

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**“APLICACIÓN DEL MODELO MESOESCALAR WRF
(WEATHER RESEARCH FORECAST MODEL) EN LA
MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL
RÍO SUCIO”**

PRESENTADO POR:

ELSY NOHEMY BARRAZA GALLEGOS

LAURA JEAMILETH CHOTO DURAN

JACQUELINE ARONET CORTEZ ALVAREZ

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**“APLICACIÓN DEL MODELO MESOESCALAR WRF
(WEATHER RESEARCH FORECAST MODEL) EN LA
MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL
RÍO SUCIO”**

Presentado por :

ELSY NOHEMY BARRAZA GALLEGOS

LAURA JEAMILETH CHOTO DURAN

JACQUELINE ARONET CORTEZ ALVAREZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS

ING. JOAQUIN MARIANO SERRANO CHOTO

ING. ROBERTO ADOLFO CERÓN PINEDA

San Salvador, Febrero 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS

ING. JOAQUIN MARIANO SERRANO CHOTO

ING. ROBERTO ADOLFO CERÓN PINEDA

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso y la Virgen María, que nos han guiado durante todo este largo camino dándonos las fuerzas para luchar por nuestros sueños y llegar a la etapa de culminación de nuestra carrera universitaria.

Agradecimiento especial a nuestros asesores, Ing. Edwin Santiago Escobar, Ing. José Roberto Cerón e Ing. Joaquín Serrano Choto, por su entrega y dedicación, por guiarnos y darnos las herramientas necesarias durante todo el proceso del proyecto de Tesis.

A la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), por proporcionarnos la información requerida para ejecutar nuestro trabajo de graduación, en especial al Ing. Juan José Amides Figueroa, Inga. Jacqueline Rivera e Inga. Laura Gil, por colaborar desinteresadamente en cada una de las etapas de nuestra tesis.

A todos los docentes que formaron parte de nuestra formación académica, por brindarnos todos los conocimientos, por su dedicación, por darnos las herramientas que necesitamos para crecer profesionalmente y llegar hasta este punto de nuestras vidas.

DEDICATORIA

A Dios, el ser supremo que siempre ha estado de mi lado, dándome las fuerzas para nunca desistir por mi sueño tan anhelado, porque sin Él no fuese posible llegar hasta donde ahora estoy, porque ha sido mi luz en los momentos de oscuridad y mi fortaleza en mis momentos de debilidad.

A María Santísima, porque siempre me cuidó, me cubrió con su manto y me mantuvo firme en mis metas.

A mis padres, Carlos Barraza y Teresa Gallegos, porque siempre me apoyaron en todos los sentidos, impulsándome a seguir adelante y dándome las fuerzas para luchar y superar las pruebas en el camino, por confiar en mí, ya que sin ellos, seguramente el camino hubiese sido más difícil.

A mis hermanos, Dinorah, Anibal, Nelly, Luis, Jaime y Cristy, por apoyarme de una u otra manera, en principal a mi hermana compinche Cris, que hemos compartido tanto juntas, y ha estado conmigo en las buenas y en las malas, por su apoyo incondicional.

A mis compañeras de Tesis, Laura y Jacqueline, porque hemos superado juntas esta prueba, y nos hemos apoyado hasta el final, compartiendo ese sentimiento de “Si lo logramos”, cultivando y fortaleciendo más la amistad.

A todas las personas que me han apoyado y brindado su amistad sincera, que han estado en las diferentes etapas de la carrera, infinitas gracias.

Elsy Nohemy Barraza Gallegos.

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios Todopoderoso, por haberme guiado y permitido llegar hasta este punto de mi vida, dándome salud para llegar a cumplir este tan anhelado sueño.

A la memoria de mi padre, Rafael Alberto García Choto, por haber motivado a estudiar esta carrera, y apoyado en todo lo que pudo.

A mi madre, Marina Elizabeth Durán, por haberme apoyado en todo lo que estuvo a su alcance, ya que sin su esfuerzo esto no sería posible, gracias por sus consejos, la confianza depositada en mí, y principalmente por su amor.

A mi hermano Rafael Alberto García Duran, por su apoyo a lo largo de la carrera.

A mi abuela Dolores de Choto, mi tía Rhina de Paz, a mi primo Steven Paz que estuvieron acompañándome a lo largo de la carrera.

A mis compañeras de Tesis, Nohemy Barraza y Jacqueline Cortez, por su esfuerzo y dedicación en este último paso para poder hacer realidad nuestro sueño.

Y finalmente a todas esas personas que me apoyaron y colaboraron, directa o indirectamente en el transcurso de toda mi carrera, muchas gracias.

Laura Jeamileth Choto Durán.

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso, por haberme permitido alcanzar este triunfo, por haberme iluminado y dado fortaleza aun en aquellos momentos difíciles de mi carrera. A la Virgen María por haberme protegido en este camino.

A mis padres, Elmer Antonio Cortez y Evelyn Alvarez de Cortez, principalmente por su amor y su confianza depositada en mí, y por todos los sacrificios que hicieron para que hoy día yo culmine mi carrera, por todo el esfuerzo que cada uno hizo y por todo el amor con el que me impulsaron a seguir adelante.

A mi hermana, Tania Julissa Cortez Alvarez, por su apoyo incondicional a lo largo de este camino.

A mis abuelas, Eva Alvarez y Rosalinda García, porque ellas creyeron en mí y en mis capacidades, y por ese gran ejemplo de fortaleza y ganas de salir adelante que ellas me dieron.

A mi familia, a mis tías, tíos y primos que me apoyaron y que con su apoyo me impulsaban a seguir adelante.

A mis compañeras de Tesis, Nohemy Barraza y Laura Choto, por todo el empeño que tuvieron en esta última etapa de nuestra carrera, por todos los buenos momentos que también pasamos y porque de cada una de ella aprendí mucho.

A mis amistades, que indiscutiblemente pasamos los mejores y los peores momentos durante toda la carrera.

Y finalmente a todas esas personas que de forma directa o indirectamente, colaboraron en el transcurso de toda mi carrera, muchas gracias.

Jacqueline Aronet Cortez Alvarez.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	XXVII
--------------	-------

CAPITULO I GENERALIDADES

1.1	INTRODUCCIÓN	2
1.2	ANTECEDENTES	5
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.4	OBJETIVOS.....	10
	1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	10
	1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.5	ALCANCES.....	11
1.6	LIMITACIONES.....	12
1.7	JUSTIFICACIÓN.....	13

CAPITULO II TEORÍA DE MODELOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS Y SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

2.1	INTRODUCCIÓN	16
2.2	TEORÍA DEL MODELO METEOROLÓGICO.....	18
	2.2.1 INTRODUCCIÓN.....	18
	2.2.2 DESCRIPCIÓN FÍSICA	18
	2.2.3 FUNDAMENTOS E HISTORIA DE LA PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO.....	19
	2.2.4 PRINCIPIOS GENERALES DE LOS MODELOS NUMÉRICOS DE PREDICCIÓN DEL TIEMPO.....	23
	2.2.5 TIPOS DE MODELOS NUMÉRICOS	39
2.3	TEORÍA DEL MODELO HIDROLÓGICO	50
	2.3.1 INTRODUCCIÓN.....	50
	2.3.2 DESCRIPCIÓN FÍSICA	50
	2.3.3 HISTORIA Y FUNDAMENTOS DEL MODELAJE HIDROLÓGICO	51
	2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	56

2.3.5	ETAPAS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	62
2.3.6	METODOS DE CÁLCULO.....	64
2.3.7	DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS MODELOS COMPUTACIONALES HIDROLÓGICOS.....	68
2.4	SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA.....	74
2.4.1	INTRODUCCIÓN.....	74
2.4.2	DEFINICION.....	74
2.4.3	LINEAMIENTOS GENERALES	74
2.4.4	COMPONENTES DE UN SAT.....	76
2.4.5	EVENTOS ATMOSFERICOS QUE AFECTAN A EL SALVADOR	85
2.4.6	SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES (SNET).....	88
2.4.7	RED HIDROMETEOROLÓGICA DEL MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES DE EL SALVADOR (MARN) .	97
2.4.8	EL PAPEL DE LA RED DE MONITOREO LOCAL.....	98
2.4.9	EL PAPEL DE LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN.....	101
2.4.10	EL PAPEL DE LA ASISTENCIA INTERNACIONAL Y LOS ORGANISMOS REGIONALES.....	102
2.4.11	FINANCIAMIENTO Y SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS.....	104
2.4.12	DESCRIPCIÓN DE LAS AMENAZAS EN EL DEPARTAMENTO DE LA LIBERTA.....	106
2.5	RELACIÓN ENTRE LOS SOFTWARE GFS, WRF Y HEC-HMS PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SUCIO COMO PREÁMBULO PARA UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE LA CUENCA	109
2.5.1	INTRODUCCIÓN.....	109
2.5.2	MODELO GLOBAL GFS	111
2.5.3	MODELO METEOROLOGICO MESOESCALAR WRF	112
2.5.4	PROGRAMA DE CONVERSIÓN ARCGIS	113
2.5.5	MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS	114
2.5.6	SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA LA CUENCA DEL RIO SUCIO	115

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACIÓN

SELECCIONADOS Y ANALISIS DE LOS DATOS REGISTRADOS

3.1	INTRODUCCIÓN	118
3.2	LA PRECIPITACIÓN.....	119
3.2.1	GENERALIDADES	119
3.2.2	VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN	119
3.2.3	CLASIFICACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	120
3.3	EVENTOS DE PRECIPITACION SELECCIONADOS	122
3.3.1	GENERALIDADES	122
3.3.2	EVENTO DE LLUVIA CONVECTIVA: 17 DE OCTUBRE DE 2015.....	123
3.3.3	EVENTO PROLONGADO: DEPRESIÓN TROPICAL 12-E	125
3.4	DATOS DE LLUVIA PROVENIENTES DE ESTACIONES TELEMETRICAS Y AUTOMATICAS DE LA DGOA	143
3.4.1	GENERALIDADES	143
3.4.2	ESTACIONES PLUVIOMETRICAS SELECCIONADAS Y ACUMULADO DE LLUVIA PARA EVENTO CONVECTIVO	143
3.4.3	ESTACIONES PLUVIOMETRICAS SELECCIONADAS Y ACUMULADO DE LLUVIA PARA LA DEPRESIÓN TROPICAL 12-E ...	148
3.5	DETERMINACIÓN DE LA LLUVIA MEDIA OBSERVADA.....	172
3.5.1	GENERALIDADES	172
3.5.2	INTERPOLACIÓN DE DATOS DE LLUVIA	172
3.5.3	PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA LLUVIA MEDIA REGISTRADA EN ARCGIS	175
3.5.4	MAPAS DE PRECIPITACION ACUMULADA A 24 HORAS.....	185

CAPITULO IV

APLICACIÓN DEL MODELO MESOESCALAR WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST MODEL) EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

4.1	INTRODUCCIÓN	198
4.2	WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL (WRF).....	199

4.2.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO WRF	199
4.2.2	COMPONENTES DEL MODELO WRF	200
4.3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO WRF.....	210
4.3.1	INSTALACIÓN DEL SOFTWARE.....	210
4.3.2	REQUERIMIENTOS DEL SOFTWARE	211
4.3.3	DESCARGA DE DATOS GLOBALES	211
4.3.4	PARAMETRIZACIONES UTILIZADAS	212
4.3.5	ETAPA DE PREPROCESAMIENTO	212
4.3.6	ETAPA DE PROCESAMIENTO.....	214
4.3.7	ETAPA DE POST PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN.....	214

CAPITULO V

VERIFICACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO WRF

5.1	INTRODUCCIÓN.....	236
5.2	VERIFICACIÓN DE PRONOSTICOS Y TABLAS DE CONTINGENCIA.....	237
5.2.1	GENERALIDADES.....	237
5.2.2	PROPÓSITOS DE LA VERIFICACIÓN	237
5.2.3	COMPARACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN	238
5.2.4	ATRIBUTOS DEL DESEMPEÑO DE UN PRONÓSTICO	239
5.3	ANÁLISIS DE LOS VALORES DE LLUVIA MEDIA OBSERVADOS Y PRONOSTICADOS	244
5.4	COMPARACIÓN DE DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA LLUVIA PRONOSTICADA Y LLUVIA REGISTRADA.....	298
5.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	311

CAPITULO VI

PRONOSTICO HIDROLOGICO

6.1	INTRODUCCIÓN.....	316
6.2	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO HEC- HMS.....	317
6.3	COMPONENTES DE UN PROYECTO EN HEC-HMS.....	318
6.3.1	MODELO DE CUENCA	318
6.3.2	MODELO METEOROLÓGICO	324

6.3.3	ESPECIFICACIONES DE CONTROL	326
6.3.4	DATOS SERIES DE TIEMPO.....	326
6.4	SIMULACIÓN.....	327
6.5	DISEÑO DEL PROGRAMA.....	328
6.5.1	INTERFAZ DE USUARIO.....	328
6.6	MODELACION HIDROLOGICA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO CON HEC-HMS.....	332
6.6.1	MODELO DE CUENCA	334
6.6.2	MODELO METEOROLÓGICO.....	345
6.6.3	ESPECIFICACIONES DE CONTROL	348
6.6.4	DATOS SERIES DE TIEMPO.....	349
6.6.5	SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	350

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	CONCLUSIONES	371
7.2	RECOMENDACIONES	375
	BIBLIOGRAFÍA.....	376

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II TEORÍA DE MODELOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS Y SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Figura 2. 1: Representación de una base de elementos finitos en un dominio de una dimensión.....	29
Figura 2. 2: Rejilla de integración del modelo Arpege	31
Figura 2. 3: Escala de rejilla.....	33
Figura 2. 4: Rejilla a Escala mundial.....	34
Figura 2. 5: Distribución espacial de observaciones un día cualquiera sobre el área de integración del modelo operativo del INM.....	37
Figura 2. 6: Tipos de observaciones meteorológicas	38
Figura 2. 7: Países miembros del centro europeo de predicción a plazo medio.....	41
Figura 2. 8: Mapa global del ozono total generado por GFS.....	43
Figura 2.9: Representación gráfica de un modelo regional anidado en un modelo global	44
Figura 2. 10: Área de integración del modelo Hirlam del INM	45
Figura 2. 11: Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo con la forma, la aleatoriedad y la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.....	57
Figura 2. 12: MODELO DETERMINÍSTICO.....	58
Figura 2. 13: MODELO ESTOCÁSTICO.....	59
Figura 2.14: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. a) Modelo agregado. b) Modelo Semidistribuido. c) Modelo Distribuido.....	60
Figura 2. 15: Monitoreo de posibles eventos.....	77
Figura 2. 16: Monitoreo de posibles eventos.....	77
Figura 2. 17: Difusión de la amenaza.....	80
Figura 2. 18: Flujo de las comunicaciones	81
Figura 2. 19: Equipos básicos para los SAT	81

Figura 2. 20: Centro de operadores de emergencia.....	82
Figura 2. 21: Señalización para rutas de evacuación.....	84
Figura 2. 22: Simulacros.....	84
Figura 2. 23: Ubicación de los SATs de inundaciones en El Salvador	91
Figura 2. 24: Estaciones de monitoreo de vigilancia hidrológica	93
Figura 2. 25: Tipos de pronóstico hidrológico.....	96
Figura 2. 26: Los Medios de Comunicación para llegar a la población.....	102
Figura 2. 27: Utilizando la internet para conocer información meteorológica.....	103
Figura 2. 28: Riesgos del Departamento de La Libertad	107
Figura 2. 29: Diagrama de relación entre los software WRF, ArcGIS y HEC-HMS para la modelación hidrológica de la cuenca del Río Sucio como preámbulo para un Sistema de Alerta Temprana de la cuenca.	116

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACIÓN SELECCIONADOS Y ANALISIS DE LOS DATOS REGISTRADOS

Figura 3.1: Precipitación Frontal (Ciclónicas).....	121
Figura 3. 2: Precipitación Convectiva.....	121
Figura 3. 3: Precipitación Orográfica.....	122
Figura 3.4: Mapa de Precipitación Acumulada en 24 Horas, registrado por las estaciones telemétricas de la DGOA, para el día 17 de octubre de 2015, desde las 7 am hasta las 7 am del 18 de octubre de 2015.	124
Figura 3. 5: Imagen satelital de la DT 12E al 12OCT2011.	126
Figura 3.6: Mapa de distribución espacial de las precipitaciones ocasionadas por la DT 12E.	128
Figura 3.7: Comparativo histórico de lluvias acumuladas y máximas en 24 horas en eventos meteorológicos desde 1969 hasta 2011.	130
Figura 3.8: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 09 de octubre y las 07:00 horas del 10 de octubre de 2011.....	132

Figura 3. 9: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 10 de octubre y las 07:00 horas del 11 de octubre de 2011.....	133
Figura 3. 10: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 11 de octubre y las 07:00 horas del 12 de octubre de 2011.....	134
Figura 3. 11: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 12 de octubre y las 07:00 horas del 13 de octubre de 2011.....	135
Figura 3. 12: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 13 de octubre y las 07:00 horas del 14 de octubre de 2011.....	136
Figura 3. 13: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 14 de octubre y las 07:00 horas del 15 de octubre de 2011.....	137
Figura 3. 14: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 15 de octubre y las 07:00 horas del 16 de octubre de 2011.....	138
Figura 3. 15: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 16 de octubre y las 07:00 horas del 17 de octubre de 2011.....	139
Figura 3. 16: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 17 de octubre y las 07:00 horas del 18 de octubre de 2011.....	140
Figura 3. 17: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 18 de octubre y las 07:00 horas del 19 de octubre de 2011.....	141
Figura 3. 18: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 19 de octubre y las 07:00 horas del 20 de octubre de 2011.....	142
Figura 3. 19: Ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas por su incidencia en la cuenca del Río Sucio.	144

Figura 3. 20: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, para el evento del 17 de Octubre del 2015.	147
Figura 3. 21: Ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas por su incidencia en la cuenca del Río Sucio.	148
Figura 3. 22: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 10 de octubre de 2011.....	151
Figura 3. 23: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 11 de octubre de 2011.....	153
Figura 3. 24: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 12 de octubre de 2011.....	155
Figura 3. 25: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 13 de octubre de 2011.....	157
Figura 3. 26: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 14 de octubre de 2011.....	159
Figura 3. 27: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 15 de octubre de 2011.....	161
Figura 3. 28: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 16 de octubre de 2011.....	163
Figura 3. 29: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 17 de octubre de 2011.....	165
Figura 3. 30: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 18 de octubre de 2011.....	167

Figura 3. 31: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 19 de octubre de 2011.....	169
Figura 3. 32: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 20 de octubre de 2011.....	171
Figura 3. 33: Cuadro de selección y relleno de valores para generar archivo GRD.	174
Figura 3. 34: Isoyetas generadas para el evento del 17 de octubre de 2015, en el intervalo de 0-3 horas.	175
Figura 3. 35: Mapa de color para rásteres de banda única	176
Figura 3. 36: Mapa de El Salvador junto a la ubicación de la Cuenca del Río Sucio en el espacio de trabajo de ArcMap.....	177
Figura 3. 37: Ráster para el periodo de 0- 3 horas del evento del 17 de octubre de 2015.	178
Figura 3. 38: Ráster para el periodo de 0- 3 horas del evento del 17 de octubre de 2015.	178
Figura 3. 39: Ventana de propiedades de capa	179
Figura 3. 40: Ventana de selección de valores para obtener la lluvia media.	180
Figura 3. 41: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 17/10/15	185
Figura 3. 42: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 10/10/11	186
Figura 3. 43: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 11/10/11	187
Figura 3. 44: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 12/10/11	188
Figura 3. 45: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 13/10/11	189
Figura 3. 46: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 14/10/11	190

Figura 3. 47: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 15/10/11	191
Figura 3. 48: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 16/10/11	192
Figura 3. 49: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 17/10/11	193
Figura 3. 50: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 18/10/11	194
Figura 3. 51: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 19/10/11	195
Figura 3. 52: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 20/10/11	196

CAPITULO IV

MODELO DE PRONÓSTICO METEOROLÓGICO WRF

Figura 4. 1: COMPONENTES DEL MODELO WRF (V3)	201
Figura 4. 2: Flujo de datos entre los programas del WPS	202
Figura 4. 3: Caso de modelación real	205
Figura 4. 4: Caso de modelación ideal.....	205
Figura 4. 5: Dominio limitado para El Salvador	213
Figura 4. 6: Dominio para Centro América y El Caribe.....	213
Figura 4. 7: Diagrama de flujo entre el preprocesamiento y el procesamiento	214
Figura 4. 8: Cuadro de dialogo para crear una capa raster a partir de un archivo netCDF.....	216
Figura 4. 9: Capa raster	216
Figura 4. 10: Shape de la cuenca	217
Figura 4. 11: Calculadora raster.....	217
Figura 4. 12: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el 17/10/15.....	223
Figura 4. 13: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 10/10/11.....	224
Figura 4. 14: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 11/10/11.....	225

Figura 4. 15: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 12/10/11.....	226
Figura 4. 16: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 13/10/11.....	227
Figura 4. 17: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 14/10/11.....	228
Figura 4. 18: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 15/10/11.....	229
Figura 4. 19: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 16/10/11.....	230
Figura 4. 20: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 17/10/11.....	231
Figura 4. 21: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 18/10/11.....	232
Figura 4. 22: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 19/10/11.....	233
Figura 4. 23: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 20/10/11.....	234

CAPITULO V

VERIFICACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO WRF

Figura 5. 1: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 17 de octubre de 2015	246
Figura 5. 2: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 17 de octubre de 2015	246
Figura 5. 3: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 17/10/15.....	247
Figura 5. 4: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 17/10/15	247
Figura 5. 5: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 17/10/15.....	248
Figura 5. 6: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 10 de octubre de 2011,DT 12-E	250
Figura 5. 7: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 10 de octubre de 2011, DT 12-E	250
Figura 5. 8: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 10/10/11, DT 12-E.....	251
Figura 5. 9: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 10/10/11, DT 12-E	251

Figura 5. 10: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 10/10/11, DT 12-E.....	252
Figura 5. 11: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 11 de octubre de 2011, DT 12-E	254
Figura 5. 12: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 11 de octubre de 2011, DT 12-E	254
Figura 5. 13: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 11/10/11, DT 12-E.....	255
Figura 5. 14: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 11/10/11, DT 12-E	255
Figura 5. 15: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 11/10/11, DT 12-E.....	256
Figura 5. 16: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 12 de octubre de 2011, DT 12-E	258
Figura 5. 17: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 12 de octubre de 2011, DT 12-E	258
Figura 5. 18: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 12/10/11, DT 12-E.....	259
Figura 5. 19: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 12/10/11, DT 12-E	259
Figura 5. 20: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 12/10/11, DT 12-E.....	260
Figura 5. 21: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 13 de octubre de 2011, DT 12-E	262
Figura 5. 22: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 13 de octubre de 2011, DT 12-E	262
Figura 5. 23: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 13/10/11, DT 12-E.....	263
Figura 5. 24: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 13/10/11, DT 12-E	263
Figura 5. 25: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 13/10/11, DT 12-E.....	264

Figura 5. 26: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 14 de octubre de 2011 , DT 12-E.....	266
Figura 5. 27: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 14 de octubre de 2011, DT 12-E	266
Figura 5. 28: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 14/10/11, DT 12-E.....	267
Figura 5. 29: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 14/10/11, DT 12-E	267
Figura 5. 30: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 14/10/11, DT 12-E.....	268
Figura 5. 31: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 15 de octubre de 2011, DT 12-E.....	270
Figura 5. 32: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 15 de octubre de 2011, DT 12-E	270
Figura 5. 33: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 15/10/11, DT 12-E.....	271
Figura 5. 34: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 15/10/11, DT 12-E	271
Figura 5. 35: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 15/10/11, DT 12-E.....	272
Figura 5. 36: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 16 de octubre de 2011, DT 12-E	274
Figura 5. 37: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 16 de octubre de 2011, DT 12-E	274
Figura 5. 38: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 16/10/11, DT 12-E.....	275
Figura 5. 39: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 16/10/11, DT 12-E	275
Figura 5. 40: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 16/10/11, DT 12-E.....	276
Figura 5. 41: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 17 de octubre de 2011, DT 12-E	278

Figura 5. 42: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 17 de octubre de 2011, DT 12-E	278
Figura 5. 43: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 17/10/11, DT 12-E.....	279
Figura 5. 44: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 17/10/11, DT 12-E	279
Figura 5. 45: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 17/10/11, DT 12-E.....	280
Figura 5. 46: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 18 de octubre de 2011, DT 12-E	282
Figura 5. 47: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 18 de octubre de 2011, DT 12-E	282
Figura 5. 48: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 18/10/11, DT 12-E.....	283
Figura 5. 49: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 18/10/11, DT 12-E	283
Figura 5. 50: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 18/10/11, DT 12-E.....	284
Figura 5. 51: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 19 de octubre de 2011, DT 12-E	286
Figura 5. 52: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 19 de octubre de 2011, DT 12-E	286
Figura 5. 53: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 19/10/11, DT 12-E.....	287
Figura 5. 54: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 19/10/11, DT 12-E	287
Figura 5. 55: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 19/10/11, DT 12-E.....	288
Figura 5. 56: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 20 de octubre de 2011, DT 12-E	290
Figura 5. 57: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 20 de octubre de 2011, DT 12-E	290

Figura 5. 58: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 20/10/11, DT 12-E.....	291
Figura 5. 59: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 20/10/11, DT 12-E	291
Figura 5. 60: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 20/10/11, DT 12-E.....	292
Figura 5. 61: Gráfico de dispersión correspondiente a todos los datos del evento de la DT 12-E	293
Figura 5. 62: Hietograma de la DT 12-E, por cada periodo, para todo el evento	294
Figura 5. 63: Gráfico del acumulado por cada día de la DT 12-E, para todo el evento	295
Figura 5. 64: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 17/10/15	299
Figura 5. 65: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 10/10/11	300
Figura 5. 66: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 11/10/11	301
Figura 5. 67: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 12/10/11	302
Figura 5. 68: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 13/10/11	303
Figura 5. 69: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 14/10/11	304
Figura 5. 70: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 15/10/11	305
Figura 5. 71: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 16/10/11	306
Figura 5. 72: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 17/10/11	307
Figura 5. 73: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 18/10/11	308

Figura 5. 74: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 19/10/11	309
Figura 5. 75: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 20/10/11	310

CAPITULO VI PRONOSTICO HIDROLOGICO

Figura 6. 1: Componentes de un proyecto en HEC.....	318
Figura 6. 2: Modelos de cuenca (Basin Models)	320
Figura 6. 3: Esquema de las fases de HEC-HMS	323
Figura 6. 4: Especificaciones de control.....	326
Figura 6. 5 : Simulation run.....	327
Figura 6. 6: Interfaz de usuario	328
Figura 6. 7: Explorador de cuencas	330
Figura 6. 8: Editor de componentes	330
Figura 6. 9: Registro de mensajes	331
Figura 6. 10: Mapa de modelo de la cuenca	332
Figura 6. 11: Subcuencas de la cuenca del Rio Sucio	333
Figura 6. 12: Modelo de cuenca.....	334
Figura 6. 13: Esquema del método de Muskingum	343
Figura 6. 14: Modelo meteorologico de los eventos pronosticados	345
Figura 6. 15: Modelo meteorologico de los eventos observados.....	348
Figura 6. 16: Especificaciones de control para el evento DT 12E	348
Figura 6. 17: Especificaciones de control para el evento 17 DE OCTUBRE DE 2015	349
Figura 6. 18: Resultado sumatoria global DT 12E.....	352
Figura 6. 19: Resultado sumatoria global DT 12E(OBSERVADO)	353
Figura 6. 20: Resultado sumatoria global 17 de octubre de 2015	354
Figura 6. 21: Resultado sumatoria global 17 de octubre de 2015 (Observado).....	355

Figura 6. 22: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 10 de Octubre de 2011	356
Figura 6. 23: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 11 de Octubre de 2011	357
Figura 6. 24: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 12 de Octubre de 2011	358
Figura 6. 25: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 13 de Octubre de 2011	359
Figura 6. 26: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 14 de Octubre de 2011	360
Figura 6. 27: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 15 de Octubre de 2011	361
Figura 6. 28: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 16 de Octubre de 2011	362
Figura 6. 29: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 17 de Octubre de 2011	363
Figura 6. 30: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 18 de Octubre de 2011	364
Figura 6. 31: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 19 de Octubre de 2011	365

Figura 6. 32: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 20 de Octubre de 2011	366
Figura 6. 33: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 21 de Octubre de 2011	367
Figura 6. 34: Comparacion del resultado grafico de la simulacion del evento DT 12E pronosticado y observado.....	368
Figura 6. 35: Comparacion del resultado grafico de la simulacion del evento 17 de octubre de 2015 (Observado y Pronosticado).....	369

INDICE DE ECUACIONES

CAPITULO II TEORÍA DE MODELOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS Y SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Ecuación 2. 1: vector velocidad del viento	24
Ecuación 2. 2: vector velocidad del viento incluida la fuerza de coriolis	25
Ecuación 2. 3: ecuación del balance energético	25
Ecuación 2. 4: ecuación del balance energético	25
Ecuación 2. 5: ecuación del movimiento reducida.....	26
Ecuación 2. 6: ecuación de continuidad.....	26
Ecuación 2. 7: Método racional.....	51
Ecuación 2. 8: ecuación de transformación del sistema.....	54
Ecuación 2. 9: operador algebraico de transformación del sistema	54
Ecuación 2. 10: función de transferencia igual a la constante.....	54
Ecuación 2. 11: ecuación para un embalse lineal	55
Ecuación 2. 12: tasa de cambio del almacenamiento con respecto al tiempo	55
Ecuación 2. 13: simplificación	55
Ecuación 2. 14: ecuación del modelo.....	55

CAPITULO V VERIFICACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO WRF

Ecuación 5. 1: Desviación Estándar.....	240
Ecuación 5. 2: Coeficiente de Correlación de Pearson	241
Ecuación 5. 3: Mean Error	242
Ecuación 5. 4: Mean Absolute Error.....	243
Ecuación 5. 5: Mean Squared Error	244
Ecuación 5. 6: Raíz cuadrada del MSE.....	244

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II TEORÍA DE MODELOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS Y SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Tabla 2. 1: Evolución simplificada de los modelos numéricos de predicción del tiempo	22
Tabla 2. 2: Cuadro comparativo de los modelos meteorológicos	48
Tabla 2. 3: Comparación de modelos hidrológicos.....	71
Tabla 2. 4: Sistemas de Alerta Temprana para Inundaciones en El Salvador	90
Tabla 2. 5: Red Nacional de Monitoreo Hidrológicos.	97
Tabla 2. 6: Amenazas de los municipios de La Libertad	106
Tabla 2. 7 Sistemas de alerta temprana de La Libertad.....	108

CAPITULO III DESCRIPCIÓN DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACIÓN SELECCIONADOS Y ANALISIS DE LOS DATOS REGISTRADOS

Tabla 3.1: Eventos Hidrometeorológicos Extremos que Impactaron a El Salvador desde la década de los 60's ordenados según máximos acumulados.....	131
Tabla 3. 2: Estaciones pluviométricas con sus coordenadas.	145
Tabla 3. 3: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el evento del 17 de octubre de 2015.	146
Tabla 3. 4: Estaciones pluviométricas con sus coordenadas.	149
Tabla 3. 5: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 10 de octubre de 2011.....	150
Tabla 3. 6: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 11 de octubre de 2011.....	152
Tabla 3. 7: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 12 de octubre de 2011.....	154
Tabla 3. 8: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 13 de octubre de 2011.....	156

Tabla 3. 9: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 14 de octubre de 2011.....	158
Tabla 3. 10: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 15 de octubre de 2011.....	160
Tabla 3. 11: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 16 de octubre de 2011.....	162
Tabla 3. 12: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 17 de octubre de 2011.....	164
Tabla 3. 13: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 18 de octubre de 2011.....	166
Tabla 3. 14: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 19 de octubre de 2011.....	168
Tabla 3. 15: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 20 de octubre de 2011.....	170
Tabla 3. 16: Lluvia media generada en ArcGIS para el evento del 17 de octubre de 2015.....	181
Tabla 3. 17: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 10 de octubre de 2011.....	181
Tabla 3. 18: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 11 de octubre de 2011.....	181
Tabla 3. 19: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 12 de octubre de 2011.....	182
Tabla 3. 20: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 13 de octubre de 2011.....	182
Tabla 3. 21: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 14 de octubre de 2011.....	182
Tabla 3. 22: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 15 de octubre de 2011.....	183
Tabla 3. 23: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 16 de octubre de 2011.....	183
Tabla 3. 24: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 17 de octubre de 2011.....	183

Tabla 3. 25: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 18 de octubre de 2011	184
Tabla 3. 26: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 19 de octubre de 2011	184
Tabla 3. 27: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 20 de octubre de 2011	184

CAPITULO IV

MODELO DE PRONÓSTICO METEOROLÓGICO WRF

Tabla 4. 1: Variables de salida de WRF.....	207
Tabla 4. 2: Lluvia media en intervalos de 3 horas para el evento 17 de Octubre del 2015	218
Tabla 4. 3: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 10 de Octubre del 2011	219
Tabla 4. 4: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 11 de Octubre del 2011	219
Tabla 4. 5: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 12 de Octubre del 2011	219
Tabla 4. 6: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 13 de Octubre del 2011	220
Tabla 4. 7: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 14 de Octubre del 2011	220
Tabla 4. 8: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 15 de Octubre del 2011	220
Tabla 4. 9: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 16 de Octubre del 2011	221
Tabla 4. 10: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 17 de Octubre del 2011	221
Tabla 4. 11: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 18 de Octubre del 2011	221

Tabla 4. 12: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 19 de Octubre del 2011	222
Tabla 4. 13: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 20 de Octubre del 2011	222

CAPITULO V

VERIFICACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO WRF

Tabla 5. 1: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 17/10/15	245
Tabla 5. 2: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 10/10/11 de la DT 12-E	249
Tabla 5. 3: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 11/10/11 de la DT 12-E	253
Tabla 5. 4: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 12/10/11 de la DT 12-E	257
Tabla 5. 5: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 13/10/11 de la DT 12-E	261
Tabla 5. 6: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 14/10/11 de la DT 12-E	265

Tabla 5. 7: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 15/10/11 de la DT 12-E	269
Tabla 5. 8: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 16/10/11 de la DT 12-.....	273
Tabla 5. 9: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 17/10/11 de la DT 12-E	277
Tabla 5. 10: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 18/10/11 de la DT 12-E	281
Tabla 5. 11: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 19/10/11 de la DT 12-E	285
Tabla 5. 12: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 20/10/11 de la DT 12-E	289
Tabla 5. 13: Resultados obtenidos para los 12 casos de evaluación	296
Tabla 5. 14: Resultados obtenidos para los 12 casos de evaluación	297

CAPITULO VI

PRONOSTICO HIDROLOGICO

Tabla 6. 1: Elementos hidrológicos y procesos asociados.	321
Tabla 6. 2: Descripción de los métodos del modelo meteorológico	325

Tabla 6. 3: Características de las subcuencas del río sucio	333
Tabla 6. 4: Condiciones de humedad precedente	335
Tabla 6. 5: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento DT 12E estación procafe	336
Tabla 6. 6: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento DT 12E estación boquerón	337
Tabla 6. 7: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento DT 12E estación picacho	337
Tabla 6. 8: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento 17 de octubre de 2015 estación procafe	338
Tabla 6. 9: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento 17 de octubre de 2015 estación boquerón	338
Tabla 6. 10: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento 17 de octubre de 2015 estación picacho	338
Tabla 6. 11: Numero de curva para ((condición (III))	339
Tabla 6. 12: Afors del río sucio, estación joya de ceren	341
Tabla 6. 13: Afors del río sucio, estación los dos cerros	342
Tabla 6. 14: Parametros de Muskingum para la simulación en HEC-HMS	345
Tabla 6. 15: Porcentaje de influencia de cada pluviómetro en cada subcuenca evento DT 12E	346
Tabla 6. 16: Porcentaje de influencia de cada pluviómetro en cada subcuenca evento 17 de octubre de 2015 y el evento extenso de la depresión tropical DT 12E	347

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se realiza un análisis meteorológico e hidrológico aplicado a la cuenca del río Sucio, al igual que define las variables que se necesitan para poder llevar a cabo tales análisis, con la finalidad, de que los resultados, a través de una buena gestión, puedan ser empleados para desarrollar un Sistema de Alerta Temprana

En el primer capítulo, se describe el comportamiento del territorio nacional ante eventos meteorológicos extremos (precipitación), haciendo énfasis en la necesidad de implementar sistemas de predicción numéricos. Se plantea la problemática, se establecen los objetivos (General y Específicos), así como la justificación, los alcances y los límites de la investigación. El segundo capítulo describe la parte teórica de los modelos meteorológicos, hidrológicos y Sistemas de alerta temprana, así como también la relación que tiene cada modelo computacional utilizado. El tercer capítulo se describen los eventos meteorológicos que van a ser analizados, de igual manera se describe cómo deben ser tratados los datos observados. El capítulo cuatro, trata sobre que es el modelo meso escalar WRF, y como este trata los datos para poder obtener una predicción meteorológica. El capítulo cinco, trata sobre el análisis estadístico que se puede aplicar al pronóstico meteorológico. El capítulo seis, es pronóstico hidrológico, que para poder realizarlo se auxilia del software HEC-HMS, y se establecen las características que deben ingresarse para poder realizar esta modelación. El capítulo siete, se redactan conclusiones y recomendaciones de la investigación en general.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los efectos del cambio climático son cada día más evidentes y en muchos ámbitos afectan directamente el bienestar del ser humano en el planeta; estos efectos han alterado la frecuencia, intensidad y duración de muchos eventos meteorológicos extremos (Como lluvias torrenciales, inundaciones, sequías, etc.), causando miles de daños materiales y muertes; provocando un impacto negativo a la sociedad, al medio ambiente y todas las actividades económicas de los Estados y Países en general; es por ello que, se ha generado la necesidad de tomar medidas que permitan al ser humano adaptarse a sus efectos: entre ellas se pueden mencionar, la implementación de modelos numéricos de predicción meteorológica del tiempo, que nos permiten mediante la modelación de algunas variables meteorológicas, generar alertas oportunas ante eventos extremos y otras igual de importantes.

El Salvador es uno de los países que ya ha experimentado los efectos del cambio climático, con tormentas y depresiones tropicales que han generado grandes pérdidas humanas y económicas, por lo que implementó Sistemas de Alerta Temprana (SATs), pero que no son suficientes para contrarrestar los efectos negativos que acompañan a estos eventos meteorológicos.

El presente trabajo de graduación denominado: “APLICACIÓN DEL MODELO MESOESCALAR WRF (WEATHER RESEARCH FORECAST MODEL) EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SUCIO”, se lleva a cabo por la necesidad de mejorar las medidas de prevención, con predicciones más acertadas

de lluvias torrenciales, generando aproximaciones en la detección y alertas oportunas de precipitaciones intensas que puedan afectar a las poblaciones o infraestructura.

La efectividad en el uso de modelos en El Salvador, está asociada a un modelo que ajuste las condiciones topográficas, ya que nuestro país es montañoso; además, que los datos que se obtengan sean en tiempo real. Una herramienta que cuenta con esta capacidad, es el modelo WRF "Weather Research Forecast Model", el cual representa los últimos avances en la modelación de las variables meteorológicas, predice valores de precipitación comparables con datos reales.

La implementación del modelo meteorológico "WRF", será aplicado a la cuenca del Río Sucio, que comprende los municipios de Armenia, Ciudad Arce, Colón, El Congo, Jayaque, Sacacoyo, San Juan Opico, Talnique, Tepecoyo, Nueva San Salvador y Coatepeque. Se implementará el modelo meteorológico a un modelo hidrológico, considerando que en el país ya se tiene experiencia en su uso, además por ser un modelo gratuito, se utilizará el modelo hidrológico HEC-HMS para convertir la esorrentía en caudal pronosticado.

Con los datos de lluvia obtenidos con el modelo meteorológico "WRF", se procederá a la conversión del formato de la lluvia pronosticada al formato que acepta el modelo hidrológico HEC-HMS por medio del software ArcGIS, posteriormente se implementará el modelo hidrológico determinando los parámetros de la cuenca y calibración, ya que resulta indispensable realizar una verificación de las simulaciones que permita brindar

medidas de exactitud y detección de deficiencias, para que a su vez se realicen las correcciones necesarias que proporcione mejor calidad del pronóstico.

Con los datos obtenidos por el modelo hidrológico HEC-HMS, se procederá hasta obtener un hidrograma pronosticado que muestre gráficamente la variación en el tiempo del caudal pronosticado de lluvia recibida en la Cuenca del Rio Sucio, en un periodo de simulación de cada 3 horas para los eventos convectivos que se consideraron y un periodo de 24 horas para la precipitación 12E.

1.2 ANTECEDENTES

El Salvador es un país en el que las condiciones naturales del territorio lo hacen propenso a sufrir los efectos dañinos y destructivos de algunos fenómenos naturales tales como, terremotos, temporales, huracanes y otros.

De forma general y sistemática, los temporales y huracanes generan una problemática de inundaciones en áreas urbanas y rurales, desde mucho tiempo atrás, tal es el caso de un Huracán que en 1934, provocó inundaciones y pérdidas en todo el país, posteriormente, en 1974, el Huracán Fifi produjo en el país grandes y graves inundaciones; además, han ocurrido muchos desastres más provocados por el Huracán Mitch (Octubre-Noviembre 1998), la Tormenta Tropical Stan, la Depresión Tropical 12E, que azotó al país en octubre de 2011 y otros eventos más recientes.

Todos estos fenómenos naturales conllevan a pérdidas humanas y económicas, con los consiguientes efectos sociales que esto significa. Desde el año 2000, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), ha implementado Sistemas de Alerta Temprana (SATs), instalando la instrumentación necesaria, la elaboración de planes de emergencia y capacitación para las comunidades y se creó el Servicio Nacional de Estudios Territoriales, institución gubernamental para el monitoreo y análisis de amenazas naturales y vulnerabilidades con enfoque de Gestión del Riesgo; todo lo anterior ha contribuido efectivamente a disminuir el impacto económico y social en las poblaciones más vulnerables y que son afectadas directamente por eventos destructivos de esta naturaleza.

Como se puede inferir, El Salvador es un país con experiencia reciente en Sistemas de Alerta Temprana por Inundaciones. Después del Huracán Mitch en 1998, la población salvadoreña reconoció la vulnerabilidad ante estas amenazas y la carencia de un adecuado monitoreo, principalmente en tiempo real. Por esta razón, y a pesar de ya tener suficiente experticia en Sistemas de Alerta Temprana (SATs), el país sigue sufriendo los efectos del cambio climático, cada vez más evidente, incrementándose la frecuencia e intensidad de muchos eventos extremos, tales como sequías, temperaturas extremas, tormentas fuertes y temporales, generalizados en el país como y en otras regiones, trayendo consigo pérdidas humanas, daños estructurales y grandes pérdidas económicas.

Lo anterior es un indicativo de que, solo los SATs no son suficientes, que es necesario adoptar otras medidas efectivas y oportunas para enfrentar eventos extremos como los mencionados anteriormente, ya que la información disponible muestra que la intensidad y frecuencia viene en aumento.

Una manera de colaborar con los SATs y contrarrestar o mitigar los efectos de las lluvias extremas es mediante el uso de los modelos numéricos de predicción del tiempo, los cuales permiten identificar con antelación el desarrollo de los fenómenos destructivos, para alertar oportunamente y evitar o mitigar daños devastadores.

