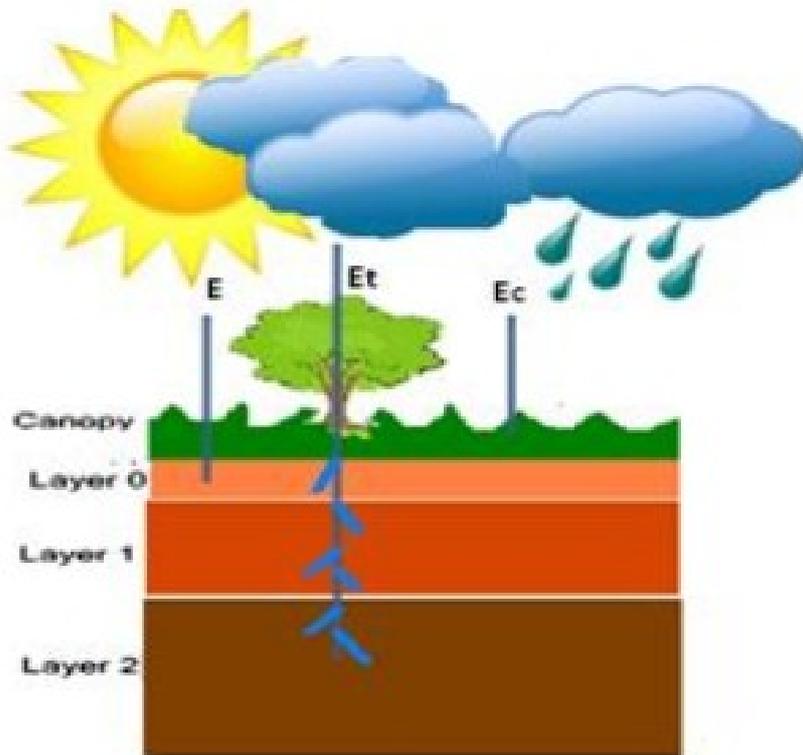


Ilustración 8. Componentes de energía en las celdas y capas de suelo

3.2.2.5 Infiltración y escorrentía superficial

Este modelo asume que la capacidad de infiltración del suelo no es uniforme. Por tanto, la generación de escorrentía y evaporación varían dentro de un área que tienen variaciones en su topografía. También se considera que la capacidad de infiltración está almacenada y no es una razón. El esquema de variabilidad submalla en la infiltración es usado para tomar en cuenta la capacidad de infiltración variable. El VIC utiliza la fórmula de infiltración usada en el modelo Xinanjiang, el cual, asume que la precipitación en exceso de la capacidad de infiltración variable forma escorrentía superficial,

$$i = i_m [1 - (1 - A)^{1/b_i}] \quad (5)$$

Donde i es la capacidad de infiltración a la cual el suelo es saturado. i_m es la capacidad de infiltración máxima. A representa la fracción saturada de la celda de grilla ($0 \leq A \leq 1$) y b_i un parámetro de forma.

La máxima mezcla de suelo de la capa de suelo 1 W_1^c está relacionado a i_m y b_i según

$$W_1^c = \frac{i_m}{(1 + b_i)} \quad (6)$$

También el modelo VIC asume que la escorrentía es generada por áreas donde la precipitación agregada a la cantidad neta de mezcla de suelo al final del paso de tiempo previo excede la capacidad de almacenamiento del suelo. La escorrentía directa Q_d a partir de la fracción de área saturada está dada por

$$Q_d = P - W_1^c + W_1^-, \quad i_0 + P \geq i_m \quad (7a)$$

$$Q_d = P - W_1^c + W_1^- + W_1^c \left[1 - \frac{i_0 + P}{i_m} \right], \quad i_0 + P \leq i_m \quad (7b)$$

donde W_1^- es el contenido de mezcla de suelo en la capa 1 a inicio del paso de tiempo. i_0 es la capacidad de infiltración del área saturada.

Para el suelo descubierto, la capa de balance de agua es descrito por

$$W_1^+ = W_1^- + P - Q_d - Q_{12} - E \quad (8)$$

donde W_1^+ es el contenido de mezcla de suelo en las capas de suelo al termino de cada paso de tiempo. Q_{12} Representa el drenaje de la capa 1 a la capa 2.

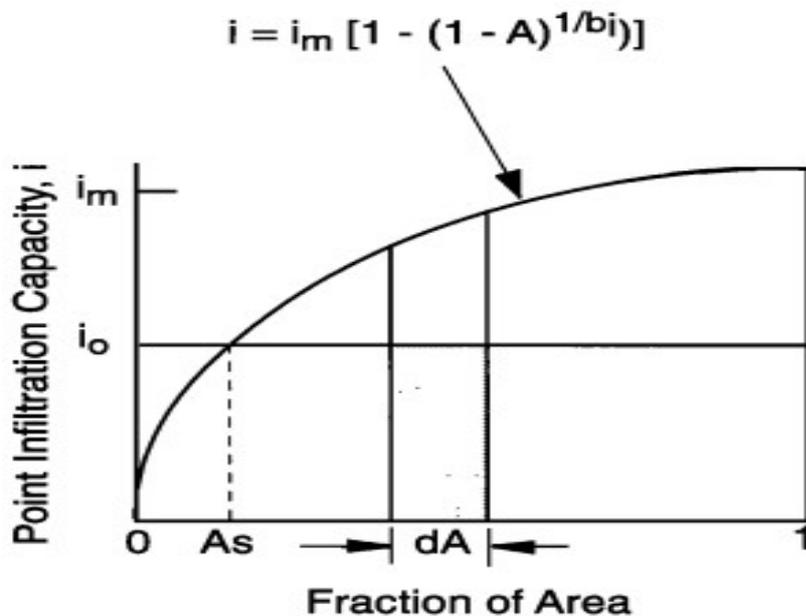


Ilustración 9. Curva de capacidad de infiltración

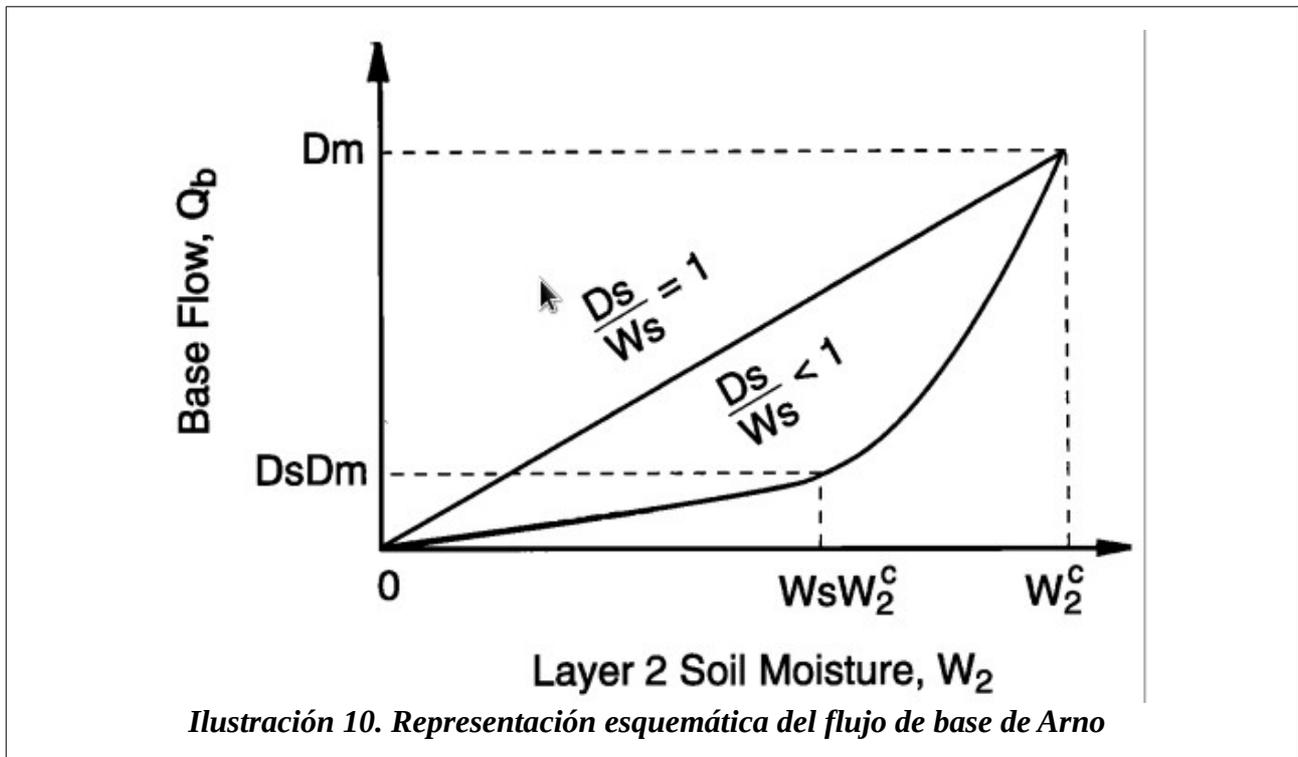
3.2.2.6 Escorrentía subsuperficial

La formulación de la escorrentía subsuperficial (flujo base) sigue la conceptualización del modelo de Arno (Francini y Pacciani, 1991), el cual solo es aplicado a la capa de suelo más baja (i.e. El drenaje de la capa 1 solo va a la capa 2, y no contribuye a la escorrentía del flujo base). La escorrentía subsuperficial o flujo base está dado por

$$Q_b = \frac{D_s D_m}{W_s W_2^c} W_2^-, \quad 0 \leq W_2^- \leq W_s W_2^c \tag{9a}$$

$$Q_b = \frac{D_s D_m}{W_s W_2^c} W_2^- + \left(D_m - \frac{D_s D_m}{W_s} \right) \left(\frac{W_2^- - W_s W_2^c}{W_2^c - W_s W_2^c} \right)^2, \quad W_2^- \geq W_s W_2^c \tag{9b}$$

donde Q_b es la escorrentía subsuperficial. D_m es el flujo de subsuperficie máximo. D_s es una fracción del flujo de subsuperficie máximo. W_2^c es el máximo contenido de mezcla de suelo de la capa 2. W_s es una fracción de W_2^c , con $D_s \leq W_s$, y W_2^- es el contenido de mezcla de suelo en la capa 2 al inicio del paso de tiempo. Las ecuaciones (9a) y (9b) describen una recesión que es lineal debajo de un umbral (Ec. (9a)) y no lineal a altos valores de mezcla de suelo (Ec. (9b)) como se muestra en la Figura 3.2.2.6.1. El drenaje no lineal es requerido para representar situaciones donde los flujos de torrente superficial ocurren. Las ecuaciones (9a) y (9b) tienen una primera derivada continua en la transición del drenaje lineal al no lineal. Como se muestra en la Figura 3.2.2.6.1.



3.2.2.6 Routing

Para simular el flujo de río, los resultados del VIC son típicamente pos-procesados con un modelo de enrutamiento separado basado en una función de transferencia lineal (Lohmann, et al. 1996;1998). Se asume que la mayor cantidad de flujo horizontal dentro de la celda de grilla llega a la red de canales dentro de la celda antes de que cruce el borde de la celda vecina. El flujo puede salir de cada celda de grilla en ocho direcciones posibles pero todo el flujo debe salir en la misma dirección. El flujo de cada celda de grilla es ponderado por la fracción de celda de grilla que cae dentro de la cuenca. Una vez que el flujo de agua entra al canal ya no retorna y por tanto es eliminado del ciclo hidrológico de las celdas de grilla. La escorrentía superficial diaria y el flujo de base en el VIC es calculado según

$$R_1 = \sum_{j=1}^{i < j} Q_j \quad (10)$$

donde R_1 es la escorrentía enrutada internamente en la salida de la grilla. Q_j Es la escorrentía del flujo de salida. I Representa el paso de tiempo del hidrograma unitario. j Es el paso de tiempo de la serie de escorrentía. i El número total de pasos de tiempo en la serie de tiempo de escorrentía. Y H las ordenadas del hidrograma unitario.

3.2.2.7 Modo de balance de agua del VIC

El modelo VIC puede ser ejecutado en un modo de balance de agua o en modo de balance de energía. El modo de balance de agua no resuelve el balance de energía superficial. En lugar de ello se asume que la temperatura de superficie del suelo es igual a la temperatura del aire para el paso de tiempo presente. Por eliminación del flujo de calor de suelo y el proceso iterativo requerido para cerrar el balance de energía de superficie, el modo de balance de agua requiere menos tiempo computacional que otros modos de modelos (Andreas et al., 2004; Cherkauer y Lettenmair 1999; Storck et al. 1998). La ecuación de continuidad usada para el balance de agua en el modelo VIC para cada paso de tiempo viene dada por

$$\frac{\partial S}{\partial T} = P - E - R \quad (11)$$

donde la expresión de la izquierda de la ecuación representa el cambio neto de la cantidad de agua para el paso de tiempo en unidades de mm, P representa la precipitación (mm), E la evapotranspiración (mm), y R la escorrentía (mm).

Sobre áreas cubiertas de vegetación, la ecuación de balance de agua en la capa de canopia es

$$\frac{\partial S}{\partial T} = P - E_c - R_t \quad (12)$$

Donde W_i es el agua interceptado por la canopia (mm). E_c Es la evaporación de la capa de canopia (mm). Y P_t el escurrimiento.



3.2.2.8 Forzantes meteorológicas

El modelo VIC es forzado con datos meteorológicos de superficie observados que incluyen precipitación (mm), temperatura (°C), vientos (m/s), presión de vapor, radiación de onda larga entrante, radiación de onda corta entrante, presión del aire.



Capítulo 4: Área de estudio

El río Rímac sigue es un curso relativamente corto en la costa peruana, ubicado en la cuenca del Océano Pacífico, es uno de los principales suministros de agua de la ciudad de Lima. Se origina a una altitud de 5100m pasando la laguna Ticticocha a 4697m y fluye hacia el suroeste con un gradiente promedio de 3% al Océano Pacífico. El río es parcialmente alimentado por la escorrentía glaciar, sin embargo esta contribución al río no es aún conocida. El río Rímac atraviesa la provincia de Huarochirí y Lima ambos localizados en la región Lima, Perú.