Entre todos los diferentes modelos de predicción destaca el modelo WRF, el cual por su versatilidad se ha vuelto cada vez de uso más frecuente, debido principalmente a los buenos resultados obtenidos en las predicciones meteorológicas y pronóstico hidrológico.

Con el paso del tiempo se ha intensificado el uso del WRF entre la comunidad científica, ya que con él es posible pronosticar más acertadamente el número de tormentas intensas, ya que otros modelos no lo hacen tan bien, mejorando la predicción del área de la lluvia y la localización de los núcleos de precipitación.

Por lo anterior, es importante hacer una investigación sobre la aplicación de este modelo en nuestro País, con la finalidad de demostrar sus bondades y aplicabilidad en el pronóstico e investigación meteorológica, lo cual vendrá en beneficio de una efectiva prevención de desastres producto de los fenómenos meteorológicos.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los años setenta, la red hidrométrica de El Salvador contaba con aproximadamente 70 estaciones, cuyo objetivo era el manejo del recurso hídrico con fines agrícolas. En los años ochenta, la mayoría de estaciones fueron destruidas o abandonadas debido a la guerra civil que azotó nuestro País; posteriormente a la firma de los acuerdos de Paz en 1992, se realizaron esfuerzos a fin de rehabilitar la Red de estaciones de monitoreo de fenómenos naturales.

El Huracán Mitch en octubre de 1998, generó en El Salvador inundaciones que produjeron cuantiosas pérdidas económicas y humanas, por lo que la cooperación internacional, financió la instalación del Sistema de Pronóstico y Alerta Temprana en el Río Lempa, lo cual comprendió la construcción de una red de estaciones hidrometeorológicas telemétricas en tiempo real, junto con software y modelos hidrológicos que formaron parte del Centro de Pronóstico Hidrometeorológico (CPHM), en ese momento como parte de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables (DGRRN) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

En octubre del año 2001, se creó el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), entidad adscrita al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), que incluye el componente de Estudios Territoriales y Gestión de Riesgos; esta institución se fortaleció con personal proveniente del Centro de Investigaciones Geotécnicas (CIG) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables (DGRRN) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

El Sistema de Pronóstico de Crecidas y Alerta Temprana se instaló junto con todas sus funciones, en el Servicio Hidrológico Nacional (SHN), el cual en conjunto con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Servicio Geológico Nacional (SGN), del SNET, posteriormente en 2007, se convirtió en la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

No obstante lo anterior, en las últimas dos décadas, las últimas depresiones tropicales y huracanes que han ocurrido en El Salvador durante este período, generaron daños de al menos \$900,000 de dólares en pérdidas. Los desastres naturales en la región se han incrementado en las últimas tres décadas con una tasa de crecimiento anual aproximada del 5%.

Estudios indican que el territorio salvadoreño recibe en promedio 38,283 millones de metros cúbicos de agua lluvia al año. En donde, respecto al suelo, más del 50% del territorio salvadoreño se usa de manera inapropiada y las tasas anuales de erosión equivalen a 59 millones de toneladas de suelo removido por la lluvia. La vulnerabilidad ambiental se refleja en que el 9.3% del territorio está expuesto a inundaciones severas y moderadas; 19.2% a diversos tipos de deslizamientos; y arriba del 45% es afectado por sequías de forma severa, moderada o débil.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar el pronóstico hidrológico para alerta temprana a partir de las salidas del modelo mesoescalar WRF para El Salvador enfocado en la cuenca del río Sucio.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extraer del modelo global de pronóstico de lluvia, en forma de grillas las lluvias esperadas de manera horaria para la cuenca del río Sucio.
- Convertir la lluvia extraída del modelo WRF a caudal esperado por medio del modelo hidrológico HEC-HMS.
- Generar un caudal pronosticado horario para la cuenca del río Sucio.

1.5 ALCANCES

- La modelación se basara en las lluvias, ya que es lo que más afecta a gran parte del territorio de El Salvador.
- El pronóstico a generar estará basado en los datos de eventos de precipitación registrados por las estaciones pluviométricas con las que cuenta el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), y que generan área de influencia en la cuenca del río Sucio.
- El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales proporcionara el software WRF y capacitación para su utilización.
- El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales proporcionara material didáctico para la utilización del software HEC HMS.

1.6 LIMITACIONES

- ✓ El modelo WRF genera un pronóstico meteorológico a escala mundial al cual se le debe de reducir su escala a nivel de la cuenca en estudio, por lo tanto se obtendría un modelo hidrológico aproximado.

- ✓ Los datos de precipitación a utilizar, serán los proporcionados por las estaciones pluviométricas con las que cuenta el MARN, y que tienen área de influencia en la cuenca del río Sucio.

- ✓ Los resultados del análisis corresponderán a los posibles escenarios que el modelo pueda generar con base al registro de precipitaciones.

1.7 JUSTIFICACIÓN

En los últimos años los drásticos cambios del clima, con huracanes y tormentas tropicales más frecuentes, que afectan en similar medida a muchas regiones del planeta entero, es uno de los efectos a corto plazo que está generando el calentamiento de la tierra, al parecer todo generado por el Cambio Climático, por lo que es necesario pronosticar y alertar oportunamente la probabilidad de ocurrencia de nuevos eventos hidrometeorológicos extremos.

La precisión de los pronósticos y predicciones son vitales para la toma de medidas de mitigación, para reducir el impacto de estos fenómenos, por lo que es necesario que se lleven a cabo los análisis necesarios, utilizando modelos meso escalares independientes y de alta resolución, como lo es uno de los modelos más utilizados disponibles de descarga gratuita, el WRF® Weather Research Forecast Model por sus siglas en inglés (Modelo de Investigación y Predicción Meteorológica).

El modelo WRF es una herramienta muy poderosa y versátil para predecir condiciones hidrológicas, en El Salvador, con el cual el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha estado trabajando en conjunto con el Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica (SERVIR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), y la USAID para ayudar a los meteorólogos del país a mejorar su conocimiento y uso de modelos de predicción avanzados del tipo de Investigación Meteorológica y de Predicción, para simular el clima durante varios días.

Estos conocimientos deben ser constantemente mejorados y se debe estar siempre actualizado con las mejoras del modelo WRF, para poder obtener mejores resultados, por lo que con la presente investigación se pretende actualizar dichos conocimientos pretendiéndose lograr con ellos una mejora en el sistema de Alerta Temprana, en principio aplicado a la cuenca del río Sucio.

CAPITULO II:
TEORÍA DE MODELOS
METEOROLÓGICOS E
HIDROLÓGICOS Y SISTEMA DE
ALERTA TEMPRANA

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente Capítulo II denominado: “TEORÍA DE MODELOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS Y SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA”, se desarrolla para conocer en qué consiste cada uno de los modelos, el avance que han tenido en el transcurso del tiempo y como se aplican en la actualidad para predecir eventos meteorológicos, así como entender el ciclo hidrológico de la cuenca de manera continua en el tiempo y en el espacio; además, los Sistemas de Alerta Temprana (SAT), que son un conjunto de procedimientos e instrumentos para monitorear amenazas y eventos adversos.

La predicción es la aplicación de tecnología y de ciencia para predecir el estado de la atmósfera para un período futuro y una localidad o región dada. Los modelos numéricos utilizados para la predicción, se basa en la toma de una muestra del fluido en un momento dado, aplicando a su vez, ecuaciones de la dinámica de fluidos y de la termodinámica.

En la década de los 50's, se empezaron a desarrollar los modelos meteorológicos, utilizando ecuaciones de la dinámica de fluidos, que son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP) no exactas, por lo que deben resolverse por métodos numéricos. La predicción numérica ha evolucionado, simplificando el sistema de EDP, para obtener resultados en un tiempo razonable con el ordenador del que se disponga.

Para los modelos numéricos se tienen rejillas de integración tridimensionales, de manera que en cada nodo se deben calcular los valores de las variables del modelo, obteniéndose en los nodos los valores de las variables básicas del modelo

(temperatura, humedad específica y componentes del viento) y de las variables derivadas (precipitación, nubosidad, etc.) previstas para un tiempo futuro.

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de un sistema real complejo, teniendo como base de la modelación hidrológica, la modelación de la cuenca, ya que se debe entender el ciclo hidrológico y entender la “Respuesta” de la cuenca de manera continua en el tiempo y en el espacio.

Entender el ciclo hidrológico implica entender la “Respuesta” de la cuenca de manera continua en el tiempo y en el espacio, por este motivo la base de la modelación hidrológica es la modelación de la cuenca. Cada cuenca tiene condiciones muy particulares de clima, geografía, geología, etc. que incrementan la importancia de un proceso por sobre otros y condicionan la estructura del modelo.

El sistema físico real generalmente se refiere a una cuenca hidrográfica, y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico; y un sistema matemático se refiere generalmente a la aplicación de ecuaciones por lo que es necesario tener conocimiento de entradas al sistema y salidas a partir del sistema, las salidas de los modelos hidrológicos varía dependiendo del objetivo del modelo.

Los Sistemas de Alerta Temprana tienen como principal objetivo, alertar a la población de posibles amenazas naturales; a través de un conjunto de procedimientos e instrumentos, se monitorea amenazas de carácter previsible, con el tiempo suficiente para poder tomar las medidas de protección necesarias para contrarrestar los efectos negativos que traen consigo eventos naturales como las precipitaciones.

2.2 TEORÍA DEL MODELO METEOROLÓGICO

2.2.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos meteorológicos se comenzaron a desarrollar en la década de los 50's, utilizando ecuaciones de la dinámica de fluidos, resolviéndose por métodos numéricos ya que son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP).

La predicción numérica ha evolucionado, haciendo más simple el sistema de EDP, comenzando con los Modelos Barotrópicos, en la década de los 40's, posteriormente, en la década de los 60's se desarrollaron los Modelos Baroclinos; en la misma década, se crearon los Modelos de Ecuaciones Primitivas, creándose tiempo después, los Modelos de Mesoescala.

Para los modelos numéricos se tienen rejillas de integración tridimensionales, de manera que en cada nodo se deben calcular los valores de las variables del modelo, obteniéndose en los nodos los valores de las variables básicas del modelo (Temperatura, humedad específica y componentes del viento) y de las variables derivadas (Precipitación, nubosidad, etc.) previstas para un tiempo futuro.

2.2.2 DESCRIPCIÓN FÍSICA

Si consideramos el concepto de "atmósfera" como la capa de gas que rodea a un cuerpo celeste, en donde los gases resultan atraídos por la gravedad del cuerpo, y se mantienen en ella, si la gravedad es suficiente y la temperatura de la atmósfera es baja, estaríamos definiendo básicamente la atmósfera terrestre, pudiendo considerar al planeta rodeado de un "Fluido".

En forma básica, la “Predicción” mediante modelos numéricos se basa en la toma de una muestra del fluido en un momento dado (En cuanto a sus propiedades en diversos puntos, como por ejemplo grado de humedad, presión, velocidad y dirección del viento) y la aplicación de ecuaciones de la dinámica de fluidos y de la termodinámica para calcular el estado del fluido en algún momento en el futuro.

2.2.3 FUNDAMENTOS E HISTORIA DE LA PREDICCIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO

Para el estudio de la atmósfera y de los fenómenos meteorológicos, actualmente se utilizan distintas herramientas como los modelos meteorológicos. Los sensores de medición de las variables atmosféricas han representado durante siglos la base del estudio del tiempo, los primeros pluviómetros son ya descritos en el año de 1,247 por el matemático chino Ching-Shao, usándose a partir del siglo XIII, por los Chinos, realizando mediciones esporádicas. Estas herramientas han sido la base para el estudio de la climatología y la meteorología de una región, durante siglos.

No fue sino hasta la década de los 50's, que se empieza a desarrollar otro tipo de herramientas, que por ahora son fundamentales para el conocimiento y predicción de la atmósfera; estas herramientas son los conocidos modelos meteorológicos.¹

Como la atmósfera es un fluido, por lo tanto, pueden usarse las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos para resolver el problema de la evolución de los fenómenos meteorológicos en la atmósfera terrestre, es decir, para resolver

¹<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6836/07Ojc07de12.pdf;jsessionid=DF63D170B7E4057781F21512BA0A79D5.tdx1?sequence=7>

el problema de la predicción del tiempo; puesto que las citadas ecuaciones de la dinámica de fluidos, son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP) que no tienen solución exacta, deben resolverse por métodos numéricos.

De esta manera, desde un punto de vista matemático, el problema de la predicción en el tiempo es "Un Problema de Valores Iniciales". Por tanto, una de las claves para obtener una buena solución aproximada del sistema de EDP que rigen los movimientos atmosféricos, es obtener una buena descripción de las condiciones iniciales en la atmósfera, o sea, tener un conocimiento lo más exacto posible de la situación meteorológica en el instante inicial, en el "Ahora". Para ello, como veremos con más detalle adelante, necesitamos reunir las observaciones meteorológicas realizadas en todo el mundo.

Para esto, las comunicaciones han jugado un papel muy importante en el desarrollo de la predicción del tiempo, ya que mientras más desarrollados son los sistemas de comunicación, más rápido podemos disponer de las observaciones de todo el mundo y antes podemos realizar la predicción con el modelo numérico del que disponemos.

Se explica así que la invención del "Telégrafo" sea una de las claves de los primeros desarrollos de la predicción del tiempo a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX. Se formaron entonces las primeras oficinas de predicción del tiempo que realizaron los primeros estudios de evolución del tiempo meteorológico en "Tiempo Real".

Así como el desarrollo del telégrafo resultó clave para la predicción del tiempo, el desarrollo de los ordenadores electrónicos resultó clave para el desarrollo de la predicción numérica. Como se mencionó antes, el sistema de EDP que rige

los movimientos atmosféricos, aún después de simplificarse convenientemente, debe resolverse por métodos numéricos, entonces la cantidad de cálculos numéricos es tan grande que es imposible de abordar por métodos convencionales.

Podemos entonces afirmar que, cada uno de los aumentos significativos en la potencia de cálculo de los ordenadores, ha llevado aparejada una mejora en los resultados de los modelos numéricos de predicción del tiempo, que se integraban en ellos. Sin embargo, esta correspondencia está llegando a su fin, ya que los modelos numéricos han alcanzado un grado de desarrollo tal que nuevas mejoras deben basarse en nuevas investigaciones y no ya solamente en el aumento de la potencia del ordenador en el que se integran los modelos o en el aumento de su resolución horizontal.

Por esa razón es necesario hacer un breve repaso a la evolución histórica de la predicción numérica, por medio de la siguiente tabla:

	MODELOS			
	BAROTRÓPICOS	BAROCLINOS	ECUACIONES PRIMITIVAS	DE MESOESCALA
DESARROLLO	Década de los 40's	Década de los 60's	Década de los 60's	Últimos 20 años
ALCANCES	<p>Redujo el sistema de EDP.</p> <p>Basados en la "hipótesis barotrópica"</p>	<p>Consideraba una cierta estructura vertical de la atmósfera (primer modelo, 3 niveles). Basados en la atmósfera baroclina.</p>	<p>Aumento en la potencia de cálculo de los ordenadores y consideraban ya una estructura vertical de la atmósfera completa (inicialmente diez niveles verticales, y fueron aumentando con el paso del tiempo). Actualmente, todos los modelos numéricos operativos que se usan en el mundo son modelos en ecuaciones primitivas.</p>	<p>Aumento de la resolución horizontal y vertical de los modelos numéricos, tomando en cuenta procesos que tienen lugar en la atmósfera. Se pasa de resoluciones de 100 Km a 50, 20 e incluso a 10 Km.</p>
LIMITACIONES	<p>Ausencia de estructura vertical</p>	<p>Insuficientes para ser usados en la predicción diaria del tiempo.</p>	<p>A partir de los primeros modelos de este tipo desarrollados, se comprobó que las deficiencias en los resultados ya no eran debidas a una deficiente formulación de las EDP, sino a dos causas principales: la 1ª, la resolución horizontal y vertical de la rejilla de integración, la 2ª, no podían tenerse en cuenta procesos que tenían lugar en la atmósfera, cuya escala espacial y temporal era inferior a las resoluciones del modelo.</p>	<p>Se debe contar con máquinas potentes y memoria disponible para su instalación y ejecución.</p>

Tabla 2. 1: Evolución simplificada de los modelos numéricos de predicción del tiempo

La Hipótesis barotrópica: consiste en suponer que las superficies isobáricas o de presión constante, coinciden con las superficies de densidad constante, de manera que el gradiente isobárico de temperatura es cero y el viento geostrófico² no varía con la altura.

Una atmósfera baroclina: se define como aquella en la que las superficies isobáricas e isopícnicas no coinciden, por tanto, el gradiente isobárico de temperatura es distinto de cero y el viento geostrófico varía con la altura pero solo en módulo y no en dirección.

2.2.4 PRINCIPIOS GENERALES DE LOS MODELOS NUMÉRICOS DE PREDICCIÓN DEL TIEMPO.

Como ya se mencionó antes, el sistema de EDP sobre el que se formulan los modelos numéricos, no es más que una simplificación de las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos particularizadas para el fluido atmosférico. La dinámica de la atmósfera consiste en el estudio de los movimientos que tienen lugar en el seno de la atmósfera terrestre y de los procesos de intercambio de energía que tienen lugar en ella. En esta formulación se desprecian las fuerzas moleculares y se tienen en cuenta las fuerzas del gradiente de presión, de Coriolis, la gravitatoria y la de rozamiento.

Estas ecuaciones, en derivadas parciales se discretizan para que puedan resolverse numéricamente, ya que no tienen solución exacta. En el proceso de discretización debe elegirse una rejilla espacial en la que se representan los valores de las variables

² Viento Geostrófico: es una aproximación física al viento real.
Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Viento_geostr%C3%B3fico

del modelo y en ella misma se resuelven las ecuaciones obteniéndose así valores de las variables meteorológicas para un instante futuro en todos los nodos de la rejilla de integración.

También, hay que tener en cuenta aquellos procesos que se producen en la atmósfera y cuya escala espacial y temporal es mucho menor que la resolución en la que hemos formulado nuestro modelo. Estos procesos que son muy importantes, se introducen en los modelos a través de los esquemas de parametrizaciones físicas que intentan contabilizar los efectos de estos procesos en las variables del modelo.

2.2.4.1 ECUACIONES DEL SISTEMA

Las ecuaciones que rigen el movimiento atmosférico y que se usan como sistema de EDP en los modelos numéricos de predicción del tiempo, son amplias, por lo que para tener una breve idea de ellas, no es necesario hacer una descripción detallada.

Las ecuaciones del movimiento se deducen de la aplicación de las leyes de Newton, considerando un sistema de coordenadas esféricas y que se mueve con la rotación de la Tierra.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \frac{\vec{F}_i}{m} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g} + \vec{F}_r$$

Ecuación 2. 1: Vector velocidad del viento

Teniendo en cuenta que el sistema de referencia gira solidario con la Tierra y, por tanto, no es inercial, se debe introducir en la ecuación una fuerza aparente, o sea, no real, llamada "Fuerza de Coriolis" que no realiza trabajo y cuyo efecto es desviar el flujo a la derecha en el Hemisferio Norte y a la izquierda en el Sur.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \frac{\vec{F}_i}{m} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{F}_r$$

Ecuación 2. 2: Vector velocidad del viento incluida la fuerza de coriolis

La siguiente ecuación que se debe tener en cuenta es la ecuación del balance energético. Se deduce directamente del Primer Principio de la Termodinámica, teniendo en cuenta que el conjunto Tierra-Atmósfera funciona como una máquina térmica que convierte la energía procedente de la radiación solar en movimiento (Vientos) y en alimento para el ciclo hidrológico (Evaporaciones y condensaciones del vapor de agua en la atmósfera). La formulación genérica del Primer Principio es:

$$dQ' = C_p dT - \alpha dp$$

Ecuación 2. 3: Ecuación del balance energético

Tomando en cuenta la energía aportada por los cambios de fase del vapor de agua obtenemos:

$$dQ - L \frac{dq}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt}$$

Ecuación 2. 4: Ecuación del balance energético

En el término de intercambio de calor no adiabático (dQ) se incluyen los efectos de la radiación solar, el flujo de calor sensible desde la superficie, calor de fricción, etc.

Una aproximación muy usada en los modelos numéricos consiste en suponer que hay un equilibrio de fuerzas en la vertical, de manera que la aceleración según dicha componente es cero. Esta aproximación simplifica mucho el sistema de ecuaciones que hay que resolver y se conoce con el nombre de "Aproximación Hidrostática". Entonces la componente vertical de la ecuación del movimiento se reduce a:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Ecuación 2. 5: Ecuación del movimiento reducida

Esta ecuación permite además tener una relación aproximadamente lineal entre la presión atmosférica y la altura geométrica sobre el terreno.

Finalmente, se debe tener en cuenta la Ley de Conservación de la Masa que, da lugar a la llamada ecuación de continuidad:

$$\frac{1}{\rho_m} \frac{d\rho_m}{dt} + \nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{1-q} \frac{dq}{dt}$$

Ecuación 2. 6: Ecuación de continuidad

Con esta ecuación se obtiene un sistema de EDP, que al ser no lineal no tiene solución exacta. Para hallar soluciones aproximadas debemos acudir a métodos numéricos que discretizen las derivadas parciales en los nodos de una rejilla de integración en la cual

se resuelven las ecuaciones y se obtienen entonces los valores de las variables del modelo en un tiempo futuro. Aplicando este método iterativamente podemos obtener los valores de las variables meteorológicas en los nodos de la rejilla numérica para cualquier tiempo futuro (En la práctica se producen limitaciones al horizonte temporal de predicción como se verá más adelante).

Entonces es necesario repasar los métodos de discretización más usados en los modelos numéricos de predicción del tiempo.

2.2.4.2 MÉTODOS DE DISCRETIZACIÓN DE ECUACIONES DIFERENCIALES EN DERIVADAS PARCIALES.

Una vez simplificadas adecuadamente las ecuaciones provenientes de la dinámica, lo que se debe resolver es un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Como el sistema obtenido no tiene solución exacta se debe aproximar dicha solución mediante métodos de discretización de las citadas ecuaciones. Dependiendo del método elegido, tanto para las derivadas espaciales, como para las temporales, se elige la rejilla en la que se va a resolver dicho sistema de ecuaciones, o sea, la rejilla de resolución del modelo.

Cada uno de los esquemas que se nombrarán brevemente tienen sus ventajas e inconvenientes y se debe de elegir aquél que mejor se adapte a las características del problema que se quiere resolver (Geometría del área de integración, coordenadas en las que se formula el modelo, etc.).

Los "**Esquemas en diferencias finitas**" son los más usados en los modelos numéricos modernos y se basan en la aproximación de las derivadas parciales (tanto espaciales como temporales) por diferencias entre los valores de la variable en cuestión en dos nodos de la rejilla próximos entre sí. Según que estos nodos sean el presente y el siguiente ("Adelantadas"), el presente y el anterior ("Atrasadas"), o el anterior y el posterior ("Centradas") se tienen diferentes variedades del esquema. Cada una tiene diferentes propiedades de exactitud y estabilidad aunque el más usado en los modelos numéricos es el "Esquema de diferencias finitas centradas", ya que es más exacto y más estable que los otros dos.

Otro tipo de esquema es "**El Método Espectral**". Se trata de un método alternativo que aprovecha las propiedades de las EDP's de los modelos numéricos. Las soluciones pueden obtenerse como serie de funciones ortogonales que pueden ser series de Fourier pero que en la esfera son armónicos esféricos, por ser éstos más adecuados a la geometría del problema. Por tanto en este caso las variables dependientes no se representan sobre los puntos de una rejilla, sino en términos de series de armónicos esféricos; aunque dichas series debieran ser infinitas esto no es posible y se establece la representación en series finitas.

La principal ventaja de los armónicos esféricos como funciones base es que son ortogonales, continuos y diferenciables en los polos. Además el laplaciano³ de un armónico esférico es proporcional a él mismo, con lo que algunos términos de las EDP's se simplifican mucho. La desventaja es que los modelos deben cambiar

³ Laplaciano: es un operador diferencial elíptico de segundo orden, denotado como Δ , relacionado con ciertos problemas de minimización de ciertas magnitudes sobre un cierto dominio. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Operador_laplaciano

entre el espacio espectral y el de rejilla en cada paso de tiempo lo que hace que consuman mucho más tiempo de ordenador que las diferencias finitas.

En la Figura 2.1 podemos ver la representación de una base de elementos finitos en un dominio de una dimensión.

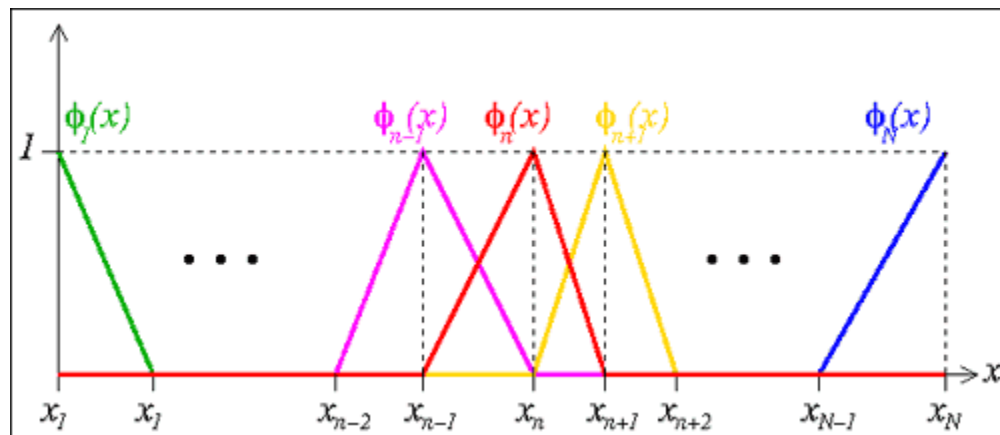


Figura 2. 1: Representación de una base de elementos finitos en un dominio de una dimensión.

Los elementos finitos no tienen por qué ser lineales, también se usan los parabólicos y cúbicos. Tienen la ventaja de mejorar la representación de la función cuando la rejilla no es regular (Rejillas de resolución variable).

2.2.4.3 REJILLAS DE INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS.

Ya se ha mencionado que, el sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de la dinámica atmosférica no tiene solución exacta ya que las ecuaciones son altamente no lineales.

La única manera de encontrar una solución aproximada del sistema es aplicar algún método de discretización de las derivadas parciales (Tanto espaciales como temporales).

En la revisión de los diferentes métodos existentes se ha visto que cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes y se debe de elegir aquél que mejor se adapte a la geometría del problema que se quiere resolver. Sin embargo, todos los métodos tienen en común la necesidad de resolver las ecuaciones resultantes en los nodos de una rejilla, que se conoce con el nombre de "Rejilla de integración del modelo".

Estas rejillas son tridimensionales (Dos dimensiones horizontales y una vertical) de manera que en cada nodo se deben calcular los valores de las variables del modelo, de sus derivadas parciales discretizadas y de las fuerzas que intervienen en las ecuaciones del modelo. Como resultado se obtienen en los nodos los valores de las variables básicas del modelo (Temperatura, humedad específica y componentes del viento) y de las variables derivadas (Precipitación, nubosidad, etc.) previstas para un tiempo futuro.

Para elegir una rejilla de integración para el modelo, se debe de tener en cuenta la geometría del problema y elegir entonces aquella rejilla que mejor se adapte a las propiedades del esquema de discretización elegido. Por ejemplo, para un modelo de circulación general de la atmósfera se necesita elegir una rejilla global, o sea, que cubra todo el planeta.

Sin embargo, estas rejillas tienen el inconveniente de que cuando se quiere aumentar la resolución horizontal del modelo, se debe de aumentar mucho el número de nodos

de la rejilla, esto hace que aumente dramáticamente el número de operaciones numéricas que debemos hacer para cubrir un determinado horizonte de predicción (3 o 4 días). La consecuencia es que aumenta mucho el tiempo que necesita nuestro ordenador para hacer la misma predicción y eso no es admisible en un modelo operativo.

La solución a este problema es considerar una rejilla con base global pero de resolución variable, es decir, más alta en la zona de interés de las predicciones, y mucho más baja en las antípodas. En la Figura 2.2 vemos un ejemplo de la rejilla de integración del modelo Arpege usado por el servicio meteorológico de Francia (MeteoFrance).



Figura 2. 2: Rejilla de integración del modelo Arpege

Como puede observarse a través de un cambio de coordenadas se ha cambiado la proyección del mapa de manera que la zona de España y Francia tiene mayor resolución que las antípodas (no mostrada en la figura).

Sin embargo, si la geometría del problema es plana, es decir, se han elegido coordenadas horizontales planas, se debe entonces elegir una rejilla de integración plana, pero también de resolución variable. Un ejemplo de este tipo de rejillas se encuentra en la Figura 2.3, en la que se muestra la rejilla de integración del modelo de predicción numérica del servicio meteorológico canadiense (Environment Canada), en ella se ve que las líneas que marcan los nodos de integración están más cercanas sobre Canadá que sobre el resto del planeta.

Otra solución diferente puede encontrarse cuando de todas maneras no interesa en absoluto obtener resultados del modelo en una gran parte de la Tierra, entonces se puede integrar un "Modelo de Área Limitada" que, como su nombre indica, solo considera la rejilla de integración en una parte de la superficie del planeta. El inconveniente de estos modelos es que, para poder resolver las ecuaciones del sistema en los puntos de la última fila o columna del área de integración, se necesita conocer los valores de las variables fuera del área cubierta por la rejilla.

Para subsanar este impedimento, se usan los valores de las variables del modelo obtenidas de un modelo cuya rejilla de integración incluya a la del modelo.

A esta disposición de rejillas en la que se va aumentando la resolución horizontal y haciendo las áreas de integración más pequeñas se le conoce con el nombre de "Anidamiento Telescópico" y es el más usado entre los centros de predicción numérica del tiempo de todo el mundo, en particular es la disposición usada por el Instituto Nacional de Meteorología de España.

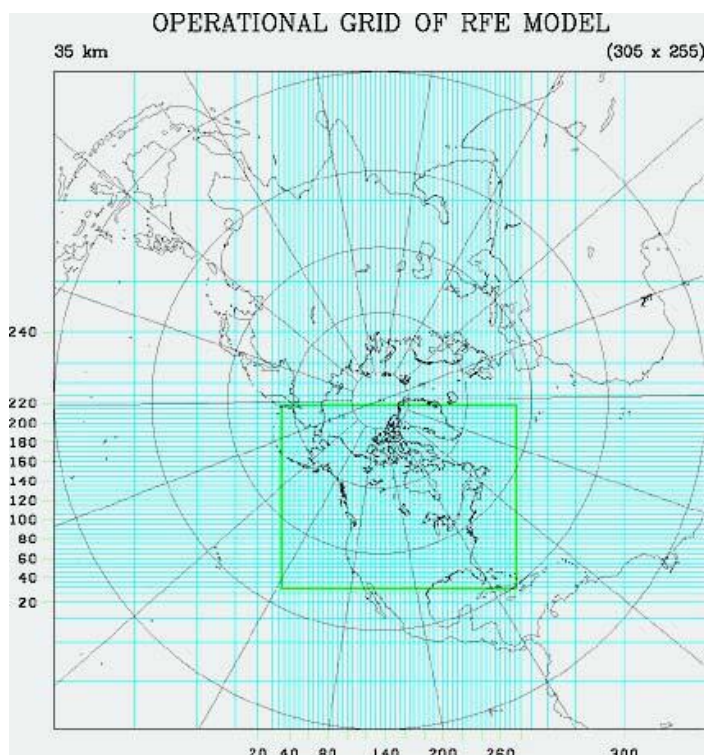


Figura 2. 3: Escala de rejilla

2.2.4.4 PARAMETRIZACIONES FÍSICAS

La escala de los fenómenos que se incluyen en un modelo numérico está directamente relacionada con la escala de la rejilla de integración. Es evidente que no puede pensarse que un modelo integrado en una rejilla con resolución de 100 Km (Cuyos nodos representan cuadrados de 10.00 Km^2) pueda representar mínimamente los efectos de una nube de tipo Cumulonimbo que cubre un área de unos 10.00 Km^2 .

Existen en la atmósfera multitud de fenómenos cuyos efectos sobre las variables atmosféricas son muy importantes y cuya escala típica es mucho menor que la resolución de los modelos numéricos típicos. Para poder tener en cuenta los efectos de estos fenómenos se debe establecer alguna hipótesis sobre su funcionamiento, de manera que a través de ella, puedan incluirse en los modelos.

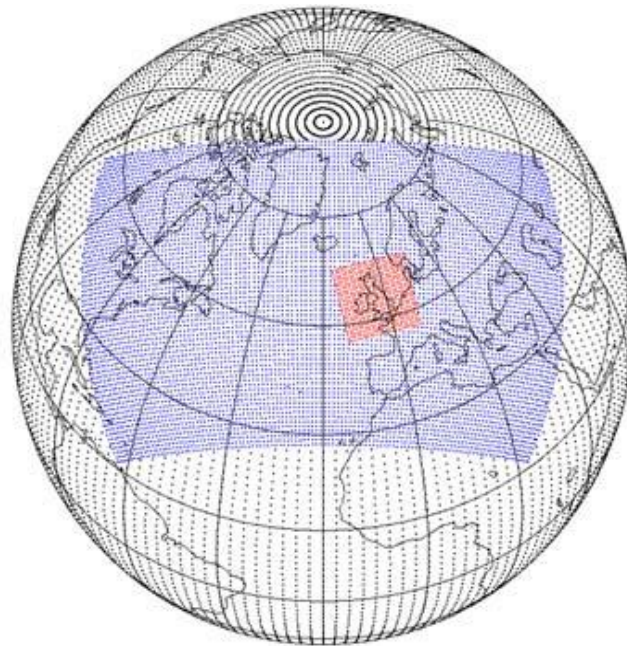


Figura 2. 4: Rejilla a Escala mundial

La hipótesis básica consiste en suponer que "Existe un equilibrio estadístico entre los fenómenos cuya escala es menor que la de la rejilla y las variables resueltas por el modelo en su rejilla". De esta manera no interesan los detalles de funcionamiento de todos los Cumulonimbos tormentosos que existen dentro de un cuadrado de la rejilla sino solo sus efectos estadísticos sobre el flujo general. Al mismo tiempo se debe buscar la manera de obtener esos efectos a partir de las características del flujo atmosférico resueltas por el modelo.

A este proceso se le llama "Parametrizar", se dice entonces que se incluyen en los modelos esquemas de "Parametrizaciones Físicas" de todos los fenómenos cuya escala típica es menor que la del modelo en cuestión.

Los principales procesos que se incluyen en los modelos numéricos son:

Radiación: Se trata de tener en cuenta los efectos que produce en la atmósfera y en el suelo la absorción de la radiación de onda corta procedente del Sol y de onda larga procedente de la Tierra, así como la interacción que esas radiaciones producen con los distintos componentes atmosféricos (Ozono, agua líquida en las nubes, vapor de agua, etc.). Se trata del proceso más importante de todos los que se parametrizan ya que la radiación solar constituye la energía que mueve la máquina atmosférica.

Convección: Cuando una columna atmosférica está potencialmente más caliente en altura que en superficie se dice que la columna es potencialmente inestable, de manera que se favorecen en ella los movimientos verticales. Al ascender el aire cargado de vapor de agua el vapor se condensa liberando grandes cantidades de calor y originándose gotas de agua líquida que posteriormente se convierten en precipitación.

Intercambio atmósfera-superficie del suelo: Se trata de tener en cuenta los intercambios de calor latente (Debido a la evaporación del agua de mares, ríos y lagos), de calor sensible (Debido al contacto del aire con el suelo) y de momento (Debido al frenado que se produce en el flujo atmosférico el rozamiento con el suelo).

Turbulencia: Se trata de los efectos producidos en la atmósfera por la interacción de los remolinos de diferente tamaño y pequeña escala que se producen en el seno de dicho flujo debido a que no es laminar.

Condensación a gran escala: Se trata de tener en cuenta la producción de precipitaciones (Lluvia o nieve) a partir de los niveles atmosféricos en los que hay

sobresaturación, como consecuencia de todos los procesos que se han tenido en cuenta en el modelo (Advección de humedad, evaporación desde la superficie, etc.).

Frenado por ondas gravitatorias: Se trata de la manera en la que el frenado que se produce en el flujo de niveles bajos por su contacto con la orografía se transmite a niveles superiores de la atmósfera.

Todos estos procesos son lo que forman generalmente la llamada "Física del Modelo" y en su conjunto son muy importantes para el acierto de las predicciones obtenidas de esos modelos.

2.2.4.5 ASIMILACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

Ya se mencionó al principio que, matemáticamente hablando el problema de la predicción numérica del tiempo era un "Problema de valores iniciales", es decir, que para resolverlo se debe resolver un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, una de cuyas condiciones fundamentales es el valor que toman las variables del modelo en el estado inicial.

En términos meteorológicos, el problema de los valores iniciales significa conocer los valores de todas las variables del modelo en todos los puntos de la rejilla de integración en el instante inicial de tiempo. A eso se le llama análisis meteorológico, y consiste en calcular a partir de las observaciones meteorológicas que se hacen en todo el mundo, el análisis de los campos meteorológicos.

Modernamente, el proceso de análisis meteorológico se conoce con el nombre de "Asimilación de Datos" ya que no solo consiste en un análisis de los campos sino en conocer la manera de "Asimilar" las observaciones obtenidas al "Estado del modelo".

Esto se hace a través de técnicas variacionales que dan mejores resultados que los esquemas de análisis clásicos. No es el objetivo describir las técnicas variacionales de asimilación de datos, por lo que se limitará a decir que persiguen el fin necesario de conocer con el mayor detalle posible, los valores de las variables del modelo en el estado inicial.

En la figura 2.5, se muestra la distribución espacial de observaciones un día cualquiera sobre el área de integración del modelo operativo del INM "Instituto Nacional de Meteorología de España" (Los puntos amarillos representan las distintas observaciones).

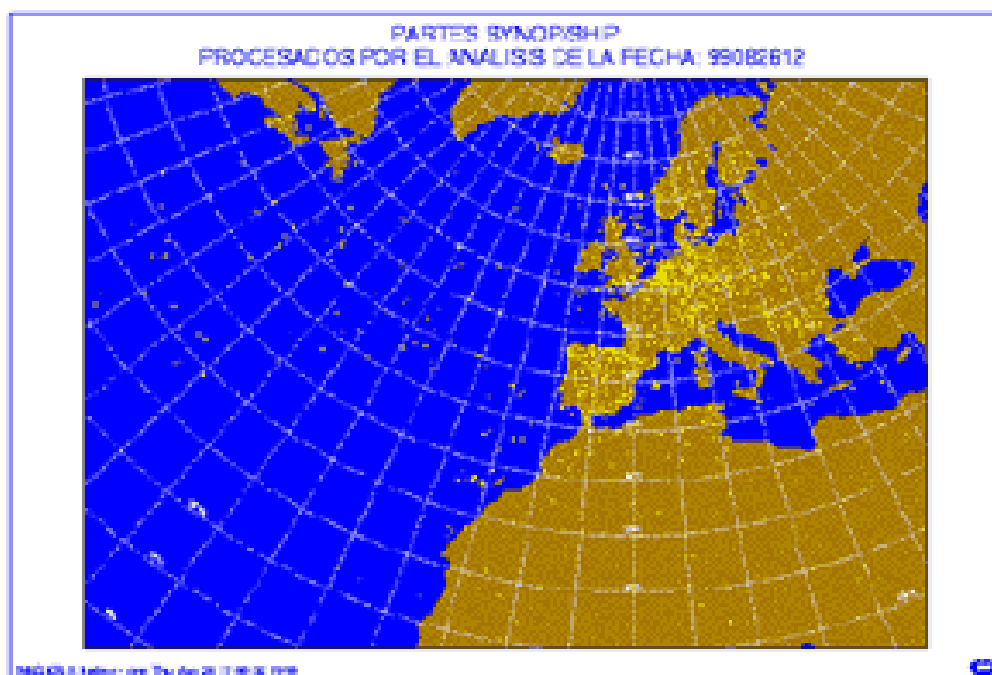


Figura 2. 5: Distribución espacial de observaciones un día cualquiera sobre el área de integración del modelo operativo del INM

Por otra parte no solo existe un tipo de observaciones, hay observaciones de superficie (Llamadas synop), de altura (Temp), observaciones desde satélites meteorológicos (Satob), desde aviones comerciales (Airep), etc., de manera que la variedad de factores a tener en cuenta complica de manera natural los métodos de asimilación de datos y hace que sea un campo en el que todavía queda mucho camino por recorrer. En la Figura 2.6 se presentan esquemáticamente, los diferentes tipos de observaciones meteorológicas que suelen tenerse en cuenta en los modelos modernos.

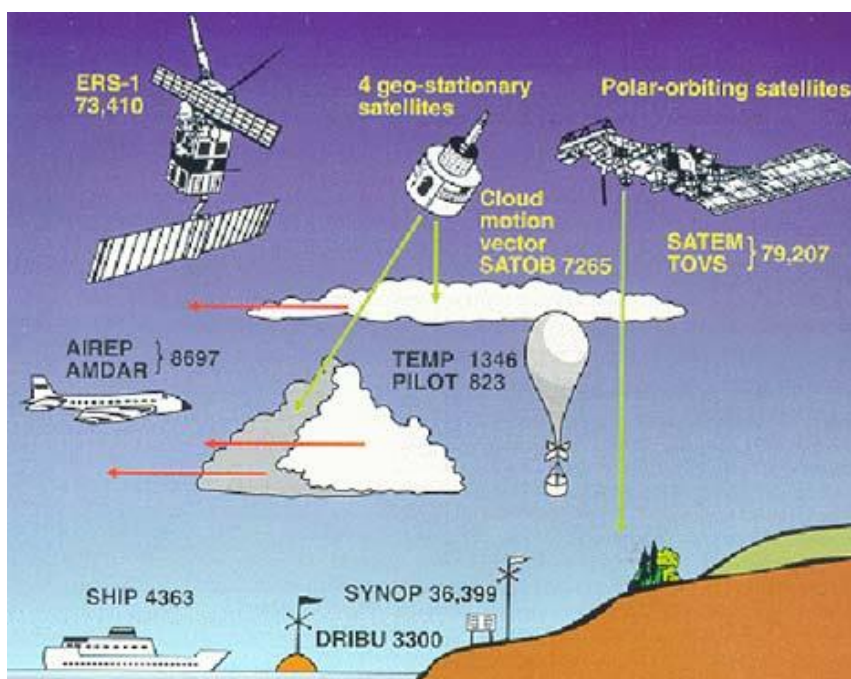


Figura 2. 6: Tipos de observaciones meteorológicas

Además de la información provista por los modelos numéricos, en El Salvador se cuenta con información de campo generada por las estaciones aeronáuticas, observadores locales, estaciones telemétricas automáticas, imágenes de satélite e imágenes de radar.

2.2.5 TIPOS DE MODELOS NUMÉRICOS

Una vez repasados los principales aspectos de los modelos numéricos de predicción del tiempo es necesario centrarse en aspectos más prácticos de la implementación de dichos principios en modelos concretos.

A pesar de la evolución que ha tenido la predicción numérica del tiempo, no existe una solución única para resolver el problema; pues se deben plantear claramente las limitaciones y prioridades. La limitación más importante es el tiempo máximo que debe mediar entre el comienzo y el final de la predicción que queremos hacer, dicho tiempo debe ser menor que del 1% del tiempo de predicción (Media hora para 48 horas de predicción). Dependiendo de la potencia de cálculo del ordenador del que se dispone, esto limita la cantidad de puntos de rejilla que puede incluir el área de integración y, por tanto, la resolución espacial de nuestro modelo.