La cuenca del río Rímac está formada por el río Rímac, como su cauce principal y sus tributarios, entre ellos, el río Santa Eulalia, al noreste de la localidad de Chosica. La cuenca del río Rímac puede separarse en tres partes en función de su altitud: La parte alta de la cuenca que colecta el agua (5200-3500msnm) con frecuente precipitación donde se ubican los principales glaciares y reservorios naturales y artificiales que tienen una función de almacenamiento muy importante. Estos reservorios colectan el agua y la liberan durante la estación seca. La parte media de la cuenca (3500-1000msnm), con un régimen de precipitación intermitente, el agua es usada en esta parte de la cuenca para usos diversos desde la agricultura, propósitos domésticos y generación hidroeléctrica. La parte baja de la cuenca (1000-0msnm) con un régimen de lluvia de muy baja intensidad, que incluye a la ciudad de Lima y Callao que aprovechan el agua y energía del río Rímac con gran intensidad para los fines urbanos e industriales.

4.1. Localización y extensión de la cuenca

La cuenca del río está ubicada al oeste de la Cordillera de los Andes Centrales del Perú, entre las montañas Anticona, Pucacocha, Yuracocha, y el Océano Pacífico. Geométricamente, la cuenca tiene una longitud de 204 km, un ancho promedio de 16 km y una superficie de 3398 km^2 . Sus límites son: la cuenca del Mantaro al noreste, la cuenca del río Lurín al sureste, la cuenca del río Chillón al noroeste y el Océano Pacífico al suroeste (INGENMET, 1988).

4.2. Características climáticas

La parte costera de la cuenca, comprendida entre los 0 a 1000msnm, se caracteriza por poseer un clima desértico costero con mucha neblina influenciado por el Océano Pacífico sudamericano a una latitud de aproximadamente 11°S. Este desierto está caracterizado por una cuasipermanente capa de nubes estratocúmulos formadas cuando las capas bajas de la atmósfera se enfrían cuando entran en contacto con las aguas frías del Océano Pacífico. La temperatura del océano a lo largo de la costa de Chile a Perú está fuertemente afectada por la Corriente Fría de Humboldt y el afloramiento de las aguas frías más profundas desde el fondo del océano. El resultado de este fenómeno hace que el clima de Lima sea más frío que otras ciudades de la misma latitud y altitud en otras partes del mundo (INGEMMET, 1998). Su precipitación es también una de las más bajas en el continente con un promedio de 21 mm de lluvia acumulada anual. Sin embargo, el aire de la ciudad es relativamente húmedo, debido a la frecuente neblina y fuerte rocío. La temperatura promedio anual varía desde 22°C en febrero a 15°C en julio.

Entre los 1000 y 2000 msnm se presenta en la zona andina de la cuenca un clima subtropical desértico. En esta región, la estación lluviosa es de baja intensidad y se presenta entre diciembre y abril. La temperatura promedio se encuentra entre los 17.3°C a 18.7°C, el máximo de temperatura es de 25°C en el mes de mayo y el mínimo es de 8°C y se presenta en julio (INGEMMET, 1998).

Entre los 2000 y 3500 msnm, el clima es templado y seco con temperatura promedio entre los 11°C y 16°C. La precipitación acumulada anual es de 250mm y ocurre de diciembre a marzo. Estas áreas son típicamente secas y sin vegetación debido a que el periodo de lluvia sucede después de un largo



periodo de seco. Esto desempeña un rol importante en la morfología y geodinámica de esas áreas. Entre los 3500 y 4000 msnm cubre principalmente las mesetas altas de los Andes, en estas áreas se presenta un clima húmedo y frío. La temperatura anual promedio es de 10°C. En este piso altitudinal se presenta normalmente heladas. La estación lluviosa ocurre de diciembre a marzo y el acumulado de precipitación anual están sobre los 450mm.

Sobre los 4000 msnm el clima predominante es excesivamente húmedo y frío. Esta es un área de precipitación muy intensa, la cual alcanza valores acumulados anuales de 750mm. Las temperaturas nocturnas han sido registradas debajo de 0°C, pero tienen un promedio de 4°C.

4.3. Condiciones meteorológicas e hidrológicas

4.3.1 Curso de río

El río Rímac es el principal curso de agua de la hidrología superficial y el río Santa Eulalia es su tributario principal. Ambos ríos fluyen en dirección noreste-suroeste. El río Rímac fluye desde una elevación de más de 5000msnm, su nacimiento está ubicado en la montaña Uco a 5100msnm y el lago Ticticocha a 4697msnm, y desciende 145 km hacia el Océano Pacífico en su desembocadura en el Callao.

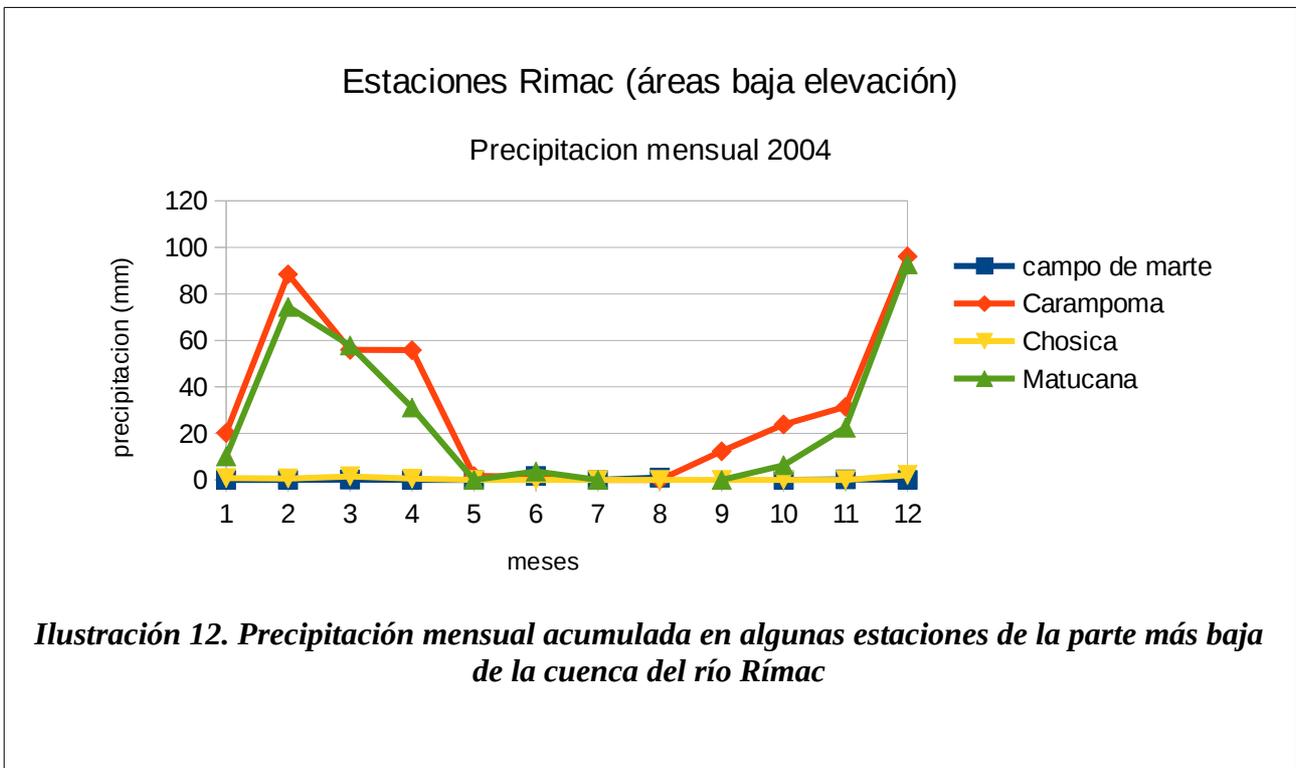
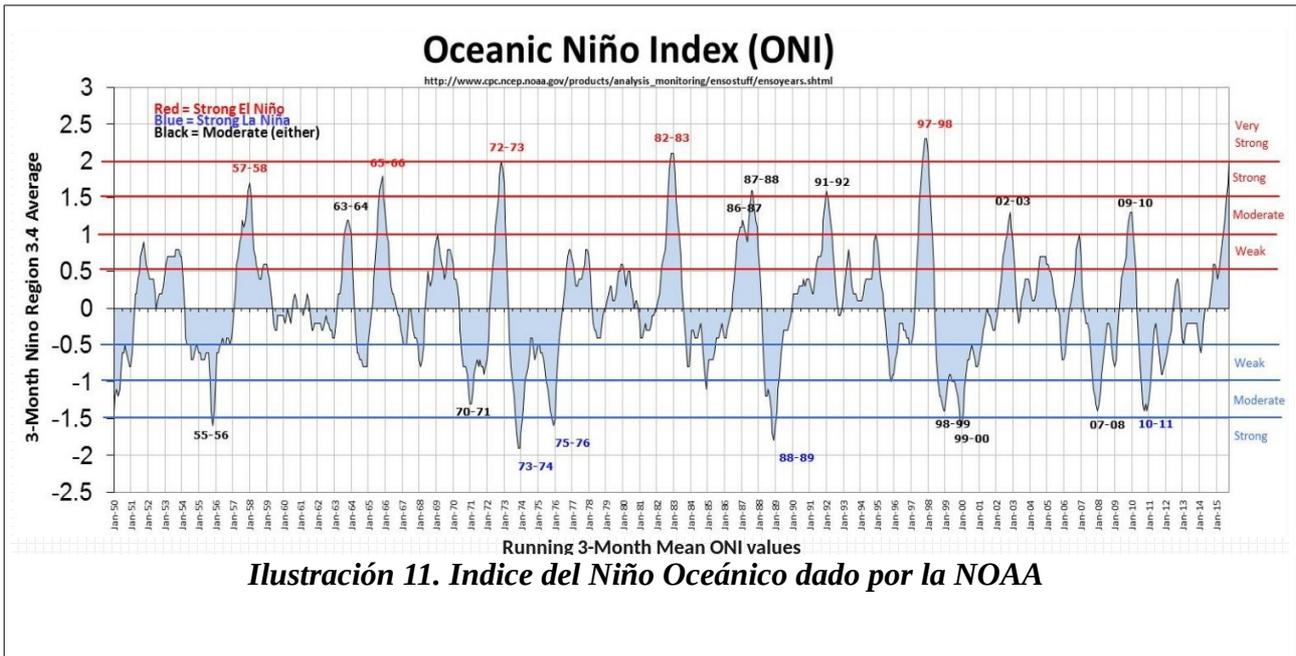
4.3.2 Precipitación

La disponibilidad de agua en la cuenca es dependiente de la precipitación, la cual, presenta un amplio rango de variabilidad. El periodo lluvioso, durante el verano, es de enero a marzo, el resto de meses del año son considerados como meses de bajo nivel de precipitación debido a que ocurre esporádicamente y solo en las áreas de elevada altitud.

En un registro publicado por el SENAMHI (2003) la precipitación en la cuenca del río Rímac en el 2003 fue de 419.9mm. El periodo más húmedo del año en el área de estudio ocurre desde enero a marzo con 64% de la precipitación anual. De junio a agosto solo el 5% de la precipitación total es registrada, considerándose como un periodo casi seco. La máxima precipitación registrado dentro de las 24h es de 47mm.

Debido a la gran variación de altitudes la cantidad de precipitación varía dentro del área de la cuenca. Las estaciones meteorológicas están localizadas en diferentes lugares de la cuenca y en cada una de ellas la cantidad de precipitación es diariamente registrada.

Los niveles de precipitación mensual registrados por el SENAMHI (2005) para el año 2004, que no presenta condiciones climatológicas de El Niño o La Niña (Ilustración 11), se muestran en Ilustración 12 y Ilustración 13. La variabilidad de la precipitación se debe a la diferencia en altitudes. En la Ilustración 12 las estaciones meteorológicas se ubican por debajo de 3500msnm y en la Figura Ilustración 13 las estaciones meteorológicas se ubican sobre los 3500msnm. En general puede apreciarse que se produce mayor cantidad de lluvia acumulada mensual en las estaciones de considerable altitud (>140mm) que en aquellas ubicada en la parte baja de la cuenca (hasta 100mm).



Estaciones Rimac (áreas elevadas)

Precipitación mensual 2004

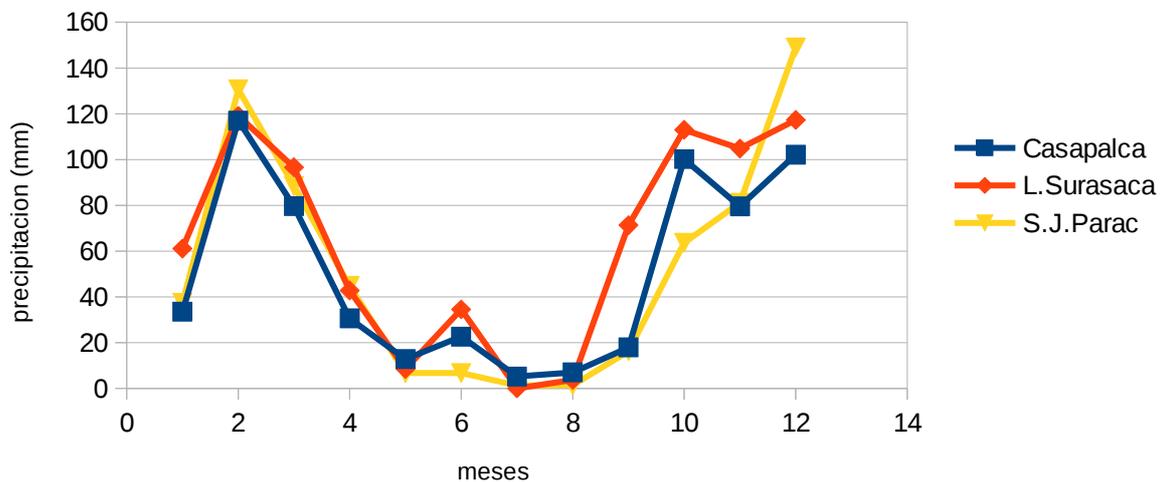


Ilustración 13. Precipitación mensual acumulada en algunas estaciones de la parte más alta de la cuenca del río Rímac

Figura 4.4.3.

4.3.3 Evaporación

El nivel de evaporación medido en la cuenca es de 3.5mm/día, pero puede llegar a 5.5mm/día, especialmente en periodos secos o de baja humedad relativa, entre junio y agosto (CECEL,1999). Los registros de evaporación mensual durante el año 2004 (SENAMHI, 2005) ilustra la tasa de evaporación registrada en dos estaciones de monitoreo, Campo de Marte, con un promedio mensual de precipitación de 37.8mm y Ñaña con 90.5mm de precipitación mensual promedio. La Figura 4.4.5, la evaporación mensual en la estación de Campo de Marte es baja debido al bajo nivel de precipitación presentado a esa altitud, mientras que en la estación de Ñaña se observa una mayor cantidad de evaporación debido a que esta estación está ubicada a mayor altitud y presenta una cantidad mayor de precipitación. Se observa también que en ambas estaciones la cantidad de evaporación es baja durante los meses de mayo a octubre, que corresponde al periodo seco.



4.3.4 Caudales

De acuerdo al SENAMHI el flujo de volumen de agua promedio anual en el río Rímac ha sido de 29.4 m³/s durante el año 2004 y el promedio anual durante el periodo 2003-2004 ha sido de 29.1m³/s, y se ha establecido como un periodo seco [4].

Año	Caudal del río Rimac 1/			Media historica	Caudal captado 2/		
	Maximo a/	Minimo b/	Promedio		Maximo a/	Minimo b/	Promedio
1997	28.35	14.25	20.25	25.63	14.64	9.81	12.11
1998	34.44	19.73	26.19	25.66	18.09	11.25	15.23
1999	35.70	20.23	26.82	25.70	17.08	12.66	14.90
2000	45.48	24.98	32.38	25.88	17.81	13.47	15.72
2001	42.29	26.72	33.58	26.10	17.60	13.85	15.63
2002	32.35	22.44	26.99	26.12	18.20	12.79	15.65
2003	34.98	23.78	28.37	26.18	19.08	14.51	16.80
2004	28.34	17.25	21.07	26.05	16.73	12.11	14.46
2005	31.52	20.26	24.69	26.02	18.31	14.62	16.38
2006	34.99	19.53	26.53	26.03	18.55	14.45	16.49
2007	41.00	23.28	30.18	26.13	18.98	14.65	16.79
2008	34.27	19.65	25.22	26.11	18.67	14.42	16.41
2009	41.97	24.94	32.11	26.24	19.45	15.02	17.28
2010	42.13	26.11	32.24	26.37	19.46	15.22	17.34
2011	46.74	27.79	34.83	26.54	19.91	15.24	17.58
2012	44.79	26.34	33.31	26.67	19.60	15.38	17.53
2013	42.08	25.21	32.52	26.81	20.30	14.97	17.42

1/ Aforo del río Rímac, medido en el punto de observación de Sheque y Tamboraque, promedio anual.

2/ Lectura promedio anual a nivel de bocatoma de la planta de tratamiento La Atarjea

a/ Promedio máximo mensual

b/ Promedio mínimo mensual.

Fuente: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima - Gerencia de Producción y Distribución Primaria

Ilustración 14. Aforo del río Rímac, medido en Seque y Tamboraque (SEDAPAL)

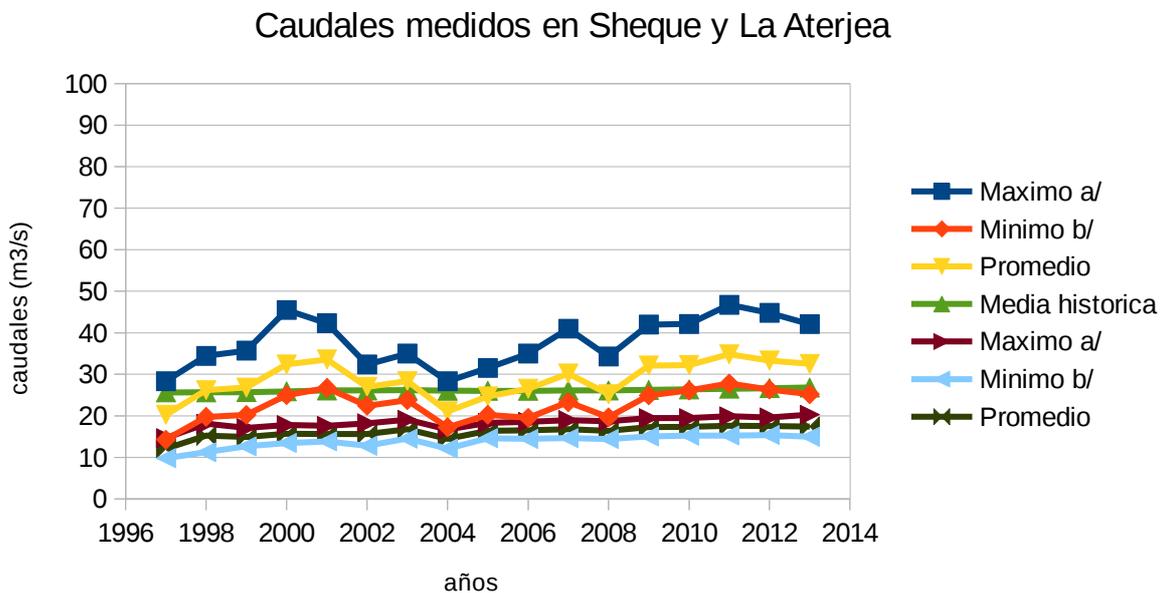


Ilustración 15. Caudales medidos en Sheque y La Aterjea (SEDAPAL)

4.3.5 Humedad relativa

La humedad relativa registrada por el SENAMHI (2005) durante el año 2004 en tres estaciones meteorológicas: Pantanos de Villa, Ñaña y Matucana se muestra en la Figura 4.4.4. Esta figura ilustra la variabilidad de esta variable respecto a la elevación de la estación. Una de las curvas pertenece a la estación de Matucana donde la humedad relativa es baja y varía entre 84% a 88%. Ninguna medición ha sido tomada en Diciembre. La segunda serie muestra los valores registrados en la estación de Ñaña donde la humedad relativa es mayor y presenta valores comprendidos entre 87% a 92%. La tercera curva representa la humedad relativa registrada en la estación Los Pantanos de Villa, y presenta valores entre 87 a 94%, siendo este un punto de alta concentración de humedad relativa debido a su cercanía al océano Pacífico.

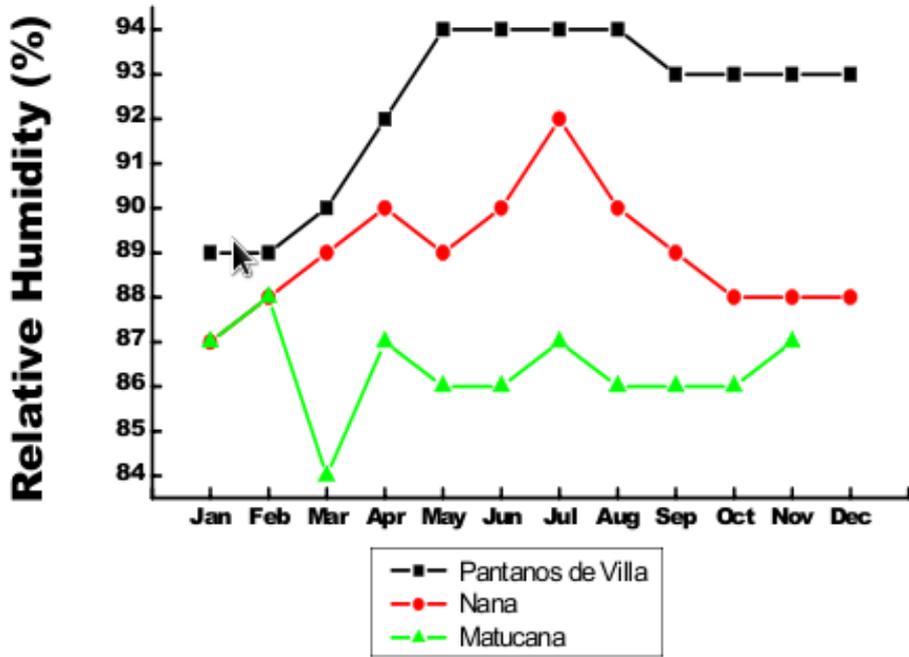


Ilustración 16. Humedad relativa en algunas estaciones de cuenca del río Rímac

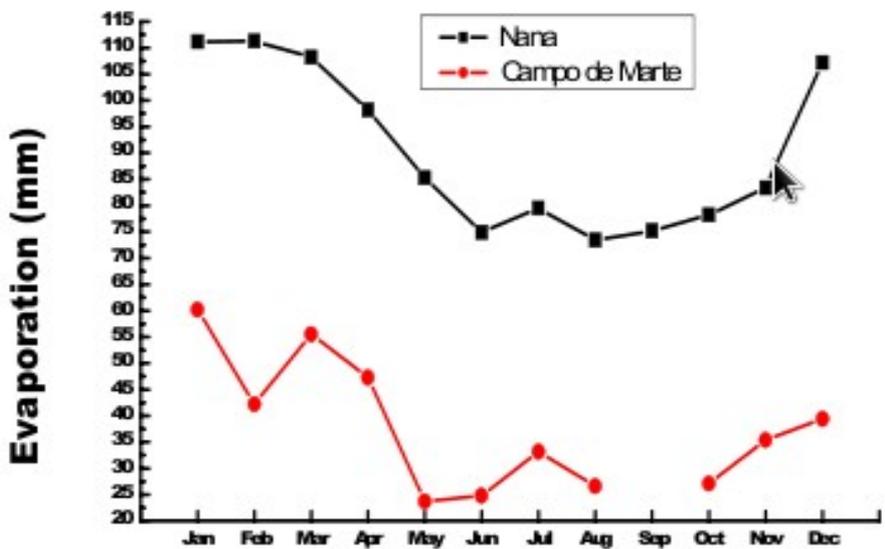


Ilustración 17. Evaporación mensual registradas en las estaciones de Campo de Marte y Ñaña



4.4. Características geológicas, fisiográficas y de suelo

Las unidades geológicas que conforman la cuenca son sedimentaria, metamórfica, volcánica, y rocas intrusivas de las eras jurásico y cuaternario. La geología de la cuenca está subdividida en dos zonas, la zona occidental y la zona oriental. La zona occidental es de la era jurásico-cretácico y está compuesto de rocas volcánicas con predominancia de andesitas, piroclastos y rocas sedimentarias, como areniscas, lutitas y calizas. En la zona oriental las rocas son del jurásico, cretácico y terciario. Esta zona está compuesta de rocas volcánicas, riolitas, breccias y dacíticas. Las rocas sedimentarias comprenden conglomerados, areniscas, lutitas y calizas.

Una tercera parte de la litología de la cuenca del río Rímac está compuesta de rocas ígneas. Esas rocas son principalmente granitos, tonalitas, granodioritas, monzodioritas, dioritas y grabodioritas. Los depósitos cuaternarios consisten de depósitos de glacial, fluvioglacial, aluvial, coluvial, proluvial y depósitos de viento (Stainmuller, 1995)

4.5. Aspectos ambientales, demográficos y socio-económicos

4.5.1 Población

La Ilustración 18 muestra la distribución de la población total por provincias en el departamento de Lima en el año 1999. Se observa que en Lima y Callao se tiene la mayor concentración de la población, por tanto estos pobladores de la ciudad demandan la mayor cantidad del recurso hídrico. La mayor concentración poblacional del país está asentada en la ciudad de Lima (INEI, 2004). La densidad poblacional en la ciudad es de 230.2 habitantes por km² y en la Provincia Constitucional del Callao la densidad es de 5523.7 habitantes por km².

4.5.2 Agua

Lima es la segunda ciudad más grande, después de El Cairo, ubicada en un desierto. Casi toda el agua del río Rímac es tratada y diversificada en usos antes que llegue al Océano Pacífico.

La producción de agua potable per cápita ofertada por SEDAPAL, según el Anuario de estadísticas Ambientales 2014 del INEI, entre los años 2005 a 2013 (Ilustración 19) obedece a una fuerte demanda de la población e industria por este recurso.

4.5.3 Energía

Hay cinco plantas de potencia hidroeléctrica las cuales generan electricidad a partir del aprovechamiento del río Rímac y su tributario principal el río Santa Eulalia. La Central Hidroeléctrica (C.H.) de Callahuanca tiene una producción de 602 947,602 MW/h, la C.H. de Huampani, 244 506,843 MW/h, la C.H. de Huinco, 1 171 512,215 MW/h, la C.H. de Matucana, 854 790,578 MW/h, y la C.H. de Moyopampa, 539 952,949 MW/h. La cantidad total de energía eléctrica producida en el año 2004, por esas plantas fue de 18 534 GW/h, lo cual representó el 81% de la energía producida en el año 2003. La energía total en el Perú, en el año 2004, ha llegado a 22 923GW/h (MEM, 2004).

En la Ilustración 20 se muestra la distribución de algunas de estas centrales hidroeléctricas en la cuenca del Rímac administradas por la empresa EDEGEL



4.5.4 Minería

Depósitos polimetálicos de zinc, cobre, plata y plomo han sido encontrados en las partes altas de la cuenca del Rímac y estos minerales son explotados continuamente en las provincias de Lima y Huarochirí. La labor minera está concentrada básicamente en los distritos de Chicla, San Mateo, Matucana, Surco, Huanza y Carampoma (MEM, 2007). Las principales compañías mineras que explotan estos recursos y su producción anual en el 2004, se muestran en la Tabla 4

Asimismo, puede apreciarse en la Ilustración 21 la producción anual de metales en Lima en unidades de Toneladas de Metal Fino (TMF)

Compañía Minera	Cobre (MFT)	Zinc (MFT)	Plomo (MFT)	Plata (MFT)	Cadmio (MFT)
Los Quenuales S.A.	2973	43503	16090	170922	-
Casapalca S.A.	1071	12252	6363	84250	-
Paru Bar	973	15685	14212	27716	-
Cajamarquilla	1419	127739	-	30426	317

Tabla 4. Producción anual en el 2004 de algunas compañías mineras en el Rímac

De un análisis general de estas cuatro últimas ilustraciones mencionadas, se puede apreciar que la demanda poblacional por recursos hídricos y energéticos es mayor que la oferta producida, por tanto, esto genera un estrés negativo en la cuenca debido a la sobre-explotación de los recursos.