En cuanto a las prioridades, se debe fijar un horizonte de predicción, es decir, si se va a hacer predicciones a escala global o en un área limitada y si van a ser a corto plazo (48 horas), medio plazo (Hasta 10 días), estacionales (Hasta 6 meses) o climáticas (Más de 10 años). Ambos aspectos no son independientes sino que están relacionados entre sí. Atendiendo a las distintas prioridades que se acaban de manejar, se pondrán algunos ejemplos de los tipos de modelos que se encuentran en la investigación meteorológica y en algunos centros operativos.

2.2.5.1 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL O GLOBALES

Se trata de modelos cuya prioridad es la simulación del flujo de circulación general atmosférico, por tanto su rejilla de integración debe cubrir toda la Tierra. Se usan

principalmente para predicciones a medio plazo, estacionales y climáticas ya que no necesitan ningún dato externo (Salvo las condiciones iniciales) para realizar las predicciones. Esta es una gran ventaja; sin embargo su principal desventaja es que necesitan una gran infraestructura de mantenimiento. Para tener una resolución horizontal adecuada (Entre 50 y 80 Km) el número de nodos de la rejilla de integración es tan grande que se necesitan ordenadores muy potentes para poder integrarlos.

Además puesto que la cobertura es global necesitan observaciones de todo el planeta para su asimilación. Como la cobertura de las observaciones es muy desigual, los resultados de dichos modelos dependen mucho de la zona del globo que se considere.

2.2.5.1.1 EL MODELO DEL ECMWF

⁴El Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (Conocido por sus siglas inglesas ECMWF) se creó en 1975 como un consorcio de países europeos que acordaron unir sus esfuerzos para crear un centro especializado en la predicción a medio plazo (Entre 2 y 10 días). Las primeras predicciones operativas se produjeron en 1979. En la Figura 2.7 puede verse un mapa con los países miembros del centro.

Es un centro mixto de investigación y operaciones y su modelo está considerado como el mejor del mundo, por encima de todos los modelos de predicción operativos de los Estados Unidos. Actualmente el modelo operativo es un modelo espectral con resolución T511 y 60 niveles en la vertical, produce predicciones operativas hasta 10 días y se usa también experimentalmente para predicciones mensuales y estacionales (6 meses).

⁴ El Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (conocido por sus siglas inglesas ECMWF; <http://www.ecmwf.int>)

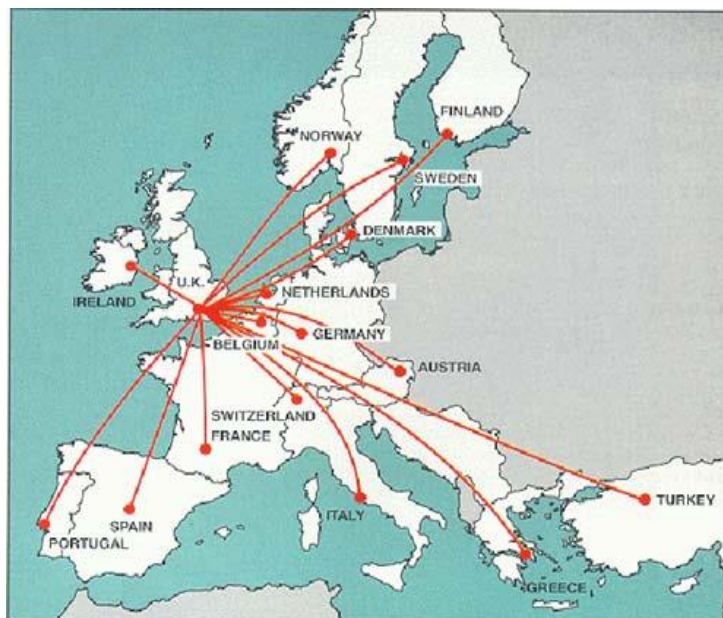


Figura 2. 7: Países miembros del centro europeo de predicción a plazo medio

2.2.5.1.2 GLOBAL FORECAST SYSTEM (GFS).⁵

El Global Forecast System desarrollado por National Centers for Environmental Prediction (NCEP) USA, es un sistema global de predicción numérica del tiempo que corre cuatro veces al día y produce pronósticos de hasta 16 días.

Básicamente el modelo corre en dos partes. La primera de ellas tiene alta resolución y pronostica 192 horas (8 días), mientras que la segunda parte corre desde la hora 192 hasta la 384 (16 días) en baja resolución. La resolución del modelo varía en cada parte del modelo: horizontalmente la resolución varía desde 35 a 70 km, verticalmente divide la atmósfera en 64 capas y temporalmente produce pronósticos cada 3 horas en las primeras 192 horas y cada 12 horas hasta las 384 horas. El GFS es un modelo

⁵ Tesis de Maestría, Integración de modelos numéricos de predicción meteorológica en sistemas de alerta temprana a emergencias, Lic. Rafael Andrés Lighezzolo, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, pags. 23-24,2014.

acoplado compuesto por cuatro modelos separados, un modelo de atmósfera, un modelo de océano, un modelo de tierra/suelo y un modelo de hielo marino. Estos cuatro modelos trabajan juntos para proveer mayor precisión en la representación de las condiciones climáticas.

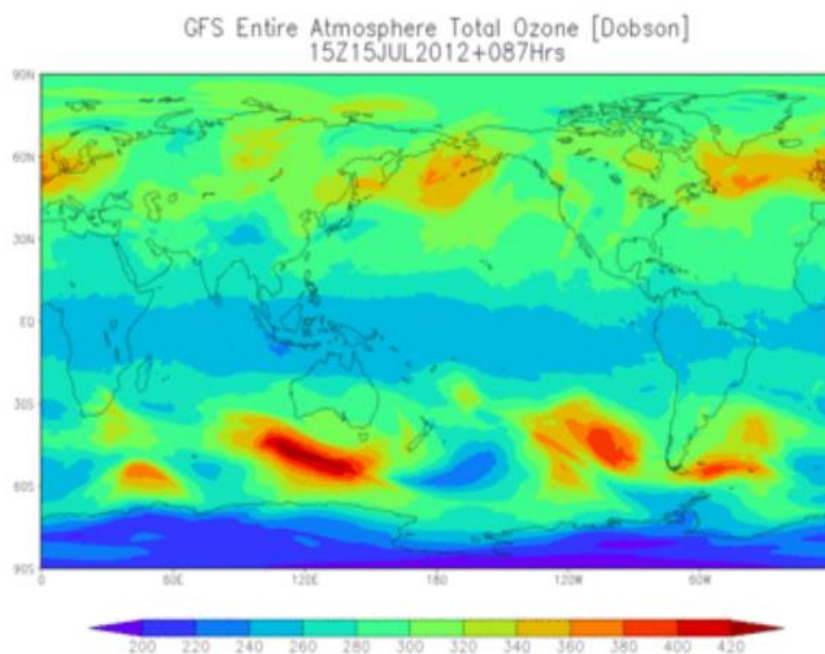
Para inicializar los pronósticos (Análisis) el GFS utiliza información que proviene del Global Data Assimilation System (GDAS). El GDAS es el componente operativo del Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) el cual es un sistema de asimilación de datos variacional tridimensional (3D-VAR).

El GSF puede asimilar los siguientes tipos de observaciones:

- Observaciones en superficies.
- Radiosondeos.
- Reportes de aeronaves.
- Observaciones de boyas.
- Observaciones de radar.
- Observaciones de satélites.

El modelo global GFS es el único que tiene sus datos de salida disponibles libremente en un dominio público en internet, de esta manera es la base de las compañías privadas relativas al pronóstico del tiempo como por ejemplo, AccuWeather, The Weather Channel, Wright-Weather, MeteoGroup, Weather Underground, SoaringMeteo, entre otras. Debido a las ventajas que se describieron anteriormente, para la presente tesis se utilizará este modelo global como entrada para los LAMs utilizados.

Un ejemplo del producto final puede verse en la Figura 2.8 donde se muestra un mapa global del ozono total para toda la atmósfera.



An animated image of GFS simulated total atmospheric ozone concentration, forecast from 00 UTC on July 12, 2012, to July 16, 2012, at 00 UTC—a four day forecast—in three hourly intervals. The lowest concentrations of ozone on the planet reside over the Antarctic during this period. This image was produced with the Grid Analysis and Display System (GrADS) and ImageMagick.

Figura 2. 8: Mapa global del ozono total generado por GFS

Fuente: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

En El Salvador, la información referente a pronóstico meteorológico, es recibida por el Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM) a través del uso de la data del modelo GFS (Global Forecast System: Sistema Global de Predicción).

2.2.5.2 MODELOS DE ÁREA LIMITADA (LAM).

Ya se comentó que, cuando el área de interés de la predicción o de los estudios que se quieren realizar con un modelo es muy concreta y el alcance corto, puede ahorrarse mucho tiempo de ordenador operando el modelo numérico sobre una rejilla plana que cubre solo esa área. Se tienen así los llamados "Modelos de Área Limitada" (Siglas inglesas LAM). Necesitan de las predicciones de un modelo cuya rejilla incluya su rejilla de integración para usarlas como condiciones de contorno y tienen una limitación en el alcance de las predicciones que pueden hacerse con ellos. (Ver Figura 2.9).

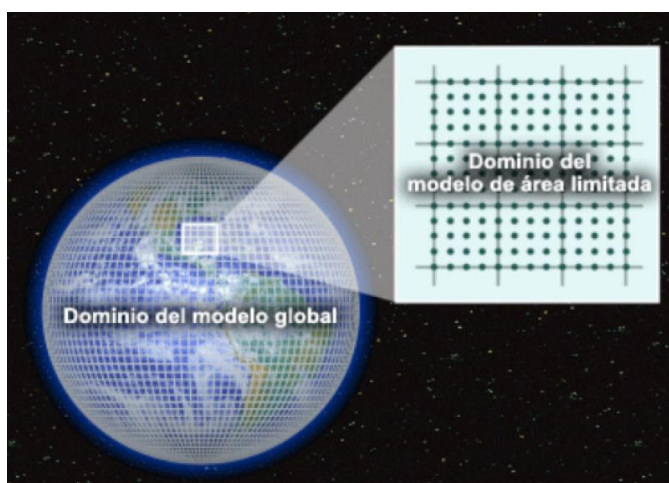


Figura 2. 9: Representación gráfica de un modelo regional anidado en un modelo global

Normalmente estos modelos se usan para predicciones a corto plazo (Hasta 48 horas de predicción) y tienen la ventaja de que poseen mayor resolución horizontal que los modelos globales típicos.

2.2.5.2.1 EL MODELO HIRLAM.

Hirlam⁶ es un consorcio de países europeos cuya finalidad es el desarrollo de un modelo de área limitada que pueda ser usado operativamente por los países miembros. Actualmente el proyecto lo forman los servicios meteorológicos de Suecia, Noruega, Finlandia, Dinamarca, Islandia, Irlanda, Holanda, España y Francia (Que es un miembro asociado).

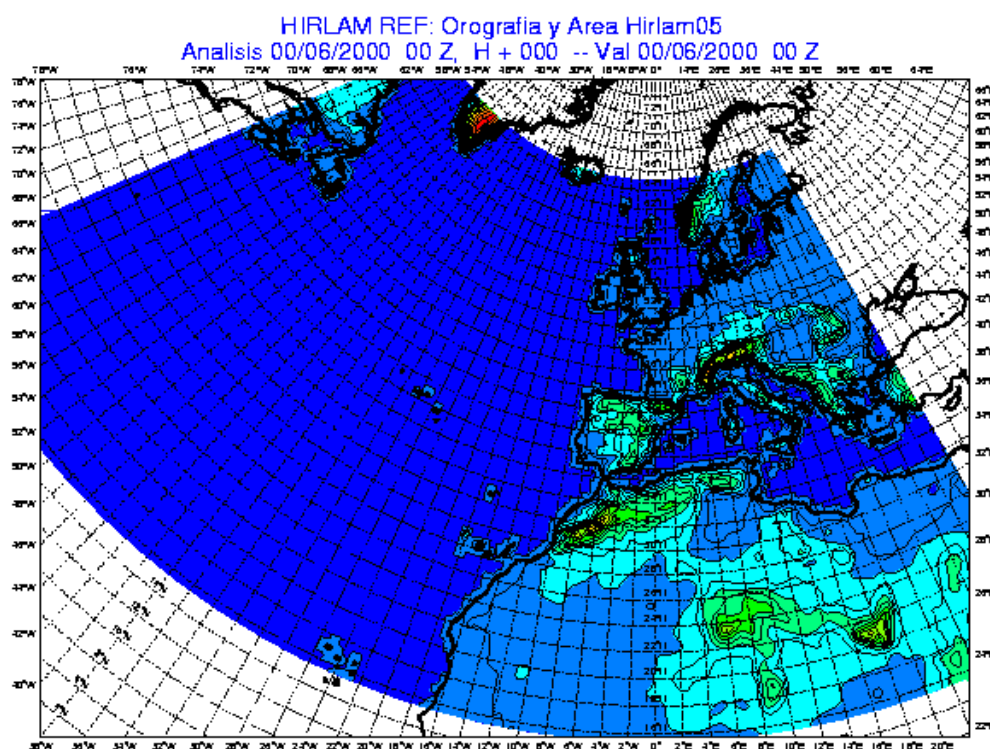


Figura 2. 10: Área de integración del modelo Hirlam del INM

El Instituto Nacional de Meteorología de España forma parte del proyecto desde 1992 y usa el modelo Hirlam como modelo operativo de predicción numérica del tiempo a corto plazo desde 1995.

⁶ Hirlam (<http://www.knmi.nl/hirlam>)

En la Figura 2.10 se presenta el área de integración del modelo Hirlam del INM, como puede verse aunque el área de interés del INM es España, el Sur de Europa y el Norte de África, el área del modelo se extiende desde las costas de Norteamérica hasta Turquía.

2.2.5.3 MODELOS DE MESOESCALA

A medida que aumenta la resolución horizontal de los modelos mejoran las predicciones que se obtienen con ellos. Sin embargo esta mejora lineal tiene un límite. Efectivamente a partir de los 5 Kms., empiezan a no ser válidas algunas de las hipótesis básicas con las que se han construido los modelos numéricos de corto y medio plazo.

La más importante de ellas es la hipótesis hidrostática cuya validez es muy discutible por encima de la resolución antes mencionada. Aquéllos modelos diseñados especialmente para funcionar a resoluciones por encima de los 5 Km. se conocen con el nombre de "Modelos de Mesoescala". Se trata de modelos con unos esquemas de parametrizaciones físicas muy sofisticados pero que tienen como contrapartida que necesitan una enorme capacidad de cálculo.

2.2.5.3.1 EL MM5

El modelo de mesoescala MM5⁷, se trata de un modelo desarrollado por la Universidad de Pensilvania (PSU) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos. Es un modelo de puntos de rejilla y de área limitada e incluye varias opciones particulares para cada uno de los esquemas de parametrizaciones físicas.

⁷ Modelo MM5: <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>

Es un modelo de investigación aunque algunas instituciones como el servicio meteorológico de la Fuerza Aérea de Estados Unidos (AFWA) lo usan para sus predicciones operativas.

En El Salvador, ya se ha utilizado el MM5, con el objetivo de mejorar y apoyar el pronóstico meteorológico de la región, con una resolución de 12 a 20 Km.

2.2.5.3.2 EL WRF

Uno de los modelos mesoescalares utilizado por MeteoGroup es el WRF Weather Research and Forecasting Model (Modelo de Investigación y Predicción Meteorológica).

WRF es un modelo de fuente abierta. En zonas de especial relieve topográfico y condiciones meteorológicas extremas, tales como vientos de alta velocidad o convección extrema, el WRF goza de una clara ventaja sobre los demás modelos, dado que tiene en cuenta los efectos de la superficie terrestre sobre el tiempo atmosférico.

El WRF es sumamente flexible y tiene multitud de aplicaciones. No es únicamente una herramienta para las predicciones meteorológicas, sino que también puede utilizarse para realizar estudios de pronóstico retrospectivo, estudios sobre la calidad del aire, modelización climática regional y previsión meteorológica a corto plazo.

Por ser este modelo el objeto del presente Trabajo de Graduación, este modelo será descrito con más detalle en el Capítulo III.

2.2.5.4 CUADRO COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES MODELOS METEOROLÓGICOS DESCRITOS ANTERIORME

CLASIFICACION	MODELOS				
	ECMWF	GFS	HIRLAM	MM5	WRF
Globales	✓	✓			
Área Limitada			✓	✓	✓
Meso escalares				✓	✓
CARACTERISTICAS					
Interfaz Grafica	✓	✓	✓	✓	✓
Escala	Macro-Escala (25 km)	Macro-Escala (35-70 km)	Macro-Escala Micro-Escala (50-150 km)	Micro-Escala (1-20 km)	Micro-Escala (4-36 km)
Ecuaciones básicas				Compresible	Compresible
Pronósticos:					
• Precipitación	✓	✓	✓		✓
• Temperatura	✓	✓	✓	✓	✓
• Viento	✓	✓	✓	✓	✓
• Punto de Rocío		✓		✓	✓
• Humedad		✓		✓	✓
• Presión	✓	✓	✓	✓	✓
• Nubosidad		✓	✓	✓	✓
Alcance máximo de predicción	10 días	16 días	48 hr	72 hr	72 hr
Entorno	Linux	Linux	Linux, Windows	Linux	Linux, Windows
Gratuito	x	✓	x	✓	✓

✓ Afirmación x Negación

Tabla 2. 2: Cuadro comparativo de los modelos meteorológicos
Fuente: Elaborada por Grupo de Tesis

ELECCIÓN DE MODELOS METEOROLOGICOS GLOBAL Y MESOESCALAR

Evaluando los 2 modelos globales presentados, el ECMWF y el GFS, según las necesidades que se tienen para llevar a cabo la modelación, el GFS, tiene un mayor alcance de predicción de 16 días, a diferencia del ECMWF, que solo tiene un alcance máximo de 10 días. Ambos modelos pueden trabajar bajo entorno Linux; el modelo GFS proporciona pronósticos de mayor cantidad de variables, además, es un software gratuito que puede ser obtenido fácilmente para su utilización.

Se requiere de datos iniciales, que corresponden al comportamiento de la atmosfera en el instante “Ahora”, para introducirlos al posterior modelo de mesoescala, para obtener la evolución de la atmosfera en un tiempo futuro determinado; los datos son extraídos del modelo global correspondiente a las fechas de los eventos que se pretende simular, y debido a las virtudes del modelo global GFS, es el modelo seleccionado.

HIRLAM es un modelo de área limitada, que tiene muchas bondades que sobresalen de otros modelos, pero solo y exclusivamente puede ser utilizado por los países miembros del consorcio que lo desarrollaron, por lo tanto, no puede ser utilizado en El Salvador.

Los modelos MM5 y WRF, se clasifican como mesoescalares, con características similares, pronostican muchas variables, a excepción del MM5 no pronostica precipitaciones, a diferencia del WRF que si puede ejecutar un pronóstico de lluvia, indispensable para la simulación que se pretende elaborar, es ésta una de las razones por la que se optó por el modelo mesoescalar WRF para utilizarlo y obtener pronósticos de lluvia de eventos de corta y larga duración; además, este modelo trabaja bajo 2 entornos Windows y Linux y es un programa que puede adquirirse fácilmente, puesto que es gratuito.

2.3 TEORÍA DEL MODELO HIDROLÓGICO

2.3.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de un sistema real complejo, bajo forma física o matemática; el sistema físico real generalmente se refiere a una cuenca hidrográfica, y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico; y un sistema matemático se refiere generalmente a la aplicación de ecuaciones por lo que es necesario tener conocimiento de entradas al sistema y salidas a partir del sistema, las salidas de los modelos hidrológicos varía dependiendo del objetivo del modelo.

2.3.2 DESCRIPCIÓN FÍSICA

Entender el ciclo hidrológico implica entender la “Respuesta” de la cuenca de manera continua en el tiempo y en el espacio, por este motivo la base de la modelación hidrológica es la modelación de cuenca.

La capacidad predictiva de un modelo hidrológico depende de cómo los construimos y cómo los aplicamos, y la calidad de las predicciones es generalmente consistente con la calidad de nuestra comprensión del sistema y del modelo que lo representa. Esto significa que no existe el modelo perfecto aplicable a todas las cuencas del planeta: cada cuenca tiene condiciones muy particulares de clima, geografía, geología, etc. que incrementan la importancia de un proceso por sobre otros y condicionan la estructura del modelo.

Los modelos hidrológicos son entonces representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir del cual podemos estudiar la relación causa-efecto de una

cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca. Además nos permite simular y predecir el comportamiento hidrológico de los procesos físicos en la cuenca. Generalmente los modelos hidrológicos se basan sobre los sistemas existentes y difieren en términos de su manejo y la magnitud de los componentes que integran el proceso hidrológico.

2.3.3 HISTORIA Y FUNDAMENTOS DEL MODELAJE HIDROLÓGICO

Se puede definir el término "Modelo" como una representación simplificada del mundo real, que permite tener una idea de lo que ocurre bajo ciertas circunstancias. En el caso de los modelos hidrológicos se intenta representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio, generalmente una cuenca, que transforman una precipitación en escorrentía.

Podría decirse que la historia del modelaje se remonta al año 1851 cuando el ingeniero irlandés Thomas James Mulvaney publicó la famosa ecuación conocida como el método racional:

$$Q_p = CIA$$

Ecuación 2. 7: Método racional

Dónde:

- Q_p Caudal pico del hidrograma.
- C: Coeficiente empírico.
- I: Intensidad de la lluvia.
- A: Área de la cuenca.

El coeficiente C es el que representa los procesos de escurrimiento y tránsito que ocurren en la cuenca, y varía de cuenca en cuenca, según las condiciones físicas, de humedad antes del evento y de la distribución temporal de la lluvia. Para obtener su valor, es decir, calibrar el modelo, se comparan los valores medidos de caudales pico para un evento con los obtenidos por la ecuación hasta obtener un coeficiente que genere la mínima diferencia.

Este es un modelo muy sencillo, pero ofrece solo una idea de lo que podría esperarse ante un evento, además que solamente modela caudales pico. A partir de entonces distintos investigadores presentaron sus modelos en un intento de llegar a una mejor aproximación a los valores reales y mayor detalle de los distintos procesos. Por ejemplo el año 1921 Ross plantea la división de la cuenca en base a tiempos de viaje, buscando tomar en cuenta la distribución espacial de los parámetros y/o procesos hidrológicos. A partir de esta idea Clark formula en el año 1945 el procedimiento del hidrograma unitario instantáneo.

Con la invención de la computadora en la década de 1950 se introdujo una poderosa herramienta que permite realizar cálculos de forma automatizada y rápida.

Desde entonces los modelos hidrológicos evolucionaron aprovechando las ventajas que le ofrecen las computadoras, de allí que a medida que la capacidad de almacenamiento y velocidad de las computadoras aumentaba los modelos hidrológicos se hicieron más complejos con el fin de representar de la mejor manera posible los distintos procesos hidrológicos.

Uno de los primeros y más conocidos modelos es el Standford Watershed Model formulado por Linsley y Crawford en la Universidad de Standford en el año 1966, en base al cual se desarrolló más adelante el Hydrocomp Simulation Program, HSP, que incorporaba el modelaje del transporte de sedimentos y la calidad del agua, y este se convirtió en el año 1976 en el modelo Hydrologic Simulation Program — Fortran, HSPF, que trabaja en entorno MS-DOS y que es gratuito. Más tarde se desarrollaron en base a este modelo varias versiones que permiten una mejor interacción aprovechando el entorno Windows. Una de estas versiones es el WinHSPF distribuido como parte del BASINS de la US Environmental Protection Agency, EPA.

Así como este modelo, una gran cantidad de otros modelos fueron desarrollados y actualizados a lo largo de estas cinco décadas de modelaje hidrológico asistido por computadora, como:

- HEC- HMS del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos
- TETIS de la Universidad Politécnica de Valencia
- SWAT del Servicio de Investigación de Agricultura de los Estados Unidos, entre otros.

El objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Un modelo de sistema hidrológico es una representación simplificada de fenómenos que ocurren durante el ciclo hidrológico, tales como precipitación, evaporación, escorrentía y otros⁸; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas del sistema. Cada uno de los procesos:

⁸ Chow et al., 1994, HIDROLOGÍA APLICADA, pag. 8-12.

precipitación, evaporación, escorrentía y otros, pueden ser analizado separadamente y sus resultados ser combinados de acuerdo a la interacción entre los mismos.

En la estructura central del modelo está el concepto de transformación del sistema. Las entradas y las salidas pueden expresarse como funciones del tiempo, $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente, en donde t pertenece al rango de tiempo en consideración. El sistema realiza una transformación de la entrada en la salida representada por:

$$Q(t) = \Omega I(t)$$

Ecuación 2. 8: Ecuación de transformación del sistema

La cual se conoce como ecuación de transformación del sistema. El símbolo Ω es una función de transferencia entre la entrada y la salida. Si esta relación puede representarse mediante una ecuación algebraica, entonces Ω es un operador algebraico. Por ejemplo, si:

$$Q(t) = CI(t)$$

Ecuación 2. 9: Operador algebraico de transformación del sistema

Donde C es una constante, entonces la función de transferencia es el operador:

$$\Omega = \frac{Q(t)}{I(t)} = C$$

Ecuación 2. 10: Función de transferencia igual a la constante

Si la transformación es descrita por una ecuación diferencial, entonces la función de transferencia sirve como un operador diferencial.

Por ejemplo, un embalse lineal tiene su almacenamiento S relacionado con su caudal de salida Q a través de:

$$S = kQ$$

Ecuación 2. 11: Ecuación para un embalse lineal

Donde k es una constante que tiene dimensiones de tiempo. Por consiguiente, la tasa de cambio del almacenamiento con respecto al tiempo dS/dt es igual a la diferencia entre la entrada y la salida

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t)$$

Ecuación 2. 12: Tasa de cambio del almacenamiento con respecto al tiempo

Eliminando S en las dos ecuaciones y reordenando:

$$k \frac{dQ}{dt} + Q(t) = I(t)$$

Ecuación 2. 13: Simplificación

Luego:

$$\Omega = \frac{Q(t)}{I(t)} = \frac{1}{1 + kD}$$

Ecuación 2. 14: Ecuación del modelo

Donde D es el operador diferencial d/dt . Si la ecuación de transformación ha sido determinada y puede ser resuelta, se encuentra la salida como función de la entrada. La ecuación 2.14 describe un sistema lineal si k es una constante. Si k es una función de la entrada I o de la salida Q entonces, la ecuación 2.14 describe un sistema no lineal que es más difícil de solucionar (Chow et al., 1994).

2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos matemáticos (Chow et al., 1994).

2.3.4.1 MODELOS FÍSICOS

Los modelos físicos son representaciones físicas simplificadas del prototipo. Se tienen:

- ✓ **Modelos a escala**, representan el sistema en una escala reducida, tal como un modelo hidráulico del vertedero de una presa.
- ✓ **Modelos análogos**⁹, dos fenómenos físicos de diferente naturaleza se llaman analógicos si las ecuaciones que los describen se expresan con formas matemáticas idénticas, aún cuando los símbolos de cada una de ella tengan significado diferente. Es común que uno de los dos fenómenos sea de menor dificultad, por lo que éste se emplea para resolver el otro. Como la analogía entre flujo laminar y flujo turbulento.

2.3.4.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos representan el sistema hidrológico en forma abstracta, mediante un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo, y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias que no tienen un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo. Estas variables están descritas a través de distribuciones de probabilidad. En la Figura 2. 11 se presenta la clasificación de los modelos hidrológicos según Ven Te Chow.

⁹http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/modelacionhidraulica/modelacion_hidraulica.html

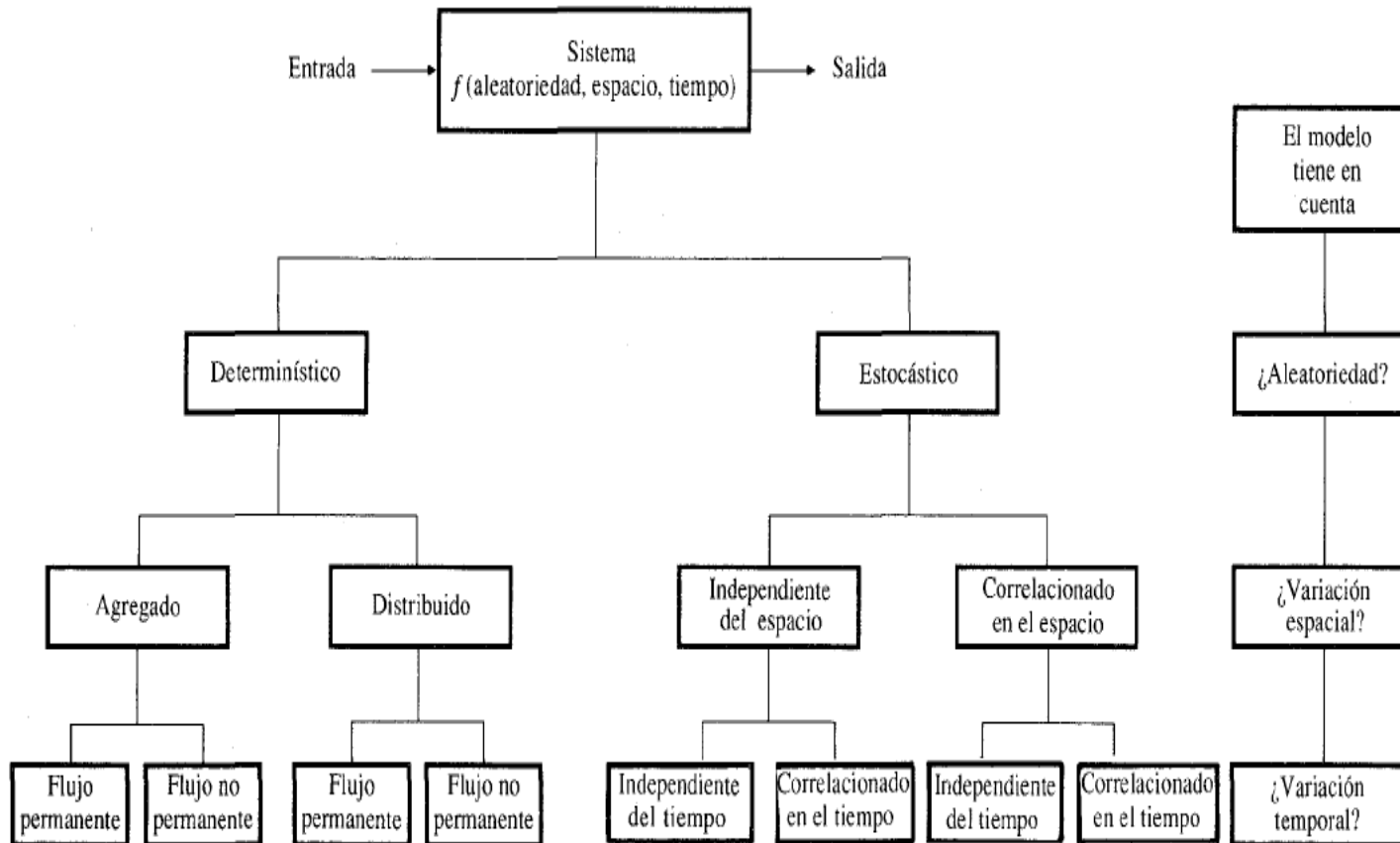


Figura 2. 11: Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo con la forma, la aleatoriedad y la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.

Fuente: Hidrológica aplicada, VEN TE CHOW 1994.

TIPOS DE MODELOS MATEMÁTICOS.

Desde el punto de vista de la aleatoriedad los modelos hidrológicos se clasifican en: determinísticos y estocásticos.

► DETERMINÍSTICO

No considera aleatoriedad; una entrada dada produce siempre una misma salida ver Figura 2. 12. Los modelos determinísticos hacen pronósticos.

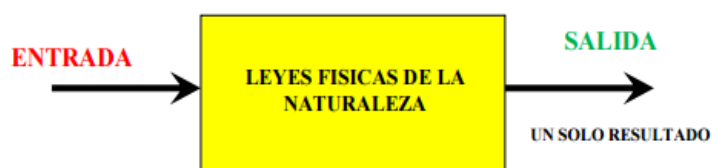


Figura 2. 12: MODELO DETERMINÍSTICO.

Fuente: Modelación hidrológica estocástica: desarrollo de un modelo de generación sintética de series temporales, por Dr. Francisco Pablo García Gutiérrez.

En un modelo determinístico¹⁰ no se considera la probabilidad de ocurrencia de valores y de variables implicadas en el proceso, pero si se considera que tal proceso esté representado (implícita o explícitamente) por una hipótesis, según la cual, el conocimiento de las leyes de la evolución de los fenómenos físicos y de su estado actual, permiten prevenir rigurosamente sus estados futuros en la física clásica.

► ESTOCÁSTICOS

Tienen salidas que son por lo menos parcialmente aleatorias. Los modelos estocásticos hacen predicciones, si la variación aleatoria es grande, un modelo estocástico es el más adecuado, porque la salida real podría ser bastante diferente del valor único producido por un modelo determinístico. En los modelos estocásticos y

¹⁰http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/clase_ii_met_el_ciclo_hidrologico_y_modelos_def.pdf

cuyos resultados están marcados por la aleatoriedad de los eventos, pueden tener varios resultados, marcados a su vez, por las probabilidades de ocurrencia de los eventos. Los N resultados o series generadas tienen igual probabilidad de presentarse en el futuro, y una de ellas, no se sabe cuál, será probablemente parecida a la serie real futura (Ver Figura 2. 13). Ejemplo de ellos son el diseño de centrales hidroeléctricas.

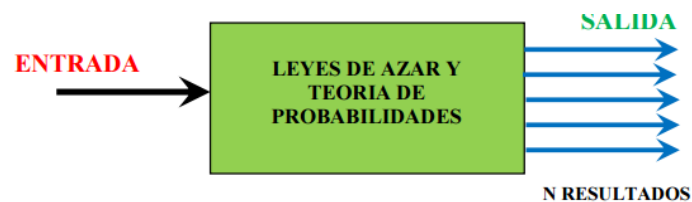


Figura 2. 13: MODELO ESTOCÁSTICO.

Fuente: Modelación hidrológica estocástica: desarrollo de un modelo de generación sintética de series temporales, por Dr. Francisco Pablo García Gutiérrez.

Desde el punto de vista de la variación espacial los modelos hidrológicos pueden clasificarse en:

- **Determinísticos**
 - ✓ **Agregados:** En la naturaleza las características físicas de una cuenca no son homogéneas, en los modelos agregados los parámetros asociados a estas características no cambian espacialmente dentro de la cuenca, es decir, se supone un valor típico o medio para toda la cuenca.
 - ✓ **Distribuidos:** Estos modelos permiten variar el valor de sus parámetros espacialmente dentro de la cuenca. Es por esta razón que el nivel de detalle es mucho mayor, pero también requiere una mayor cantidad y calidad de datos que crece a medida que se aumenta el nivel de detalle. Se divide la cuenca en celdas, en las que se simulan los diferentes procesos hidrológicos.

Actualmente se toman en cuenta los modelos semidistribuidos.

- ✓ **Semidistribuidos:** Son aquellos que permiten una cierta variabilidad de la lluvia y de los parámetros de los submodelos que lo componen, mediante la división de la cuenca en multitud de pequeñas subcuencas con lluvia y parámetros constantes en cada uno de ellos.

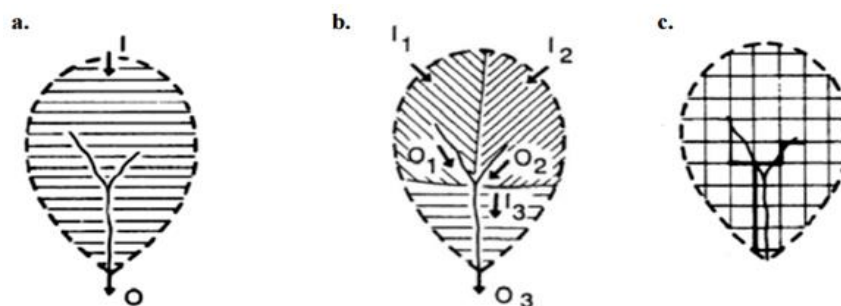


Figura 2. 14: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. a) Modelo agregado. b) Modelo Semidistribuido. c) Modelo Distribuido
Fuente: Chong-yu Xu, 2002.

- **Estocásticos**

- ✓ **Independientes del espacio y correlacionados en él,** de acuerdo con la influencia que las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos del espacio.

Desde el punto de vista de la variación en el tiempo los modelos hidrológicos pueden clasificarse en:

- **Estocásticos**

- ✓ **Independiente del tiempo** representa una secuencia de eventos hidrológicos que no influyen entre sí.
- ✓ **Correlacionado en el tiempo** representa una secuencia en la cual el evento siguiente está parcialmente influido por el evento anterior y posiblemente con otros.

- **Determinísticos**

- ✓ **Flujo permanente** la tasa de flujo no cambia con el tiempo.
- ✓ **Flujo no permanente.**

Otros textos como como el del Dr. Víctor M. Ponce, describe los modelos según la continuidad del tiempo como:

- **Evento:** este tipo de modelos están diseñados para simular eventos lluvia-escorrentía aislados. Su objetivo es evaluar la escorrentía por lo que se centra en el cálculo del escurrimiento e infiltración. Estos modelos no calculan almacenamiento de humedad entre eventos, por lo que no sirven para simular periodos secos (Sin lluvia).
- **Continuos:** los modelos continuos realizan la simulación de periodos de tiempo largos, donde existen varios eventos separados por periodos secos. Estos modelos toman en cuenta todos los procesos del flujo superficial, sub-superficial y subterráneo. Los modelos continuos simulan también la evapotranspiración y otros procesos que intervienen en la dinámica del almacenamiento de humedad en el suelo durante periodos secos.

Adicional a los modelos anteriores el Dr. Víctor M. Ponce de la Universidad Estatal de San Diego, California, USA, describe los modelos:

- **Conceptuales:** son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.

- **Paramétricos** (Empírico): como su nombre indica, el énfasis de los modelos paramétricos está en los parámetros empíricos en los que está basada la solución. Usualmente, un modelo paramétrico consiste en una ecuación algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico. Un modelo empírico se basa en relaciones estadísticamente significativas entre variables.

2.3.5 ETAPAS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA¹¹

2.3.5.1 REVISIÓN Y ESTUDIO DEL MODELO

En esta etapa se debe estudiar el funcionamiento del modelo. Para esto se necesita ver como esta conceptualizado e identificar y estudiar los métodos hidráulicos, hidrológicos y matemáticos que utiliza y sus respectivos parámetros. De esta manera se podrán identificar sus debilidades y fortalezas, así como la información que este necesita y el formato en que se requiere esta.

2.3.5.2 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN NECESARIA

Una vez que se determina cual es la información que necesita el modelo para realizar la simulación, esta debe ser recopilada y preparada.

2.3.5.3 INTRODUCCIÓN DE DATOS AL MODELO

El modelo puede contar con un interfaz de introducción de datos manual o simplemente puede ser que se alimente por medio de un archivo preparado por el usuario con un formato específico.

¹¹ Tesis de maestría: APLICACION DE MODELOS HIDROLOGICOS CON FINES DE PREVENCION DE DESASTRES EN CUENCAS DE VENEZUELA, por Jose Marfa Eterovie Ruiz

2.3.5.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo es el proceso por el cual los valores de los parámetros del modelo son identificados para su uso en una aplicación particular. Consiste en el uso de datos de lluvia- escurrimiento y un procedimiento para identificar los parámetros del modelo que provean la mejor concordancia entre los flujos simulados y los registrados. La identificación de los parámetros puede ser llevada a cabo manualmente, por prueba y error, o automáticamente utilizando técnicas de optimización matemática. La calibración implica la existencia de datos de caudales, para cuencas no medidas, la calibración simplemente no es posible. La importancia de la calibración varía con el tipo de modelo. Por ejemplo, un modelo determinístico es observado generalmente como altamente predictivo, por ello, debería requerir poca o ninguna calibración. En la práctica, sin embargo, los modelos determinísticos no son enteramente determinísticos, y por ello, un cierto modo de calibración es necesario frecuentemente.

2.3.5.5 VALIDACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

Es el proceso que permite establecer la confiabilidad de predicción del modelo. La validación consiste en realizar la simulación de la cuenca en estudio, utilizando los parámetros establecidos con la calibración, con datos de precipitación y caudal de un periodo diferente al usado para la calibración. Una vez realizada la simulación se realiza el análisis de comparación entre el hidrograma simulado y el observado. Si las pruebas aplicadas arrojan resultados similares a los obtenidos en la calibración, entonces la calibración del modelo se considera validada y el modelo queda listo para ser usado.

2.3.6 METODOS DE CÁLCULO¹²

Para cada cálculo necesario en la modelación hidrológica e hidráulica existen muchos métodos disponibles. A continuación se presenta una descripción de los métodos más utilizados para calcular la precipitación efectiva y para la simulación de escurrimiento y escorrentía.

2.3.6.1 PRECIPITACIÓN EFECTIVA

De la lluvia total precipitada en una tormenta sobre una cuenca, solo una fracción escurre por las vertientes hasta llegar al río. Esta reducción del volumen se debe a que una parte es interceptada por las hojas de árboles, techos, y otros, evaporándose más tarde; otra parte llega al suelo pero se infiltra o se acumula en irregularidades del terreno formando charcos que se evaporan. El agua que finalmente llega hasta el río se llama precipitación efectiva.

Algunos de los métodos más utilizados para calcular la precipitación efectiva son los siguientes:

- Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de EUA (SCS)
- Método del Índice de Infiltración Constante y Perdida Inicial. (initial and constant-rate loss model)
- Modelo de Infiltración de Green y Ampt

¹² Tesis de maestría: APLICACION DE MODELOS HIDROLOGICOS CON FINES DE PREVENCIÓN DE DESASTRES EN CUENCAS DE VENEZUELA, por Jose Marfa Eterovie Ruiz

2.3.6.1.1 METODO DEL NUMERO DE CURVA (CN) DEL SCS

El método del número de curva no sirve para modelación continua, solo para la modelación de eventos.

Este método estima la precipitación efectiva como una función de la precipitación, cobertura, uso de suelo, humedad antecedente, condición hidrológica y tipo de suelo.

2.3.6.1.2 METODO DEL INDICE DE INFILTRACION CONSTANTE Y PERDIDA INICIAL

Es método del índice constante e inicial de perdida es apto para la modelación de evento, mas no para la modelación continua.

Este método considera que el índice máximo de infiltración potencial (f_c) es constante a lo largo de todo el evento. Entonces cuando la precipitación media en un intervalo de tiempo dado supera el valor de f_c empieza el escurrimiento. También se consideran las pérdidas iniciales (I_a) por intercepción y almacenamiento en depresiones. Mientras la precipitación acumulada no exceda las pérdidas iniciales no habrá escurrimiento.

2.3.6.1.3 MODELO DE INFILTRACIÓN DE GREEN Y AMPT

Este es un método no apto para simulación continua, solo para eventos aislados. El modelo de infiltración de Green y Ampt (Mein y Larson 1973) está basado en la ecuación de Richards (Richards 1931, Eagleson 1970), la cual simula la infiltración de la lluvia a través del perfil de suelo y su capacidad de infiltración.