DEPARTAMENTO LIMA Y CALLAO (PROV. CONST.): POBLACION TOTAL, SEGUN PROVINCIAS: 1999 (En Miles)

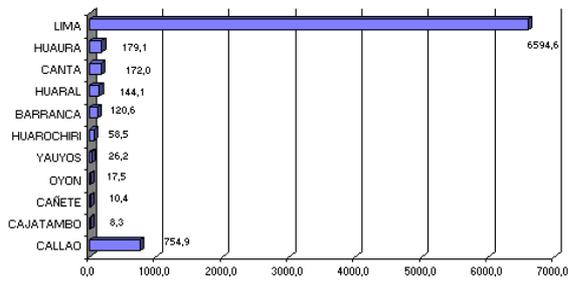


Ilustración 18. Población total por provincias en el Dpto. Lima (INEI,2009)

PRODUCCIÓN PER CÁPITA DE AGUAPOTABLE EN LIMA

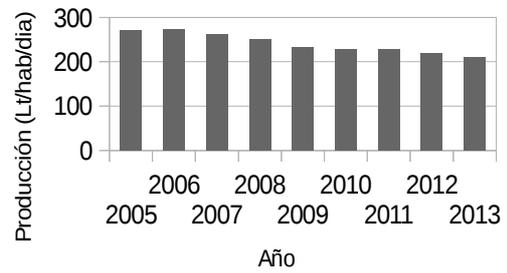


Ilustración 19. Producción per cápita de agua potable en Lima (INEI)

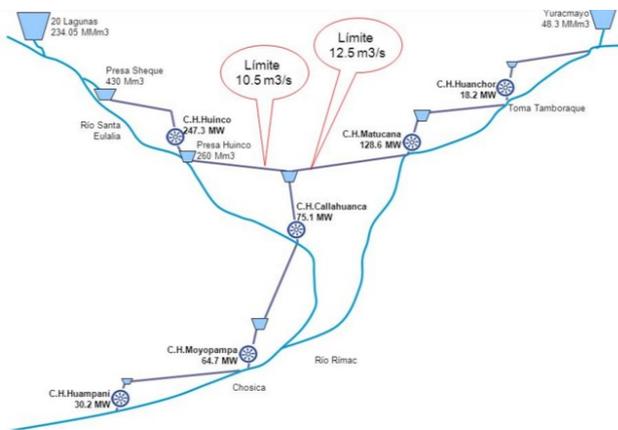


Ilustración 20. Principales centrales hidroeléctricas en el Rímac (EDEGEL)

Producción anual de metales en Lima

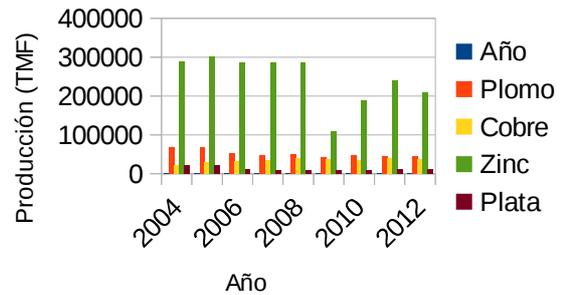


Ilustración 21. Producción anual de metales en Lima (INEI)



Capítulo 5: Materiales y Datos

Diferentes fuentes de datos han sido aplicados durante esta primera etapa de preparación de archivos y datos para la modelización hidrológica en la cuenca Rímac. Los datos de percepción remota y los datos de modelos atmosféricos globales son de libre acceso desde los servidores públicos de las organizaciones que los proporcionan y administran. Los datos observacionales han sido obtenidos de algunas estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI.

Estos datos, están sujetos al control de calidad y verificación dados por las organizaciones encargadas de su gestión. En este estudio se utiliza estos datos como fuente de entrada para los modelos WRF y VIC y solo se evalúan algunos datos necesarios para la simulación hidrológica, especialmente los datos meteorológicos regionalizados a partir del modelo atmosférico WRF.

5.1 Datos de percepción remota

Las fuentes de datos de percepción remota corresponden a imágenes de los sensores AVHRR, para el trabajo con el modelo de elevación digital y cobertura de suelo proporcionado por la Universidad de Maryland a través del portal de la NASA. Los productos del sensor MODIS (NASA), MCD15A2 para la extracción del LAI a escala de la cuenca Rímac también ha sido utilizado durante la generación del archivo de parámetros de vegetación, y el proyecto GTOPO30 ha sido utilizado para el trabajo con el modelo de elevación digital de alta resolución han servido de base para la construcción de los archivos de parámetros requeridos por el modelo hidrológico VIC.

5.2 Datos de modelos atmosféricos globales y regionales

Datos regionalizados usando el sistema WRF para un escenario de cambio climático RCP8.5 a 5km por 5km de resolución espacial y a paso de tiempo diario generados para el estudio de escenarios en las cuencas de Rímac , Chillón y Lurín y parte alta del Mantaro en el marco del convenio de cooperación entre el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI y el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima - SEDAPAL (SENAMHI, 2015) han sido utilizados para producir los archivos de forzantes meteorológicas para la modelización hidrológica en la cuenca del río Rímac.

5.3 Datos observados

Para la evaluación de las forzantes meteorológicas se ha utilizado datos de estaciones meteorológicas terrenas en la cuenca del Rímac administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

Capítulo 6: Metodología

6.1. Aplicación del modelo WRF

El sistema WRF se utiliza en esta etapa para regionalizar los análisis del GFS a un dominio que abarca el territorio de la cuenca del río Rímac y generar las series diarias de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y vientos proyectados a una escala local. Se toman los análisis del GFS de 6h con una resolución espacial grilla de 1 grado por 1 grado (NCEP-NOAA) en formato GRIB cuyo periodo abarca desde 2004 hasta 2015 como datos conductores del modelo WRF. La configuración de dominios propuesta consiste en un anidamiento de regiones de escalas espaciales diferentes. Los datos de los análisis del GFS se procesan en un primer proceso de downscaling hacia una malla de 60 km por 60 km que abarca la región de Sudamérica. El primer subdominio anidado tiene una resolución espacial de 20km por 20km y abarca la extensión del territorio peruano. El segundo subdominio, anidado dentro del primer subdominio, abarca la extensión de la cuenca del río Rímac y tiene una resolución espacial de 5km por 5km.

6.1.1 Atributos y requerimientos del modelo WRF

El modelo WRF se construye usando Perl version 5 y un número de utilidades de los sistemas operativos Unix o Linux. El código fuente del WRF esta escrito en Fortran 90 y tienen una estructura de desarrollo modular. El WRF ha sido compilado en diferentes sistemas operativos con diferentes configuraciones y diferente número de procesadores para analizar el costo computacional en términos de tiempo de ejecución y eficiencia del sistema.

La configuración del sistema y las librerías específicas para esta implementación se presenta en la Tabla 5

6.1.2 Compilación del modelo WRF

Una compilación exitosa del modelo WRF en el sistema operativo de la estación de trabajo con la configuración mencionada genera dos ejecutables principales: real.exe, el cual se utiliza para la generación de la condiciones iniciales de la simulación y wfr.exe, el cual es el núcleo de integración del modelo WRF-ARW.

6.1.3 Compilación del WPS

Después de realizar la instalación y configuración del núcleo del WRF, lo siguiente es configurara y compilar el sistema de pre-procesamiento WPS. Su correcta instalación genera tres ejecutables: geogrid.exe, el cual define la configuración de dominios e interpola los datos geográficos sobre ellos. Ungrib.exe, que permite extraer los campos meteorológicos del formato binario GRIB. Y metgrid.exe que permite interpolar horizontalmente los datos meteorológicos a la configuración de dominios establecida.

6.1.4 Preparación de los datos de entrada para la simulación

La ejecución de los módulos del sistema de pre-procesamiento del WRF (WPS) son requeridos para preparar las entradas para simulaciones de casos reales con el sistema WRF. Para esto, algunas preparaciones deben ser realizadas para convertir los datos externos al formato intermedio del WPS.



Especificaciones del sistema	
Sistema operativo	Linux, distribución Centos 6.4
Arquitectura	x86_64
Intérprete	Bash, Csh, Ksh
Compiladores	Ifort, icc (Intel)
Librerías instaladas	
Memoria distribuida	MPICH2
Soporte formato I/O	NetCDF 4.0
Soporte GRIB2	JasPer, png, zlib
Procesamiento y Visualización	GrADS, NCL, Python2.7
Tabla 6.1.1.1.	

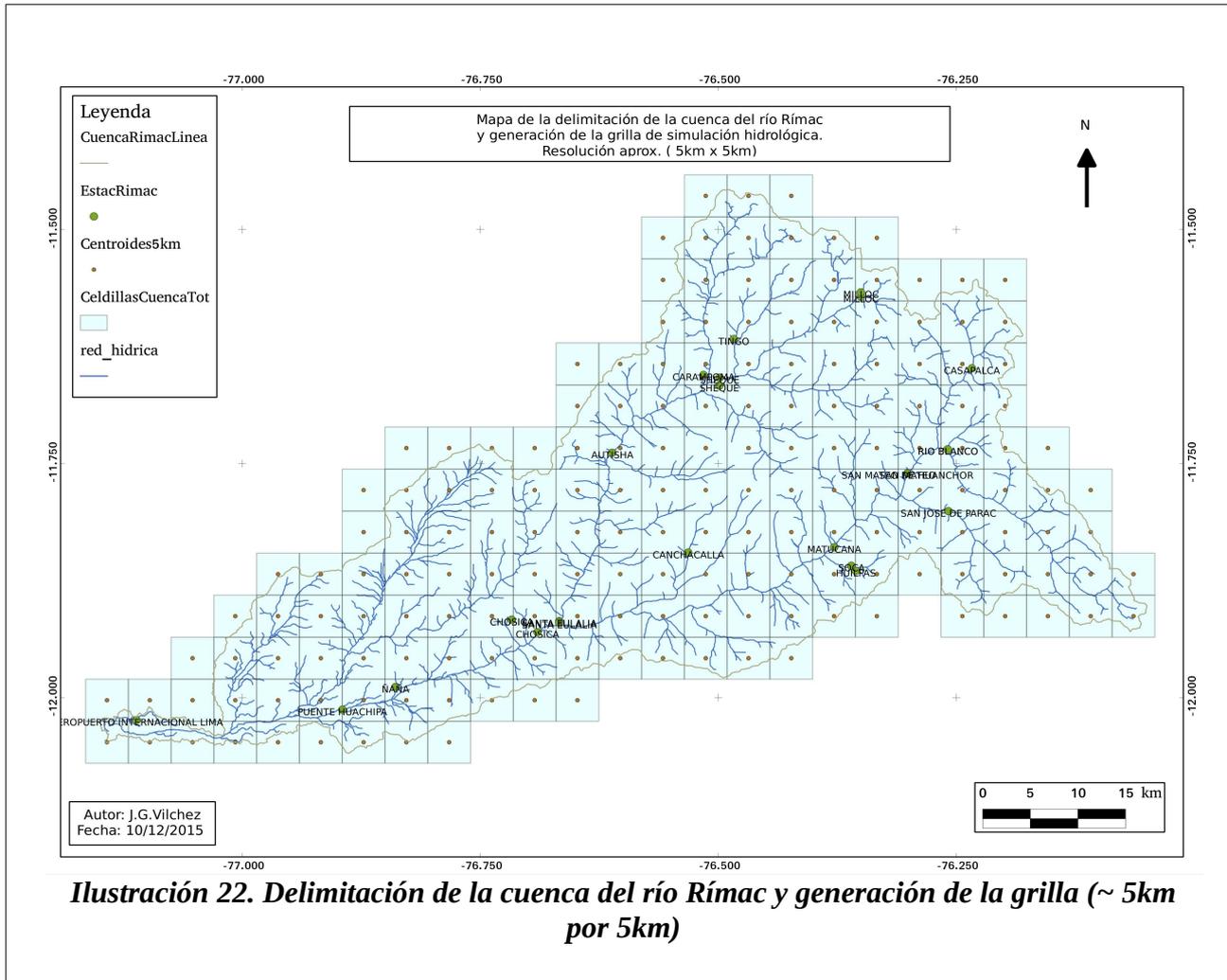
Tabla 5. Configuración del sistema y las librerías instaladas en la estación de trabajo

6.1.5 Ejecución de modelo WRF y pos-procesamiento de datos regionalizados

El modelo WRF ha sido ejecutado en la Dirección de Meteorología Aplicada del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú DMA-SENAMHI durante aproximadamente un año en los equipos de cómputo de alto rendimiento de la dirección. Los datos de las salidas han sido analizados por los especialistas de DMA y han sido evaluados tanto en su periodo histórico así como para su periodo futuro. Cabe señalar que estos datos han sido generados en el marco de un convenio de cooperación entre el SENAMHI y SEDAPAL para un estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hidrológicos de cuatro cuencas de la región.

6.2. Aplicación del modelo VIC

Para realizar la modelización hidrológica en la cuenca del río Rímac, el modelo hidrológico de Capacidad de Infiltración Variable (VIC) ha sido aplicado. El modelo hidrológico de macroescala semi-distribuido VIC calcula estadísticamente los balances de cantidad de agua neto en cada celda de grilla de la cuenca. Por tanto, para establecer la delineación de la cuenca apropiadamente es esencial generar un mapa de grillas que cubre la extensión de la cuenca del río Rímac y preparar la base de datos de la información relacionada a los parámetros de entrada de las características de vegetación, suelo y terreno de cada celda de grilla, así como la información meteorológica característica en cada celda de grilla del dominio de trabajo de la cuenca.



6.2.1. Generación de la malla sobre la región de estudio

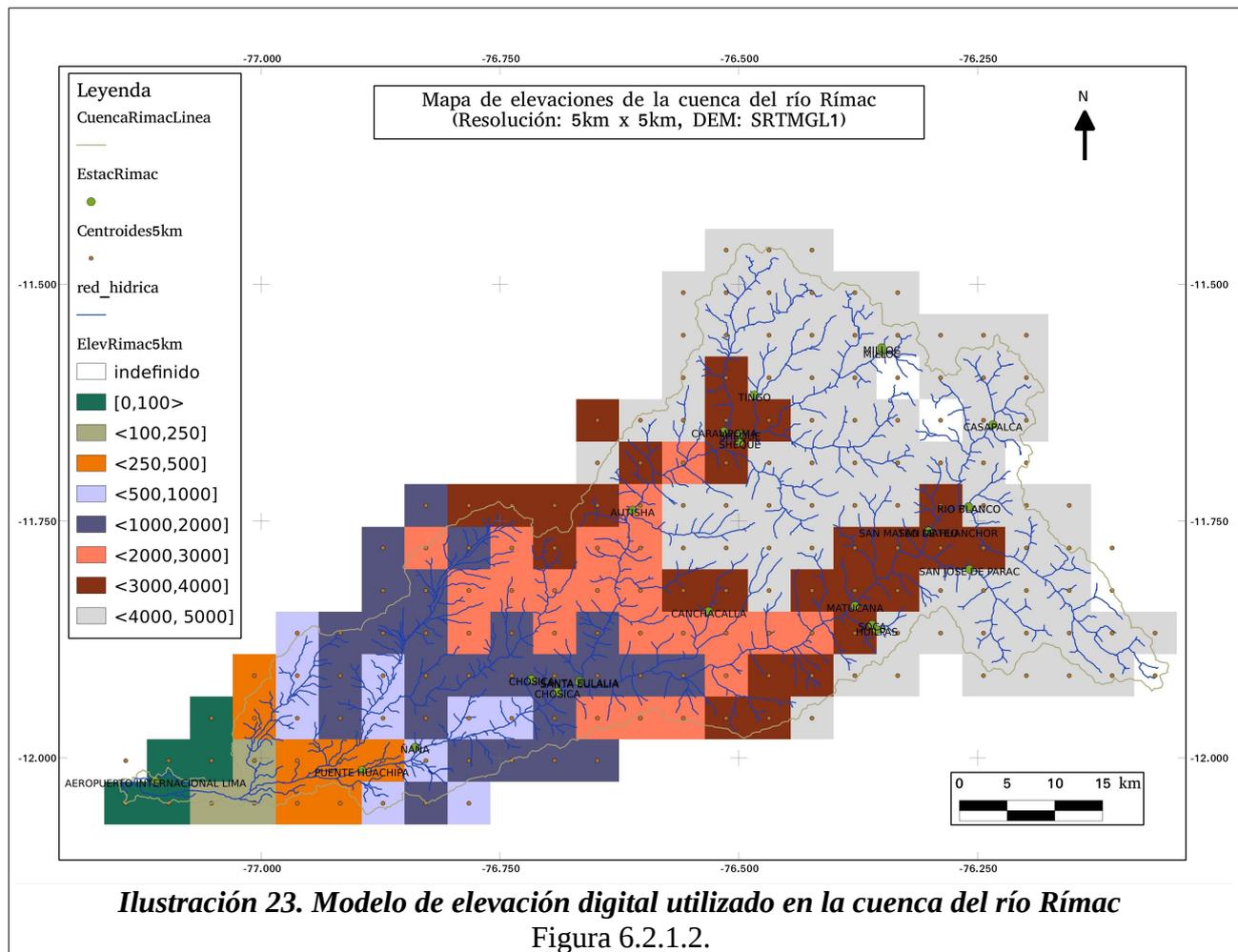
La región de estudio de la cuenca del río Rímac ha sido dividida en grillas cuadradas de aproximadamente 5 km por 5km (Ilustración 22), la cual ha sido generada a partir de un dominio rectangular que se extiende desde el punto geográfico (77.2094°W, 12.0726°S) a (75.9932°W, 11.3969°S) en un sistema de proyección geográfico de longitud-latitud y con *datum* geodésico WGS84.

6.2.1.1. Grillado

El cálculo de la resolución de grilla, se realiza mediante la ecuación: $\text{delta} = (360.0 * 1000) * 5 / \text{medlon}$, donde medlon es la medida de un arco de longitud en el Ecuador geográfico (40075004.0m). Por tanto, la resolución de grilla se calcula a 0,044915778423877388 grados (~5km). Usando el software QGIS1.8.0 Lisboa, se genera una nueva cuadrícula con la resolución aproximada de 5km según el cálculo previo. Los centroides de cada celda de grilla son calculados asimismo por el software QGIS1.8.0 y se obtienen las coordenadas de los centroides en el sistema de longitud-latitud.

6.2.1.2. Modelo de elevación de alta resolución

La información de elevaciones de la cuenca es extraída a partir del modelo de elevación digital de alta resolución *Shuttle Radar Topography Mission - SRTM Version 3* (NASA, USGS, 2000; <https://earthdata.nasa.gov/nasa-shuttle-radar-topography-mission-srtm-version-3-0-global-1-arc-second-data-released-over-asia-and-australia>), el cual, tiene una cobertura espacial global con 1 segundo de arco (aproximadamente 30m) de resolución. La misión de topografía NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) obtiene los datos de elevación de terreno a una escala global usando la técnica de interferometría de radar. Las imágenes del producto del modelo de elevación digital SRTMGL1 (*NASA Version 3.0 SRTM Global 1 arc second*) han sido procesadas de modo que los píxeles vacíos han sido completados usando datos de elevación de otros modelos de terreno entre ellos, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model 2 (GDEM2), USGS Global Multi-resolution Terrain Elevation Data (GMTED) 2010, and USGS National Elevation Dataset (NED), los detalles pueden ser consultados en la guía https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/measures/docs/NASA_SRTM_V3.pdf y <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. En la Ilustración 23 se muestra una representación de las elevaciones en la cuenca del Rímac obtenidas a partir del modelo de elevación digital SRTMGL1





6.2.2. Construcción del archivo de parámetros de suelo

Distintas fuentes de datos y diversos procedimientos han sido aplicados durante la generación de este archivo. Debido a la dificultad de contar con información de suelo consolidada y unificada para la región de interés se ha utilizado principalmente fuente de datos globales de información de suelo de libre acceso y luego esta información ha sido regionalizada a la zona de interés de la cuenca aplicando diferentes técnicas de procesamiento geoespacial. El uso de las herramientas de cartografía digital y GIS ha permitido facilitar esta tarea. Cada una de las columnas del archivo de suelo es generada a partir de una serie de procesos de análisis independiente. Las columnas del archivo de parámetros de suelo se generan a partir de los procedimientos siguientes:

6.2.2.1. Definición de los centroides de la grilla en el archivo de parámetros de suelo

Las coordenadas de los centroides de la capa de centroides de la grilla de 5km de resolución son guardados como texto separado por comas (csv) para ser organizado en una hoja de calculo. Para esto se utiliza el menú Capa del software QGIS1.8.0 Lisboa a través del cual se procede a guardar la capa como archivo csv. Este archivo luego es abierto en el software de oficina Libreoffice Calc para ordenar las coordenadas de los centroides con los respectivos ID de los puntos de grilla, estos deben luego servir para identificar las celdillas en el archivo de suelo correctamente.

6.2.2.2. Definición de las celdas activas de ejecución en el archivo de parámetros de suelo

En esta etapa se define que celdas deben estar activas al momento de ejecución del modelo VIC. Esto se especifica en el archivo de parámetros de suelo poniendo 1 en la primera columna definida como #RUN, esto le dirá al modelo que celdas se deben activar para ser calculadas durante la ejecución. Las celdas activas corresponden a aquellas que están contenidas completamente o parcialmente dentro del perímetro de la cuenca. Se seleccionan manualmente estas celdas desde el software QGIS y se coloca 1 en la columna #RUN asociada a la celda en el archivo de parámetros de suelo.

6.2.2.3. Definición de propiedades hidráulicas de suelo en la cuenca

La base de datos global de parámetros de suelo hidráulicos y térmicos para modelización del sistema terrestre del grupo de investigación de interacción suelo-atmósfera de la Universidad Normal de Beijing (Dai, Y., et al., 2013) [5] ha sido utilizada para la estimación de los parámetros en la cuenca del Rímac. Esta base de datos ha sido derivada a partir de la estimación de las funciones de pedotransferencia de suelo. Estas funciones incluyen los parámetros en las funciones de Clapp y Hornberger y en las ecuaciones de la dinámica térmica [6]. Los valores de mediana de las estimaciones son proporcionados. La resolución es 30 segundos de arco. La variación vertical de las propiedades de suelo han sido capturadas en ocho capas hasta una profundidad de 2.3m. Las capas de suelo son: 0- 0.045, 0.045- 0.091, 0.091- 0.166, 0.166- 0.289, 0.289- 0.493, 0.493- 0.829, 0.829- 1.383 y 1.383- 2.296m.

6.2.2.4 Cálculo de la conductividad hidráulica saturada (Ksat)

Para obtener las estimaciones de la conductividad hidráulica saturada en el dominio de la cuenca del Rímac se utiliza la información de la base de datos de parámetros de suelo de la Universidad Normal de Beijing, la variable es la conductividad hidráulica saturada de las funciones de Clapp y Hornberger, denotada como k_s en la base de datos NetCDF original. Para esta variable, se interpola los valores correspondientes dados usando una aproximación de vecinos cercanos hacia los puntos de grilla que definen los centroides de la malla que delimita la cuenca. Como paso previo, se ha extraído un subdominio de interés del conjunto de datos original en formato NetCDF,

ya que debido a su gran tamaño en peso lógico, es recomendable para su apropiado manejo y almacenamiento en la estación de trabajo actual. Para extraer el subdominio se ha utilizado el software NCO mediante la utilidad `ncks`. Luego, este subdominio en formato NetCDF se transforma a formato raster usando las herramientas de la librería de manipulación de datos geoespaciales *Geospatial Data Abstraction Library* - GDAL, mediante su utilidad `gdal_rasterize`. En seguida, este raster que contiene los valores de conductividad hidráulica saturada para un dominio rectangular se interpola, como se ha mencionado por el método de vecinos cercanos, usando la utilidad de la librería GDAL `gdalwarp` a una resolución de 0,044915778423877388 grados (~5km). Los datos de los píxeles del archivo raster final son leídos por un procedimiento definido en el lenguaje estadístico R para extraer estos valores a los puntos de grilla activos del dominio de cuenca definido y asociarlos a sus coordenadas geográficas respectivas. Este procedimiento se realiza para las capas de profundidad de suelo: 0.289- 0.493, 0.829- 1.383, y 1.383- 2.296m, dado que el archivo de suelo requiere tres capas de suelo como mínimo para ser definido. Esto caracteriza la estructura tridimensional del dominio de celdas activas en la simulación hidrológica.

6.2.2.5 Cálculo de los exponentes de la ecuación de Campbell (EXPT)

El índice de distribución de tamaño de poros λ definido a partir de las funciones de Clapp y Hornberger en la base de datos de parámetros de suelo de la Universidad Normal de Beijing han sido interpolados siguiendo un procedimiento similar al cálculo de la conductividad hidráulica y ha sido usado para el cálculo de los exponentes de la ecuación de Campbell vía la relación: $3+2/(\lambda*1000)$ en las capas de profundidad de suelo: 0.289- 0.493, 0.829- 1.383, y 1.383- 2.296m definidas. Estos valores han sido establecidos para cada celda de grilla del dominio de la cuenca y se ha definido en las columnas del archivo de suelo respectivas.

6.2.2.6 Cálculo de las elevaciones de las celdas de grilla (ELEV)

Estos valores han sido extraídos a partir del modelo de elevación digital SRTMGL1 interpolado a la resolución de 0,044915778423877388 grados (~5km).

6.2.2.7 Cálculo de la velocidad del flujo de base máximo (DsMax)

Este parámetro puede calibrarse durante la simulación hidrológica.

6.2.3. Construcción de los archivos de vegetación

La cobertura de terreno en el modelo VIC es descrito usando dos archivos: el archivo de librería de vegetación y el archivo de parámetros de vegetación. El primer archivo describe características hidrológicamente importantes de los diferentes tipos de cobertura de terreno. El segundo archivo, contiene la variabilidad espacial de la cobertura de terreno y describe la composición vegetativa de cada celda de grilla del dominio de cuenca.

6.2.3.1 Construcción del archivo de librería de vegetación

Los parámetros de vegetación necesarios para cada tipo de vegetación usado en el modelo VIC son provistos en un archivo ASCII en formato de columnas. Los parámetros son dados para cada tipo de vegetación diferente (Ilustración 24) y son referenciados por el archivo de parámetros de vegetación, el cual proporciona información respecto al número de tipos de vegetación por celda de grilla y su cobertura fraccional.