La ecuación de Richards se deriva de combinar la ley de Darcy para flujo no saturado con la ley de conservación de masas. Toma como hipótesis un suelo ideal homogéneo e infinito. Este método considera que la infiltración se distribuye uniformemente en el suelo.

2.3.6.2 MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO

Los métodos descritos en este punto simulan el proceso de transformación de la precipitación efectiva en escurrimiento. Existen dos tipos de modelos, los empíricos y los conceptuales. Los primeros son más simples y establecen una relación entre el escurrimiento y la precipitación efectiva sin entrar en mucho detalle en los procesos internos. Los modelos conceptuales intentan representar, dentro de lo posible, los procesos físicos que gobiernan el movimiento del agua proveniente de la precipitación efectiva sobre la superficie de la cuenca.

Los métodos más utilizados en cada categoría son los siguientes:

- Modelos empíricos:
 - * Hidrograma Unitario Triangular del SCS
 - * Hidrograma Unitario de Snyder
 - * Hidrograma Unitario de Clark
- Modelos Conceptuales:
 - * Onda cinemática

2.3.6.2.1 MODELOS EMPÍRICOS

El hidrograma unitario (HU) fue propuesto originalmente por Sherman (1932). Se define como el hidrograma de esorrentía directa resultante de una unidad de precipitación efectiva distribuida uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante durante un tiempo determinado. Se basa en el concepto de linealidad del proceso de escurrimiento, el cual supone que el escurrimiento producido por una precipitación mayor o menor a una unidad, no es más que un múltiplo del hidrograma de una unidad de lluvia.

→ **Hidrograma Unitario Triangular del SCS**

Mockus desarrolló un hidrograma unitario sintético de forma triangular, que lo usa el SCS (Soil Conservation Service), la cual a pesar de su simplicidad proporciona los parámetros fundamentales del hidrograma: caudal punta, tiempo base y el tiempo en que se produce la punta. El hidrograma triangular del SCS está basado en hidrogramas unitarios desarrollados para un gran número de pequeñas cuencas rurales de Estados Unidos.

→ **Hidrograma Unitario de Snyder**

Snyder (1938), basado en varias cuencas de los Estados Unidos con áreas que oscilaban entre 30 y 30.000 Km², Snyder encontró relaciones sintéticas para algunas características de un hidrograma estándar que sirven para calcular el hidrograma requerido.

→ **Hidrograma Unitario de Clark**

Este modelo deriva el hidrograma unitario de una cuenca al representar explícitamente dos procesos críticos en la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía:

- El movimiento de la precipitación efectiva desde su origen hasta la salida de la cuenca a través del drenaje de esta.
- La reducción de la magnitud de la descarga mientras la precipitación efectiva se almacena en toda la cuenca.

2.3.6.2.2 MODELOS CONCEPTUALES

→ Modelo de la onda cinemática

Este modelo representa la cuenca como un canal abierto, donde la entrada de flujo es la precipitación efectiva, y el hidrograma es calculado al resolver ecuaciones que simulan un canal en régimen no permanente.

Esta metodología puede ser utilizada para modelar primero las vertientes del cauce, donde la entrada lateral es la precipitación efectiva, y luego el cauce donde la entrada lateral es la salida de las vertientes. De esta manera se obtiene el hidrograma generado por la precipitación efectiva.

2.3.7 DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS MODELOS COMPUTACIONALES HIDROLÓGICOS

2.3.7.1 HEC-HMS

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), es un software de libre distribución, perteneciente al Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos, es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (Caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa. Está diseñado de forma tal que puede realizar la simulación desde grandes cuencas hasta pequeñas redes de drenaje urbano.

El programa incluye una interfaz gráfica para el usuario (GUI) que le permite introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados, y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión.

2.3.7.2 HBV

El modelo HBV fue desarrollado por el profesor Bergström para el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI por sus siglas en sueco) el año 1972. Su nombre proviene de la abreviación en sueco de la división del SMHI que lo desarrolló: la oficina hidrológica de balance de agua (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning).

El HBV es un modelo precipitación-escorrentía que puede ser clasificado como conceptual, continuo y semi-distribuido, ya que divide la cuenca en subcuencas para realizar la simulación. De acuerdo a la experiencia adquirida por los desarrolladores del modelo, el HBV se comporta mejor en cuencas con una superficie de 100 Km² o más, ya que para pequeñas cuencas se tuvieron resultados muy variados. Este modelo cuenta con una interfaz gráfica de usuario programada bajo entorno Windows.

2.3.7.3 MIKE SHE

El modelo MIKE SHE, un producto comercial del Instituto Hidráulico Danés (Danish Hydraulic Institute; DHI), está basado en el Sistema Hidrológico Europeo (Système Hydrologique Européen; SHE). El modelo SHE es un sistema determinístico, espacialmente distribuido y de base física. Fue desarrollado a partir de la constatación de que los modelos de escorrentía y precipitación convencionales no son adecuados para muchos problemas hidrológicos urgentes, especialmente aquellos relacionados

con el impacto de la actividad del hombre, los cambios en los usos del suelo y la calidad del agua.¹³ Tiene una interfaz de usuario avanzada independiente para cada modelo, con cálculos de balance de agua de todos los procesos hidrológicos. Los procesos hidrológicos y los métodos numéricos pueden combinarse dependiendo de los requisitos de la aplicación y de la disponibilidad de datos.

2.3.7.4 SWAT

Uno de los grandes modelos hidrológicos integrado a un SIG es el SWAT¹⁴ que fue desarrollado por la USDA (Departamento de Agricultura de EEUU) y por la Universidad de Texas A&M (TAMU). Está basado físicamente y es un modelo de tipo continuo en el tiempo, es decir para procesos hidrológicos a largo plazo. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua y sedimento, entre otros, son modelados directamente por SWAT. SWAT trabaja solo en ambiente windows.

¹³ <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5346/1/TESIS.pdf>

¹⁴ <http://latingeomatica.blogspot.com/2014/10/vision-general-sobre-el-software-swat.html>

CUADRO COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS DESCRITOS ANTERIORMENTE

	MODELO			
	HEC-HMS	HBV	MIKE SHE	SWAT
CLASIFICACIÓN				
Continuo	✓	✓	✓	✓
Evento	✓			
Distribuido	✓		✓	
Semidistribuido	✓	✓		✓
Agregado		✓		
CARACTERÍSTICAS				
Interfaz grafica	✓	✓	✓	✓
Vinculación con SIG	✓	✓	✓	✓
Complejidad del modelo	▼	●	?	▲
Información requerida	▼	●	▲	▲
Manejo de datos	▼	●	▲	▲
Entorno	Windows, Linux, Solaris	Windows	Windows	Windows
Gratuito	✓	✗	✗	✓
Open Source	✓	✗	✗	✓

✓ Afirmación ✗ Negación ▼ Bajo ● Intermedio ▲ Alto ? No se tiene

Tabla 2. 3: Comparación de modelos hidrológicos.
Fuentes: Desarrollado por el grupo de tesis.

ELECCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

En la Tabla 2. 3 se muestra la clasificación y las características principales de los softwares hidrológicos que se eligieron para ser descritos; la clasificación se basa en la investigación realizada en el presente trabajo de tesis y las características que se tomaron en cuenta, son las que el grupo de tesis considera importantes para la elección del software hidrológico, como lo es:

- Interfaz gráfica: si es amigable y entendible al usuario.
- Vinculación con los SIG: los SIG (Sistema de información Geográfica) son clave importante en todo software hidrológico ya que, son un sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada¹⁵.
- Complejidad del modelo: investigando revista especializadas, tesis, libros y páginas de internet se logró determinar qué tan complejo es la utilización del software, según las experiencias comentadas en dichos artículos. Además se considera que cantidad de información existe sobre el software, si existen manuales y tutoriales libres para su estudio.
- Información requerida: que tan amplia es la información que requiere el software.
- Manejo de datos: la facilidad de que alguna institución proporcione los datos requeridos.
- Open Source: se refiere al poder modificar la fuente del programa sin restricciones de licencia, ya que muchas empresas de software encierran su código, ocultándolo y restringiéndose los derechos a sí misma¹⁶.

¹⁵ https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_informaci%C3%B3n_geogr%C3%A1fica

¹⁶ https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%B3digo_abierto

Por los resultados obtenidos en Tabla 2. 3, se descartan los softwares HBV y MIKE SHE, ya que se ha decidido utilizar un software gratuito que tenga popularidad a nivel mundial por su buen desempeño y que cumpla con lo que se debe obtener en este trabajo; esta decisión se toma porque se pretende que el presente trabajo de graduación quede como una base para una posterior realización de un sistema de alerta temprana para las comunidades aledañas a la cuenca del río Sucio.

Con lo expuesto anteriormente nos concentramos en los softwares HEC- HMS y SWAT ya que son gratuitos y son de código abierto lo cual permite adaptar al modelo a ciertas circunstancias para la cual el modelo no este diseñado. De igual manera se toma en cuenta que para este trabajo nos interesa los modelos de clasificación tipo evento, ya que no se considerarán períodos secos entre evento y se requiere determinar caudal máximo para eventos extremos.

El modelo HEC-HMS, tiene una evidente ventaja respecto al modelo SWAT, puesto que puede realizar simulaciones para un evento aislado y de proceso continuo, tiene una interfaz gráfica amigable para el usuario, permite una fácil integración con los SIG mediante la extensión GeoHMS.

También puede ejecutarse bajo tres entornos diferentes, dependiendo del ordenador del que se disponga; el modelo es de baja complejidad, lo que quiere decir que se han encontrado manuales de usuarios y diferentes tutoriales para poder aprender a utilizar el software y requiere de poca información para su ejecución. Por todas estas bondades del HEC-HMS, se decidió optar utilizarlo para el desarrollo de este Trabajo de Graduación.

2.4 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

2.4.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de alerta temprana tienen como principal objetivo, como su propio nombre lo indica, alertar a la población de posibles amenazas naturales; con el tiempo suficiente para poder tomar las medidas de protección necesarias y así disminuir o evitar pérdidas, tanto humanas, como económicas.

En el presente capítulo se aborda la descripción de lo que son los sistemas de alerta temprana, su importancia para la sociedad, quienes son los encargados de difundir la noticia a la comunidad; con tiempo de anticipación para ésta pueda actuar correctamente.

2.4.2 DEFINICIÓN

Es el conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta que sea oportuna y significativa, con el fin de permitir que las personas, las comunidades y las organizaciones amenazadas por un tipo de peligro, se preparen y actúen de forma apropiada y con suficiente tiempo de anticipación para reducir la posibilidad de que se produzcan pérdidas o daños.

2.4.3 LINEAMIENTOS GENERALES

1. Los SAT¹⁷ son parte del proceso de PREPARACIÓN ante desastres; se implementan en un territorio determinado (Comunidad, distrito, provincia, región, cuenca, microcuenca, subcuenca).

¹⁷ SAT: Sistema de Alerta Temprana

2. Los SAT deben ser complementados con en el Plan de Contingencia ante Desastres o Plan de Operaciones de Emergencia de los gobiernos locales y regionales y deben considerar:

- Organización de las Plataformas de Defensa Civil y brigadas de voluntarios.
- Organización en grupos de trabajo: Primera Respuesta, Asistencia Humanitaria y Rehabilitación.
- Funcionamiento y Equipamiento del Centro de Operaciones de Emergencia.
- Fortalecimiento de capacidades de los Grupos de Trabajo para manejo de emergencias.
- Diseño e implementación de SAT de acuerdo a los peligros
- Diseño e implementación de medios para la información pública y sensibilización
- Simulacros y Simulaciones

3. Se pueden diseñar e implementar SAT ante diferentes tipos de peligros:

- Sistema de Alerta Temprana ante Deslizamientos
- Sistema de Alerta Temprana ante Inundaciones
- Sistema de Alerta Temprana ante Eventos Fríos
- Sistema de Alerta Temprana ante Tsunamis
- Sistema de Alerta Temprana ante Erupciones Volcánicas
- Sistemas de Alerta Temprana ante Incendios

4. En las zonas donde se hallan varios peligros, los SAT deben ser Multi peligros a fin que se optimicen los recursos existentes o por implementarse.
5. Los Centros de Operaciones de Emergencia (COE) de los gobiernos locales y regionales son la instancia de coordinación entre los diferentes componentes del SAT y entre los diferentes niveles territoriales (locales, regionales y nacionales).
6. Asegurar que los SAT cumplan con estándares de calidad mínimos, así como que sean sostenibles y con funcionamiento permanente mediante la asignación de recursos materiales y humanos a través de presupuestos institucionales.

2.4.4 COMPONENTES DE UN SAT

Los SAT tienen 4 componentes

- a) Conocimiento de los Riesgos,
- b) Seguimiento y Alerta,
- c) Difusión y Comunicación
- d) Capacidad de Respuesta

Debe contemplar:

- a) Gobernabilidad y arreglos institucionales eficaces.
- b) Enfoque de amenazas múltiples
- c) Participación de las comunidades locales.
- d) Consideración de la diversidad cultural

2.4.4.1 CONOCIMIENTO DEL RIESGO

- ¿Se conocen los peligros y vulnerabilidades?
- ¿La Población conoce ampliamente los mapas e información de los riesgos?

Para su identificación se debe tomar en cuenta:

- Estudios, mapas de peligro elaborados previamente.
- El conocimiento de los peligros es responsabilidad de los organismos técnico científicos, y puede ser ejecutado por algunas Universidades.

2.4.4.2 MONITOREO Y SEGUIMIENTO



Figura 2. 15: Monitoreo de posibles eventos

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>



Figura 2. 16: Monitoreo de posibles eventos

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>

- ¿Qué parámetros se utilizan para el seguimiento?
 - ✓ Corresponde a la vigilancia y monitoreo en forma permanente de los peligros y cuando estos se manifiesten.

- ¿Los pronósticos tienen base sólida científica?
 - ✓ La información generada en los puntos de vigilancia se registra en el Centro de Operación de Emergencia (COE) del gobierno local.

- ¿Se emite alertas precisas, lo entiende la población?
 - ✓ Firma de Convenio con organismos científicos a fin de que estos apoyen la instalación y se fortalezcan las capacidades locales.

Cuando comienza la temporada de lluvias se monitorea, los niveles o caudales de los ríos; se vigila las quebradas para alertar cuando estas se dinamicen, en invierno, se debe vigilar los deslizamientos previamente identificados.

En El Salvador, dentro del Nivel Operativo del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN, se encuentra la Dirección General del Observatorio Ambiental, cuyo objetivo es apoyar la gestión ambiental y la gestión de riesgos mediante la observación sistemática de las amenazas relacionadas con fenómenos meteorológicos y de otra índole, puesto que, mediante la instrumentación y protocolos apropiados, se lleva a cabo el monitoreo continuo y sistemático de los procesos y fenómenos meteorológicos.

2.4.4.2.1 NIVELES DE MANIFESTACIÓN DEL PELIGRO

Se recomienda establecer cuatro niveles de manifestación del peligro: ALERTA VERDE, AMARILLA, NARANJA Y ROJA.

<p>ALERTA VERDE</p>	<p>Estado que se declarará cuando se tenga la presencia de un fenómeno natural que por su evaluación, comportamiento y características se percibe, dentro de un nivel de probabilidad con un grado de amenaza previa, de la cual pueden considerarse ciertas medidas de protección predeterminadas y específicas que aseguren una condición cautelosa y de vigilancia por la probable y cercana ocurrencia de un evento adverso.</p>
<p>ALERTA AMARILLA</p>	<p>Se declarará cuando se manifieste el desarrollo de una amenaza, en la cual se encuentre aumentada en un 50% la probabilidad de afectación por evento natural, logrando dar un mayor grado de certeza del peligro que pueda existir</p>
<p>ALERTA NARANJA</p>	<p>Se activará ante el hecho que se intensifique el riesgo, logrando alcanzar un nivel crítico mayor del 75% teniendo la posibilidad de producir serios daños hasta lograr que se necesite la participación de los grupos de búsqueda y rescate así como lo que se estipula en el plan.</p>
<p>ALERTA ROJA</p>	<p>Se activará cuando la magnitud generalizada del evento ha logrado impactar de manera severa hasta producir una situación de desastre, debiéndose aplicar la atención de acuerdo al Plan de Emergencia, disponiendo en un momento dado de todos los recursos que el estado necesite para dar seguridad y salvaguardar a la población que se encuentre afectada o en situación de riesgo.</p>

2.4.4.3 DIFUSION Y COMUNICACIONES



Figura 2. 17: Difusión de la amenaza

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>

- ¿Cómo reciben la alerta las personas en peligro?
- ¿La población comprende las alertas y los riesgos?
- ¿La información de las alertas es clara y útil?

Las autoridades en coordinación con la población adoptaran un sistema de alerta, para que sus integrantes se protejan ante la manifestación de los peligros que afectan su territorio, y activen su Plan Operativo de Emergencia.

En un primer momento se sugiere implementar el sistema con equipos o elementos que existen en las comunidades como silbatos, el sonar de campanadas o adquirir altavoces, que serán de uso exclusivo de brigadistas previamente capacitados y que conozcan la cadena de mando.

Se debe establecer un sistema de comunicaciones de tal manera que todas las comunidades integrantes de este sistema, se enlacen en una red de comunicaciones con un nivel de gradualidad, con todas las autoridades locales y regionales.



Figura 2. 19: Equipos básicos para los SAT

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>

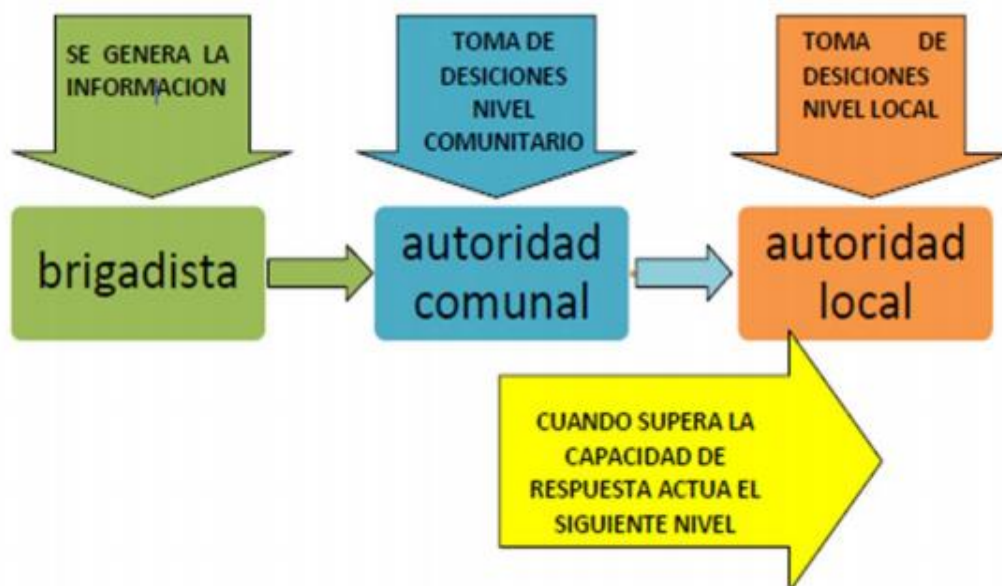


Figura 2. 18: Flujo de las comunicaciones

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>

2.4.4.3.1 CAPACIDAD DE RESPUESTA

- ¿Los planes de operaciones están al día y han sido aprobados?
 - ¿Se hace uso de la capacidad y el conocimiento local?
 - ¿Está la población preparada y lista para reaccionar ante los avisos?
- ✓ La participación de los dirigentes y población de las comunidades y en la zona urbana es importante, ya que son los actores principales en los Sistemas de Alerta Temprana.
- ✓ La Población participa:
- * Dando información de desastres ocurridos en el pasado y como éstos se produjeron.
 - * En el monitoreo de peligros, como observadores o vigías, ya sea haciendo lecturas de pluviómetros, escalas hidrométricas o limnímetros y lectura del movimiento de masas.
 - * Como operadores de radio o enlaces

Los Centro de Operaciones de Emergencia de los Gobiernos locales son articuladores de los diferentes Componentes de los SAT.



Figura 2. 20: Centro de operadores de emergencia

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>

Los sistemas de alerta temprana requieren del entrenamiento y capacitación de personal para una efectiva función de los mismos. La capacitación en gestión de riesgos, y en sistemas de alerta temprana, es un proceso sistemático de facilitación y aprendizaje, apegado a la realidad local y adaptado a nivel de los participantes, que procura la adquisición de conocimientos, el desarrollo de capacidades y la promoción de un cambio de actitudes hacia la cultura de la gestión de riesgos.

2.4.4.3.2 CAPACITACIÓN

Para asegurar su efectividad, el proceso de preparación/capacitación se dirige a tres tipos de usuarios-beneficiarios

- A nivel Municipal: técnicos, líderes, profesionales, miembros de la plataforma de Defensa Civil y personal municipal.
- A nivel Comunitario: directivos y líderes comunitarios incluyendo miembros de base.
- Voluntarios y brigadistas del SAT: Personas voluntarias que radican en sitios-comunidades seleccionadas para la funcionalidad del sistema de alerta.

2.4.4.3.3 SEÑALIZACIÓN

El Plan de Operaciones de emergencia contempla el diseño de las rutas de evacuación de las poblaciones a intervenir, debiendo proponerse la señalización, con la finalidad de orientar a la población hacia las zonas seguras para cada evento. También se debe señalar los peligros o zonas de peligros, con carácter preventivo con la finalidad de evitar el acceso a la zona o para tomar precauciones.

La señalización puede ser realizada en muros, pisos o estructuras, o en paneles; sus dimensiones no están normadas, debiendo respetar los colores y figuras, es importante que estas señales sean de fácil acceso y tenga buena visibilidad.



Figura 2. 21: Señalización para rutas de evacuación

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>

2.4.4.3.4 SIMULACROS

Los simulacros sirven para familiarizar a la población en las formas y maneras de actuar ante una situación de emergencia dentro de los condicionantes físicos y ambientales que cada zona presenta. Así, se prueba la idoneidad y la suficiencia de los equipos humanos y de los medios, se detecta errores u omisiones del Plan Operativo de Emergencia (POE) y el entrenamiento de la población.



Figura 2. 22: Simulacros

Fuente: <http://www.indeci.gob.pe/sectores/reuniones/2013/06%20jun/INDECI%20-%20SAT.pdf>

Un SAT se instala con la finalidad de:

- Alertar a la gente para que apliquen las medidas de preparación y se refugien en sitios seguros.
- Informar a los equipos de Defensa Civil / las fuerzas de respuesta (Policía, bomberos, equipos de rescate, etc.) para que se preparen y coordinen.
- Informar a los servicios básicos (Centros de salud, servicios de agua, de electricidad, de circulación) para que organicen medidas de preparación.
- Alertar los centros comerciales y a las empresas para que adopten las medidas de preparación.

2.4.5 EVENTOS ATMOSFERICOS QUE AFECTAN A EL SALVADOR

El Salvador sobresale por presentar 88.7% de su territorio como área de riesgo y con la más alta tasa porcentual de población bajo riesgo (95.4%), según CEPAL. Históricamente, el país ha estado sometido a situaciones de emergencia debido a la actividad hidro-meteorológica.

El territorio salvadoreño, por su ubicación geográfica y condiciones geológicas, está sometido a peligros naturales de todo tipo, destacando los terremotos y las inundaciones, debido fundamentalmente a su frecuencia y extensión a lo largo de todo el país, deben citarse los deslizamientos y movimientos de ladera.

Estos procesos naturales, reflejo de la dinámica del medio geológico y de la evolución natural de la superficie terrestre, suponen riesgos cuando interaccionan con las actividades y construcciones humanas. Las consecuencias de los peligros naturales como la deforestación, desertificación, cambios de usos del suelo, modificación de los regímenes de los cauces naturales de los ríos.

2.4.5.1 MOVIMIENTOS DE LADERA DESENCADENADOS POR PRECIPITACION

La ocurrencia de movimientos de ladera está relacionada con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones y con el régimen climático, debiendo considerarse:

- La respuesta del terreno frente a precipitaciones intensas durante horas (Tormentas) o días
- La respuesta estacional (Épocas secas y épocas de lluvia a lo largo del año)
- La respuesta plurianual (Ciclos húmedos y de sequía).

La cantidad de agua que se infiltra al terreno depende de la intensidad y duración de las lluvias, tamaño de la cuenca de aporte, contenido previo de agua en el terreno (Posición del nivel freático y grado de saturación), de su permeabilidad y de la topografía y otras características de la ladera, como la presencia de vegetación. Dependiendo de estos factores, se generan estados de desequilibrio que pueden dar lugar a la inestabilidad de las laderas. Las precipitaciones intensas durante horas o días pueden desencadenar movimientos superficiales, como los deslizamientos que afectan a materiales alterados y a suelos, y desprendimientos de bloques rocosos.

La falta de vegetación en las laderas, la presencia de materiales sueltos y la existencia previa de inestabilidades juegan un papel fundamental por la mayor capacidad de escorrentía y movilización de los materiales

Algunos indicadores de la amenaza por deslizamiento:

- Aparecen grietas en las paredes o el piso. Se presentan daños en tuberías, alcantarillados, etc. Puertas y ventanas se atascan o quedan trabadas. Las paredes exteriores, caminos o escaleras comienzan a separarse de las construcciones.
- Las cercas, muros de retención, gaviones y árboles se inclinan o desplazan hacia abajo.
- Poco a poco aparecen grietas amplias sobre la tierra.
- Aparecen o desaparecen nacimientos de agua o manantiales.
- Periodos de lluvias intensas o continuas.
- Se escuchan ruidos raros que pueden indicar el principio de un deslizamiento.

2.4.5.2 RIESGOS POR INUNDACIONES

Las inundaciones constituyen una amenaza para una parte importante del territorio nacional. Una inundación se define como un aumento anormal del nivel de agua de un río, lago o del nivel del mar, provocando un desbordamiento en áreas que habitualmente se encuentran secas.

En El Salvador, además de las características topográficas y morfológicas proclives a las inundaciones que presentan determinadas áreas (Como las zonas de planicies costeras y aluviales situadas junto a laderas), las inundaciones se asocian a los siguientes eventos:

- Lluvias torrenciales, que por su intensidad y duración no logran ser evacuadas por las quebradas y los ríos, generándose desbordamientos.
- Lluvias provocadas por los temporales, los cuales son consecuencia de fenómenos meteorológicos como los ciclones tropicales (Huracanes). En estos casos, las lluvias son prolongadas y continuas, aumentando el nivel del agua y saturando el suelo, y produciendo el desbordamiento de las aguas.
- Marejadas, que dan lugar al aumento del nivel medio del mar por efecto directo de un huracán, de un tsunami o por una marea extraordinaria.
- Vaciado del agua almacenada en embalses.

2.4.6 SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES (SNET)

En octubre del 2001, después del efecto devastador que tuvieron los terremotos, se crea el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET): actualmente conocida como Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) , institución adscrita al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), unificando los servicios técnicos de Geología, Meteorología e Hidrología y creando el nuevo Servicio de Gestión de Riesgos, en la línea de reforzar la seguridad del desarrollo social y económico que la sociedad salvadoreña necesita.

El SNET (DGOA) tiene como objeto contribuir a la prevención y reducción del riesgo de desastre, así como promover y facilitar el diseño y la implementación de políticas, estrategias, programas y proyectos que favorezcan y estimulen la concreción de las intervenciones que las organizaciones, instituciones y colectividades nacionales

públicas y privadas realicen en función del desarrollo, y en el cual, la reducción y control de riesgo constituyan actividades transversales e integradoras de los diferentes procesos que tienen por objetivo garantizar que las iniciativas económicas y sociales de desarrollo impulsados en la sociedad, se den en las condiciones permisibles de seguridad y que las acciones de respuesta ante un desastre, promuevan el mismo desarrollo transformando en lo posible las causas que le dieron origen.

2.4.6.1 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIONES, EXPERIENCIA EN EL SALVADOR POR EL (DGOA)

En El Salvador han existido sistemas de alertas tempranas ante inundaciones desde 1998 se destaca el proyecto “Vulnerabilidad en El Salvador” que gracias al patrocinio de la Organización de Estados Americanos y la Oficina de Asuntos Humanitarios de la Unión Europea OEA / ECHO desarrollo un estudio completo en la parte baja de la cuenca del río Lempa.

A raíz del Huracán Mitch en 1998, fue que se reconoció abiertamente la vulnerabilidad del país ante amenazas hidrometeorológicas y la carencia de un adecuado monitoreo de estas amenazas, por lo que la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional, (USAID) financió a través del Proyecto de Reconstrucción Post Huracán Mitch, la instalación del Sistema de Pronóstico y Alerta Temprana del Río Lempa, y el Sistema de Alerta en el río Grande de San Miguel (ALERT System). La implementación del sistema comprendió la construcción de una red de estaciones hidrometeorológicas en tiempo real. Se incluyó la instalación del equipo, software y modelos hidrológicos para la creación del Centro de Pronóstico Hidrológico (CPH) en la División de Meteorología e Hidrología del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Algunos de estos sistemas se instalaron en: Zacatecoluca, Departamento de La Paz (FEMICA), Tacuba y San Francisco Menéndez en Ahuachapán (GTZ-MARLAH). Adicionalmente, se instaló un Sistema de Pronóstico de Crecidas en Tiempo Real en la Cuenca del Río Lempa y fue equipado el Centro de Pronóstico Hidrometeorológico (CPHM), y diseñada y creada una nueva institución gubernamental para el monitoreo y análisis de amenazas naturales y el análisis de vulnerabilidades, con el enfoque de la Gestión del Riesgo.

En la actualidad El Salvador cuenta con 20 Sistemas de Alerta Temprana para la amenaza de inundaciones:

1. Río Paz	11. Municipio de Santa Isabel Ishuatán
2. Río Jiboa	12. Área Metropolitana De San Salvador
3. Río Lempa	13. Municipio de La Libertad
4. Río Grande San Miguel	14. Estero de Jaltepeque
5. Río Goascorán	15. Municipio de Zacatecoluca.
6. Zona Ahuachapán Norte	16. Área Metropolitana de San Salvador (AMSS: Municipios de Ilopango, San Martín, Ciudad Delgado, Apopa, Tonacatepeque).
7. Zona Ahuachapán Sur	17. Municipio de Cojutepeque.
8. Río grande de Sonsonate o Sensunapán.	18. Río Huiza.
9. Municipio de Metapán	19. Río Titihuapa.
10. Municipio de Citalá	20. Río Acahuapa

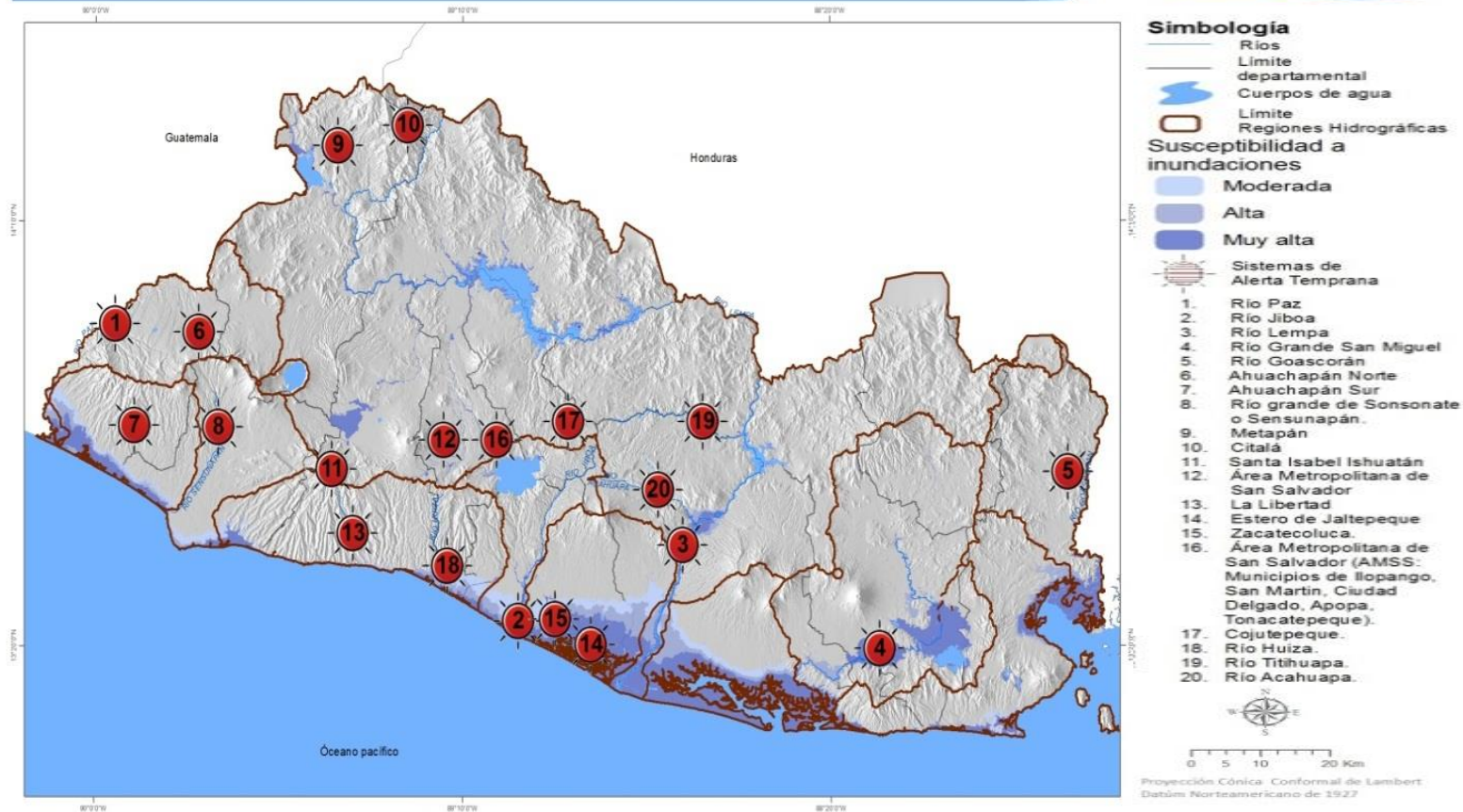
Tabla 2. 4: Sistemas de Alerta Temprana para Inundaciones en El Salvador
Fuente: MARN

A continuación se muestran en la siguiente figura los sistemas de alerta temprana con los que se cuenta actualmente en el país.

Sistemas de Alerta Temprana (SATs) Inundaciones

El Salvador

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES
GOBIERNO DE
EL SALVADOR
UNIDOS CRECEMOS TODOS



El MARN no garantiza la exactitud de los límites territoriales administrativos presentes en este mapa. Es solamente para usos de planificación y ubicación

Figura 2. 23: Ubicación de los SATs de inundaciones en El Salvador
Fuente: MARN

De acuerdo a la experiencia de trabajo del MARN en los Sistema de Alerta Temprana para inundaciones comprende seis elementos fundamentales:

1. Monitoreo en tiempo real.
2. Conocimiento de la Zona geográfica o cuenca.
3. Herramientas de modelación hidrológicas.
4. Análisis hidrológicos: conocimiento de umbrales de nivel, tiempos de tránsito de la onda de crecida, umbrales de precipitación.
5. Estructuración de la Red Observadores Locales.
6. Flujo de Comunicación oportuno entre las instituciones que desarrollan el SAT y los beneficiarios del mismo, para establecer las diferentes etapas de alertamiento. (Monitoreo, aviso y alerta).

Para el monitoreo de la amenaza por inundaciones el MARN posee toda una red de estaciones para la vigilancia hidrológica, ubicadas en los puntos estratégicos de las principales cuencas del país, tal como lo muestra la siguiente imagen:

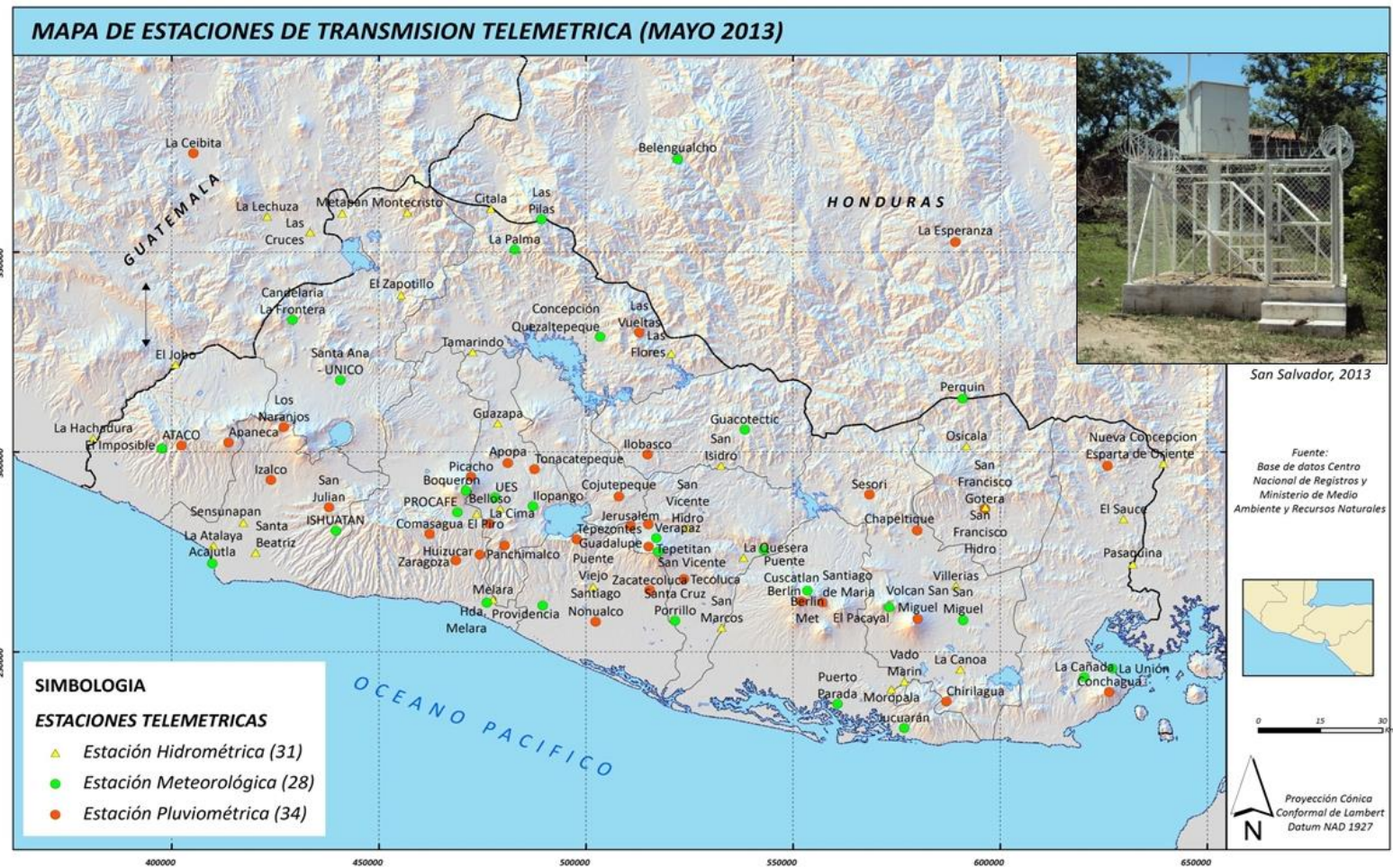


Figura 2. 24: Estaciones de monitoreo de vigilancia hidrológica
Fuente: MARN

La Red de Observadores Locales está compuesta por un grupo de ciudadanos, que viven o trabajan en zonas identificadas como de alto riesgo, formado por representantes institucionales, líderes locales y comunales, promotores sociales, representantes del Sistema Nacional de Protección Civil y representantes del MARN, así como de toda aquella persona que libre y voluntariamente exprese su deseo de colaboración por la seguridad y desarrollo de su zona de habitación, por medio de la tarea del manejo integral de su riesgo a través del monitoreo de variables físicas, en coordinación con el MARN; actualmente se cuenta con aproximadamente 600 Observadores locales a nivel nacional, los cuales apoyan el funcionamiento de todos el Sistema de Alerta Temprana, siendo estos los contactos locales responsables de mantener comunicación directa y oportuna sobre la vigilancia y monitoreo en las zonas susceptibles a inundaciones, deslizamientos, eventos volcánicos, entre otros.

2.4.6.2 DISEÑO CONCEPTUAL DE LOS SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA DEL DGOA.

El diseño de las redes de monitoreo hidrometeorológico, de los tipos de pronóstico hidrológico, de las redes locales de observación y de monitoreo, así como el procedimiento de emergencia depende básicamente de las siguientes condiciones:

- Comportamiento de la cuenca ante inundaciones (tamaño y forma del drenaje)
- Tipo de evento (Temporal o precipitación convectiva)
- Características socio-organizativas de los actores locales.
- Experiencia y conocimientos previos de los actores locales en el manejo y gestión de sus riesgos.
- Iniciativa de los gobiernos locales.

Adicionalmente, el tipo de pronóstico hidrológico dependerá de las redes de monitoreo instaladas, del tipo de monitoreo generado por los observadores locales y de las capacidades a nivel de pronóstico de la DGOA.

Pueden realizarse varios tipos de pronóstico:

- a) Lluvia Pronosticada – Nivel (Caudal pronosticado):** A través de pronóstico cuantitativo de la lluvia y de utilización de un modelo hidrometeorológico. En El Salvador se recomienda para cuencas grandes (Lempa, Grande de San Miguel), proporciona mayor tiempo de alerta, aunque pueden existir más posibilidades de incerteza. No tiene mucha aplicación en las lluvias rápidas y convectivas. Su aplicación es más acertada para temporales.
- b) Nivel (caudal) observado – Nivel (Caudal Pronosticado):** Se basa en la utilización de estaciones hidrométricas telemétricas en la cuenca alta y baja, y a través de relaciones matemáticas, a través del dato de nivel observado aguas arriba se puede pronosticar el tiempo de llegada y el pico de la crecida aguas abajo. La certeza es mayor, y el tiempo de alerta se reduce. Su utilidad mayor es para eventos como temporales, pero su utilización para eventos rápidos es básica, ya que puede alertar acerca de crecidas instantáneas a pobladores que realizan actividades dentro del río (Pesca, baño, extracción de áridos, lavado de ropa)
- c) Lluvia observada y/o pronosticada – Nivel (Caudal) Pronosticado:** Se basa en los datos de precipitación precedente (contenido de humedad del suelo), observada y pronosticada. A través de un modelo hidrometeorológico que pronostica nivel o caudal en base a lo que está sucediendo en la cuenca alta. Su aplicación es muy útil en cuencas de respuesta rápida (FLASH FLOODS).

La selección del modelo hidrológico, no es única. Los modelos hidrológicos utilizados en cuencas medianas y grandes, pueden no ser muy útiles por su diseño y características en los modelos de cuencas pequeñas, y aún más, en las cuencas de respuesta rápida y cuencas urbanas.

Es importante mencionar que **las características e involucramiento de la población y los actores locales, también son un factor determinante en el diseño de los sistemas.** El apoyo a la red de monitoreo de lluvia y nivel local de parte de las comunidades y sus enlaces, relaciones y redes de comunicación con los demás actores locales, son determinantes para el éxito del funcionamiento del SAT.



Figura 2. 25: Tipos de pronóstico hidrológico

Fuente: <http://www.snet.gob.sv/Publicaciones/SATEISalvador.PDF>

2.4.7 RED HIDROMETEOROLÓGICA DEL MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES DE EL SALVADOR (MARN)

El monitoreo de niveles de ríos y cantidad de lluvia se realiza mediante una red de 34 estaciones hidrométricas y 32 estaciones pluviométricas distribuidas en todo el territorio nacional, las cuales registran esos parámetros de forma automática y continua mediante modernos equipos, que a su vez envían la información por medio de comunicación satelital hacia el Centro de Monitoreo de Amenazas en las oficinas centrales del MARN.