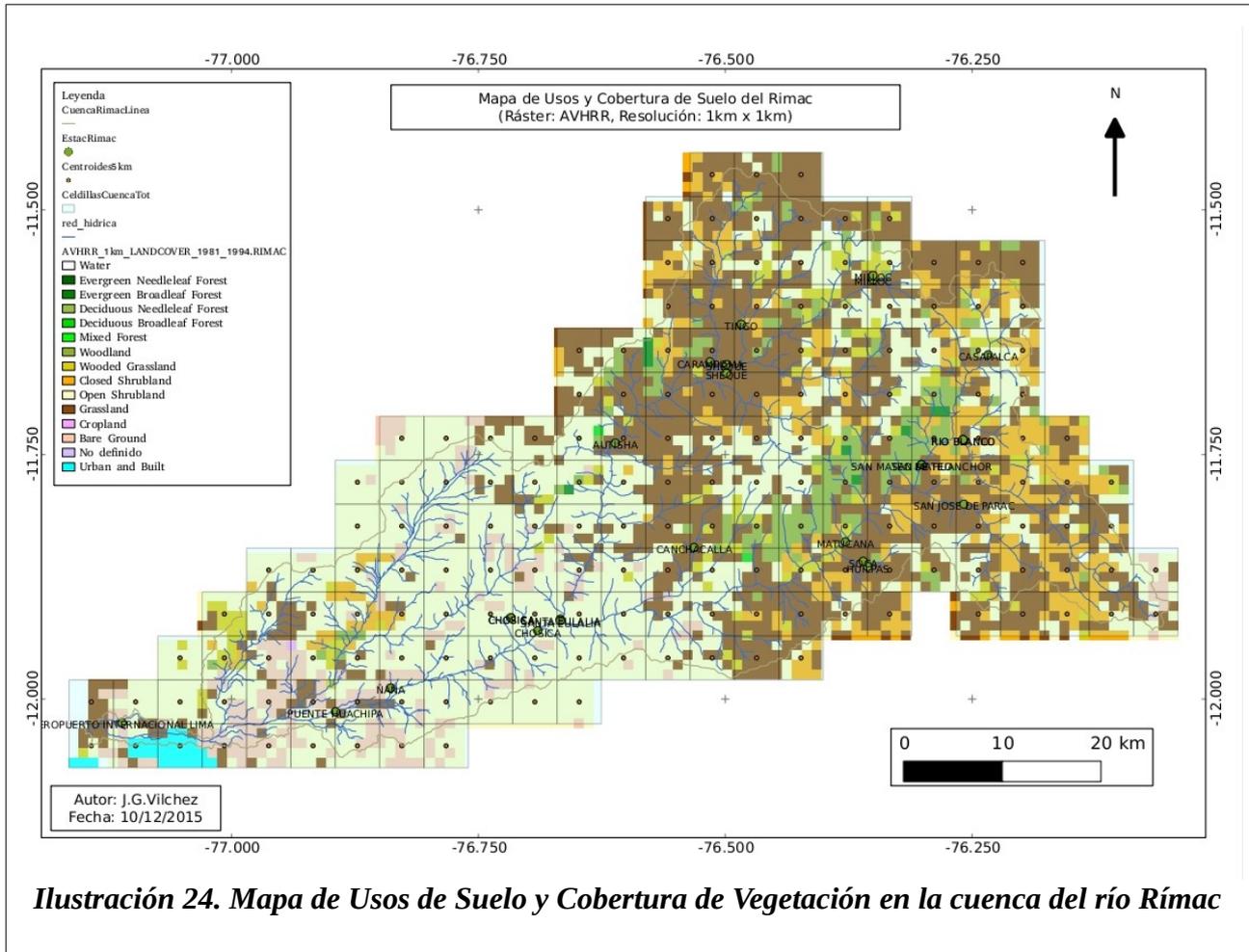


Ilustración 24. Mapa de Usos de Suelo y Cobertura de Vegetación en la cuenca del río Rímac

6.2.3.2 Construcción del archivo de parámetros de vegetación

La fuente de datos primaria usada para generar el archivo de parámetros de vegetación es el conjunto de datos ráster *AVHRR Global Land Cover Classification* dado por la Universidad de Maryland a través del portal de la *NASA Global Land Cover Facility*. El ráster descargado corresponde a un conjunto de datos de las características de vegetación generados a partir de los compuestos de imágenes del sensor AVHRR durante el período 1992 – 1993 a una resolución de 0.01 grado por 0.01 grado (1km por 1km). Con este archivo ráster se ha construido el Mapa de Usos de Suelo y Cobertura de Vegetación en la cuenca del río Rímac mostrado en la Figura 6.2.3.1. Se determina el número de clases de vegetación presentes en cada una de las celdas de grilla del dominio de simulación y se asigna las zonas de raíces presentes por cada clase de vegetación, estas zonas de raíces están determinadas por una distribución de la profundidad de raíces y fracción de raíces de la vegetación. Asimismo, una climatología mensual del *leaf area index* (LAI) y otras características como albedo de onda corta para cada tipo de vegetación,

6.2.4. Construcción del archivo de forzantes meteorológicas

El modelo hidrológico VIC puede tomar los datos diarios o subdiarios de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y viento como variables de forzamiento meteorológico para realizar la simulación hidrológica en la cuenca de interés. El modelo VIC necesita las variables meteorológicas



siguientes para su ejecución: precipitación, temperatura del aire, rapidez del viento, presión y densidad atmosférica, presión de vapor (o déficit de presión de vapor o humedad relativa o humedad específica), radiación solar de onda corta entrante, y radiación solar de onda larga entrante. No obstante, el modelo VIC puede estimar algunas de esas cantidades internamente de modo que no es necesario disponer de todas.

En esta investigación, las salidas regionalizadas a partir de los datos del modelo global del modelo WRF para los escenarios de cambio climático RCP8.5 a 5km por 5km de resolución espacial y a paso de tiempo diario generados para el estudio de escenarios en las cuencas de Rímac , Chillón y Lurín y parte alta del Mantaro en el marco del convenio de cooperación entre el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI y el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima - SEDAPAL (SENAMHI, 2015) han sido utilizados para producir los archivos de forzantes meteorológicas para la modelización hidrológica en la cuenca del río Rímac. Cada celda de grilla activa en el dominio de la cuenca tiene su propio archivo de datos meteorológicos. Los nombres de archivo se designan por el formato: *data_<lat>_<lon>*, donde <lat> y <lon> son la latitud y longitud del punto de grilla en coordenadas geográficas respectivamente. El archivo puede ser escrito en formato binario o ASCII y debe contener como mínimo cuatro variables meteorológicas: precipitación diaria total, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y rapidez del viento promedio diario. En este caso, el modelo VIC utiliza los algoritmos MTCLIM (Kimball et al. 1997; Thornton y Running, 1999) para convertir la temperatura diaria máxima y mínima a humedad y radiación de onda corta entrante, respectivamente. El VIC luego utiliza el algoritmo de *Tennessee Valley Authority* (Bras, 1990) para deducir la radiación de onda larga entrante a partir de la humedad y temperatura. El modelo VIC también computa la presión y densidad atmosférica a partir de la elevación de cada celda de grilla y la razón del lapso de presión promedio global.

Capítulo 7: Evaluación de forzantes meteorológicas en puntos de grilla cercanos a algunas estaciones de observación

7.1 Análisis de los cambios estacionales y anuales en la temperatura máxima proyectada por los escenarios regionalizados a 5km usando el modelo WRF en el periodo futuro (2016-2045) en relación al periodo histórico (1981-2010)

El cambio en la temperatura máxima (T_x) proyectada en el período futuro 2016-2045 (T_{xf}) en relación al análisis en el período histórico 1981-2010 (T_{xh}), en el escenario de alto forzamiento introducido por el RCP8.5 incluido en los datos de los modelos globales y regionalizado a una resolución de 5km partir de los modelos globales, puede ser representado en algunas estaciones de las principales cuencas de los departamentos de Lima y Junín en función de la altura y por la estacionalidad del año. Para las estaciones a lo largo de la cuencas de estudio, puede notarse que estos cambios de $T_{máx}$ obedecen la tendencia incremental de la altitud y dependen de la estación del año. Los cambios son mayores en las estaciones de mayor altitud y durante la estación de invierno (JJA) en la mayoría de las cuencas.

La cuenca del río Rímac presenta una alta demanda por usos de suelo y recursos hídricos por diversas actividades de expansión urbana, industria, hidroenergía y minería se observan cambios muy elevados en las tendencias de temperatura máxima proyectadas en el escenario futuro 2016 – 2045. La Ilustración 25 muestra la distribución de estaciones de medición en función de la altitud ubicadas a lo largo de la cuenca del río Rímac y río Santa Eulalia, su principal tributario. Entre 0 a 1500msnm se encuentran las estaciones de Campo de Marte, Von Humboldt, Santa Eulalia y Chosica, las cuales conforman la parte baja de la cuenca, que presenta una alta concentración urbana. Entre 1500 a 3000msnm están ubicadas las estaciones de Autisha, Matucana, Canchacaya, que conforman la parte intermedia de la cuenca y entre los 3000 a 4500msnm se conforma la parte alta de la cuenca donde están ubicadas las estaciones de Carampoma, Rio Blanco, Sheque, Tingo, Casapalca y Milloc.

La distribución de temperatura máxima estacional y anual en los periodos histórico 1981-2010 y futuro 2016-2045 se presenta en la Ilustración 26 y la distribución de los cambios de Temperatura máxima estacional y anual proyectada futura en relación al periodo histórico está representado en la Ilustración 27. En las estaciones ubicadas en la parte de baja de la cuenca la temperatura máxima en el trimestre de verano (DEF) varía entre los 23 y 29°C en los periodos histórico y futuro, mientras que, durante el invierno (JJA) oscila entre los 19 y 22.5° (Ilustración 26). Los cambios de temperatura máxima en el periodo futuro respecto al periodo histórico durante el verano (DEF), para esta parte de la cuenca, se encuentra entre 1.2 y 1.7°C y para el invierno (JJA) oscila entre 1.5 y 2°C (Ilustración 27). En las estaciones de la parte intermedia de la cuenca se observa que la temperatura máxima en los periodos histórico y futuro se encuentra entre los 19 y 23.5°C durante casi todas las estaciones del año (Figura2.2). Los cambios en la temperatura máxima en el periodo futuro respecto al periodo histórico, sin embargo, manifiesta una variabilidad dependiente de la estacionalidad del año y de la influencia poblacional.

Durante el verano (DEF), por ejemplo, el cambio de la temperatura máxima proyectada en el periodo futuro es de 1.5°C en la estación de Autisha, 0.46°C en Matucana y 1.47°C en Canchacaya. (Ilustración 27) Sin embargo, durante el invierno (JJA) estos cambios se configuran en los valores siguientes: 1.98°C en Autisha, 1.14°C en Matucana y 1.95°C en Canchacaya.

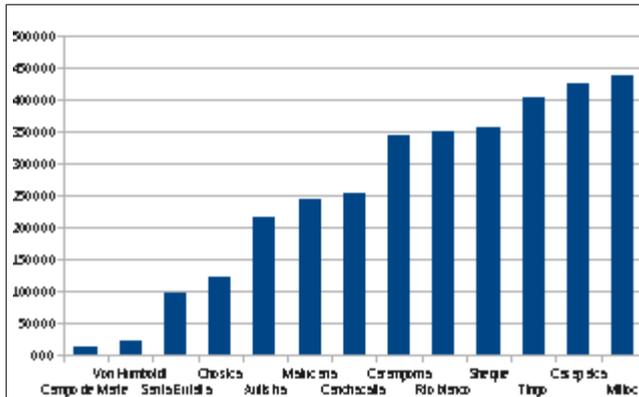


Ilustración 25. Distribución altitudinal de estaciones de la cuenca del río Rímac

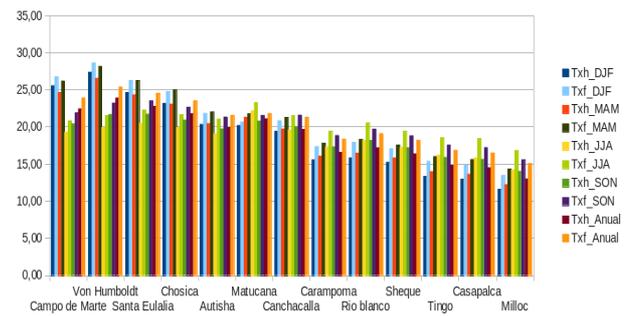


Ilustración 26. Distribución de Tmax estacional y anual en los periodos histórico (Txh) y futuro (Txf) en algunas estaciones de la cuenca del río Rímac

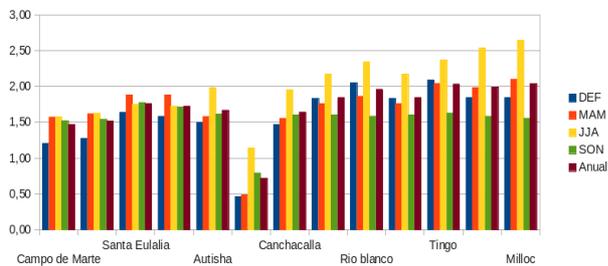


Ilustración 27. Cambios en Tmax estacional y anual en algunas estaciones de la cuenca del río Rímac

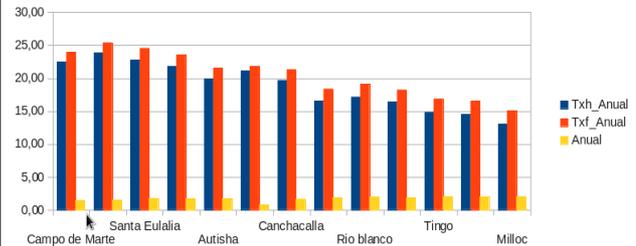


Ilustración 28. Cambios en Tmax anual en los periodos histórico (Txh) y futuro (Txf) en algunas estaciones de la cuenca del río Rímac

Para las estaciones ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Rímac, la temperatura máxima en el trimestre de verano costero (DEF) varía entre los 11.5 y 18°C en los periodos histórico y futuro, mientras que, durante el invierno costero (JJA) oscila entre los 14 y 21°C (Ilustración 26). Los cambios de temperatura máxima en el periodo futuro respecto al periodo histórico durante el trimestre de verano costero (DEF) y durante el trimestre de otoño costero (MAM), para esta parte de la cuenca, se encuentra entre 1.7 y 2.1°C mientras que para el invierno costero (JJA) oscila entre 2.1 y 2.7°C (Ilustración 27). Se observa además que durante la primavera costera (SON) el cambio de Tx oscila alrededor de 1.6°C.

El máximo cambio de Tx en el periodo futuro respecto al histórico se presenta en la estación de Milloc (4386msnm) durante el invierno (JJA) y alcanza un valor de 2.64°C y el mínimo cambio de Tx se presenta en la estación de Matucana (2758msnm) también durante el trimestre de invierno costero (JJA) y alcanza un valor de 1.14°C.

La distribución del promedio anual de temperaturas máximas en los periodos de análisis histórico 1981-2010 (barras azules) y futuro 2016-2045 (barras naranjas) y los cambios de la temperatura máxima en estos periodos (barras amarillas) para esta cuenca se muestra en la Ilustración 28. Se observa que los cambios anuales se incrementan con la altitud y que el mayor cambio anual de Tx se presentan en la estación de Milloc con 2.03°C, cuya Tx anual en el periodo histórico de 13°C. Mientras que, la estación de Matucana manifiesta el menor cambio de temperatura máxima anual proyectada con 0.72°C donde la Tx anual en el periodo histórico alcanza un valor de 21.11°C.

7.2 Precipitación

La precipitación mensual regionalizada usando el modelo WRF ha sido evaluada con las observaciones de lluvia mensual dadas en algunas estaciones de la cuenca del Rímac. Los datos de precipitación mensual observados han sido tomados de la base de datos PISCO: *Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations. Precipitación v1.0*. (Lavado, et al., 2015) [7].

La series de precipitación modelizadas y observadas han sido comparadas usando medidas estadísticas escalares asociadas a los errores, tales como: el error medio o bias (ME), error medio absoluto (MAE), error medio cuadrático (MSE) y error de raíz medio cuadrático (RMSE). Asimismo, se han calculado las medidas estadísticas básicas, como la medias, medianas y cuantiles, mostrados gráficamente en los *boxplot* y otras como la desviación estándar (SD) y correlaciones, las cuales, se asocian gráficamente con los RMSE centrados, a través de los diagramas de Taylor. En la Ilustración 29 se puede observar las series de precipitación mensual modelizadas y observadas en algunas estaciones del Rímac. La series regionalizadas usando el sistema WRF manifiestan estimaciones superiores a las observaciones, sin embargo, puede observarse una aceptable concordancia en los ciclos mensuales de precipitación, en particular, en las estaciones de la parte alta de la cuenca, como Carampoma (3424), Parac (3805msnm) y Casapalca (4100msnm). En la parte intermedia de la cuenca, los acumulados mensuales de lluvia regionalizados con el WRF en las estaciones de Matucana (2431msnm) y Canchacalla (2487msnm) presentan también estimaciones superiores a las observaciones, no obstante, aún mantiene la tendencia de los ciclos mensuales del régimen observado. En la estación de Chosica (906msnm), se observa una muy alta sobre-estimación de la lluvia regionalizada con el WRF respecto a las observaciones. Esto es, debido a la deficiencia de los esquemas físicos del modelo regional WRF para representar apropiadamente la variabilidad en la cantidad de producción de lluvia local, sobre todo en regiones áridas muy cercanas a la costa, como es el caso de la parte baja de la cuenca Rímac.

En la **Ilustración 30**, se muestran los diagramas de Taylor, los cuales, indican los valores de SD, Correlación y RMSE de las series modelizadas (WRF) respecto a las observaciones. Las estaciones de Carampoma (SD=93.95, RMSE=86.06, Correlación=0.64), Parac (SD=55.17, RMSE=69.51, Correlación=0.74) y Casapalca (SD=76.91, RMSE=63.29, Correlación=0.7), indican una aceptable concordancia en exactitud con las observaciones. Asimismo, la precisión de la lluvia modelizada con el WRF respecto a la lluvia observada en dichas estaciones puede ser estudiada mediante los valores de desviación estándar respectivos. En las estaciones de Matucana (SD=35.73, RMSE=103.13, Correlación=0.65), y Canchacalla (SD=114.71, RMSE=124.52, Correlación=0.5), las medidas estadísticas presentes en los diagramas de Taylor indican una exactitud también aceptable con las observaciones, pero se muestran valores más altos de RMSE y valores más bajos de correlación en relación a aquellos obtenidos en las estaciones de mayor altitud. Asimismo, los valores de SD indican una menor precisión en las estimaciones de lluvia modelizadas. En la estación de Chosica (SD=98.38, RMSE=103.13, Correlación=0.65) las medias estadísticas indican una menor exactitud y menor precisión de la lluvia modelizada respecto a las observaciones.

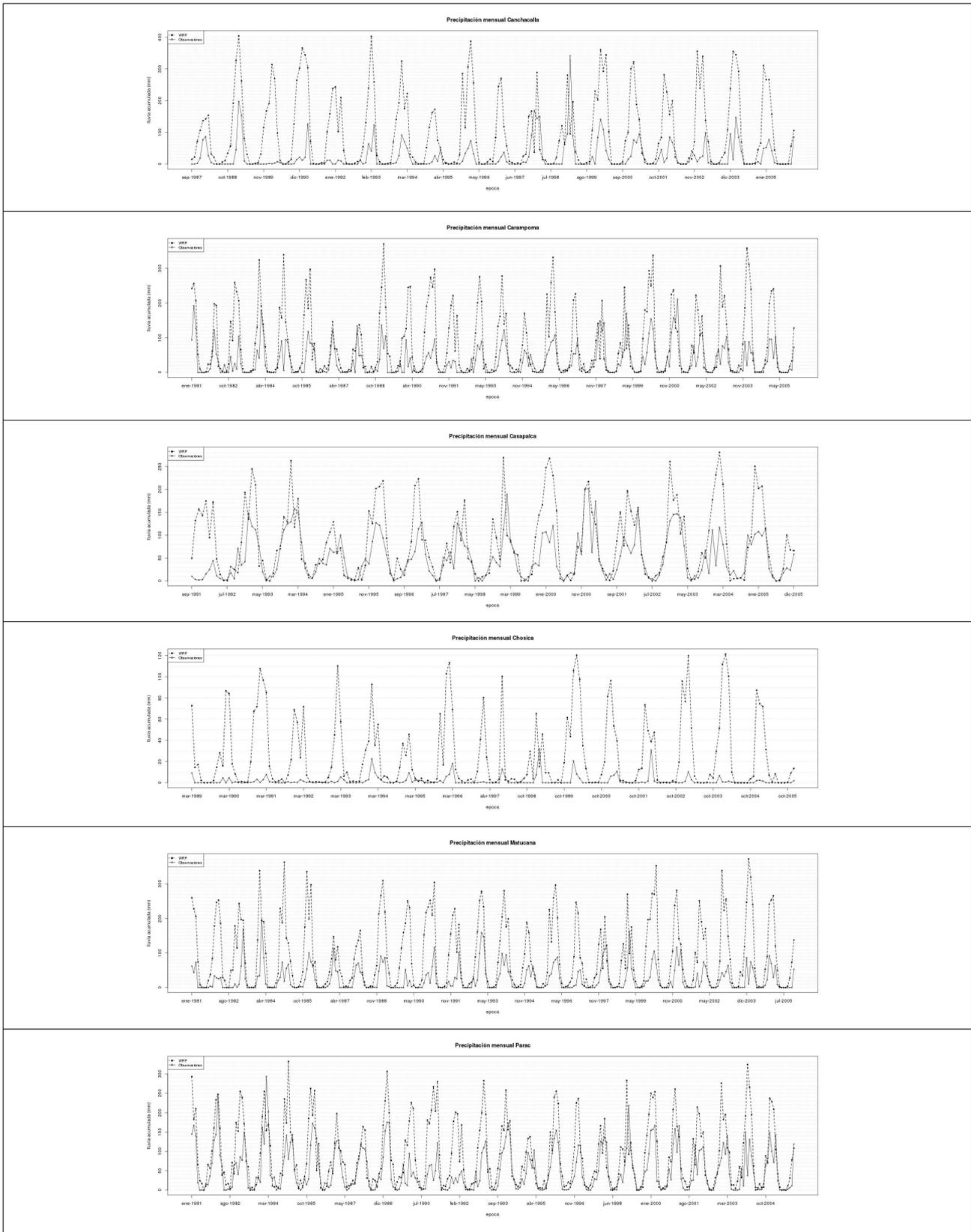


Ilustración 29. Comparación entre series de precipitación mensual modelizadas (WRF) y observadas en algunas estaciones del Rímac

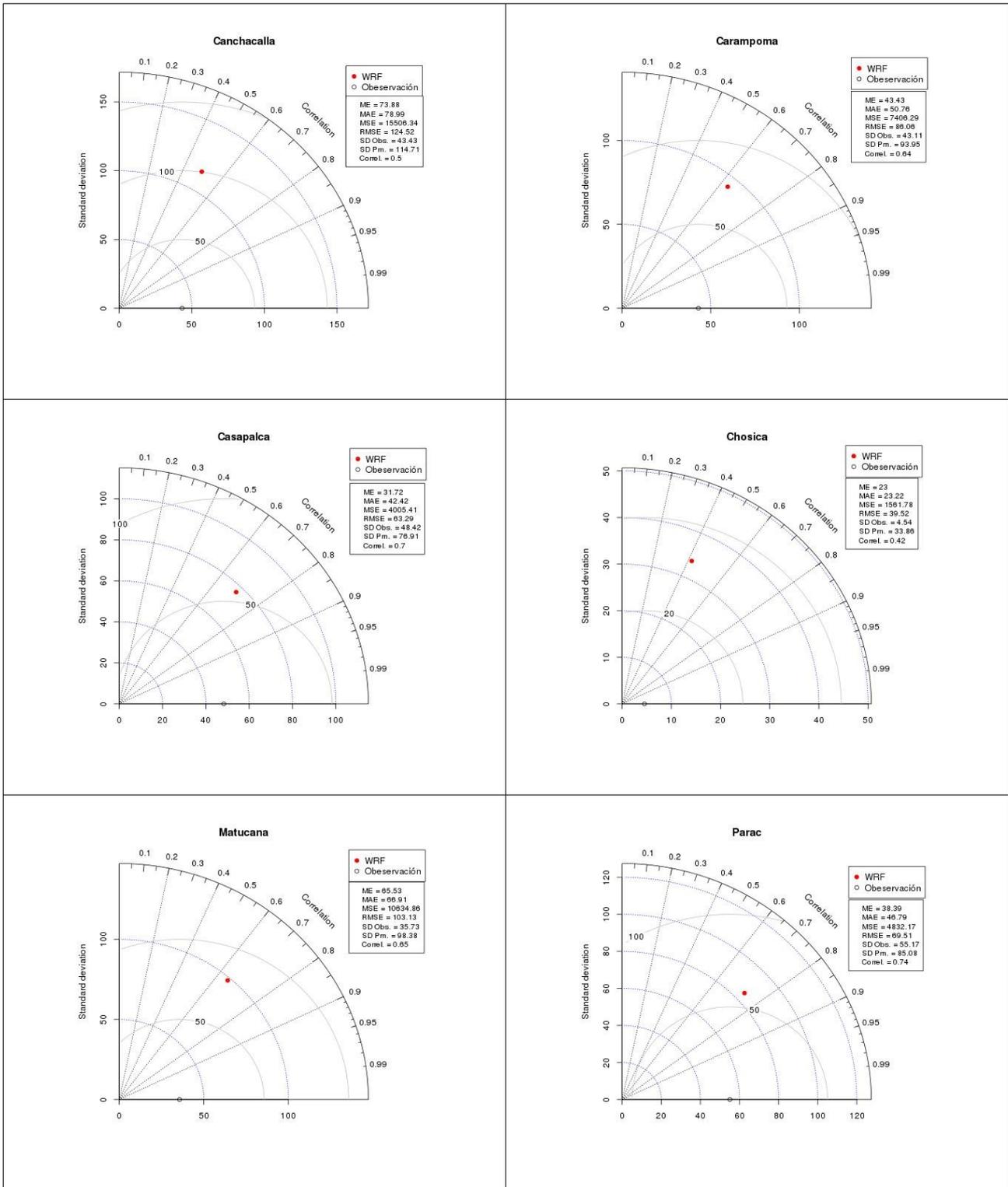


Ilustración 30. Diagramas de Taylor indicando los valores de SD, Correlación y RMSE de las series modelizadas (WRF) y de las observaciones en algunas estaciones del Rímac



Los diagramas de dispersión mostrados en la **Ilustración 31** muestran también el grado de asociación lineal entre la estimación de precipitación modelizada por el WRF y las observaciones.

Los diagramas de caja en la **Ilustración 32** muestran la distribución de los cuantiles principales, así como los valores de las medias, mínimos y máximos entre los datos de lluvia generados por el modelo WRF y las observaciones en las estaciones de evaluación.

Los diagramas de barra (**Ilustración 33**) presentan comparaciones entre la distribución de frecuencias relativas de la lluvia mensual acumulada modelizada y observada, definidos en ciertos intervalos de clase, en las estaciones de evaluación. Se observa que la frecuencia relativa es mayor en el intervalo [0, 50) mm de precipitación mensual acumulada en las estaciones de Canchacalla, Carampoma, Casapalca, Matucana y Parac, mientras en la estación de Chosica la mayor frecuencia de ocurrencias (mayor que 0.5) se presenta en el intervalo [0, 25) mm. Esto se explica por el hecho de que los mayores acumulados de precipitación se producen en las estaciones ubicadas a mayor elevación en la cuenca. En la parte alta de la cuenca la lluvia es abundante y frecuente mientras que en la parte media y baja es más escasa. En las estaciones ubicadas a menor elevación, como Chosica, se observa valores de frecuencia relativa de lluvia mensual acumulada modelizada en los intervalos de (25, 50), (50, 75), (75, 100) mm, lo cual no corresponde a las observaciones. Mientras que en las estaciones de Canchacaya, Matucana, Casapalca, Carampoma y Parac la distribución de frecuencia relativa de la precipitación mensual modelizada presenta una concordancia aceptable con la distribución de la lluvia mensual acumulada observada y se muestra, asimismo, que la frecuencia de ocurrencias es también aceptablemente reproducida en los intervalos (50,100) mm y (100, 150) mm.