Red Nacional de Monitoreo Hidrometeorológico	
Tipo de Estación	Número de estaciones o sitios de monitoreo
Meteorológicas	28
Pluviométricas	32
Hidrométricas	34
Agua subterránea	15 sitios
Calidad del agua	125 sitios

Tabla 2. 5: Red Nacional de Monitoreo Hidrológicos.
Fuente: <http://www.marn.gob.sv/red-de-monitoreo-hidrometeorologico/>

Con este equipo se realiza la vigilancia en tiempo real del desarrollo y evolución de los fenómenos hidrometeorológicos que puedan representar una amenaza para la población y emitir las alertas por inundaciones de manera temprana.

Adicionalmente, se mantiene un programa de aforos mensual sobre el caudal de los ríos en cada una de las estaciones de registro.

Con esta red de monitoreo hidrometeorológico se pretende:

- Brindar una alerta temprana para control de inundaciones y manejo de embalses.
- Ordenar y desarrollar el territorio.
- Elaborar balances hídricos y gestión integrada de los recursos.
- Disponer del recurso hídrico para el desarrollo productivo: carreteras, puentes, riego, agua potable, generación hidroeléctrica, entre otros.
- Conocer el impacto de las sequías y el cambio climático en el recurso hídrico.

2.4.8 EL PAPEL DE LA RED DE MONITOREO LOCAL

La concepción, diseño y construcción de la Red de monitoreo local no puede ser única para las diferentes áreas en riesgo. Su construcción debe basarse en el tipo de amenaza de las zonas, en la organización municipal, comunitaria, los organismos locales existentes y hasta en la idiosincrasia y capacidades de las poblaciones.

El Sistema de Gestión de Riesgo como parte de los Sistemas de Alerta Temprana, es un sistema dinámico e integral por medio del cual un grupo humano toma conciencia del riesgo que enfrenta, lo analiza y lo entiende, considera las opciones y prioridades en términos de su reducción, considera los recursos disponibles para enfrentarlo, diseña las estrategias e instrumentos necesarios para afrontarlo, negocia su aplicación y toma la decisión de hacerlo. Finalmente se implementa la solución más apropiada en términos del contexto concreto en que se produce o se puede producir el riesgo.

La Red de monitoreo local, es un concepto que abarca un número representativo de ciudadanos, líderes locales y comunales, instituciones descentralizadas gubernamentales (Unidades de Salud, Escuelas), Policía Nacional Civil, Fuerza Naval, Destacamentos Militares, Municipalidades, ONG's que viven ya sea en zonas identificadas como de alto riesgo y/o habitan en las cuencas medias y altas de las zonas susceptibles a inundación y que asumen con responsabilidad la tarea del manejo integral de su riesgo y/o el apoyo en el monitoreo de las variables hidrometeorológicas respectivas, con el fin de apoyar a la DGOA en el monitoreo en campo.

Para la formación de la Red de monitoreo local, personal de los Servicios de Gestión de Riesgo, Hidrología y Meteorología de la DGOA, se desplazaron a las zonas con alto riesgo a inundaciones, ubicadas principalmente en las áreas bajas de los ríos Paz, Jiboa, Lempa, Grande de San Miguel y Goascorán, para identificar a los líderes comunales y habitantes con quienes se inició el proceso de organización con el fin de implementar la vigilancia local de los diferentes fenómenos de origen natural y su incidencia en los municipios. Este proceso está en implementación en otras cuencas del país.

Se establecieron los enlaces que permitiera iniciar un nivel de coordinación muy estrecho a través de capacitación y protocolos de comunicación a implementarse con cada lugar, en caso de generarse un evento extremo. Posteriormente, se realizaron una serie de talleres con el objetivo de explicar la forma de establecer una comunicación directa entre la población y los Comités de Emergencia Locales y la DGOA en caso de generarse alertas.

Así mismo, la DGOA, transmite periódicamente, información sobre el monitoreo que se realiza a los fenómenos de origen natural en estas mismas áreas y hará del conocimiento de las autoridades locales y de los líderes comunales para tomar las decisiones respectivas.

Con la Red de monitoreo local se busca una mayor cobertura mediante una presencia física y activa en las zonas más alejadas y donde la comunicación a través de teléfono y/o radio se hace difícil. Acciones como estas, serán ampliadas y fortalecidas a través de la colaboración de los voluntarios que conforman la Red de monitoreo local, con quienes se pretende, a la vez, permanecer en constante comunicación y organización para:

- a) Fortalecer los niveles de gobiernos locales y comunitarios, dotándolos de la capacidad para analizar las condiciones de riesgo y diseñar, negociar e implementar soluciones con bases sólidas y a la vez flexibles y viables.
- b) Implementar procesos continuos de capacitación que incidan en la creación de riesgo y en la sensibilización y conciencia sobre el mismo: como por ejemplo pobladores, munícipes, ONGs, entre otros.

En la red de monitoreo local se distinguen varios tipos de actividades:

- a) En la cuenca alta los observadores: personas de las comunidades con un radio y un pluviómetro para el aviso de inicio de lluvias y cantidades.
- b) En la cuenca baja los receptores de la información que la propagarán según el diseño de su red y sus medios de comunicación.
- c) Los observadores cercanos a estaciones de medición de nivel de río o de lluvia, que confirmarán los datos de nivel o de la ocurrencia de la lluvia.

2.4.9 EL PAPEL DE LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN

En la experiencia que la DGOA ha tenido a través de su monitoreo y sus Sistemas de Alerta Temprana, la capacidad y el impacto de los medios de comunicación de llegar a la población, es una herramienta a la que se le debe prestar mucha atención. Los comunicadores, pueden ser un aliado o un obstáculo para el desarrollo de la capacitación a distancia de la población sobre los temas de Gestión de Riesgos y Alerta Temprana, por ello, parte de las actividades desarrolladas por la DGOA ha sido capacitar a los comunicadores en los temas mencionados y mantener una relación directa en la emisión de boletines especiales, pronósticos y avisos.

Si bien para alertas de corto plazo (dos a 10 horas), los medios escritos y la televisión no son los ideales, sí lo han sido para la comunicación de información específica tendiente a orientar y capacitar a la población. En el caso de las alertas de corto plazo, han sido determinantes las radioemisoras locales y nacionales, que pueden llegar a la población en riesgo en poco tiempo.

Es importante, que los medios de comunicación sean conscientes acerca de las tareas de Gestión de Riesgos y emisión de alertas, ya que el sensacionalismo tiende a estar presente y obviar su papel para la emisión de las alarmas, arribando solamente a las zonas de riesgo cuando el desastre ya se ha producido. Pero si los medios de comunicación son orientados y convencidos de la utilidad del apoyo que pueden dar a los Sistemas de Alerta, son un aliado muy importante en la Gestión de Riesgos Nacionales.



Figura 2. 26: Los Medios de Comunicación para llegar a la población
Fuente: <http://promopublicidad.blogspot.com/2012/10/la-radio-como-medio-de-comunicacion.html>

2.4.10 EL PAPEL DE LA ASISTENCIA INTERNACIONAL Y LOS ORGANISMOS REGIONALES

Generalmente, en los países en vías de desarrollo, el apoyo internacional que se ha tenido ha sido basada en el asistencialismo y en la solución temporal de la problemática del país, sin considerar, la mayoría de las veces, la capacidad de los países en darle sostenibilidad a los sistemas técnico científicos instalados, a la capacidad técnica establecida y a la misma organización del país e idiosincrasia de los pueblos.

Por lo anterior, la Cooperación Internacional tiene que estar más orientada a apoyar en el desarrollo y fortalecimiento de las capacidades nacionales y locales en el desarrollo y fortalecimiento de las capacidades técnicas que le permitan, hacer sostenibles los sistemas técnico-científicos de monitoreo, análisis y comunicación.

Adicionalmente, su papel a nivel de “Tomadores de Decisión” es muy importante, ya que hay que hacer notar que las redes donadas e instaladas, para que estén en funcionamiento deben ser mantenidas y procesadas por los Servicios

Hidrometeorológicos Nacionales. Si bien esta información está en internet, debe hacerse notar que son los países con sus capacidades presupuestarias y científicas, quienes tienen el reto de mantener las redes en buen funcionamiento y operación.

Así mismo, los entes regionales e instituciones hidrometeorológicas de los demás países de la región, pueden potenciar sus capacidades a través de un intercambio de conocimientos y experiencias en forma horizontal. Esto cada día es más posible con el desarrollo de las comunicaciones y con el poder contar con mecanismos de comunicación y discusión virtuales, conexiones de información en sitios web y la internet.

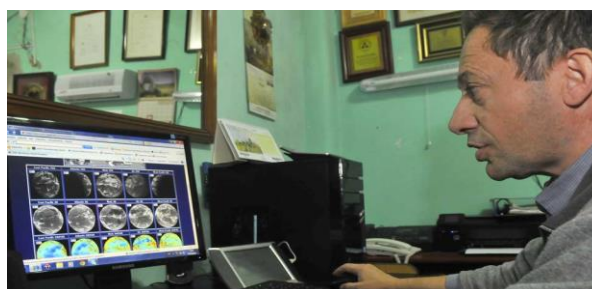


Figura 2. 27: Utilizando la internet para conocer información meteorológica
Fuente: <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/guru-mario-navarro-su-pasion-clima>

El apoyo horizontal entre los diferentes Servicios Hidrometeorológicos y el establecimiento de mecanismos virtuales de monitoreo, permite potenciar las capacidades de los servicios que tienen oportunidad de desarrollar herramientas y compartirlas con los Servicios que no han desarrollado estas herramientas (software, capacitación, equipo, instrumental, mantenimiento, etc.).

El decidido apoyo que entre los Servicios Hidrometeorológicos en lo regional se ha desarrollado, es el soporte de los análisis técnicos y monitoreo en el tiempo. Este es el caso del Sistema de Pronósticos y Monitoreo establecido en la Cuenca del Río Lempa,

o el apoyo e intercambio de experiencias y capacitaciones que se hacen entre los servicios hidrometeorológicos de la región y a través de los Foros Climáticos con el soporte de los organismos regionales como SICA, CRRH, CCAD y CEPREDENAC.

2.4.11 FINANCIAMIENTO Y SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS.

Después de una discusión sobre el diseño y desarrollo técnico-científico y social de los Sistemas de Alerta Temprana, los países en vías de desarrollo afrontan la necesidad de soportar y dar sostenibilidad al monitoreo e investigación hidrometeorológica, en el tiempo. Lo anterior consume fondos y requerimientos que muchas veces no son sostenibles por los presupuestos del Gobierno Central.

Ante necesidades sociales como Salud y Educación, el monitoreo hidrometeorológico, la Gestión de Riesgos y la investigación científica, puede no ser una prioridad en los países. Ha ocurrido en décadas pasadas, que los bien montados sistemas de observación e investigación, el personal altamente calificado y las capacidades instaladas en las instituciones gubernamentales, se han perdido debido a la falta de fondos para el mantenimiento de los mismos. Sin embargo, estos sistemas vienen a ser importantes cuando un fenómeno ha impactado, generando cuantiosos daños y pérdidas, ya que un monitoreo y vigilancia previa, pudo haber reducido considerablemente las pérdidas, especialmente las humanas.

Posiblemente, una de las opciones de financiamiento de los sistemas de monitoreo y análisis hidrometeorológicos con fines de alertamiento por inundaciones, estriba en los servicios paralelos que la información generada y las capacidades instaladas puedan dar para el desarrollo de las actividades económicas y de aseguramiento de las

inversiones que se requieran en el país. Por ejemplo, para las empresas de generación hidroeléctrica, el contar con pronósticos a corto y mediano plazo, le permite planificar de una mejor manera la oferta hídrica y hacer un manejo más eficiente de sus embalses.

También las pérdidas que se pueden ocasionar por descargas tardías ante incrementos en las precipitaciones, pueden generarle gastos que con un mejor sistema de monitoreo pueda minimizar. Así mismo, el desarrollo de actividades productivas como puertos, sistemas de riego, desarrollo de zonas industriales, turismo, y el manejo en sí mismo del agua para los diferentes usos, generan una demanda de información hidroclimática que pueda ser suplida por los servicios hidrometeorológicos del país.

El desarrollo de estudios de balances hídricos, escenarios climáticos, escenarios de disponibilidad hídrica, información para la construcción de puentes, carretera, sistemas de riego, aviación civil, etc., con información adecuada y de alta calidad, puede contribuir a asegurar las inversiones económicas del país y privadas. Por tanto, la venta de este tipo de servicios y la recuperación parcial de costos, puede apoyar a financiar el mantenimiento de las redes de monitoreo, de comunicación y de alerta temprana que tienen un fin más social.

Por otro lado, las comunidades y municipalidades, la búsqueda de soporte y financiamiento local, puede disminuir la carga del mantenimiento de redes de observación y comunicación a la institución central. Esta carga distribuida entre los usuarios y las redes sociales, puede ser más manejable a mediano plazo, que una carga económica centralizada en una institución del Estado.

2.4.12 DESCRIPCIÓN DE LAS AMENAZAS EN EL DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD

La Cuenca del Rio Sucio está integrada por los municipios: Armenia, Ciudad Arce, Colon, El Congo, Jayaque, Sacacoyo, San Juan Opico, Talnique, Tepecoyo, Nueva San Salvador y Coatepeque. Se describirá solamente las amenazas del departamento de la libertad, debido a que es el departamento con mayor influencia en la cuenca del rio sucio, que es la que se estudia en este trabajo de graduación.

MUNICIPIOS	GEOLÓGICAS		HIDROMETEOROLÓGICAS	Movimientos de masa
	Volcánicas	Sísmicas	Inundación	Deslizamiento
Antiguo Cuscatlán		X	X	X
Chiltiupán		X	X	X
Ciudad Arce			X	X
Colon	X	X	X	X
Comasagua		X	X	X
Huizucar			X	
Jayaque		X	X	X
Jicalapa		X	X	X
La Libertad		X	X	X
Santa Tecla	X	X	X	X
Nuevo Cuscatlán		X	X	X
Quezaltepeque	X	X	X	X
Sacacoyo			X	X
San José Villanueva			X	X
San Juan Opico			X	X
San Matías			X	X
San Pablo Tacachico			X	
Talnique		X	X	X
Tamanique		X	X	X
Teotepeque		X	X	X
Tepecoyo		X	X	X
Zaragoza		X	X	X

Tabla 2. 6: Amenazas de los municipios de La Libertad
Fuente: Protección Civil

2.4.12.1 MAPA DE RIESGO

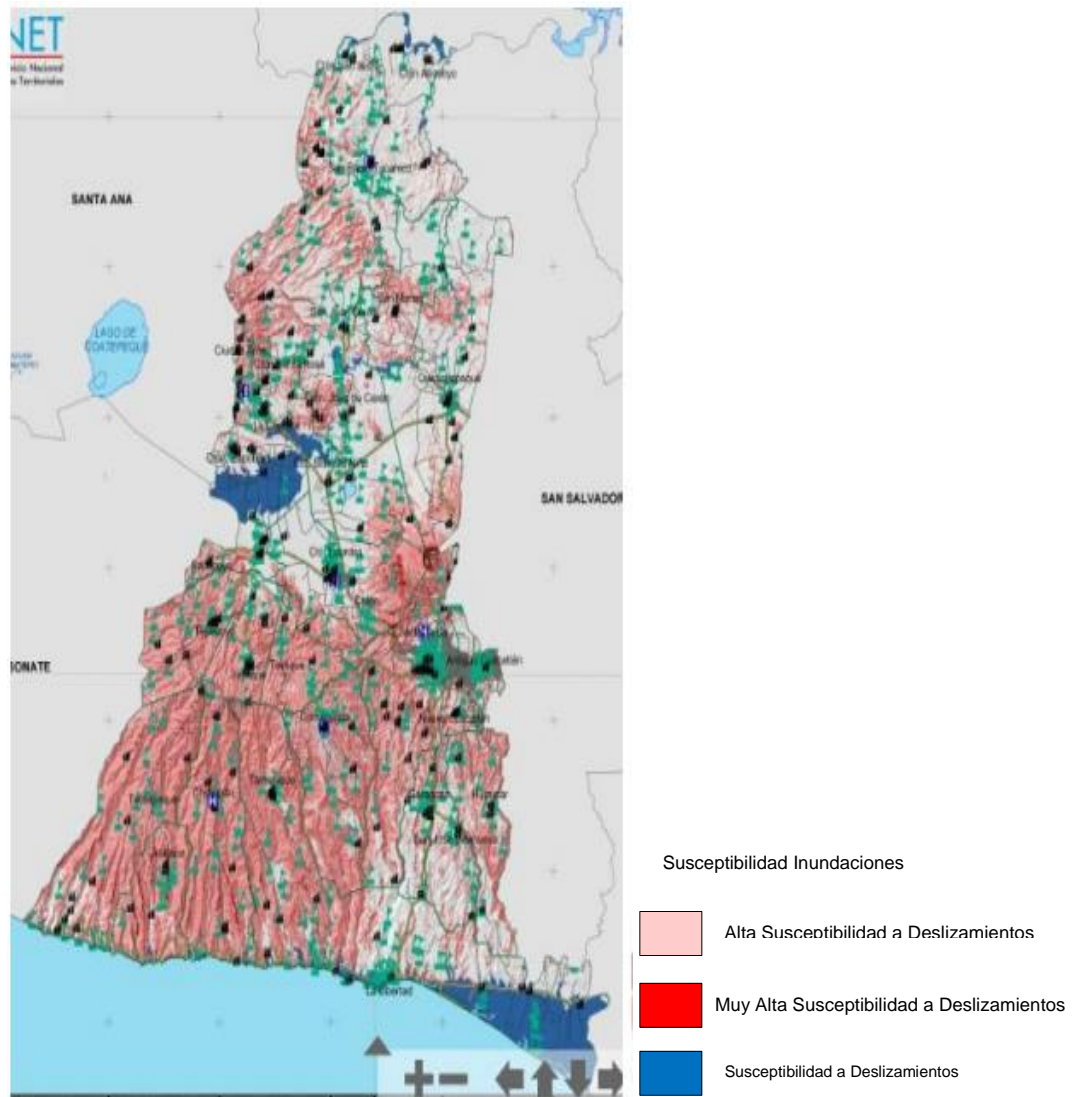


Figura 2. 28: Riesgos del Departamento de La Libertad

Fuente: Protección Civil

2.4.12.2 SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA

MUNICIPIOS	Situacion Actual
Antiguo Cuscatlán	No cuenta con SAT
Chiltiupán	Si cuenta con SAT
Ciudad Arce	No cuenta con SAT
Colon	No cuenta con SAT
Comasagua	Si cuenta con SAT
Huizucar	Si cuenta con SAT
Jayaque	No cuenta con SAT
Jicalapa	Si cuenta con SAT
La Libertad	Si cuenta con SAT
Santa Tecla	Si cuenta con SAT
Nuevo Cuscatlán	Si cuenta con SAT
Quezaltepeque	Si cuenta con SAT
Sacacoyo	No cuenta con SAT
San José Villanueva	No cuenta con SAT
San Juan Opico	No cuenta con SAT
San Matías	No cuenta con SAT
San Pablo Tacachico	No cuenta con SAT
Talnique	No cuenta con SAT
Tamanique	No cuenta con SAT
Teotepeque	No cuenta con SAT
Tepecoyo	No cuenta con SAT
Zaragoza	Si cuenta con SAT

Tabla 2. 7 Sistemas de alerta temprana de La Libertad
Fuente: Protección Civil

Es claro que muchos de los municipios que conforman la cuenca en estudio no cuentan con un Sistema de Alerta Temprana, por lo que es necesario ejecutar un SAT para la cuenca del Rio Sucio.

2.5 RELACIÓN ENTRE LOS SOFTWARE GFS, WRF Y HEC-HMS PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SUCIO COMO PREÁMBULO PARA UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE LA CUENCA

2.5.1 INTRODUCCIÓN

El Río Sucio que se ubica en el Departamento de La Libertad, después de un recorrido de unos 60 Km en dirección E-NE desemboca en el Río Lempa a unos 10 Km aguas arriba del embalse del Cerrón Grande. Con una superficie de 820 km² representa un 8.2 % de la cuenca del río Lempa perteneciente a El Salvador y un 4 % de la superficie total del país.

Como El Salvador está situado en la parte Norte del cinturón tropical de la Tierra, por ende, es un país tropical que presenta dos estaciones: la seca (Noviembre-Abril) y la lluviosa (Mayo-Octubre). En la época lluviosa el país se ve afectado por eventos de lluvia aislada y eventos prolongados, en el que los municipios aledaños a la cuenca del Río Sucio sufren los efectos de este tipo de eventos.

Es necesario que existan procedimientos e instrumentos, a través de los cuales se pueda monitorear una amenaza o evento adverso, para poder contrarrestar los efectos negativos, salvando la vida y medios de subsistencia, gracias a la implementación de estos sistemas. El Salvador ya tiene experiencia con Sistemas de Alerta Temprana SAT, como mención algunos sistemas de las cuencas: Río Grande de San Miguel, Río Paz, Río Goascorán y Río Jiboa.

Ofreciendo un pronóstico o predicciones temporales sobre la acción de eventos de precipitación en un futuro próximo, se pueden implementar los SAT en una determinada región que se verá afectada.

Debido a que en la cuenca del Río Sucio no existe un SAT, se pretende que con la investigación y la simulación de eventos de lluvia seleccionados, extrayendo los datos correspondientes a estos eventos del modelo global GFS, exportando dichos datos al modelo meteorológico WRF para obtener la lluvia pronosticada, procediendo con la conversión de toda la información obtenida con WRF, a un formato compatible con el modelo hidrológico HEC-HMS, por medio del software ArcGIS, para obtener datos de caudal pronosticado de cada evento. El programa ArcGIS no ha sido descrito anteriormente, debido a que es un software cuya función principal es la de conversión de un formato a otro. Se hará uso del programa Surfer¹⁸ como una herramienta de ayuda para llevar a cabo la simulación.

Es necesario conocer cómo se relacionan estos programas, la secuencia que lleva cada uno de ellos para obtener lo que se pretende lograr, obtener hidrogramas pronosticados de los eventos de análisis. Además que la información obtenida de las simulaciones, sirva de preámbulo para el Sistema de Alerta Temprana en la cuenca del Río Sucio, para su posterior ejecución. A continuación se muestra la secuencia de cada uno de los programas y la relación del software precedente con el consecuente.

¹⁸ **Surfer** : es un software completo para la visualización en 3D. Fuente: www.software-shop.com

2.5.2 MODELO GLOBAL GFS

El pronóstico meteorológico básicamente implica predecir el estado futuro de la atmosfera utilizando la información y/o data de las condiciones atmosféricas y climáticas de una amplia área que incide en una región. Para obtener esta información se dispone de una red de estaciones meteorológicas distribuidas alrededor del mundo. Alrededor de 10,000 estaciones terrestres, aeropuertos, barcos y boyas proveen información de superficie, adicionalmente datos en altitud son provistos por radiosondas, aeronaves, satélites y radares.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) está constituida por un poco más de 175 naciones. La OMM es la organización responsable del intercambio de los datos meteorológicos y certifica que los procedimientos de las observaciones meteorológicas sean iguales entre naciones, esta es una tarea de mucha importancia, ya que las observaciones deben ser comparables.

Después que las observaciones meteorológicas son realizadas, los datos recolectados de muchas estaciones son enviados electrónicamente a los Centros Meteorológicos Mundiales localizados en Melbourne, Australia; Moscú, Rusia; y Washington, D.C., USA. Desde estos centros la información es transmitida al Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP: National Weather Environmental Service), una rama del Servicio Nacional Meteorológico (NWS: National Weather Service), localizado en Maryland cerca de Washington, D.C. En este sitio se realiza el trabajo masivo de analizar los datos, preparar los mapas meteorológicos y gráficos, y así comienza la predicción meteorológica. Los gráficos, mapas y pronósticos producidos son enviados electrónicamente a las agencias de predicción meteorológicas.

En El Salvador esta información es recibida por el Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM) a través del uso de la data del modelo GFS (Global Forecast System: Sistema Global de Predicción). De este modelo global es que se extraen los datos correspondientes a los eventos de lluvia seleccionados, y son importados al modelo mesoescalar WRF.

2.5.3 MODELO METEOROLOGICO MESOESCALAR WRF

Existen varios modelos de mesoescala, como fue descrito anteriormente, el WRF “Weather Research Forecast Model” goza de una clara ventaja sobre los demás modelos, dado que tiene en cuenta los efectos de la superficie terrestre sobre el tiempo y es de fuente abierta.

Debido a que El Salvador es un país montañoso, con una extensión territorial de 21.041 km², y el análisis se basa específicamente en la cuenca del Rio Sucio ubicado en el Departamento de La Libertad, con un área de 820 km², el modelo WRF es el indicado para la modelación de eventos de precipitación que se generan en este tipo de cuenca con áreas pequeñas, con resoluciones de más de 4 Kms.

WRF se utilizará para modelar 1 evento de lluvia intensa aislada correspondientes al año 2015 del mes donde generalmente se producen eventos de lluvia con más intensidad (Octubre) y un evento prolongado, la tormenta 12 E, que afectaron los municipios aledaños a la cuenca del Rio Sucio, según registros del MARN, por lo que de este modelo se obtendrá lluvia pronosticada en mm, obteniendo datos del programa con extensión **.nc**.

La extensión .nc corresponde al formato NetCDF; la característica de este formato es que contiene la suficiente información para poder saber qué clase de data se encuentra en el archivo (Tipo de variable, unidades, dimensiones, institución que la creó, etc.) a diferencia de otros formatos que necesitan de un archivo adicional para su correcta interpretación. También se puede contar como otra de sus características, la portabilidad de su formato, es decir, que puede ser manipulado por cualquier computadora que tenga las librerías NetCDF instaladas en el disco duro de los ordenadores que se utilizan.

2.5.4 PROGRAMA DE CONVERSIÓN ARCGIS

Los datos de lluvia obtenidos con el modelo meteorológico WRF, con formato NetCDF, se exportan al software ArcGIS, procediendo a la conversión del formato de la lluvia pronosticada, que acepta el modelo hidrológico HEC-HMS.

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica en formatos ráster y vectoriales.

Los archivos ráster (O de imagen) son datos basados en píxeles, mientras un archivo vectorial, es un archivo de gráficos que contiene un vector de imagen, en lugar de una trama o una imagen de mapa de bits. Para la conversión se generan capas ráster introduciendo los datos almacenados referentes a la cuenca con extensión .nc; además se crean capas vectoriales, agregando las capas temáticas de cuenca (.shp) y afluentes (.shp).

Cuando se digitaliza el mapa con ArcGIS, se crea un archivo con extensión **.shp**, el formato ESRI Shapefile (SHP), que corresponde a un formato vectorial de archivo informático propietario de datos espaciales, que es el que se utiliza con Hec-Hms, pero también se crean otros 2, ya que es un formato multiarchivo, es decir está generado por varios ficheros informáticos, cuyas extensiones son **.dbf** y **.shx**. Se debe tener el cuidado de copiar todos estos archivos, en la carpeta donde se tiene el proyecto, puesto que son necesarios para visualizar el de extensión **.shp**.

2.5.5 MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), es un programa de simulación hidrológica con muchas bondades para simular eventos de precipitación. Por defecto, el modelo HEC-HMS, está preparado para recibir datos de lluvia en mm, que es el tipo de dato que se importa de ArcGIS, con extensión **.shp**, el cual, se intenta representar los diferentes procesos que se dan dentro de una cuenca, que transforman una precipitación en escorrentía.

Los estudios hidrológicos, requieren cada vez mayor uso de modelos matemáticos de probada eficacia, que representan el sistema hidrológico en forma abstracta, mediante un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida. Puesto que, desde el punto de vista de la aleatoriedad, el modelo hidrológico HEC HMS se clasifica como determinístico, que no considera aleatoriedad; una entrada dada produce siempre una misma salida. Desde el punto de vista de la variación espacial, también se clasifica como determinístico agregado, en que en la naturaleza de las características físicas de la cuenca no son homogéneas.

Se deben determinar los parámetros de la cuenca, así como la calibración del modelo, debido a que es indispensable realizar una verificación de las simulaciones que permita brindar medidas de exactitud y detección de deficiencias, para que a su vez se realicen las correcciones necesarias que proporcione mejor calidad del pronóstico.

Con los datos obtenidos por el modelo hidrológico HEC-HMS, se procederá hasta obtener un hidrograma pronosticado que muestre gráficamente la variación en el tiempo del caudal pronosticado de lluvia recibida en la Cuenca del Rio Sucio, en un periodo de simulación de cada 6 horas para los eventos convectivos que se consideraron y un periodo de 24 horas para la precipitación 12E.

2.5.6 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA LA CUENCA DEL RIO SUCIO

Puesto que la cuenca del Rio Sucio, que comprende los municipios de Armenia, Ciudad Arce, Colón, El Congo, Jayaque, Sacacoyo, San Juan Opico, Talnique, Tepecoyo, Nueva San Salvador y Coatepeque, no posee un Sistema de Alerta Temprana SAT, se requiere de un análisis meteorológico e hidrológico.

No se pretende elaborar un SAT para dicha cuenca, más bien, se pretende que con los datos obtenidos de la modelación meteorológica e hidrológica, se tengan parámetros de cómo se comporta la cuenca ante eventos de precipitaciones de corta duración y prolongados.

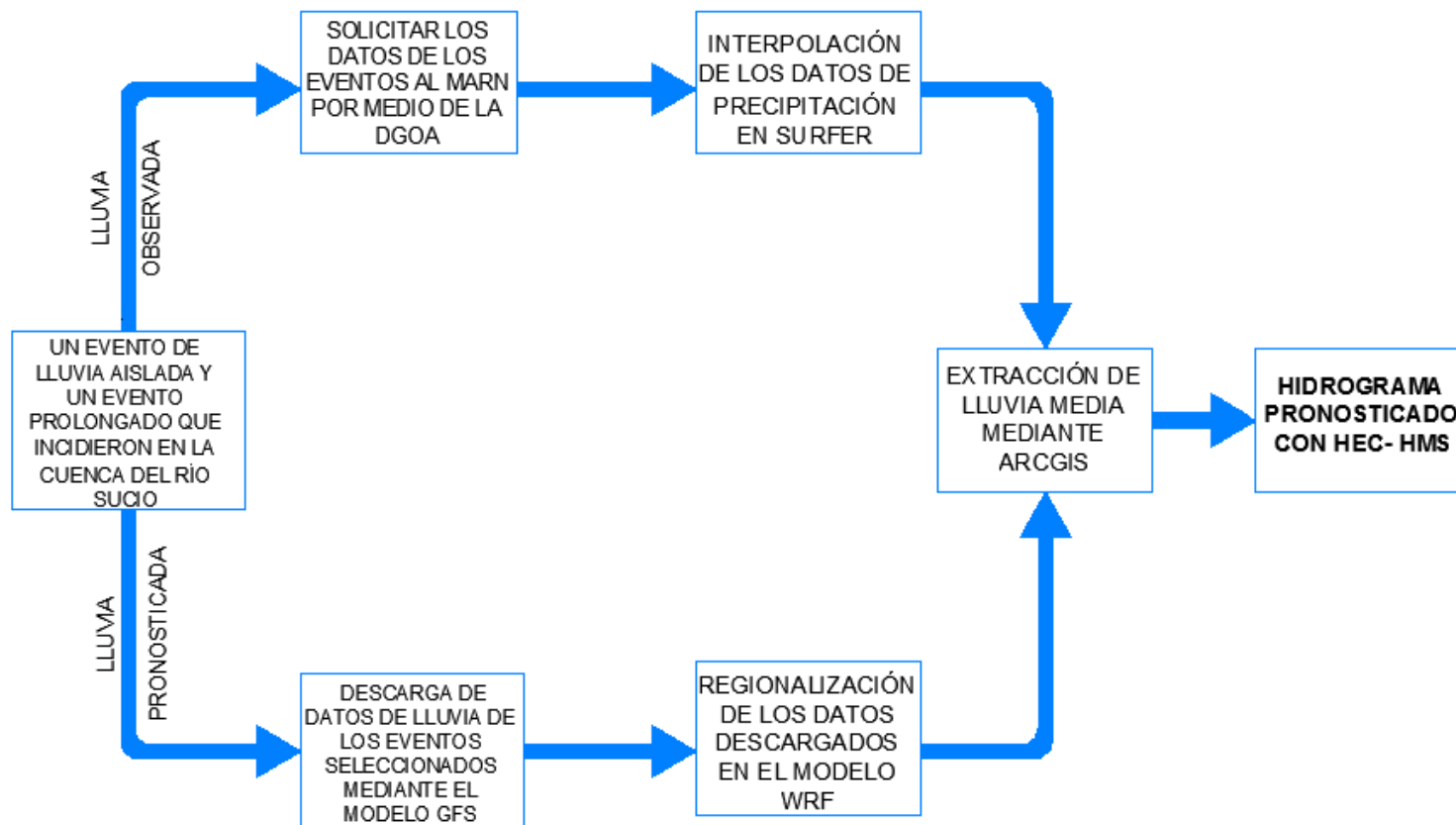


Figura 2. 29: Diagrama de relación entre los software WRF, ArcGIS y HEC-HMS para la modelación hidrológica de la cuenca del Río Sucio como preámbulo para un Sistema de Alerta Temprana de la cuenca.
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis.

CAPITULO III:
DESCRIPCIÓN DE LOS EVENTOS
DE PRECIPITACIÓN
SELECCIONADOS Y ANALISIS
DE LOS DATOS REGISTRADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Para poder desarrollar un análisis integral de la lluvia, se desarrollará la teoría de la Precipitación, posteriormente se seleccionarán 2 eventos de precipitación: un evento aislado y un evento prolongado. Con la información de precipitación proporcionada por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), se describirán las causas que generaron las precipitaciones para los eventos seleccionados, y, con información proveniente de los registros de lluvia de estaciones telemétricas y automáticas que tienen incidencia en la Cuenca del Río Sucio, se elaborarán las tablas que contienen los acumulados de lluvia para intervalos de 3 horas, de las estaciones más representativas que se encuentren de preferencia al interior de la cuenca.

Posteriormente, con el software Surfer 12, se efectuará la interpolación de los datos de lluvia, generando archivos GRD para cada periodo. En ArcGIS 10.4, se generarán los rásters con los archivos GRD desarrollados en Surfer, y por medio de las herramientas de ArcGIS, se obtendrá la lluvia media para ambos eventos por cada uno de los periodos determinados.

3.2 LA PRECIPITACIÓN

3.2.1 GENERALIDADES

La precipitación se define como toda forma de humedad que se origina en las nubes y llega hasta la superficie terrestre. La precipitación se puede dar en forma de lluvia, llovizna, nieve, granizo, etc. Se produce gracias al vapor de agua originado por la evaporación del agua de océanos, ríos, mares, plantas y diversas superficies húmedas. El vapor de agua se enfría, condensándose y tomando forma líquida. De esta manera se forman las nubes, que finalmente son los agentes que provocan las precipitaciones.

3.2.2 VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

3.2.2.1 VARIACIÓN TEMPORAL

Las precipitaciones varían de acuerdo a ciertos ciclos temporales determinados por los movimientos de rotación y traslación terrestres y por la localización astronómica o geográfica del lugar de que se trate. Esos ciclos pueden ser: diarios, mensuales o estacionales o en ciclos anuales; en efecto, siempre hay meses en que las precipitaciones son mayores que en otros. Para evaluar correctamente las características objetivas del clima, las precipitaciones mensuales deben haber sido observadas por un período de por lo menos 20 a 30 años. En El Salvador estacionalmente se cuenta con una época seca y una época lluviosa. La época seca o estiaje, que comprende desde noviembre hasta abril y la época lluviosa abarca de mayo a octubre.

3.2.2.2 VARIACIÓN ESPACIAL

La distribución espacial de la precipitación sobre los continentes es muy variada, en algunos sitios son extremadamente escasas y en otros muy abundantes; la orografía del terreno influye fuertemente en las precipitaciones, una elevación del terreno provoca muy frecuentemente un aumento local de las precipitaciones, al provocar la ascensión de las masas de aire saturadas de vapor de agua. Los tres factores más importantes que influyen en la precipitación promedio que recibe un determinado lugar son:

1. **Latitud:** Se puede decir que la precipitación es mayor cerca del ecuador y disminuye al aumentar la latitud.
2. **Altitud:** como el ascenso de las masas de aires es el factor más importantes de casi todos los tipos de precipitación, entonces la altitud juega un factor importante en la distribución de la lluvia.
3. **Continentalidad:** Siendo la fuente principal de humedad para la precipitación, la evaporación que ocurre en las grandes masas de agua, la precipitación tendera a ser mayor en las costas.

3.2.3 CLASIFICACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Según el mecanismo por el cual las masas de aire son obligadas a ascender se pueden clasificar las precipitaciones en los siguientes tipos: frontales, convectivas y orográficas.

3.2.3.1 PRECIPITACIÓN FRONTAL (CICLÓNICA)

Ocurre cuando dos masas de aire de distintas presiones y temperaturas, tales como la fría (Más pesada) y la cálida (Más liviana) chocan una con la otra.



Figura 3. 1: Precipitación Frontal (Ciclónicas).

3.2.3.2 PRECIPITACIÓN CONVECTIVA

Se produce, generalmente, en regiones cálidas y húmedas cuando masas de aire cálidas, al ascender en altura se enfrían, generándose de esta manera la precipitación.



Figura 3. 2: Precipitación Convectiva

3.2.3.3 PRECIPITACIÓN OROGRÁFICA

Se genera durante el ascenso de una nube sobre un relieve como lo son las montañas y las cordilleras. Esto ocurre porque el vapor de agua se eleva demasiado y su temperatura baja lo suficiente como para precipitar en forma líquida¹⁹.

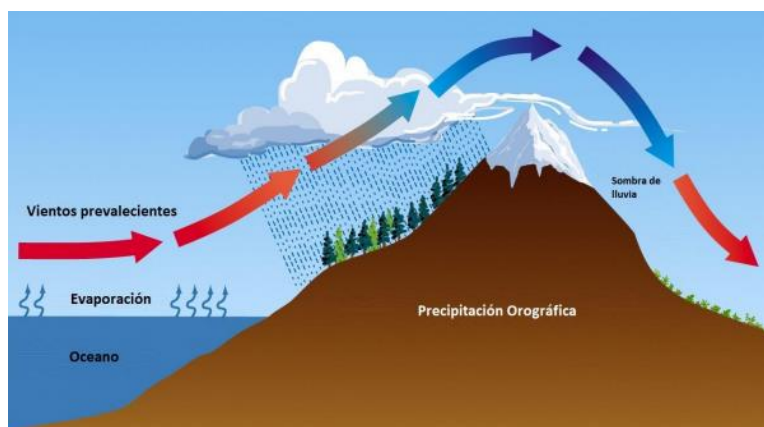


Figura 3. 3: Precipitación Orográfica.

3.3 EVENTOS DE PRECIPITACION SELECCIONADOS

3.3.1 GENERALIDADES

Uno de los eventos de precipitación más importantes, que ha dejado huella en el territorio salvadoreño, es la Depresión Tropical 12-E, ocurrida el 12 de Octubre de 2011, y dado que ese mes es de los más lluviosos en el territorio nacional, se seleccionó para el análisis de los datos de lluvia, al igual que un evento aislado ocurrido en Octubre de 2015.

Ambos eventos han tenido incidencia en la cuenca del Río Sucio, y además, para esas fechas, la DGOA, posee los registros de lluvia registradas en las estaciones telemétricas y automáticas distribuidas a lo largo de todo el país, por periodos de 24 horas.

¹⁹ Tesis: "UTILIZACIÓN DEL MODELO "HEC-HMS" EN SISTEMAS DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS Y VERIFICACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MODELO CMPORH, EN LA CUENCA DEL RIO SUCIO", Claudia Stephanie Carrillo y otros

3.3.2 EVENTO DE LLUVIA CONVECTIVA: 17 DE OCTUBRE DE 2015

Según los registros de la DGOA del MARN, en octubre de 2015, las lluvias fueron mayores a lo normal en todo el país, únicamente la zona costera del departamento de La Paz tuvo lluvias “Normales”, marcando un fuerte contraste con el período de mayo a agosto en los que hubo un déficit generalizado.

Las lluvias generadas para este evento, se atribuyen a una baja presión que se desplazó al sur del país, produciendo el temporal más lluvioso en El Salvador desde la depresión tropical 12E; dicha baja presión posteriormente (Y ya alejado de Centroamérica) se convertiría en el huracán Patricia, el más intenso de los que se tienen registros en el Pacífico.

El registro pluviométrico del período comprendido entre las 7:00 a.m. del 17 de octubre a las 7:00 a.m. del 18 de octubre de 2015, indica que se tuvieron precipitaciones generalizadas sobre el territorio nacional, caracterizadas por una intensidad moderada a ocasionalmente fuerte. El registro máximo de precipitación acumulada para ese periodo corresponde a la Estación Zaragoza en La Libertad, con lluvia acumulada de 162.4 mm. En la Estación San Vicente, ubicada en el Departamento de San Vicente, se obtuvo un registro de máximo de lluvia acumulada de 86.0 mm; en la Estación VSM - La Piedra en el Departamento de San Miguel, un acumulado de lluvia de 65.8 mm y en la Estación Acajutla-Puerto Nuevo en Sonsonate, un registro máximo de 56.3 mm de lluvia.

Las precipitaciones generaron escorrentía directa que provocó que el nivel de los ríos principales y afluentes secundarios a los mismos presentaran niveles altos, principalmente en la zona oriental y central del territorio, generando desbordamientos de los mismos en diferentes puntos.