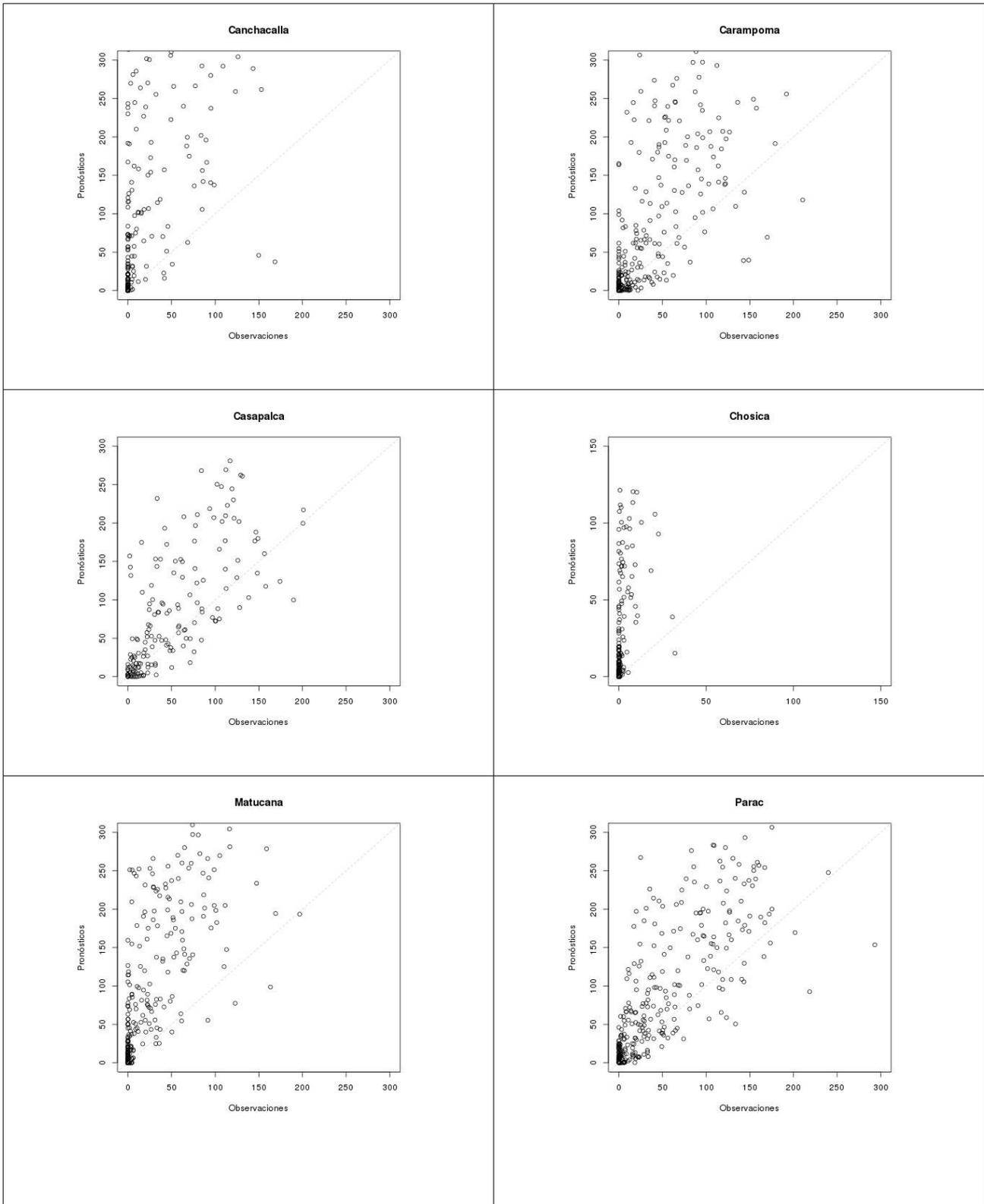


Ilustración 31. Diagramas de dispersión entre la lluvia mensual acumulada modelizada y observada en las estaciones evaluadas del Rímac

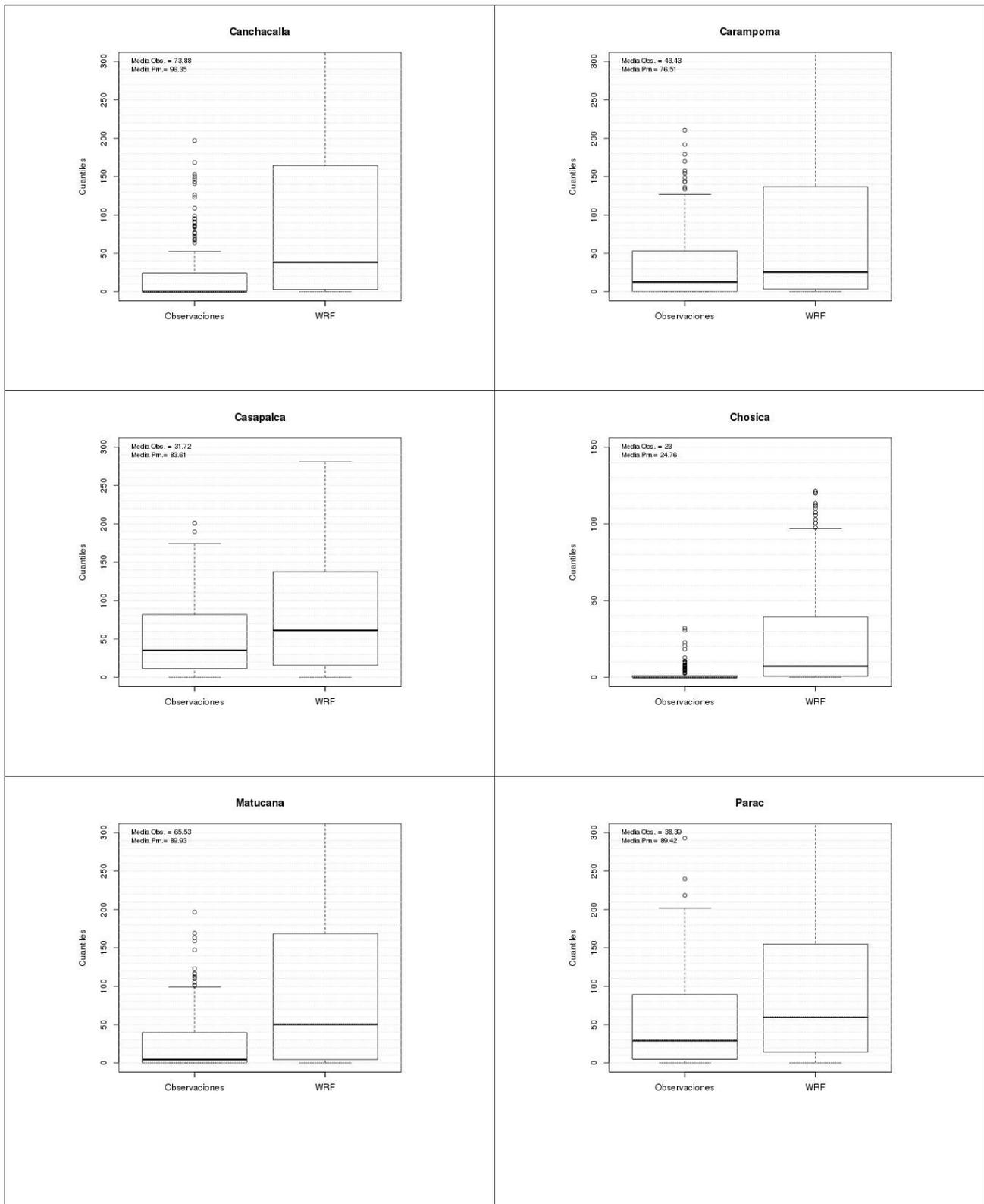


Ilustración 32. Diagramas de caja de la lluvia mensual acumulada observada y modelizada (WRF) en las estaciones evaluadas del Rímac

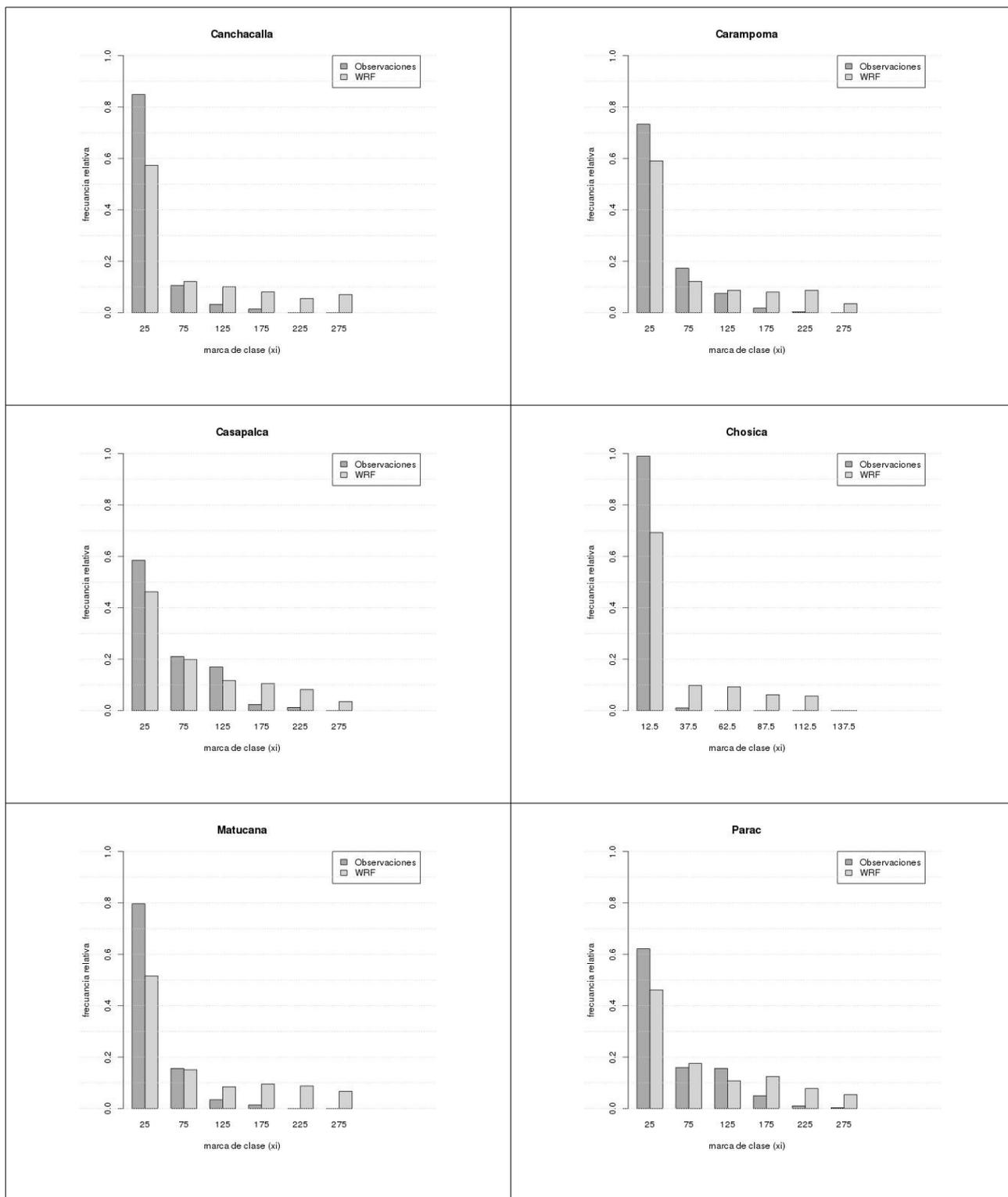


Ilustración 33. Distribuciones de frecuencia relativa porcentual de las ocurrencias de lluvia mensual acumulada observada y modelizada (WRF) en en las estaciones evaluadas del Rímac



Capítulo 8: Conclusiones y Perspectivas

8.1 Conclusiones

Esta primera etapa del proyecto de estudio ha contemplado la construcción y evaluación de los conjuntos de datos para inicializar el modelo hidrológico VIC en el dominio de la cuenca del río Rímac a una resolución de aproximadamente 5km por 5km.

Los datos de suelo, meteorológicos, y de vegetación han sido construidos sobre el dominio de la cuenca del río Rímac para forzar la modelización de los balances hidrológicos y balances de energía usando el modelo VIC.

La base de datos global de parámetros de suelo hidráulicos y térmicos para modelización del sistema terrestre del grupo de investigación de interacción suelo-atmósfera de la Universidad Normal de Beijing (Dai, Y., et al., 2013) [5] ha permitido disponer de información del suelo sobre la cuenca del río Rímac. Estos datos representan aceptablemente algunas propiedades del suelo y ha permitido construir el archivo de suelo del modelo VIC para la cuenca Rímac.

Las características de usos de suelo y cobertura de vegetación para la cuenca Rímac ha sido preparada usando la clasificación y usos de suelo global obtenidas a partir de los compuestos de las imágenes AVHRR generado por la Universidad de Maryland. Estos datos, aunque no corresponden a un periodo actual (1992, 1993), han sido usado como archivo de base de las características de vegetación a fin de calibrar inicialmente el modelo hidrológico.

Los datos meteorológicos regionalizados a partir de las simulaciones del modelo WRF han sido evaluados para algunos puntos de estación y han arrojado resultados aceptables para la utilización como forzante meteorológica del modelo hidrológico VIC, especialmente en un contexto de cambio climático donde se evaluaron aceptablemente los cambios en un periodo futuro (2016-2045) en relación a un periodo histórico (1981-2010). Esto permitirá generar la oportunidad de evaluar un escenario de cambios en los regímenes hidrológicos en la cuenca Rímac.

Con respecto a la forzante de precipitación, los acumulados mensuales de lluvia regionalizados con el WRF en las estaciones presentan estimaciones superiores a las observaciones, no obstante, esta sobre-estimación de la precipitación mensual podría ser ajustada estadísticamente a las observaciones usando una función filtro de ponderación asociada a la altitud. Este ajuste podría mejorar el exceso de producción de escorrentía durante la simulación hidrológica.

8.2 Perspectivas

La continuación del presente proyecto de estudio involucra la realización de las etapas de preparación del archivo de control global, ejecución del modelo VIC, *routing* del flujo superficial y la calibración y validación de las salidas hidrológicas con los datos observados. Se espera que las pruebas de evaluación permita conseguir resultados satisfactorios con el fin de implementar el modelo hidrológico en un ambiente operativo de trabajo.



Referencias

- [1] Goyal, Anupriya, (2013), Dynamic Downscaling for Future Climate Scenario and Hydrologic Simulation using WRF and VIC models, Water Resources Dep., Indian Space Research Organization (ISRO), Andhra University, 120 (Tesis)
- [2] Skamarock W., Klemp J., Dhudia J. et. al., (2008) , A Description of the Advanced Research WRF Version 3, , ,
- [3] Wang W., Bruyere C. Duda M., et.al., (2015), Weather Research & Forecasting, ARW Version 3 Modeling System User's Guide January 2015, , ,
- [4] Mendez, W., (2005), Contamination of Rimac River Basin Peru, Due to Mining Tailings, Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), , 81 (Tesis)
- [5] Dai, Y., W. Shangguan, Q. Duan, B. Liu, S. Fu, G. Niu, (2013), Development of a China Dataset of Soil Hydraulic Parameters Using Pedotransfer Functions for Land Surface Modeling, Journal of Hydrometeorology, , 14
- [6] Campbell, Gaylon S. , (1985) , Soil physics with Basic-Transport Models for Soil-Plant Systems, , , ELSEVIER
- [7] Lavado, W.; Fernandez, C.; Vega, F.; Caycho, T.; Endara, S.; Huerta, A. y Obando O., (2015), PISCO: Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations. Precipitación v1.0. , Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