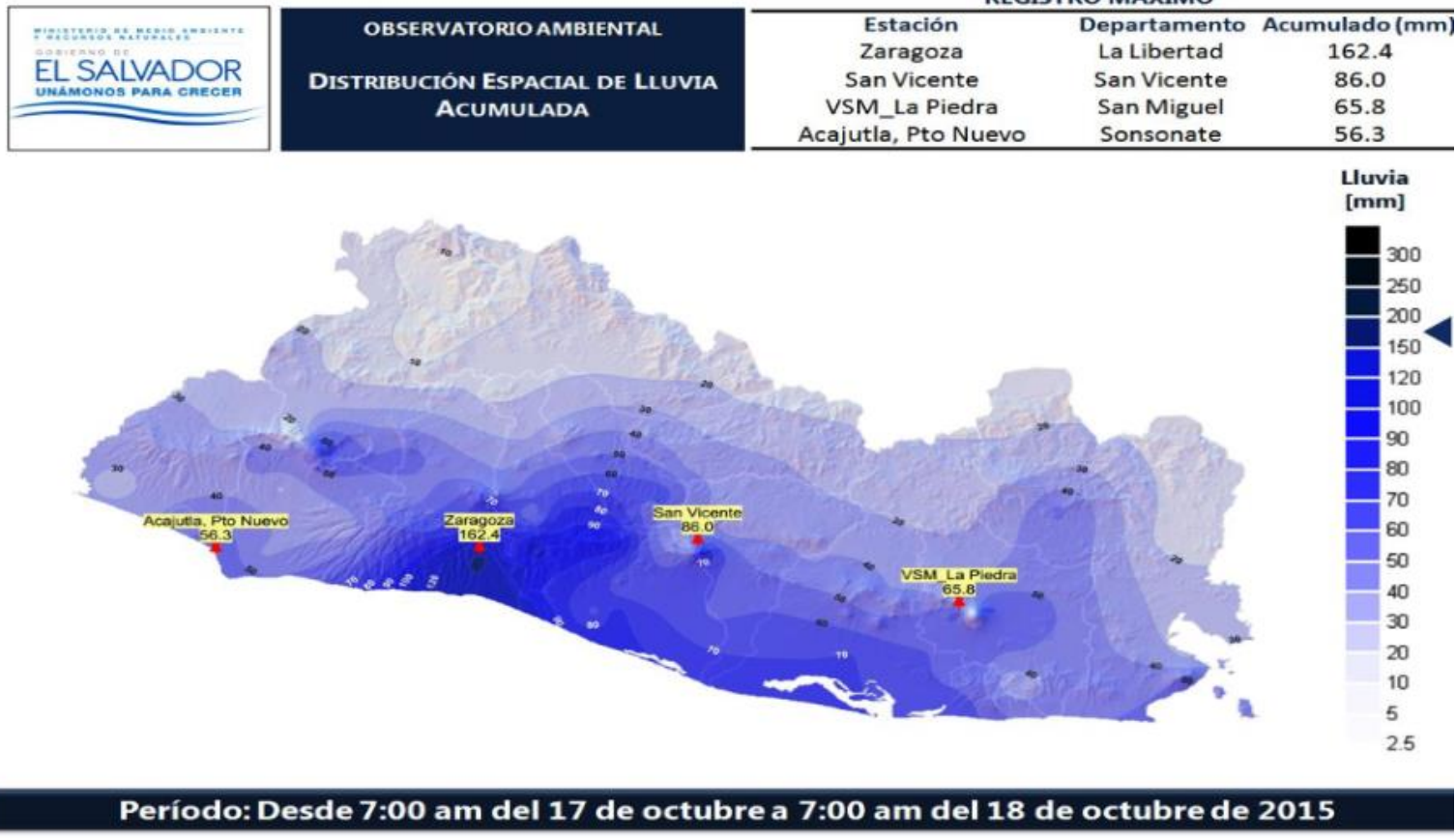


Figura 3. 4: Mapa de Precipitación Acumulada en 24 Horas, registrado por las estaciones telemétricas de la DGOA, para el día 17 de Octubre de 2015, desde las 7 am hasta las 7 am del 18 de Octubre de 2015.

3.3.3 EVENTO PROLONGADO: DEPRESIÓN TROPICAL 12-E

La Depresión Tropical 12E (DT 12E), ocurrida entre el 10 de Octubre y el 20 de Octubre de 2011 sobre el territorio salvadoreño, puso de manifiesto una vez más una serie de aspectos relacionados con los eventos que implican desastres, puesto que confirma que el cambio climático es un fenómeno que está presente en el planeta y, por ende, en la región centroamericana y que afecta por igual sin distinguir fronteras ni nacionalidades; además, deja ver la tendencia que los eventos hidrometeorológicos será cada vez con más frecuencia, con más fuerza y con más concentración sobre determinadas cuencas que, al drenarse hacia sus partes bajas, ocasionan inundaciones y destrucción de infraestructura pública.

De esta manera, este evento reafirma que El Salvador es un país muy vulnerable ante desastres, lo cual ha documentado UNDAC (Organismo de la ONU especializada en desastres) y GERMANWATCH (Organización no gubernamental de origen alemán).

3.3.3.1 NATURALEZA DEL EVENTO Y COMPARACION CON EVENTOS ANTERIORES

El evento inicio el 10 de octubre del 2011 como un sistema de baja presión ubicado en la costa Pacífica de Guatemala y se convirtió en la Depresión Tropical 12E (DT 12E) al amanecer del miércoles 12 de octubre del mismo año.

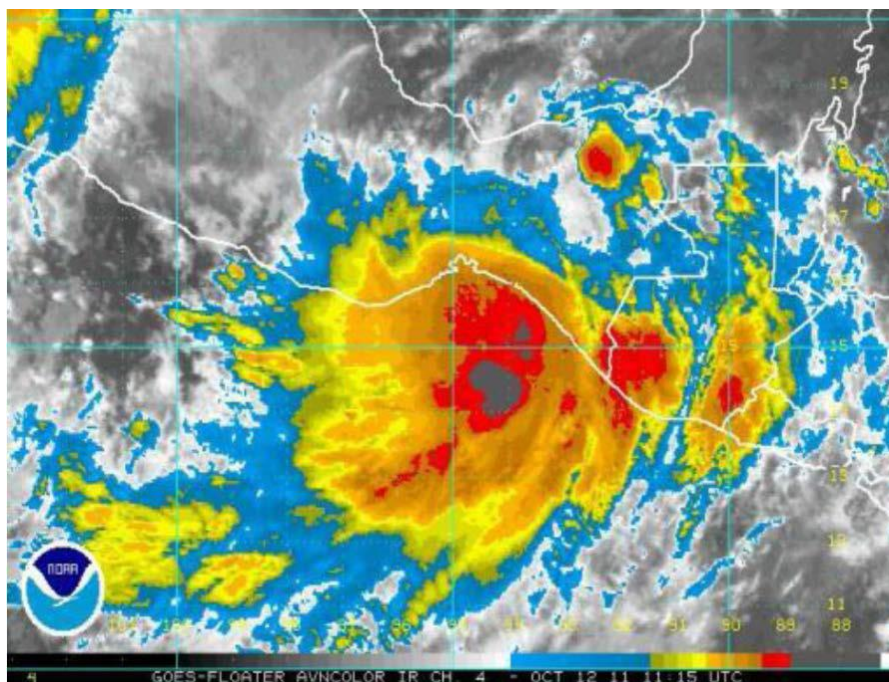


Figura 3. 5: Imagen satelital de la DT 12E al 12OCT2011(Fuente: NOAA).

El miércoles 12 de octubre de 2011 por la tarde la DT tocó tierra en el Istmo de Tehuantepec, México, debilitándose gradualmente dejando remanentes dispersos sobre territorio de México, Guatemala y Belice. Estos remanentes ocasionaron la formación de dos bajas presiones que se ubicaron en la costa Pacífica de Guatemala y otra en Yucatán, lo que provocó la permanencia de la Zona de Convergencia Intertropical sobre Centroamérica y el ingreso de flujo del Sur sobre El Salvador.

Por la madrugada del jueves 20 de Octubre de 2011, inició el ingreso gradual de vientos nortes débiles, resultante de un sistema de alta presión que impulsa al frente frío hacia el Norte de Centroamérica.

La DT 12E se ha caracterizado como un evento hidrometeorológico resultante del cambio climático, las 3 características, entre otras, que llevan a establecerlo de esa forma son las siguientes:

1. Es un fenómeno originado en el Océano Pacífico, lo cual es inusual históricamente pues los eventos más importantes se habían originado con anterioridad en el Océano Atlántico.
2. La concentración de lluvia sobre determinadas áreas del territorio denotan las tendencias ya predichas como resultado del cambio climático.

Al examinar detenidamente el siguiente mapa se puede determinar que las concentraciones de las precipitaciones se dieron sobre las partes altas en las zonas altas de las siguientes áreas:

- a) Cordillera Apaneca-Illamatepec, Departamento de Ahuachapán.
- b) Cadena Costera (Cordillera del Bálsamo), Departamento de La Libertad.
- c) Cordillera Tecapa-Chinameca, Departamento de Usulután y Sur de San Vicente.

Hacia el Norte de la Cordillera del Bálsamo, se saturó la subcuenca hidrográfica del Río Sucio, lo que ocasionó las inundaciones del Valle de San Andrés y el colapso del 75 % del total de los puentes destruidos por el evento debido al volumen y fuerza de la escorrentía originada en altura y que se escurrió hacia la meseta central.

Sobre la subcuenca del Río Sucio, en las partes altas de la Cordillera del Bálsamo, se precipitaron acumulados entre 1,253 mm (Registrados en Chiltiupan) y 1,513 mm (Registrados en Huizucar), lo que posteriormente se escurrió hacia el Sur y hacia el Norte de la Cordillera.

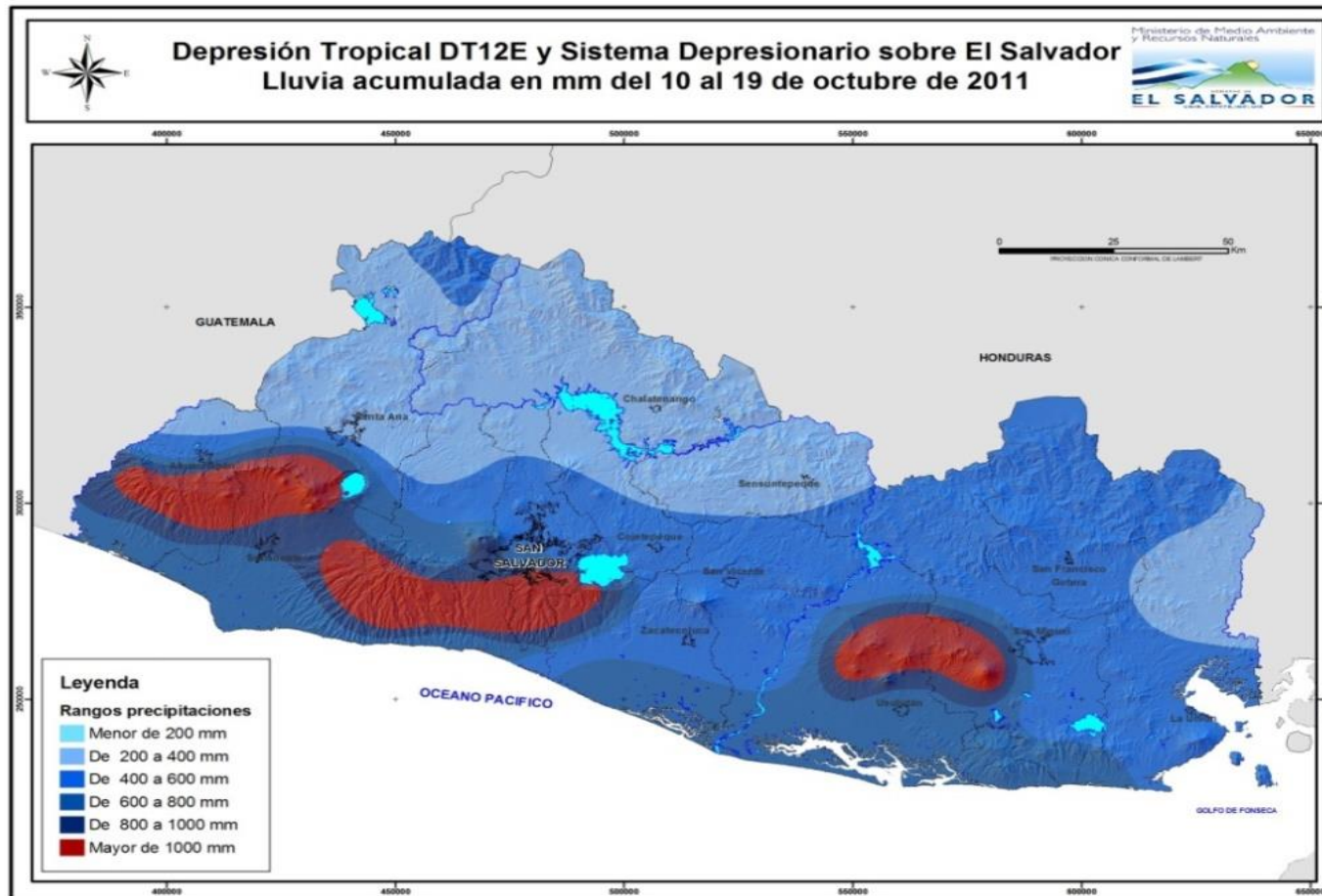


Figura 3. 6: Mapa de distribución espacial de las precipitaciones ocasionadas por la DT 12E.

Fuente: MARN, El Salvador, CA

3. Las características del evento muestran que sus parámetros inusuales obedecen a una tendencia histórica no común que está por encima de otros eventos similares, según registros desde 1969 con la TT FRANCELIA.

Si los datos de lluvia acumulada de la gráfica siguiente se comparan entre sí, se puede apreciar lo siguiente:

- Durante la DT 12E se acumuló el 175.72 % de lluvia más que durante MITCH en 1998.
- Durante la DT 12E se acumuló el 197.51 % de lluvia más que durante STAN en 2005.
- Durante la DT 12E se acumuló el 313.25 % de lluvia más que durante IDA en 2009.
- La lluvia máxima durante 24 horas de la DT 12E (407 mm/2011) es superior a la lluvia máxima acumulada durante el tiempo total de eventos como FRANCELIA (364 mm/1969), JOAN (320 mm/1988), GERT (390 mm/1993), CESAR (365 mm/1996) y ALEX (375 mm/2010).

Si se mantiene esta tendencia, se pone de manifiesto que el cambio climático gradualmente provocara lluvias con mayores volúmenes que generaran más fuerza y poder erosivo de la escorrentía, lo cual tendrá una mayor incidencia sobre la infraestructura pública.

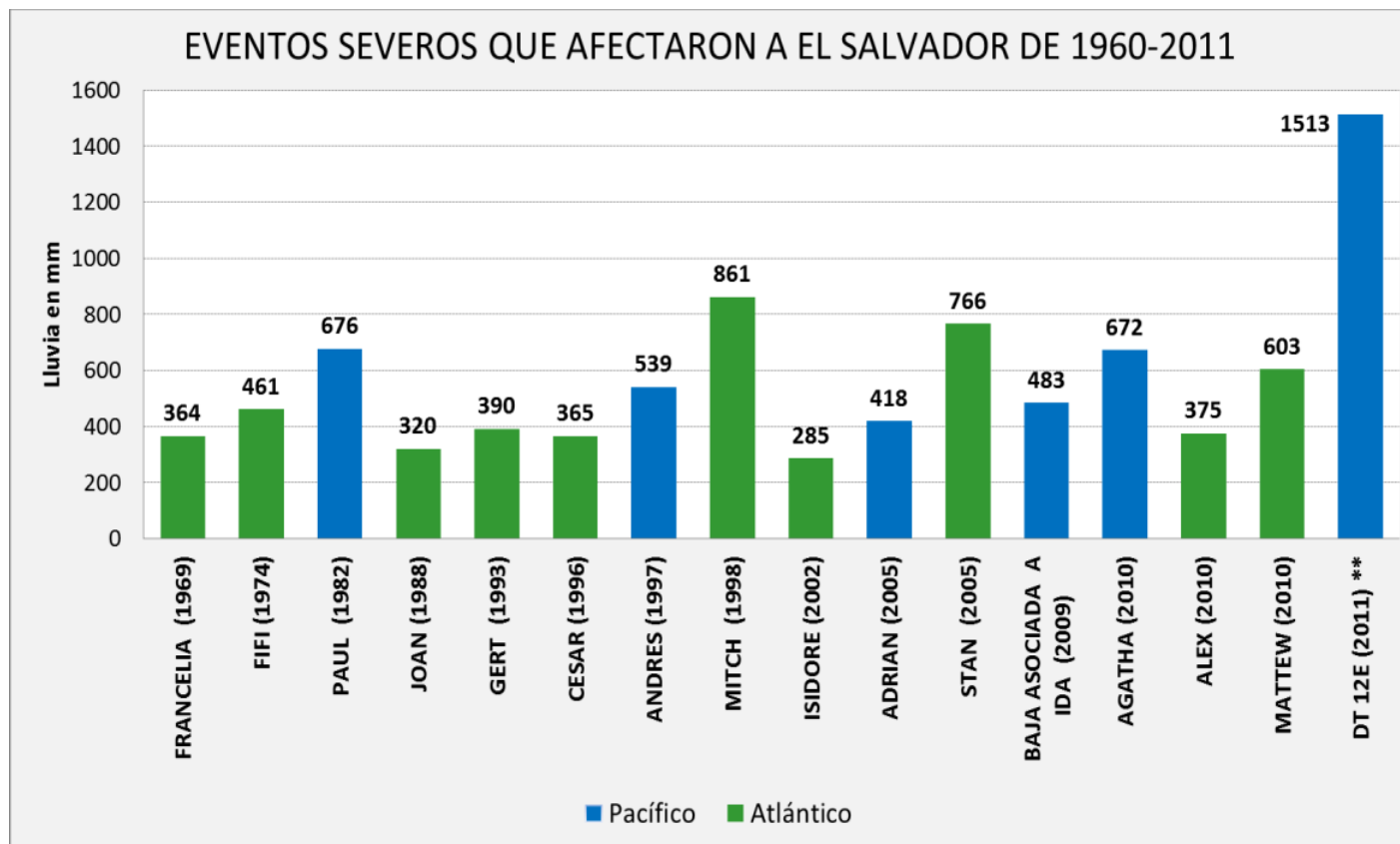


Figura 3. 7: Comparativo histórico de lluvias acumuladas y máximas en 24 horas en eventos meteorológicos desde 1969 hasta 2011

(Fuente: DGOA-MARN, El Salvador, CA.).

Evento	Origen	Mes	Año	Duración (días)	Promedio* Nacional (mm)	Máximo acumulado (mm)
DT12E y Sistema Depresionario	Pacífico	Octubre	2011	10	762	1513
Mitch	Atlántico	Octubre	1998	7	472	861
Stan	Atlántico	Octubre	2005	6	424	805
Paul	Pacífico	Septiembre	1982	4	276	676
Agatha	Pacífico	Mayo	2010	8	274	672
Mattew	Atlántico	Septiembre	2010	8	325	603
Andres	Pacífico	Julio	1997	5	289	530
Baja E96/IDA	Pacífico	Noviembre	2009	3	248	483
FIFI	Atlántico	Septiembre	1974	4	275	461
Adrian	Pacífico	Mayo	2005	3	195	418
Gert	Atlántico	Septiembre	1993	4	198	390
Alex	Atlántico	Junio	2010	5	180	375
Cesar	Atlántico	Julio	1996	5	199	365
Francelia	Atlántico	Septiembre	1969	4	210	364
Joan	Atlántico	Octubre	1988	5	178	331
Isidore	Atlántico	Septiembre	2002	5	160	285

Tabla 3. 1: Eventos Hidrometeorológicos Extremos que Impactaron a El Salvador desde la década de los 60's ordenados según máximos acumulados, Fuente: MARN, El Salvador, CA.

3.3.3.2 MAPAS GENERADOS POR LA DGOA POR CADA DIA DEL EVENTO

El orden cronológico de los mapas generados por la DGOA, muestra el acumulado de lluvia registrado por las estaciones telemétricas y automáticas, desde las 7:00 horas de un día a las 7:00 horas del día siguiente, para todos los días que duró el evento.



Figura 3. 8: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 09 de Octubre y las 07:00 horas del 10 de Octubre de 2011



Figura 3. 9: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 10 de Octubre y las 07:00 horas del 11 de Octubre de 2011



Figura 3. 10: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 11 de Octubre y las 07:00 horas del 12 de Octubre de 2011



Figura 3. 11: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 12 de Octubre y las 07:00 horas del 13 de Octubre de 2011



Figura 3. 12: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 13 de Octubre y las 07:00 horas del 14 de Octubre de 2011



Figura 3. 13: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 14 de Octubre y las 07:00 horas del 15 de Octubre de 2011



Figura 3. 14: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 15 de Octubre y las 07:00 horas del 16 de Octubre de 2011



Figura 3. 15: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 16 de Octubre y las 07:00 horas del 17 de Octubre de 2011

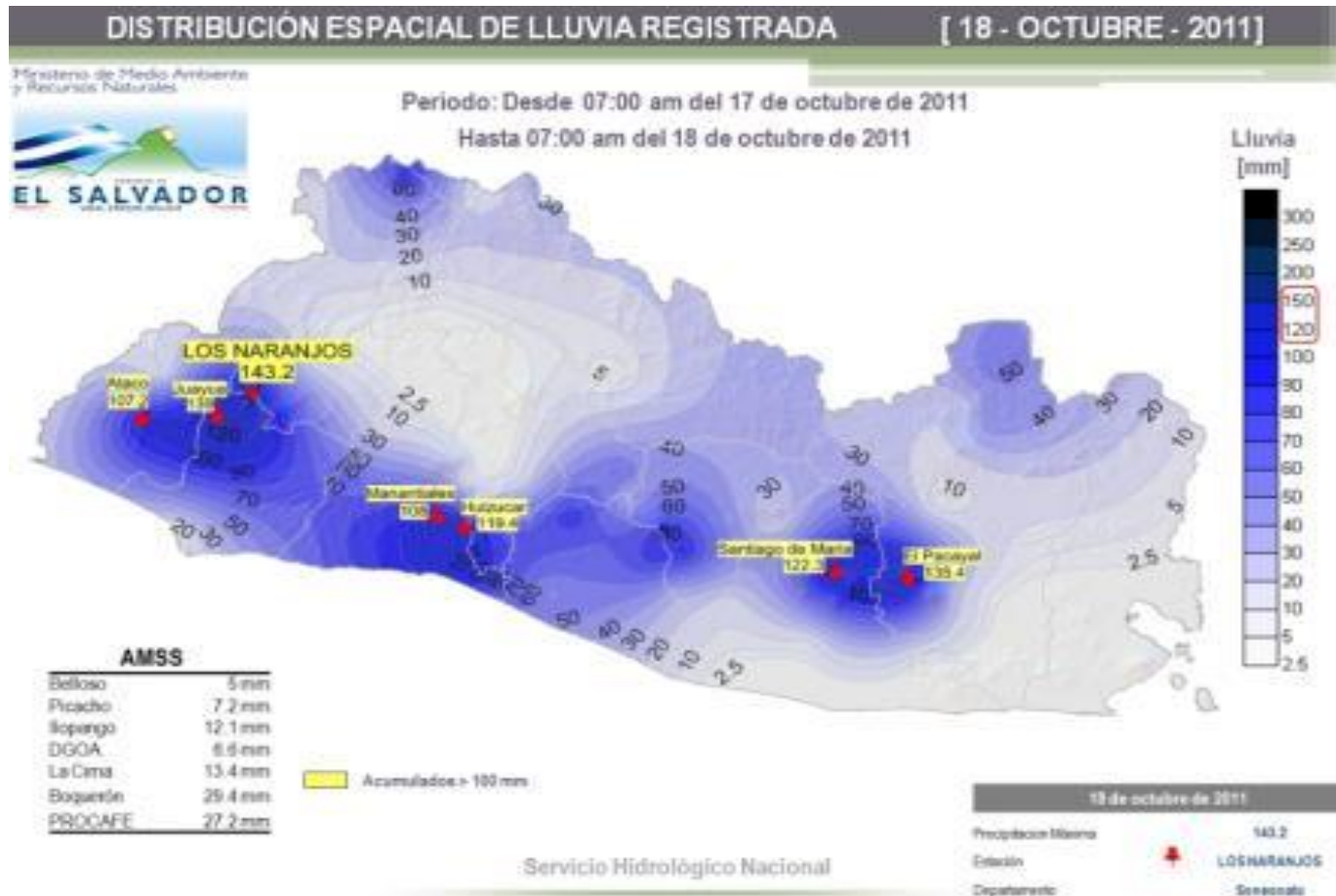


Figura 3. 16: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 17 de Octubre y las 07:00 horas del 18 de Octubre de 2011



Figura 3. 17: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 18 de Octubre y las 07:00 horas del 19 de Octubre de 2011



Figura 3. 18: Mapa de distribución espacial de la lluvia acumulada entre las 07:00 horas del 19 de Octubre y las 07:00 horas del 20 de Octubre de 2011

3.4 DATOS DE LLUVIA PROVENIENTES DE ESTACIONES TELEMÉTRICAS Y AUTOMÁTICAS DE LA DGOA

3.4.1 GENERALIDADES

La Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), a lo largo y ancho de todo el territorio salvadoreño cuenta con estaciones telemétricas y automáticas para obtener datos de lluvia de las diferentes regiones del país. Tratándose de un estudio que se lleva a cabo sobre la Cuenca del Río Sucio, se han obtenido los registros de estaciones que inciden en la cuenca, elaborando tablas que cuantifican la lluvia acumulada en milímetros para cada 3 horas, por cada día, tanto para el evento de lluvia aislada como para la Depresión Tropical 12-E.

Los periodos con los que se trabajó esta evaluación fueron correspondientes a 24 horas, puesto que la base de recolección de datos de lluvia que se realiza en la DGOA corresponde a la lluvia registrada en periodos de 24 horas (7:00am del día de interés a las 7:00am del día siguiente).

3.4.2 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS Y ACUMULADO DE LLUVIA PARA EVENTO CONVECTIVO

Una estación meteorológica es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Los datos que se obtienen de las estaciones, se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

Se requiere inicialmente seleccionar las estaciones que inciden en la cuenca en estudio, tanto las estaciones cercanas como las que se encuentran dentro de la cuenca. Las estaciones seleccionadas, además de incidir en la cuenca, deben de tener un registro completo de los datos de lluvia diarios, que sean homogéneos y lo más completos posible, puesto que de eso depende la veracidad de los resultados.

La DGOA, proporcionó datos de lluvia de diversas estaciones meteorológicas, algunas con registros cada 5, 10 y 15 minutos. Con la ayuda de Google Earth, se determinó cuales estaciones estaban próximas a la cuenca o dentro de ella, de tal forma se seleccionaron las estaciones: Talnique, Procafé, Boquerón, Comasagua, Zapotitán, Coatepeque e Ishuatan. En la Figura 3.19, se muestra la ubicación de las estaciones y en la Tabla 3.2, se muestran las estaciones seleccionadas junto con sus coordenadas y elevación. La elevación de cada una de las estaciones se obtuvo por medio de Google Earth.

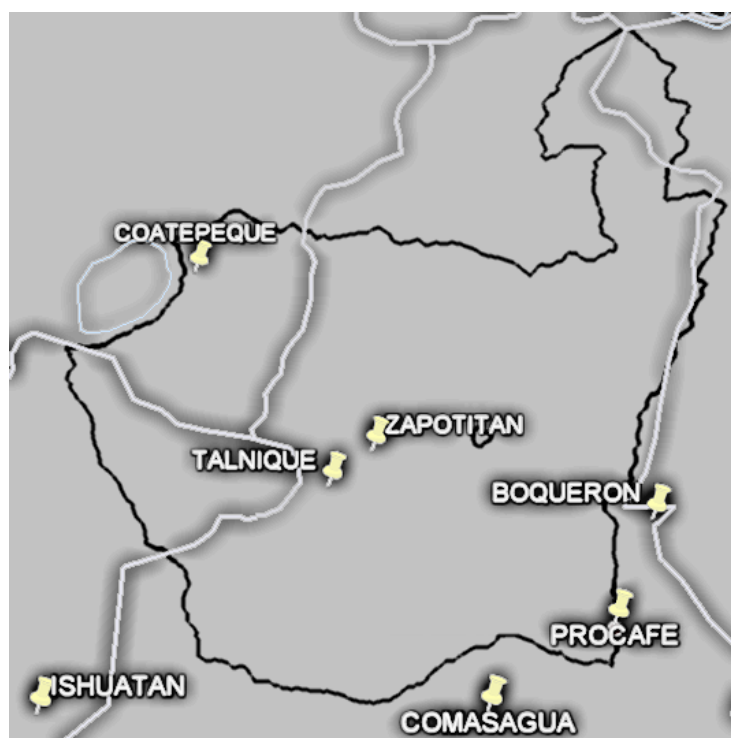


Figura 3. 19: Ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas por su incidencia en la cuenca del Río Sucio.

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION (M.S.N.M)
Talnique	13° 45' 3.6"	-89° 25' 51.6"	466
Procafé	13° 40' 48"	-89° 17' 24"	963
Boquerón	13° 43' 48"	-89° 16' 12"	1589
Comasagua	13° 38' 24"	13° 38' 24"	1006
Zapotitán	13° 46' 12"	-89° 24' 36"	461
Coatepeque	13° 52' 12"	-89° 30' 36"	937
Ishuatan	13° 38' 24"	-89° 33' 36"	601

Tabla 3. 2: Estaciones pluviométricas con sus coordenadas. Fuente: DGOA/MARN

De todas las estaciones, con los registros de lluvia, se obtuvo el acumulado en milímetros de lluvia para intervalos de cada 3 horas, partiendo desde las 7:00 horas del día 17 hasta las 7:00 horas del día 18 de Octubre de 2015.

En la Tabla 3.3, se muestra el acumulado de lluvia para cada periodo por estación, seguido de su representación gráfica en la Figura 3.20.

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)						
			TALNIQUE	PROCAFÉ	BOQUERÓN	COMASAGUA	ZAPOTITAN	COATEPEQUE	ISHUATAN
0-3 hrs	7:00-9:00	17/10/2015	1.6	5.4	10.2	22.6	1.2	3.2	6.4
3-6 hrs	10:00-12:00	17/10/2015	16.8	23.8	26.6	14.6	13.4	19	14
6-9 hrs	13:00-15:00	17/10/2015	2.2	1.6	2.2	0.8	0.6	2.2	0.8
9-12 hrs	16:00-18:00	17/10/2015	2.8	0.2	0.2	2	2.6	1.4	3.6
12-15 hrs	19:00-21:00	17/10/2015	8.2	5.4	7.2	13.4	4	5.2	3.6
15-18 hrs	22:00-0:00	18/10/2015	0.4	7.6	6	5.8	0.6	5.2	0.4
18-21 hrs	1:00-3:00	18/10/2015	5.6	12	16.4	16	4	7	5.8
21-24 hrs	4:00-6:00	18/10/2015	6	7	7.8	6	3	3.6	3.2

Tabla 3. 3: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el evento del 17 de Octubre de 2015.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

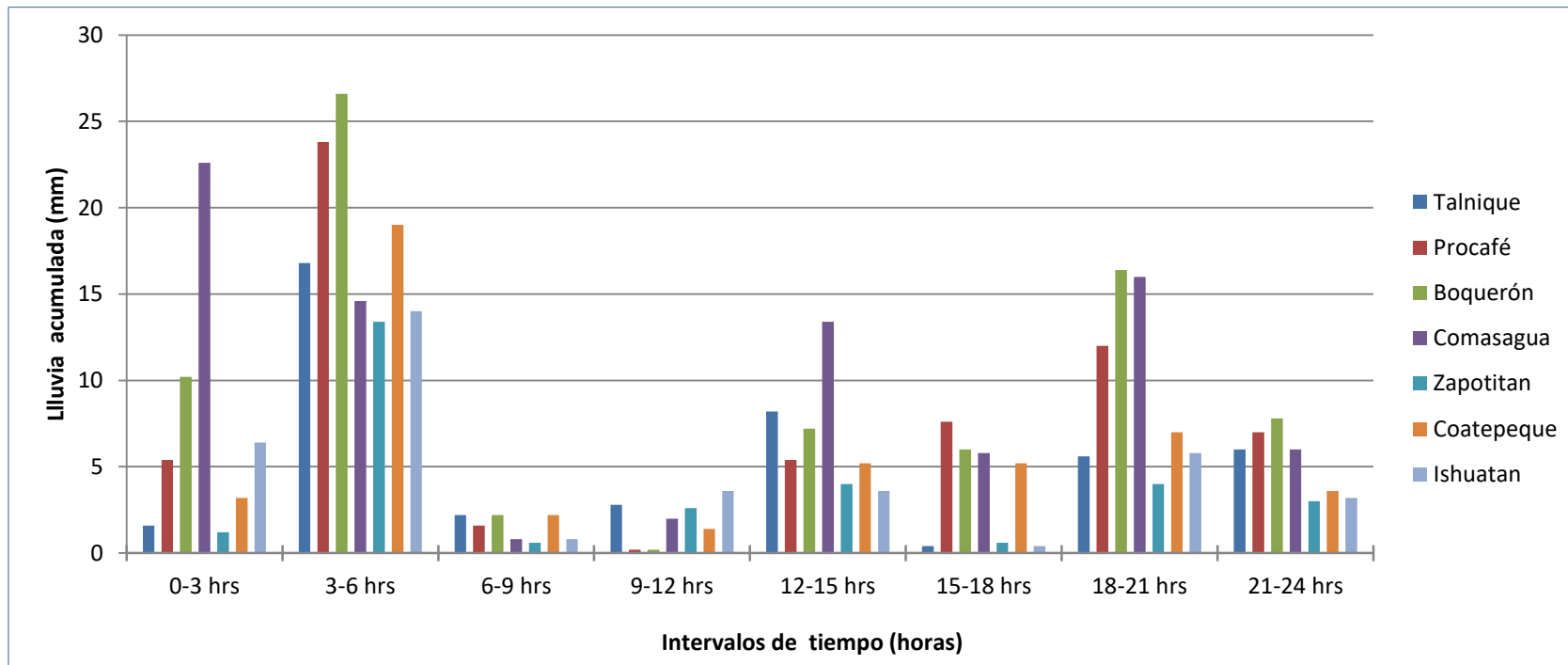


Figura 3. 20: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, para el evento del 17 de Octubre de 2015.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

3.4.3 ESTACIONES PLUVIOMETRICAS SELECCIONADAS Y ACUMULADO DE LLUVIA PARA LA DEPRESIÓN TROPICAL 12-E

Las estaciones pluviométricas establecidas para el análisis de la DT 12-E, fueron seleccionadas por su homogeneidad en los datos registrados y proporcionados por la DGOA, por estar cerca o dentro de la cuenca en estudio. En la Figura 3.21 se muestra la ubicación de las estaciones. La Tabla 3.4 muestra las estaciones con sus coordenadas y elevación. Todas las elevaciones correspondientes a cada estación, fueron obtenidas por Google Earth.



Figura 3. 21: Ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas por su incidencia en la cuenca del Río Sucio.

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION (M.S.N.M)
Belloso	13° 41' 34.8"	-89° 11' 27.6"	658
Boquerón	13° 44' 2.4"	-89° 16' 1.2"	1589
Ilopango	13° 41' 52.8"	-89° 7' 4.8"	616
La Cima	13° 39' 32.4"	-89° 12' 54"	932
Picacho	13° 45' 54"	-89° 15' 21.6"	1150
Procafé	13° 41' 2.4"	-89° 17' 13.2"	963
Coatepeque	13° 52' 12"	-89° 30' 36"	937
Nueva Concepción	14° 7' 37.2"	-89° 17' 24"	325

Tabla 3. 4: Estaciones pluviométricas con sus coordenadas.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

Al igual que en el evento aislado, se obtuvo el acumulado de lluvia para intervalos de tiempo de cada 3 horas. En las tablas y gráficos siguientes, se muestra el acumulado por cada periodo para todas las estaciones, desde el 10 al 20 de Octubre, considerando que la lluvia corresponde a partir de las 7:00 horas del día en cuestión, hasta las 7:00 horas del día siguiente.

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	10/10/2011	0	0	0	0	0	0	0	0.228
3-6 hrs	10:00-12:00	10/10/2011	0.2	0	0	0	0	11.6	0	0.216
6-9 hrs	13:00-15:00	10/10/2011	0	3.6	0	4.8	0.4	1.2	0	0.216
9-12 hrs	16:00-18:00	10/10/2011	0	0	0	0.2	0	0	0	0.216
12-15 hrs	19:00-21:00	10/10/2011	0	1	0	0.6	0.2	0	0	0.216
15-18 hrs	22:00-0:00	11/10/2011	2.6	0.4	0.6	0.2	0.4	1.2	0.04	0.144
18-21 hrs	1:00-3:00	11/10/2011	14.8	4.2	4.8	6.6	3.4	6.4	0.212	0
21-24 hrs	4:00-6:00	11/10/2011	4	9.6	1.2	5.6	11	10.2	0.216	0

Tabla 3. 5: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 10 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

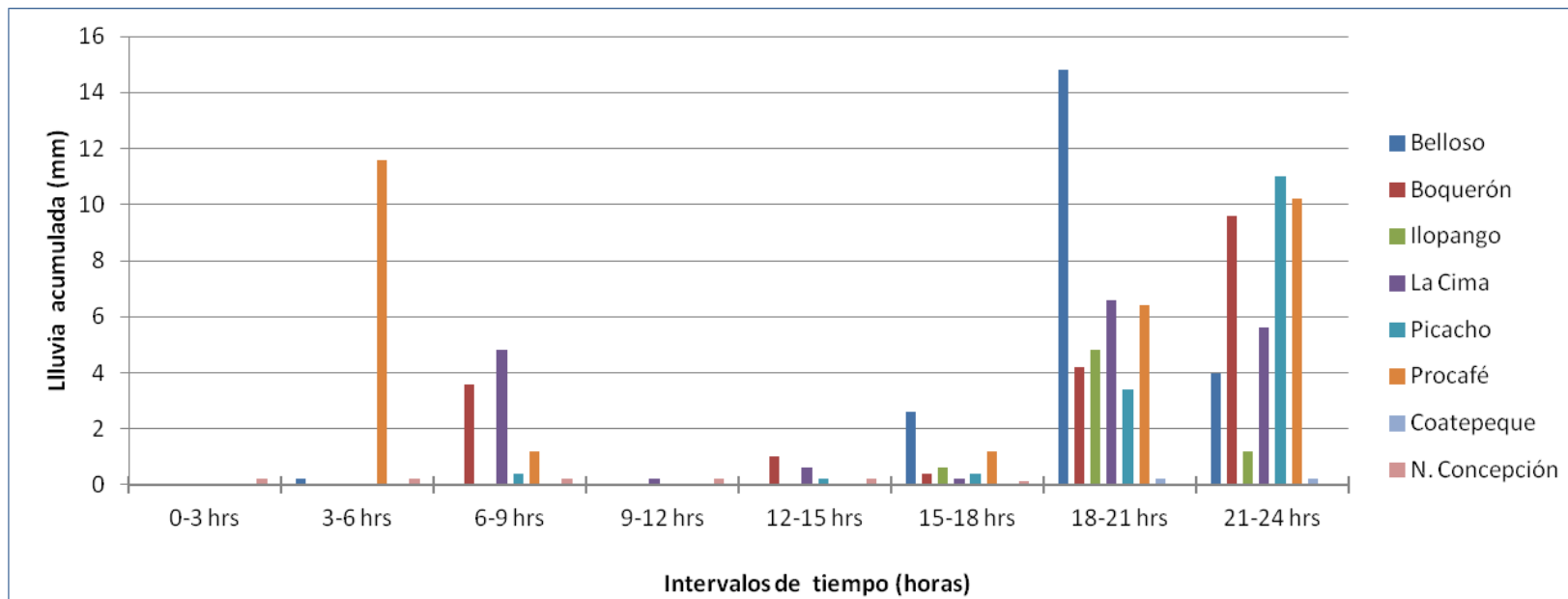


Figura 3. 22: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 10 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	11/10/2011	1.6	1.2	3	2.2	1.4	2.2	0.216	0
3-6 hrs	10:00-12:00	11/10/2011	6.4	5.4	3.6	5.6	6	7.6	0.216	0
6-9 hrs	13:00-15:00	11/10/2011	0.2	1.6	0.4	0.6	1.2	2.4	0.216	0
9-12 hrs	16:00-18:00	11/10/2011	26.6	61.4	49.6	23.4	45.8	65.6	0.216	0
12-15 hrs	19:00-21:00	11/10/2011	6.2	16.8	4	8.6	17	17.4	0.216	0
15-18 hrs	22:00-0:00	12/10/2011	1.8	5.4	2.2	7.2	5.8	5.8	9.406	2.768
18-21 hrs	1:00-3:00	12/10/2011	2.8	9.8	3	6.2	8.8	9.4	27.918	8.352
21-24 hrs	4:00-6:00	12/10/2011	5.4	21	8.6	7	18.6	14.6	27.918	8.352

Tabla 3. 6: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 11 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

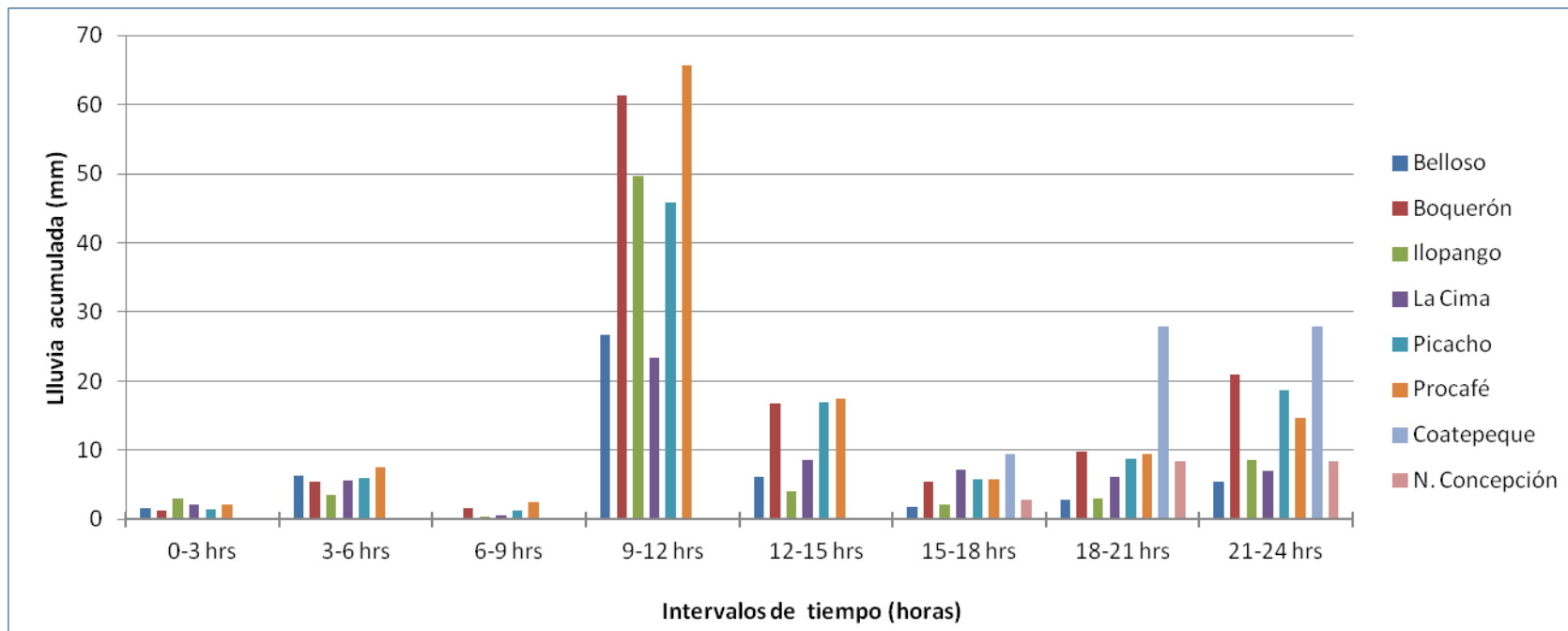


Figura 3. 23: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 11 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	12/10/2011	7	14.4	10.2	10.2	11.4	11.4	27.918	8.352
3-6 hrs	10:00-12:00	12/10/2011	7	20.2	5.8	6.2	16.8	11.4	27.918	8.352
6-9 hrs	13:00-15:00	12/10/2011	1.8	4.2	3.2	3.2	7.2	8.4	27.918	8.352
9-12 hrs	16:00-18:00	12/10/2011	0.4	1	0	2	1	1	27.918	8.352
12-15 hrs	19:00-21:00	12/10/2011	0	0.6	0	0	1.4	2.6	27.918	8.352
15-18 hrs	22:00-0:00	13/10/2011	4.4	5	8.6	3	7.6	8.6	23.054	6.724
18-21 hrs	1:00-3:00	13/10/2011	0.8	0	2.2	0.4	0.6	1	13.338	3.384
21-24 hrs	4:00-6:00	13/10/2011	1.6	2.8	1.4	2.4	2.6	4	13.338	3.384

Tabla 3. 7: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 12 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

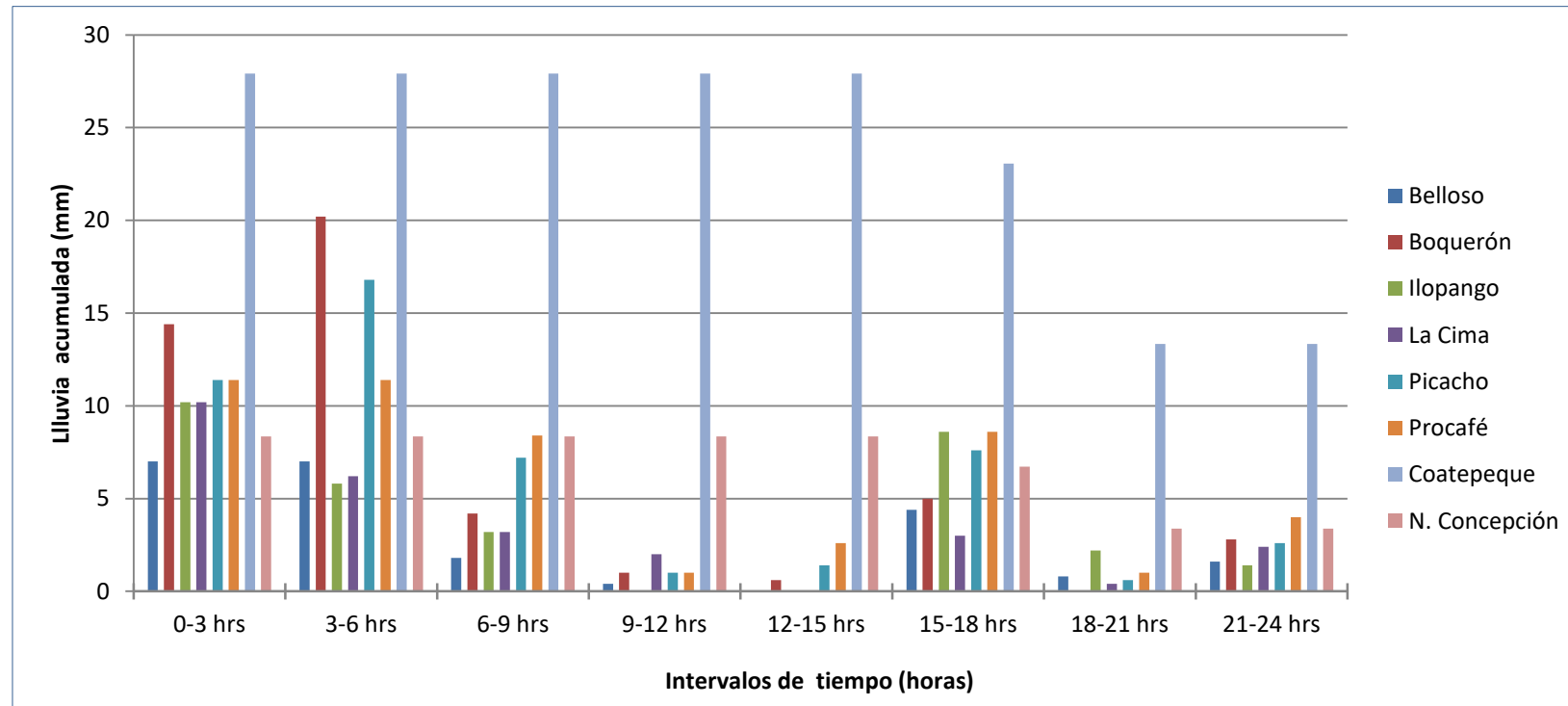


Figura 3. 24: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 12 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	13/10/2011	0.8	1.8	1	2.6	2.2	4.6	13.338	3.384
3-6 hrs	10:00-12:00	13/10/2011	1.2	2.6	1	2	3.2	3.6	13.338	3.384
6-9 hrs	13:00-15:00	13/10/2011	0.4	0	0.4	0.2	0.4	0.4	13.338	3.384
9-12 hrs	16:00-18:00	13/10/2011	0	0	0	0.2	0	0	13.338	3.384
12-15 hrs	19:00-21:00	13/10/2011	0	0	0	0	0.2	0	13.338	3.384
15-18 hrs	22:00-0:00	14/10/2011	0	0	1.6	0	0	0	9.212	2.444
18-21 hrs	1:00-3:00	14/10/2011	1	2	1.2	2.8	2	4	1.08	0.432
21-24 hrs	4:00-6:00	14/10/2011	4.2	2	3	4.4	1.8	3.4	1.08	0.432

Tabla 3. 8: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 13 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

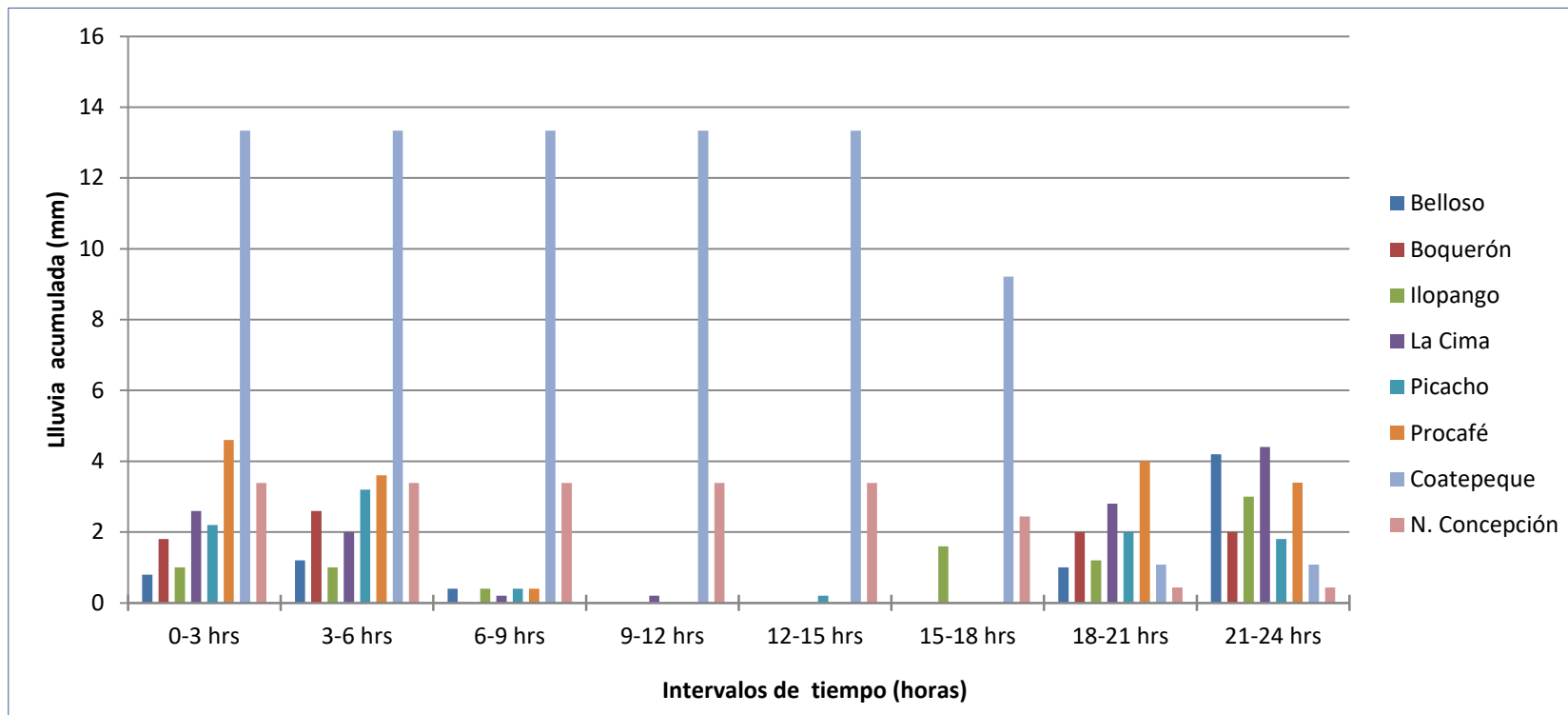


Figura 3. 25: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 13 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	14/10/2011	14.8	19	29.2	12	16	19.6	1.08	0.432
3-6 hrs	10:00-12:00	14/10/2011	12	17.6	11	6.2	15.6	4	1.08	0.432
6-9 hrs	13:00-15:00	14/10/2011	14.4	18.8	9.6	11	16.4	38.2	1.08	0.432
9-12 hrs	16:00-18:00	14/10/2011	0.8	3.6	0.4	0.4	2	1.4	1.08	0.432
12-15 hrs	19:00-21:00	14/10/2011	0	0.2	0	0	0	0	1.08	0.432
15-18 hrs	22:00-0:00	15/10/2011	0	0	1	0.2	0	0	1.596	0.834
18-21 hrs	1:00-3:00	15/10/2011	1.8	0.4	6.6	1.8	0	1	2.664	1.494
21-24 hrs	4:00-6:00	15/10/2011	2	0.8	3.2	3	0	2.6	2.664	1.494

Tabla 3. 9: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 14 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

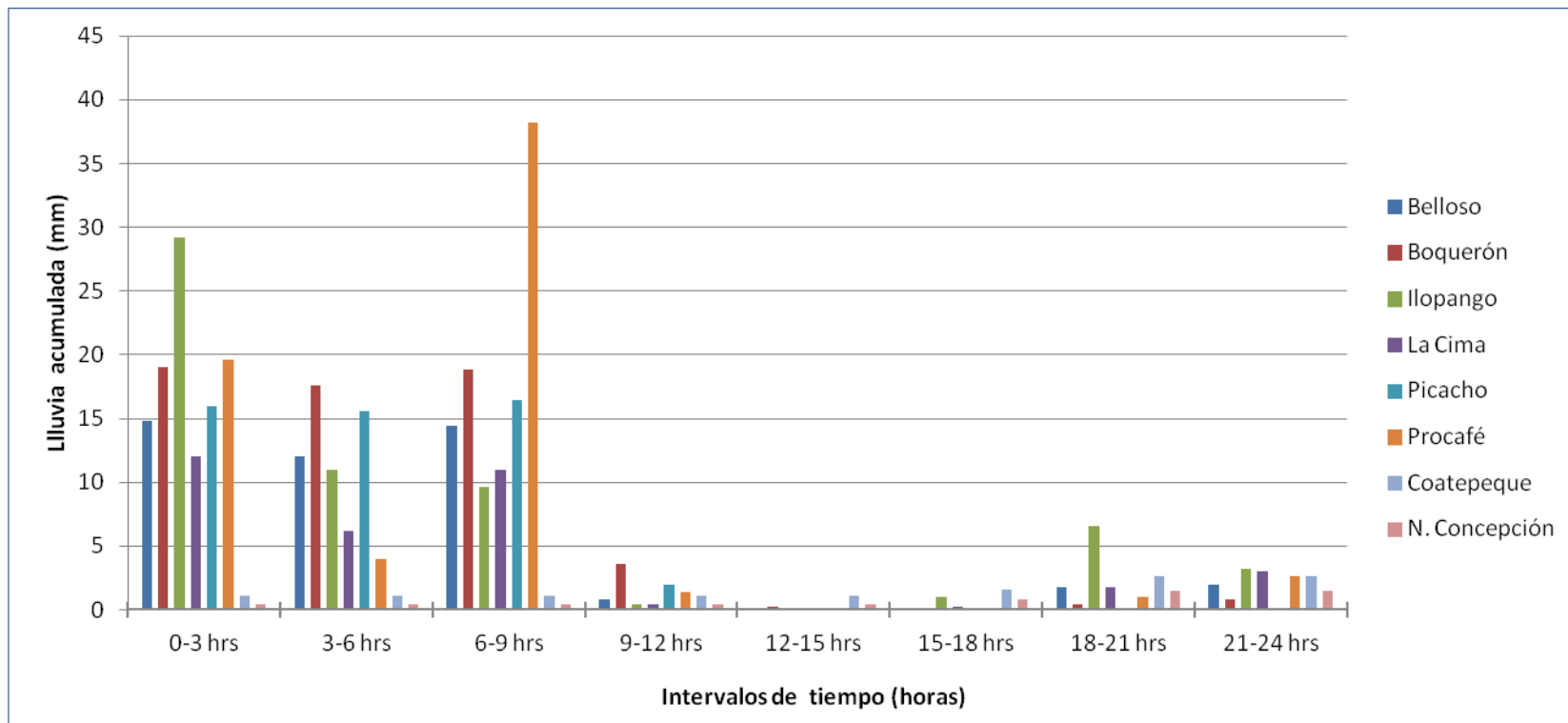


Figura 3. 26: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 14 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	15/10/2011	5	3.8	6	3.6	0	5	2.664	1.494
3-6 hrs	10:00-12:00	15/10/2011	3.2	2.6	5.2	2.6	0	4.4	2.664	1.494
6-9 hrs	13:00-15:00	15/10/2011	6.4	11	2.4	6.4	2.2	11.6	2.664	1.494
9-12 hrs	16:00-18:00	15/10/2011	24.2	31.2	25.4	27.2	22.2	27	2.664	1.494
12-15 hrs	19:00-21:00	15/10/2011	25.2	58.8	10.8	18.2	48.2	44.6	2.664	1.494
15-18 hrs	22:00-0:00	16/10/2011	8.8	46.4	9.4	12	30.8	41.8	9.252	3.516
18-21 hrs	1:00-3:00	16/10/2011	7.6	33.6	9.4	9.2	31	33.4	22.464	7.38
21-24 hrs	4:00-6:00	16/10/2011	1.4	2.8	1.4	1.2	0	6	22.464	7.38

Tabla 3. 10: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 15 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

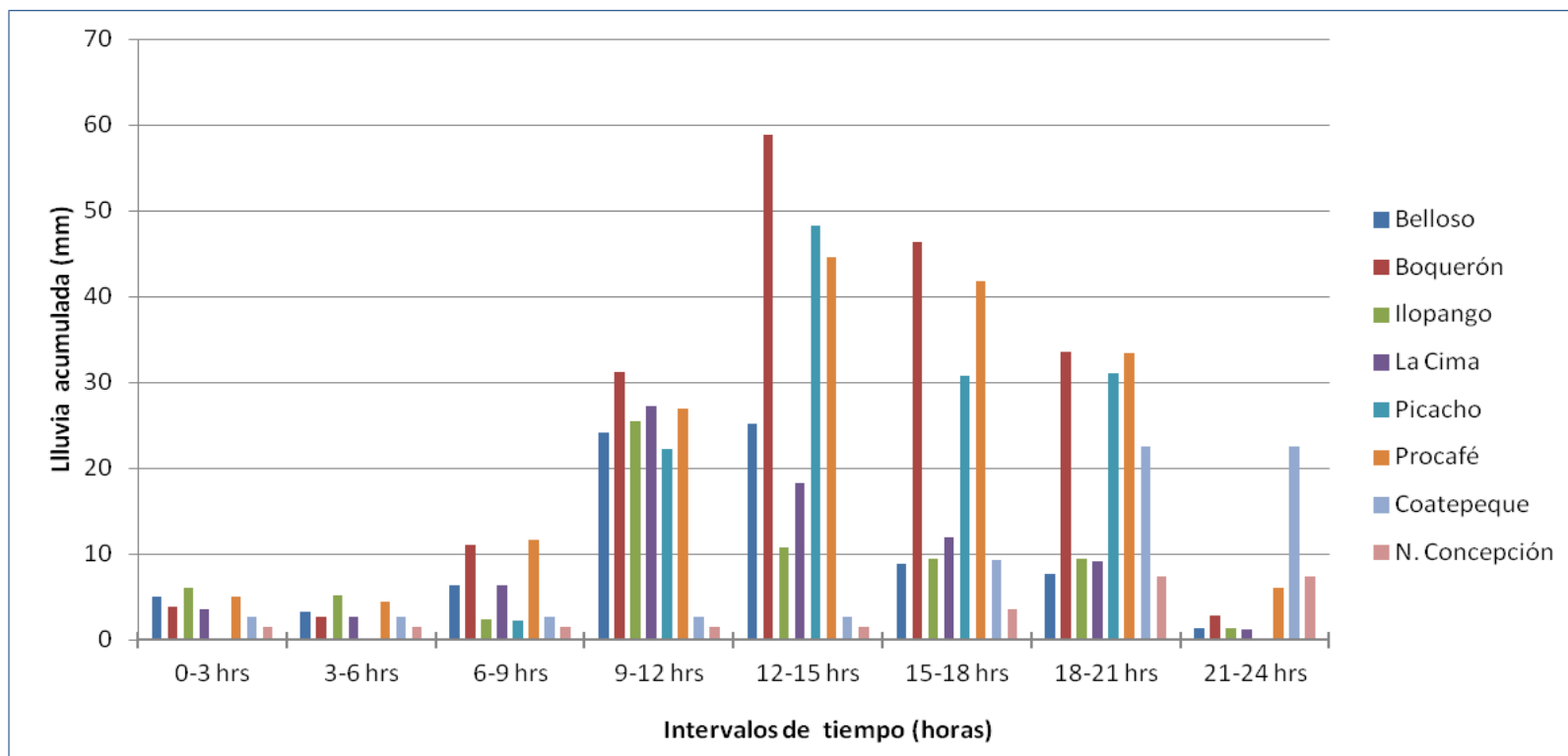


Figura 3. 27: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 15 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis.

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	16/10/2011	17.2	28	8.6	13.6	19.2	21.2	22.464	7.38
3-6 hrs	10:00-12:00	16/10/2011	1.2	15.6	4.4	3.2	6	15.6	22.464	7.38
6-9 hrs	13:00-15:00	16/10/2011	3.4	24.2	6.6	5.8	21.6	15.2	22.464	7.38
9-12 hrs	16:00-18:00	16/10/2011	2	6.6	2.8	3.6	3.2	5.4	22.464	7.38
12-15 hrs	19:00-21:00	16/10/2011	4.8	7.8	4.8	5.6	2.8	8.4	22.464	7.38
15-18 hrs	22:00-0:00	17/10/2011	3.6	17.2	11.6	5	8.8	6.6	19.068	7.074
18-21 hrs	1:00-3:00	17/10/2011	1.2	12.8	2.2	3.2	4	8.2	12.276	6.606
21-24 hrs	4:00-6:00	17/10/2011	0.4	5.4	1.4	1	0.4	5.8	12.276	6.606

Tabla 3. 11: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 16 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis.

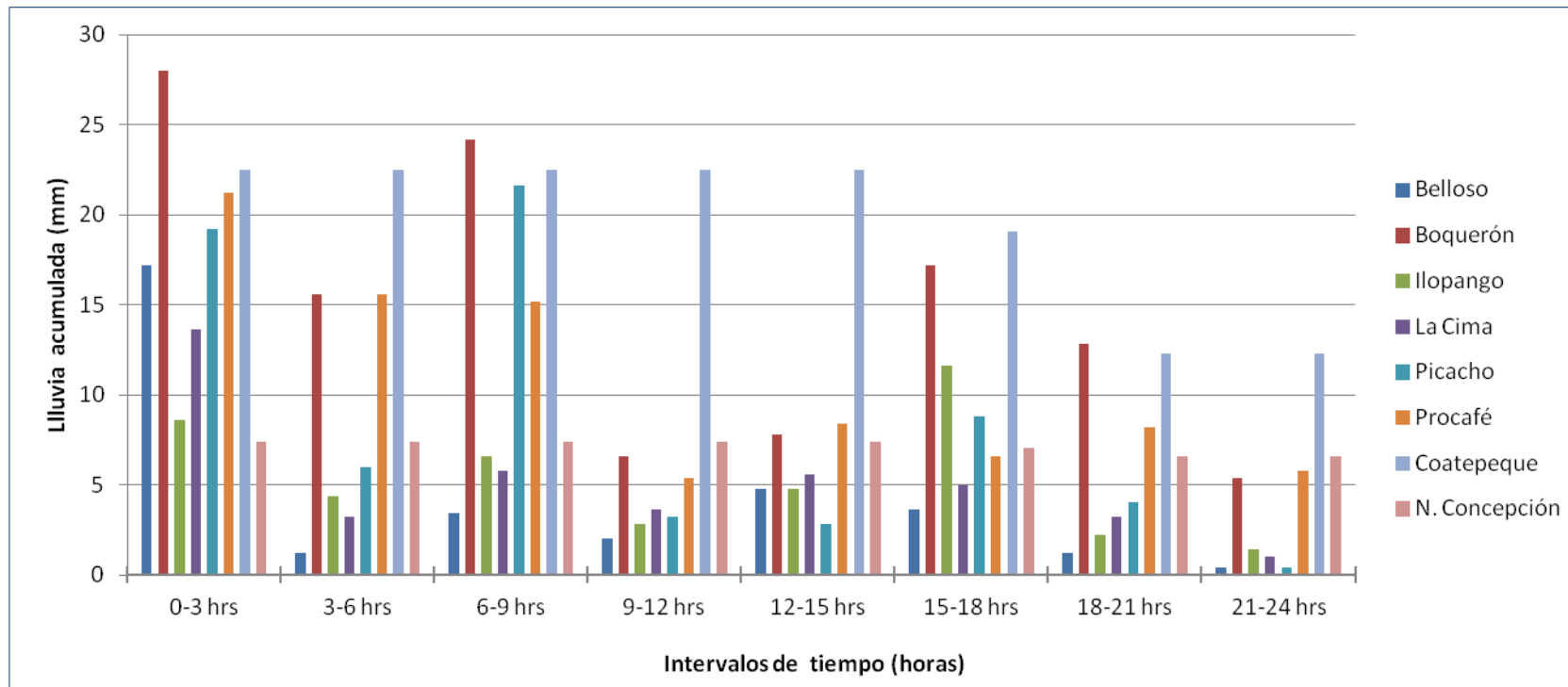


Figura 3. 28: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 16 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	17/10/2011	1.2	8.8	1.4	3.2	3.6	6.4	12.276	6.606
3-6 hrs	10:00-12:00	17/10/2011	0.8	9.6	2	3.8	2.4	6.6	12.276	6.606
6-9 hrs	13:00-15:00	17/10/2011	0	4.8	1.2	2.2	0.8	4.4	12.276	6.606
9-12 hrs	16:00-18:00	17/10/2011	1	2.2	3.6	2.2	0.4	3.2	12.276	6.606
12-15 hrs	19:00-21:00	17/10/2011	1.4	3.6	0.8	1.4	0	5	12.276	6.606
15-18 hrs	22:00-0:00	18/10/2011	0	0.4	0.2	0	0	1	8.948	4.588
18-21 hrs	1:00-3:00	18/10/2011	0	0	0.2	0.2	0	0.6	2.196	0.576
21-24 hrs	4:00-6:00	18/10/2011	0.6	0	0.4	0.4	0	0	2.196	0.576

Tabla 3. 12: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 17 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

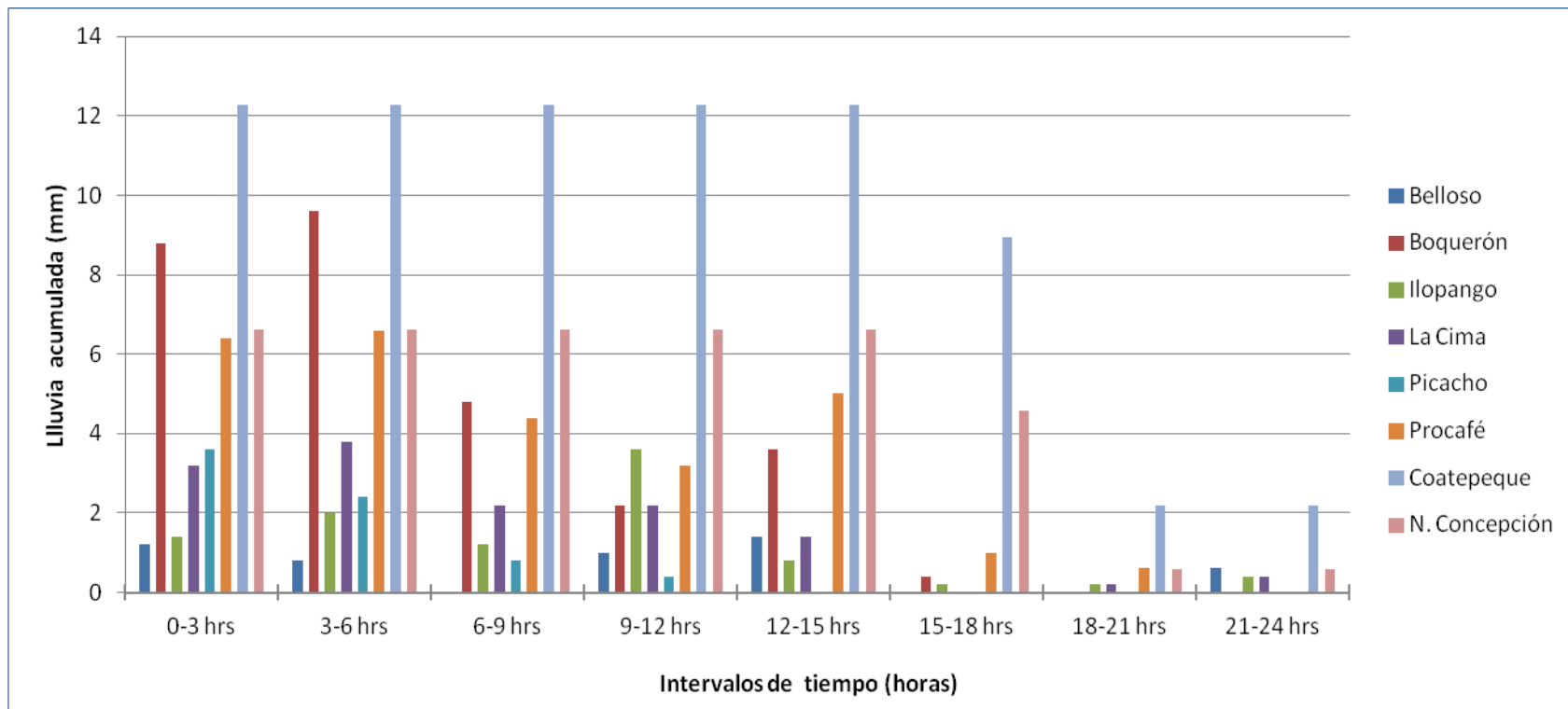


Figura 3. 29: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 17 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	18/10/2011	0	0.6	0	0	0	0.6	2.196	0.576
3-6 hrs	10:00-12:00	18/10/2011	0	0.2	0	0.2	0.2	0.2	2.196	0.576
6-9 hrs	13:00-15:00	18/10/2011	0	0	0	0	0	0.2	0	0.576
9-12 hrs	16:00-18:00	18/10/2011	0	0	0	0	0	0	4.392	0.576
12-15 hrs	19:00-21:00	18/10/2011	0	0	0	0	0	0	2.196	0.576
15-18 hrs	22:00-0:00	19/10/2011	0	0	0	0	0.2	0	3.1	0.432
18-21 hrs	1:00-3:00	19/10/2011	0	0.6	0	0	0	0.4	5.004	0.072
21-24 hrs	4:00-6:00	19/10/2011	6.4	9.2	8.6	5	2.4	6.6	5.004	0.072

Tabla 3. 13: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 18 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

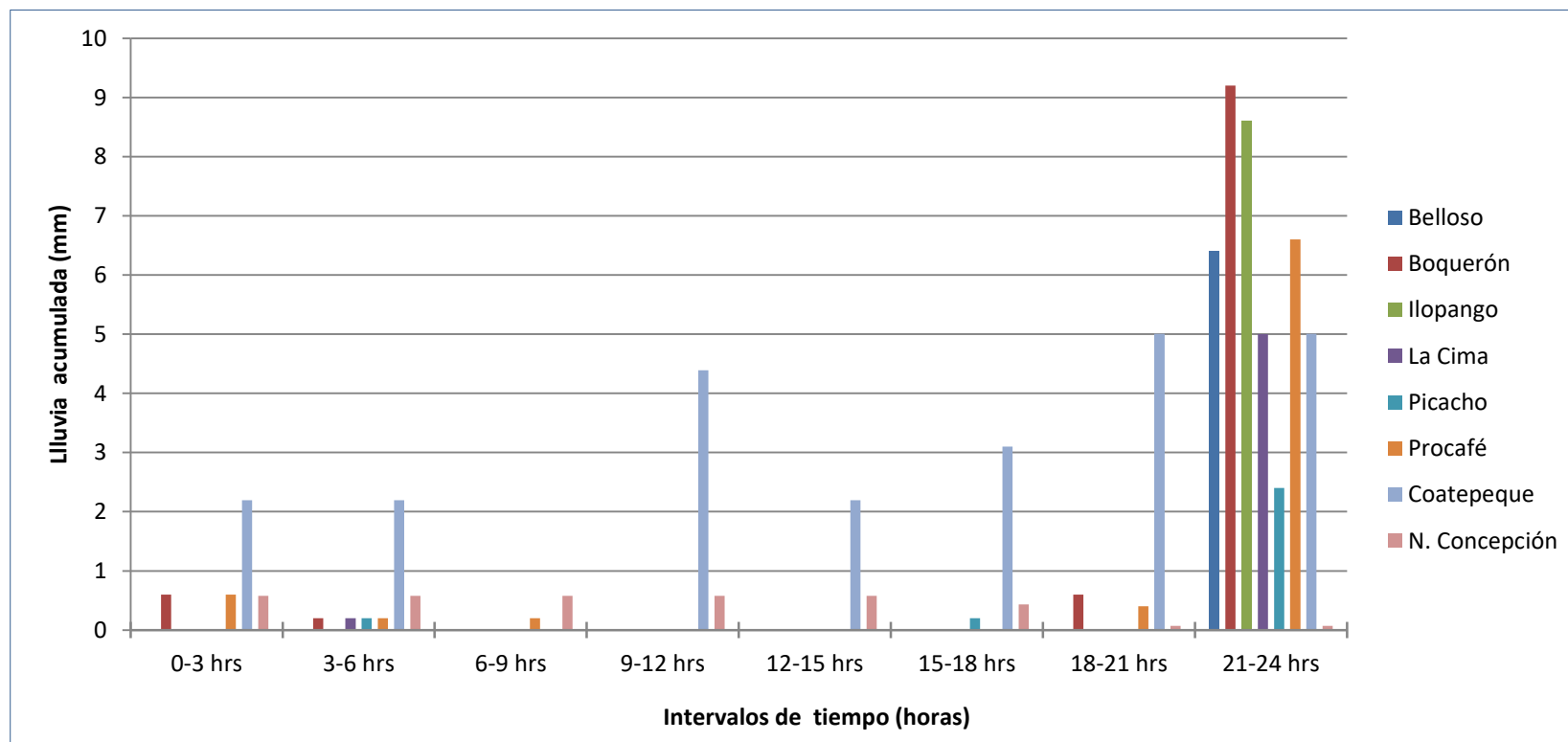


Figura 3. 30: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 18 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	19/10/2011	21.4	25	26.4	9.8	19.6	25.4	5.004	0.072
3-6 hrs	10:00-12:00	19/10/2011	7.6	10.2	4.6	2.6	2.4	12	5.004	0.072
6-9 hrs	13:00-15:00	19/10/2011	2.6	3.6	1.4	1	0.8	4	5.004	0.072
9-12 hrs	16:00-18:00	19/10/2011	0.2	0	0.4	0	0	0	5.004	0.072
12-15 hrs	19:00-21:00	19/10/2011	0	0	0	0	0	0	5.004	0.072
15-18 hrs	22:00-0:00	20/10/2011	0	0	0	0	0	0	5.596	0.952
18-21 hrs	1:00-3:00	20/10/2011	0	0	0	0	0	0	6.84	2.556
21-24 hrs	4:00-6:00	20/10/2011	0	0	0.2	0	0	0	6.84	2.556

Tabla 3. 14: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 19 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

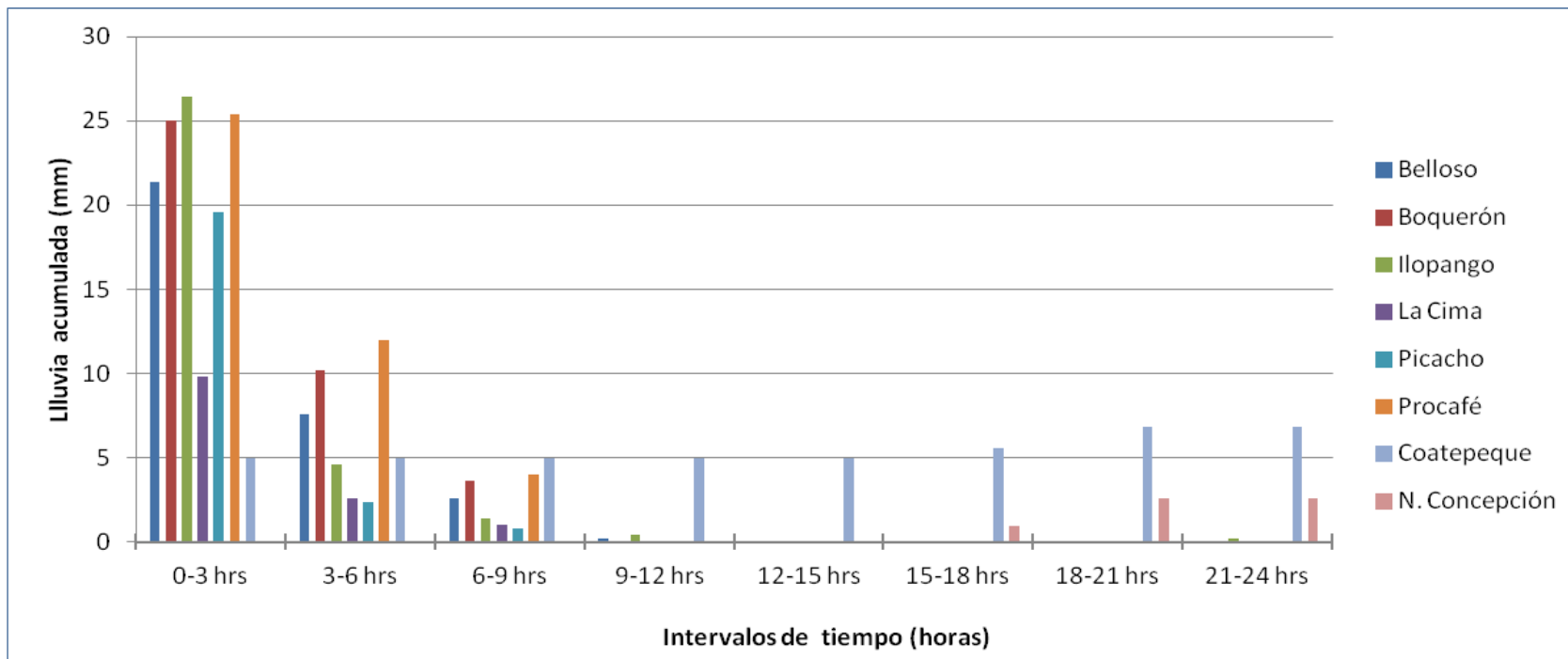


Figura 3. 31: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 19 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

PERÍODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA ACUMULADA (MM)							
			BELLOSO	BOQUERÓN	ILOPANGO	LA CIMA	PICACHO	PROCAFE	COATEPEQUE	NUEVA CONCEPCIÓN
0-3 hrs	7:00-9:00	20/10/2011	0	0	0	0	0	0	6.84	2.556
3-6 hrs	10:00-12:00	20/10/2011	0	0	0	0	0	0	6.84	2.556
6-9 hrs	13:00-15:00	20/10/2011	0	0	0	0	0	0	6.84	2.556
9-12 hrs	16:00-18:00	20/10/2011	0	0	0	0	0	0	6.84	2.556
12-15 hrs	19:00-21:00	20/10/2011	0	0	0	0	0	0	6.84	2.556
15-18 hrs	22:00-0:00	21/10/2011	0	0	0	0	0	0	4.56	1.704
18-21 hrs	1:00-3:00	21/10/2011	0	0	0	0	0	0	0	0
21-24 hrs	4:00-6:00	21/10/2011	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3. 15: Lluvia acumulada para intervalos de tiempo de cada 3 horas, para el día 20 de Octubre de 2011.

FUENTE: Elaborado por grupo de tesis

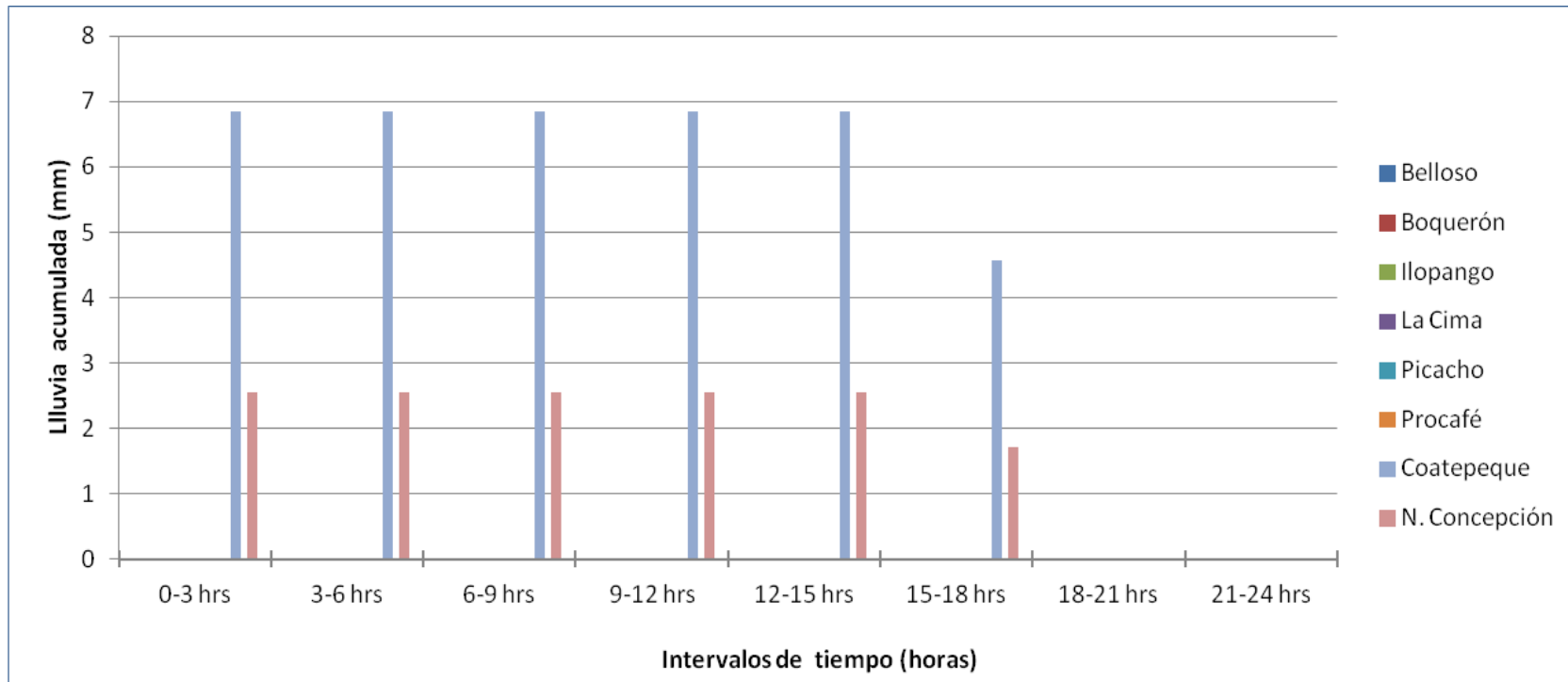


Figura 3. 32: Gráfico correspondiente a lluvia acumulada por intervalos de tiempo de 3 horas, para cada una de las estaciones, del día 20 de Octubre de 2011. FUENTE: Elaborado por grupo de tesis.

3.5 DETERMINACIÓN DE LA LLUVIA MEDIA OBSERVADA

3.5.1 GENERALIDADES

Con los datos de lluvia acumulada en tablas de Excel, guardados en formato CSV (delimitado por comas), para intervalos de tiempo de cada 3 horas, con el software de apoyo Surfer 12, se procede a la interpolación de los datos de lluvia para obtener isoyetas y generar archivos grid, que exportados al programa ArcGIS 10.4²⁰ se procede hasta obtener los valores de la lluvia media, tanto para el evento de corta duración, como para el evento prolongado.

3.5.2 INTERPOLACIÓN DE DATOS DE LLUVIA

La interpolación es el proceso de utilizar puntos con valores conocidos para estimar valores desconocidos en otros puntos. Por ejemplo, para realizar un mapa de precipitación (Lluvia) para la cuenca en estudio, no se encontrarán suficientes estaciones meteorológicas distribuidas uniformemente para cubrir toda la región. La interpolación espacial puede estimar la precipitación en zonas que no tienen ese dato utilizando lecturas de precipitación conocida en estaciones meteorológicas cercanas.

Utilizando el programa Surfer 12, con las tablas elaboradas en Excel, conteniendo el acumulado de lluvia para cada periodo por día, se procede a la interpolación de los valores. Por defecto el programa tiene múltiples métodos de interpolación; para ambos eventos se decide utilizar el método de interpolación conocido como Kriging, puesto que es el método que más experiencia se tiene en el país para análisis de eventos de lluvia.

²⁰ La versión ArcGIS 10.4 que se utiliza en esta investigación fue proporcionado por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), propiedad del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Kriging, es un método geoestadístico que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

3.5.2.1 PROCEDIMIENTO PARA LA INTERPOLACIÓN

Los datos de entrada para llevar a cabo la interpolación en Surfer, deben estar en un archivo Excel guardado en el tipo CSV delimitado por comas, que contenga el nombre de las estaciones, las coordenadas "X" y "Y" que corresponden a la longitud y latitud respectivamente, así como la lluvia acumulada que se denomina como PP.

Al abrir el programa, para la creación de un GRD, del menú Grig, se selecciona Data, de la ventana que aparece, se busca el archivo donde se tienen los datos, dando clic en abrir, aparece una ventana donde debe rellenarse los datos siguientes:

En la ventana se debe rellenar la siguiente información:

Data Columns: Se debe verificar que los datos asignados por SURFER a las variables (X, Y, Z), sean las mismas ingresadas en la serie de datos. Para lo cual se utiliza el título de cada columna, que fue ingresado en el conjunto de datos.

Gridding Method: Se ofrece una diversidad de métodos para realizar la grilla de interpolación, incluyendo métodos geoestadísticos y determinísticos, pero en este caso se aplicará Kriging (Que es un método geoestadístico).

Output Grid File: Indicar la ruta y el nombre con el que se guardará el Grid de salida.

Grid Line Geometry: Se muestran mínimos y máximos de la serie, de tal manera que a la hora de generar los ráster en ArcGIS, cubran toda la cuenca, la discretización o tamaño de celda a la cual quiere hacerse la interpolación y el número de divisiones horizontales y verticales. En este caso particular, se generará una malla de interpolación de 100 x 95 metros, utilizando para ello los puntos que se poseen.

Grid Reporte: Se puede deshabilitar o dejarlo habilitado, en este caso de deshabilita.

Después de rellenar los datos necesarios, la ventana se verá de la siguiente forma:

Grid Data - C:\Users\ASTRID\Desktop\PRUEBA EVENTO PEQUEÑO 26 ...

Data Columns (7 data points)

X: Column C: LONGITUD

Y: Column B: LATITUD

Z: Column D: PP

Gridding Method: Kriging

Output Grid File: C:\Users\ASTRID\Desktop\PRUEBA EVENTO PEQUEÑO 26 SEP\17 OCTUBRE 24 H

Grid Line Geometry

	Minimum	Maximum	Spacing	# of Nodes
X Direction:	-89.844	-89.0468	0.00805252525	100
Y Direction:	13.606	14.1486	0.00577234042	95

Z Transform: Linear

Figura 3. 33: Cuadro de selección y relleno de valores para generar archivo GRD.

Se le da ok, y procede una ventana donde da la opción de guardar el archivo que ha generado, en formato.grd.

Para generar el mapa de contorno, en el menú Map, se selecciona New, seguido de Contour Map, aparece una ventana donde se debe abrir el grid generado, a partir del cual se realizará el mapa de contorno, o conocido como isoyetas, que son isolíneas que unen los puntos que presentan la misma precipitación en la unidad de tiempo considerada. Este procedimiento es igual para todos los periodos de ambos eventos.

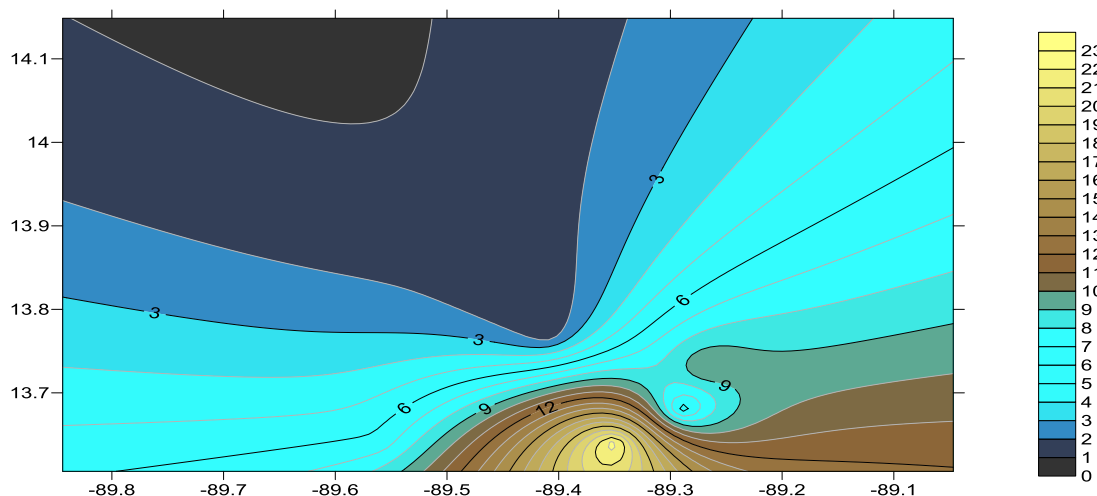


Figura 3. 34: Isoyetas generadas para el evento del 17 de octubre de 2015, en el intervalo de 0-3 horas.

3.5.3 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA LLUVIA MEDIA REGISTRADA EN ARCGIS

Se requiere de los archivos GRD generados en Surfer, ya que éstos se utilizan en ArcGIS, para generar los ráster del acumulado de lluvia, y poder obtener la lluvia media.

Antes de conocer el procedimiento, es necesario tener en claro algunos conceptos. En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (O píxeles) organizadas en filas y columnas (O una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la lluvia.

Algunos rásteres tienen una banda única, o capa (Una medida de una sola característica) de datos, mientras que otros tienen múltiples bandas. Básicamente, una banda se representa con una sola matriz de valores de celda, y un ráster con múltiples bandas contiene múltiples matrices de valores de celda que coinciden espacialmente y que representan la misma área espacial.

Una de las formas principales de visualizar (Representar) datasets ráster de banda única, es un mapa de color. Un mapa de color es un conjunto de valores que están asociados con colores. Los mapas de color se utilizan para mostrar un ráster de banda única de manera coherente con los mismos colores. Cada valor de píxel está asociado con un color, que se define como un conjunto de valores de rojo, verde y azul (RGB). Como cada valor tiene un color distinto asociado, aparecerá siempre de la misma manera, cada vez que se abra en un programa que pueda leer un ráster con un mapa de color.

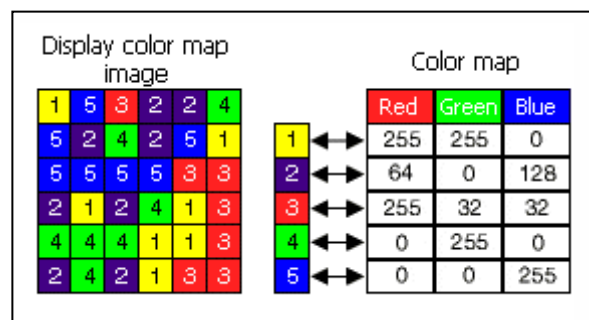


Figura 3. 35: Mapa de color para rásteres de banda única

Puesto que los grid generados en surfer corresponden a rásteres de una sola banda, la manera de su visualización es como un mapa de color.

Al abrir el programa, en la opción **Añadir datos**, aparece una ventana donde se busca el shape de la cuenca y se da clic en **Abrir**; para una mejor visualización se abre el shape de El Salvador, generándose en la tabla de contenidos los layers correspondientes.

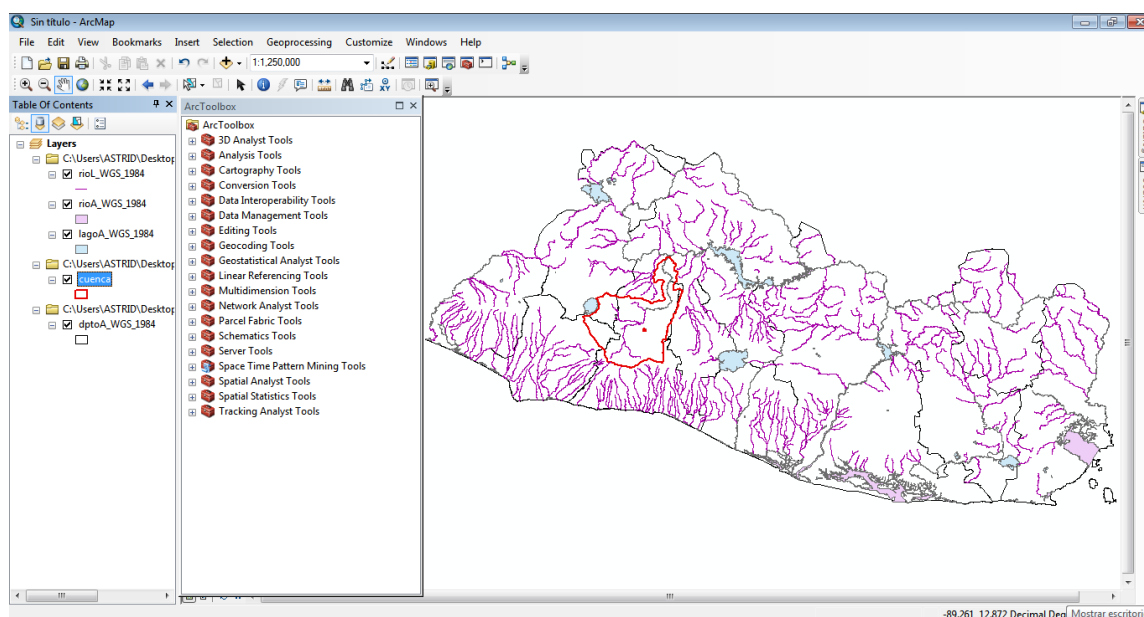


Figura 3. 36: Mapa de El Salvador junto a la ubicación de la Cuenca del Río Sucio en el espacio de trabajo de ArcMap.

Dando clic en **Añadir datos**, se busca el archivo GRD que se quiere analizar, dando clic en **Abrir**, se genera el ráster. En la Figura 3.37, se muestra el ráster correspondiente al intervalo de 0 a 3 horas para el evento convectivo del 17 de Octubre de 2015.

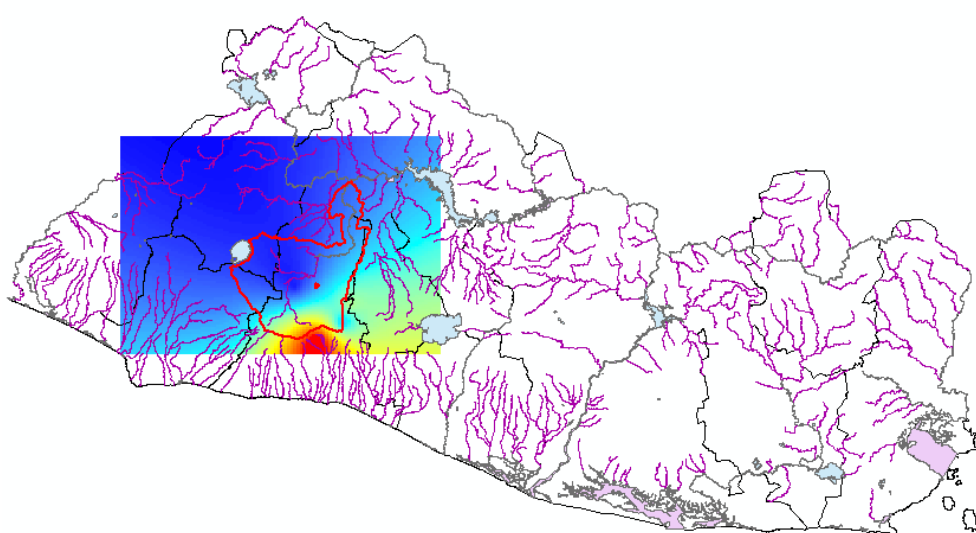


Figura 3. 37: Ráster para el periodo de 0- 3 horas del evento del 17 de Octubre de 2015.

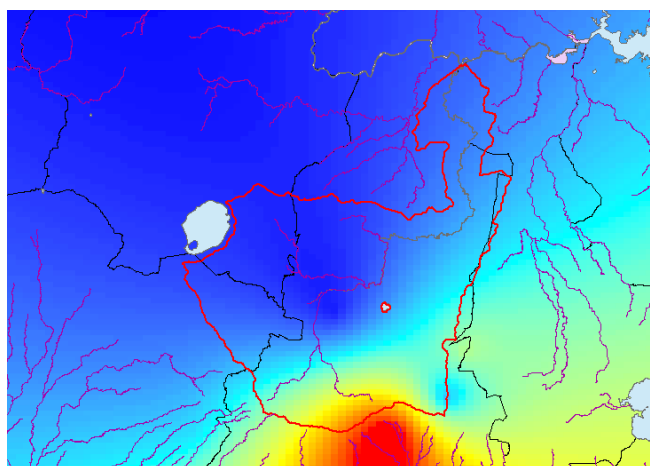


Figura 3. 38: Ráster para el periodo de 0- 3 horas del evento del 17 de Octubre de 2015.

Para conocer las propiedades del ráster, se da clic derecho sobre la capa generada en la tabla de contenido, seguido de **Propiedades**, aparece una ventana con diferentes opciones, dando clic en **Fuente**, se muestra la información del ráster como el número de columnas y filas, número de bandas, tamaño de celdas, entre otros. Efectivamente el ráster corresponde a un ráster de una sola banda.

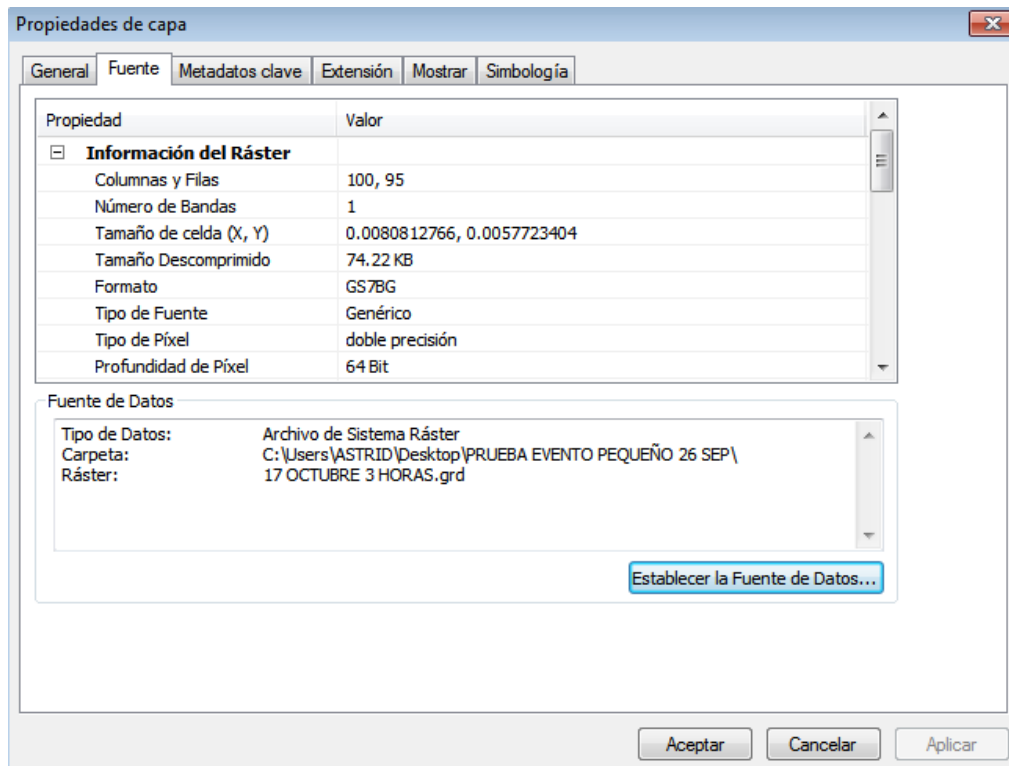


Figura 3. 39: Ventana de propiedades de capa

En la ventana de **ArcToolbox**, se selecciona la opción **Herramientas de Spatial Analyst**, seguida de **Estadísticas zonales como tabla**, aparece una ventana donde se debe rellenar lo siguiente:

Datos de zonas de entidad o ráster de entrada: el ráster que delimita las zonas, en este caso la cuenca.

Campo de zona: se deja por defecto Name.

Ráster de valores de entrada: el ráster al cual se le aplicara la estadística zonal, para este caso el que corresponde al periodo de 0-3 horas del 17 de octubre de 2015.

Tabla de salida: Indicar la ruta y el nombre con el que se guardará el resultado, se deja la ruta por defecto.

Tipo de estadística (Opcional): se selecciona Mean que se refiere a la media, es decir a la lluvia media.

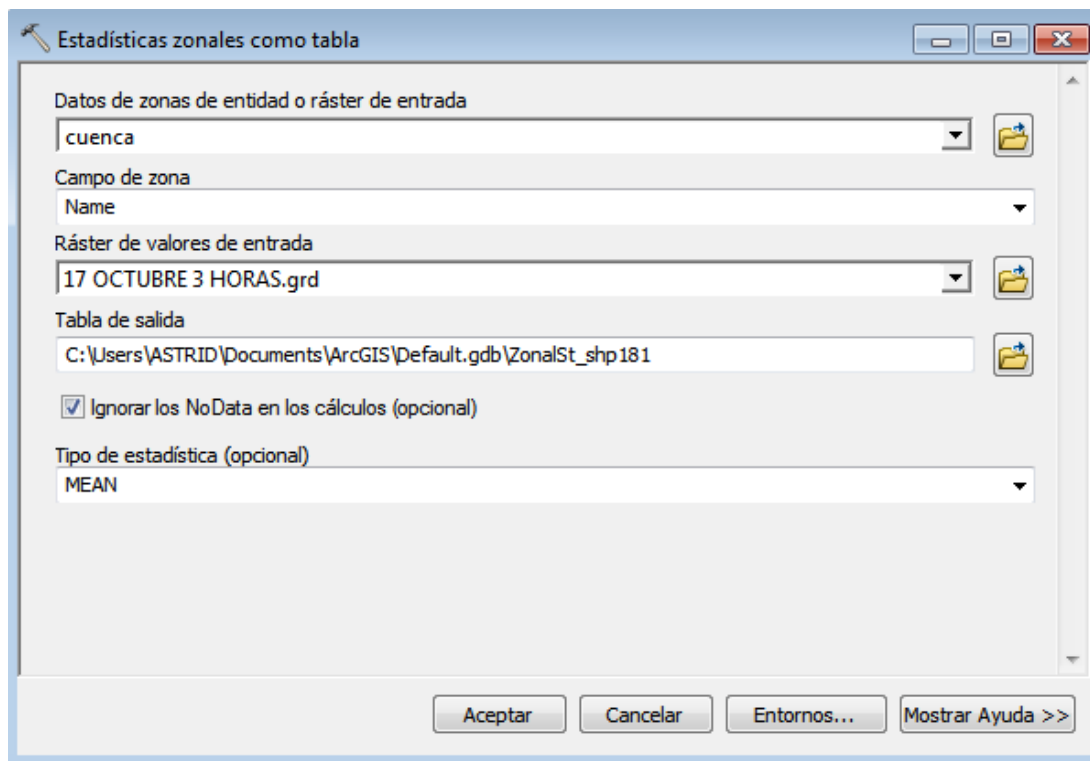


Figura 3. 40: Ventana de selección de valores para obtener la lluvia media.

Clic en **Aceptar**, en la tabla de contenido se genera la tabla, dando clic derecho, seguido de **Abrir**, se obtiene el valor de la media y otras características del elemento.

Para todos los periodos el procedimiento es igual, tanto para el evento del 17 de Octubre de 2015 como para la DT 12-E. Se obtuvo lo siguiente:

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	17/10/2015	4.774
3-6 hrs	10:00-12:00	17/10/2015	17.843
6-9 hrs	13:00-15:00	17/10/2015	1.477
9-12 hrs	16:00-18:00	17/10/2015	2.035
12-15 hrs	19:00-21:00	17/10/2015	6.424
15-18 hrs	22:00-0:00	18/10/2015	2.231
18-21 hrs	1:00-3:00	18/10/2015	8.246
21-24 hrs	4:00-6:00	18/10/2015	5.241

Tabla 3. 16: Lluvia media generada en ArcGIS para el evento del 17 de Octubre de 2015

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	10/10/2011	0.019
3-6 hrs	10:00-12:00	10/10/2011	2.701
6-9 hrs	13:00-15:00	10/10/2011	0.642
9-12 hrs	16:00-18:00	10/10/2011	0.017
12-15 hrs	19:00-21:00	10/10/2011	0.136
15-18 hrs	22:00-0:00	11/10/2011	0.321
18-21 hrs	1:00-3:00	11/10/2011	2.050
21-24 hrs	4:00-6:00	11/10/2011	5.461

Tabla 3. 17: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 10 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	11/10/2011	0.951
3-6 hrs	10:00-12:00	11/10/2011	3.341
6-9 hrs	13:00-15:00	11/10/2011	1.030
9-12 hrs	16:00-18:00	11/10/2011	29.321
12-15 hrs	19:00-21:00	11/10/2011	8.932
15-18 hrs	22:00-0:00	12/10/2011	7.187
18-21 hrs	1:00-3:00	12/10/2011	17.319
21-24 hrs	4:00-6:00	12/10/2011	21.487

Tabla 3. 18: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 11 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	12/10/2011	18.571
3-6 hrs	10:00-12:00	12/10/2011	20.202
6-9 hrs	13:00-15:00	12/10/2011	16.359
9-12 hrs	16:00-18:00	12/10/2011	13.059
12-15 hrs	19:00-21:00	12/10/2011	13.512
15-18 hrs	22:00-0:00	13/10/2011	14.282
18-21 hrs	1:00-3:00	13/10/2011	6.292
21-24 hrs	4:00-6:00	13/10/2011	7.601

Tabla 3. 19: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 12 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	13/10/2011	7.605
3-6 hrs	10:00-12:00	13/10/2011	7.642
6-9 hrs	13:00-15:00	13/10/2011	6.114
9-12 hrs	16:00-18:00	13/10/2011	5.946
12-15 hrs	19:00-21:00	13/10/2011	5.991
15-18 hrs	22:00-0:00	14/10/2011	4.126
18-21 hrs	1:00-3:00	14/10/2011	1.976
21-24 hrs	4:00-6:00	14/10/2011	1.666

Tabla 3. 20: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 13 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	14/10/2011	9.585
3-6 hrs	10:00-12:00	14/10/2011	5.790
6-9 hrs	13:00-15:00	14/10/2011	13.868
9-12 hrs	16:00-18:00	14/10/2011	1.507
12-15 hrs	19:00-21:00	14/10/2011	0.510
15-18 hrs	22:00-0:00	15/10/2011	0.753
18-21 hrs	1:00-3:00	15/10/2011	1.480
21-24 hrs	4:00-6:00	15/10/2011	1.847

Tabla 3. 21: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 14 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	15/10/2011	2.524
3-6 hrs	10:00-12:00	15/10/2011	2.366
6-9 hrs	13:00-15:00	15/10/2011	5.001
9-12 hrs	16:00-18:00	15/10/2011	13.904
12-15 hrs	19:00-21:00	15/10/2011	25.777
15-18 hrs	22:00-0:00	16/10/2011	23.964
18-21 hrs	1:00-3:00	16/10/2011	27.078
21-24 hrs	4:00-6:00	16/10/2011	11.706

Tabla 3. 22: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 15 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	16/10/2011	20.776
3-6 hrs	10:00-12:00	16/10/2011	16.264
6-9 hrs	13:00-15:00	16/10/2011	20.215
9-12 hrs	16:00-18:00	16/10/2011	12.544
12-15 hrs	19:00-21:00	16/10/2011	13.133
15-18 hrs	22:00-0:00	17/10/2011	13.394
18-21 hrs	1:00-3:00	17/10/2011	9.482
21-24 hrs	4:00-6:00	17/10/2011	7.596

Tabla 3. 23: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 16 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	17/10/2011	8.666
3-6 hrs	10:00-12:00	17/10/2011	8.524
6-9 hrs	13:00-15:00	17/10/2011	7.326
9-12 hrs	16:00-18:00	17/10/2011	6.735
12-15 hrs	19:00-21:00	17/10/2011	7.138
15-18 hrs	22:00-0:00	18/10/2011	4.445
18-21 hrs	1:00-3:00	18/10/2011	1.120
21-24 hrs	4:00-6:00	18/10/2011	0.957

Tabla 3. 24: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 17 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	18/10/2011	1.165
3-6 hrs	10:00-12:00	18/10/2011	1.086
6-9 hrs	13:00-15:00	18/10/2011	0.094
9-12 hrs	16:00-18:00	18/10/2011	0.642
12-15 hrs	19:00-21:00	18/10/2011	2.252
15-18 hrs	22:00-0:00	19/10/2011	1.397
18-21 hrs	1:00-3:00	19/10/2011	2.270
21-24 hrs	4:00-6:00	19/10/2011	4.671

Tabla 3. 25: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 18 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	19/10/2011	13.544
3-6 hrs	10:00-12:00	19/10/2011	5.933
6-9 hrs	13:00-15:00	19/10/2011	3.410
9-12 hrs	16:00-18:00	19/10/2011	2.126
12-15 hrs	19:00-21:00	19/10/2011	2.132
15-18 hrs	22:00-0:00	20/10/2011	2.456
18-21 hrs	1:00-3:00	20/10/2011	3.117
21-24 hrs	4:00-6:00	20/10/2011	3.119

Tabla 3. 26: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 19 de Octubre de 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	20/10/2011	3.117
3-6 hrs	10:00-12:00	20/10/2011	3.117
6-9 hrs	13:00-15:00	20/10/2011	3.117
9-12 hrs	16:00-18:00	20/10/2011	3.117
12-15 hrs	19:00-21:00	20/10/2011	3.414
15-18 hrs	22:00-0:00	21/10/2011	1.781
18-21 hrs	1:00-3:00	21/10/2011	0.000
21-24 hrs	4:00-6:00	21/10/2011	0.000

Tabla 3. 27: Lluvia media generada en ArcGIS para la DT 12-E del 20 de Octubre de 2011

3.5.4 MAPAS DE PRECIPITACION ACUMULADA A 24 HORAS

PRECIPITACIÓN DEL DÍA 17 DE OCTUBRE DE 2015

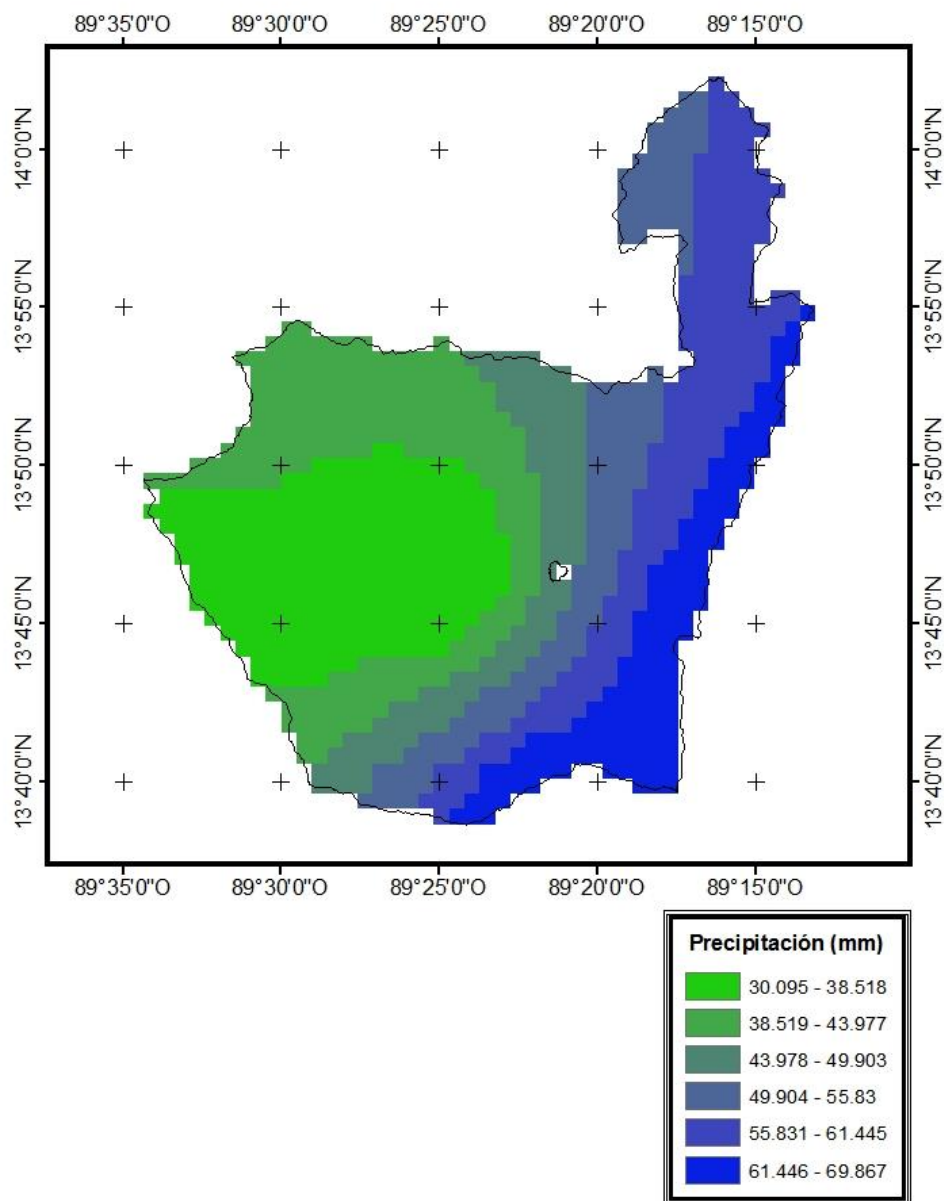


Figura 3. 41: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 17/10/15

PRECIPITACIÓN DEL DIA 10 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

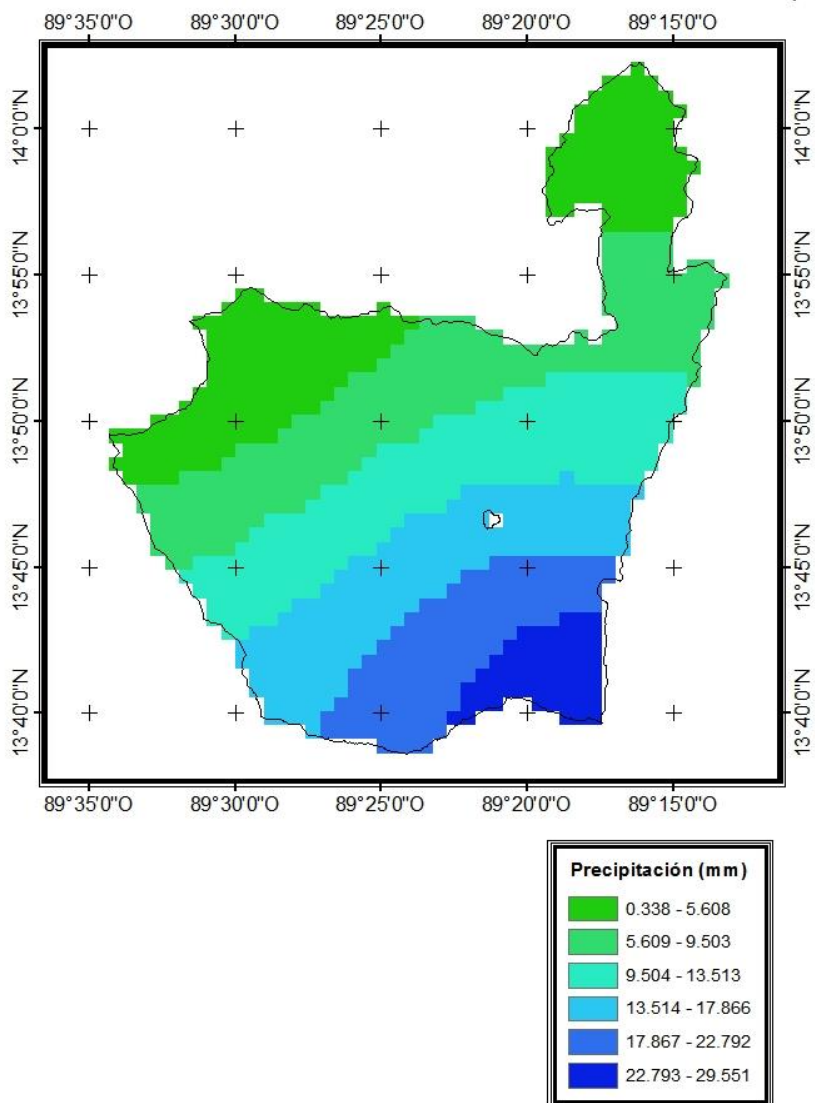


Figura 3. 42: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 10/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 11 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

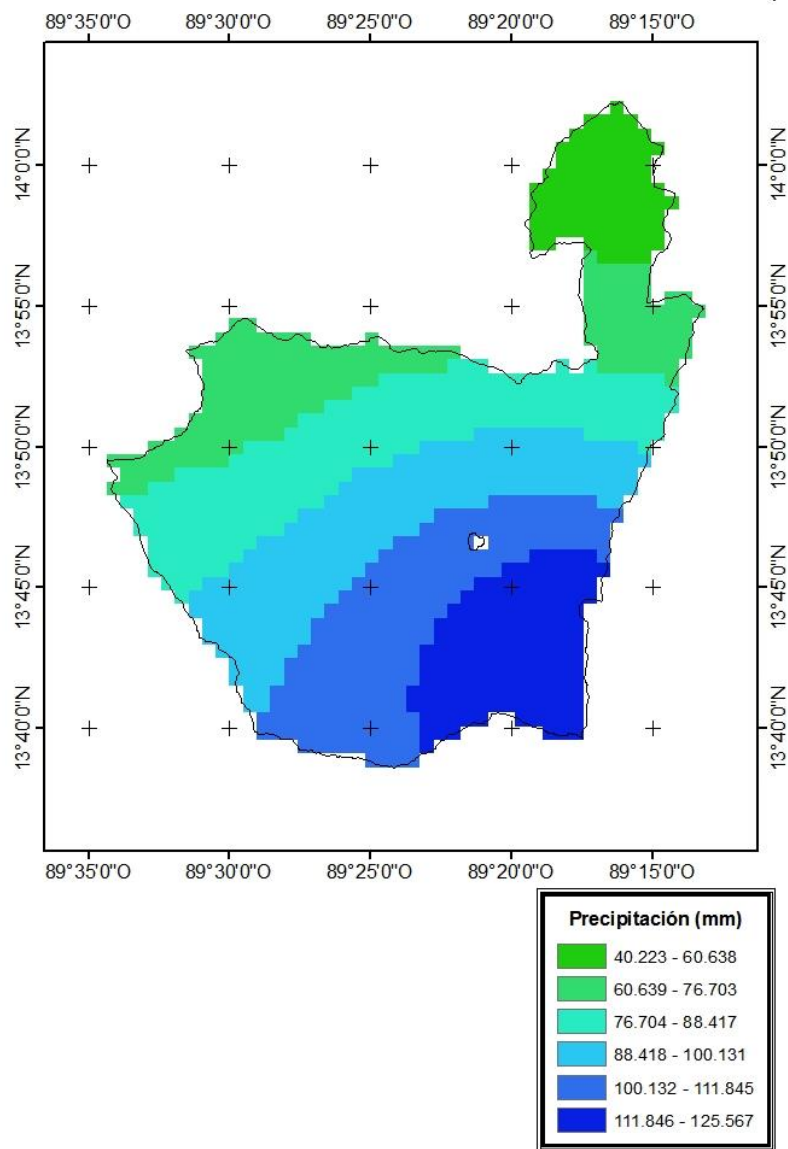


Figura 3. 43: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 11/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 12 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

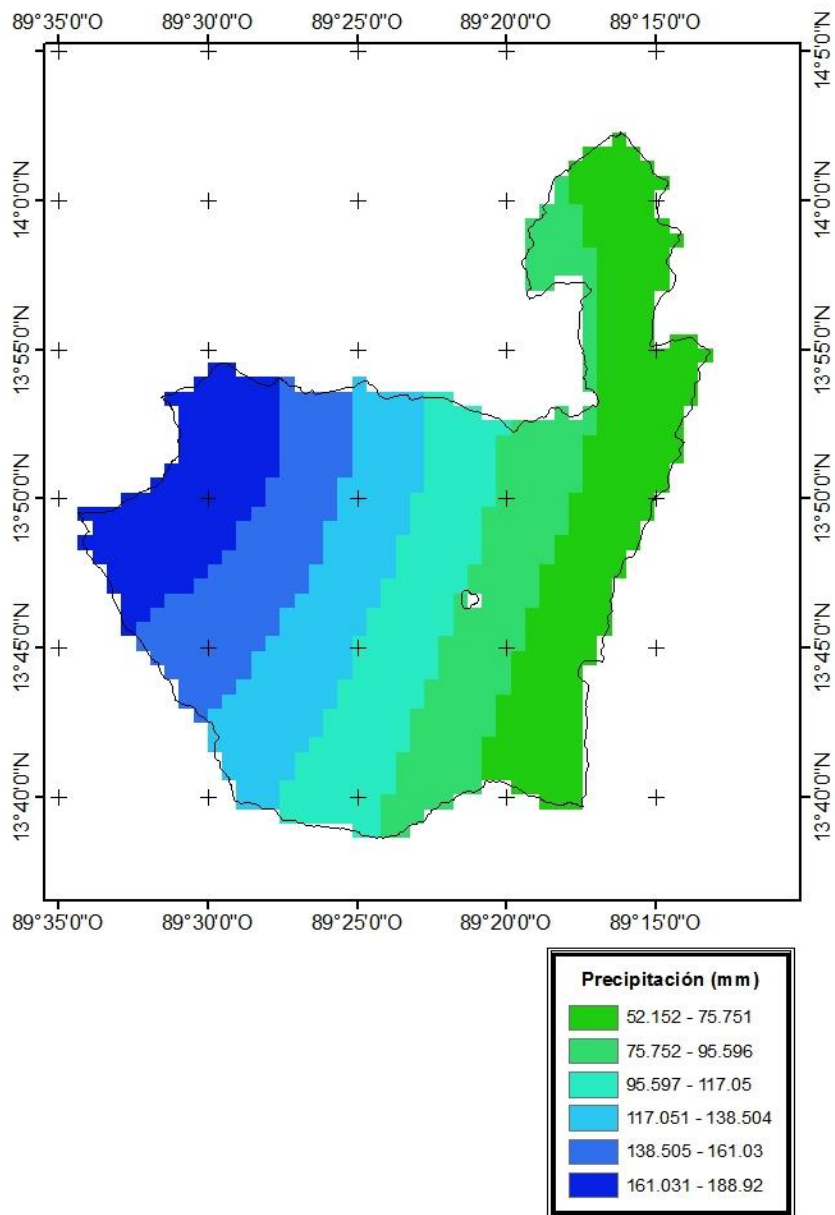


Figura 3. 44: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 12/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 13 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

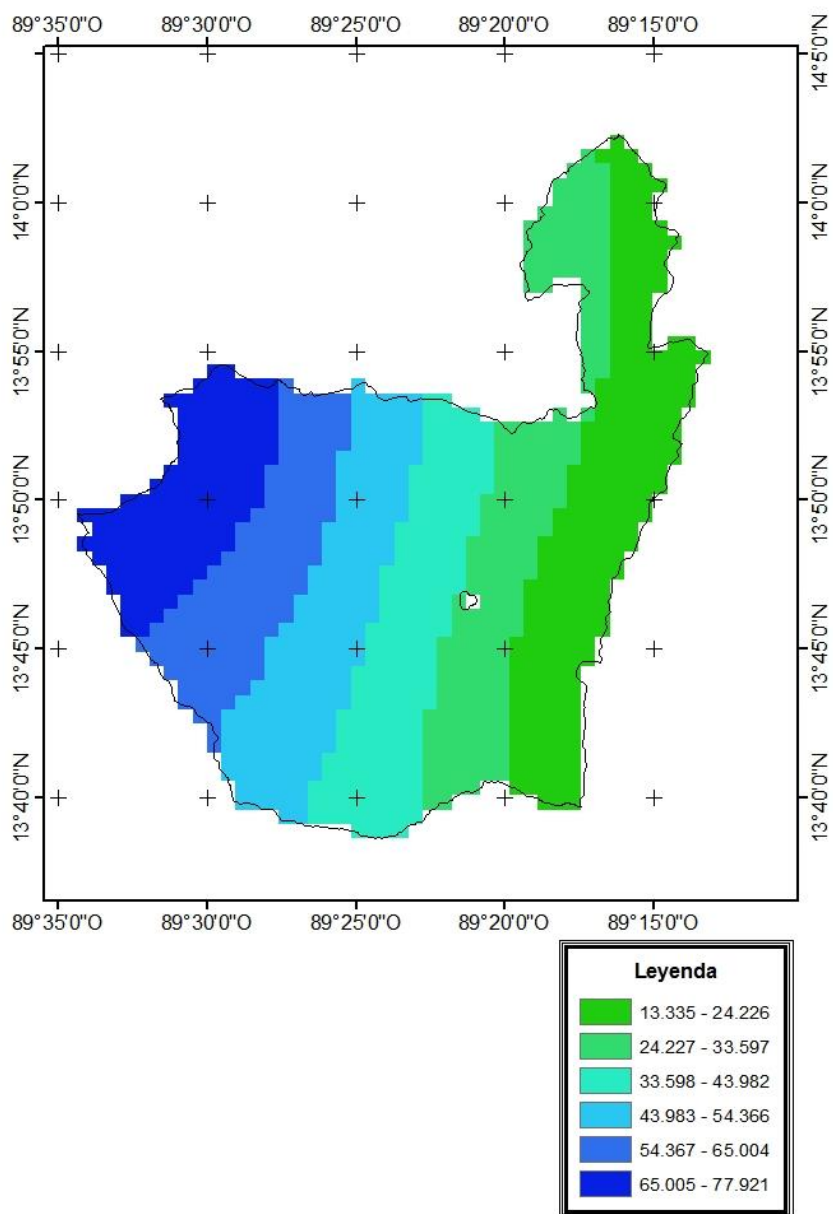


Figura 3. 45: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 13/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 14 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

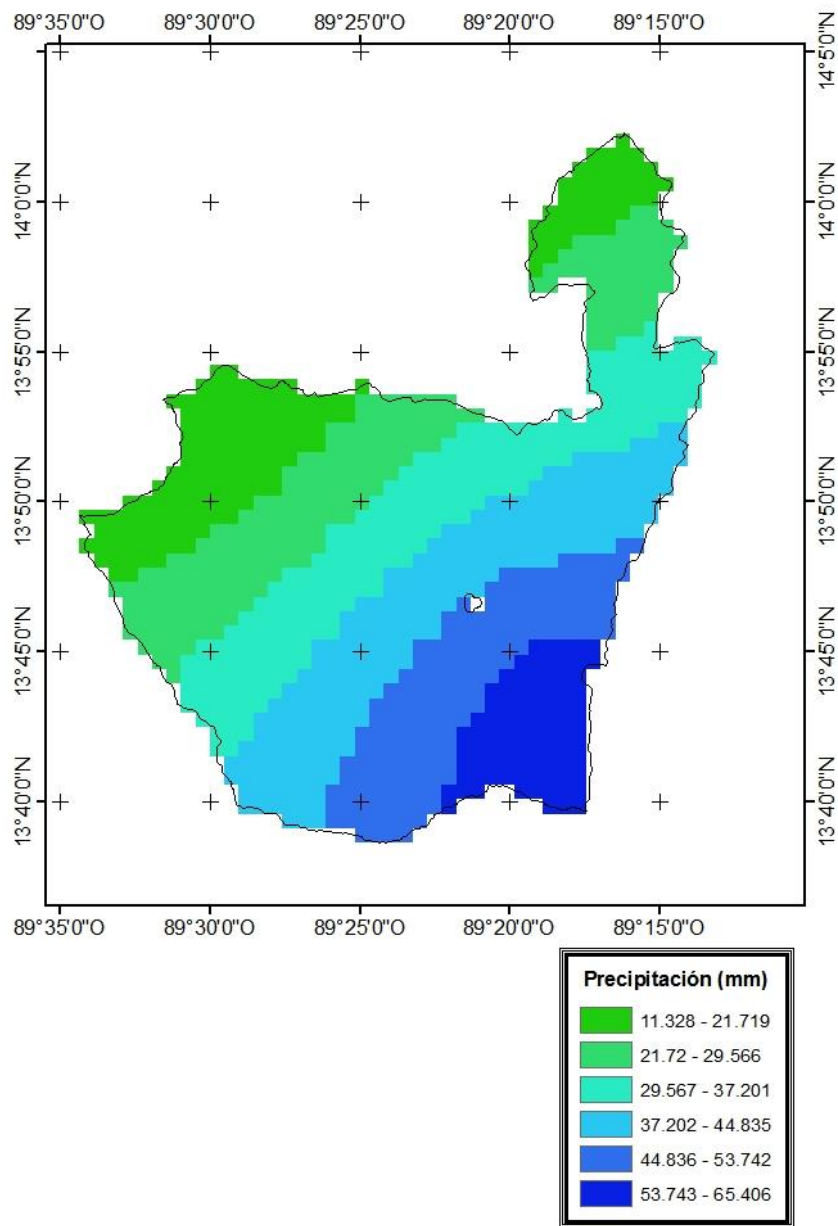


Figura 3. 46: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 14/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 15 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

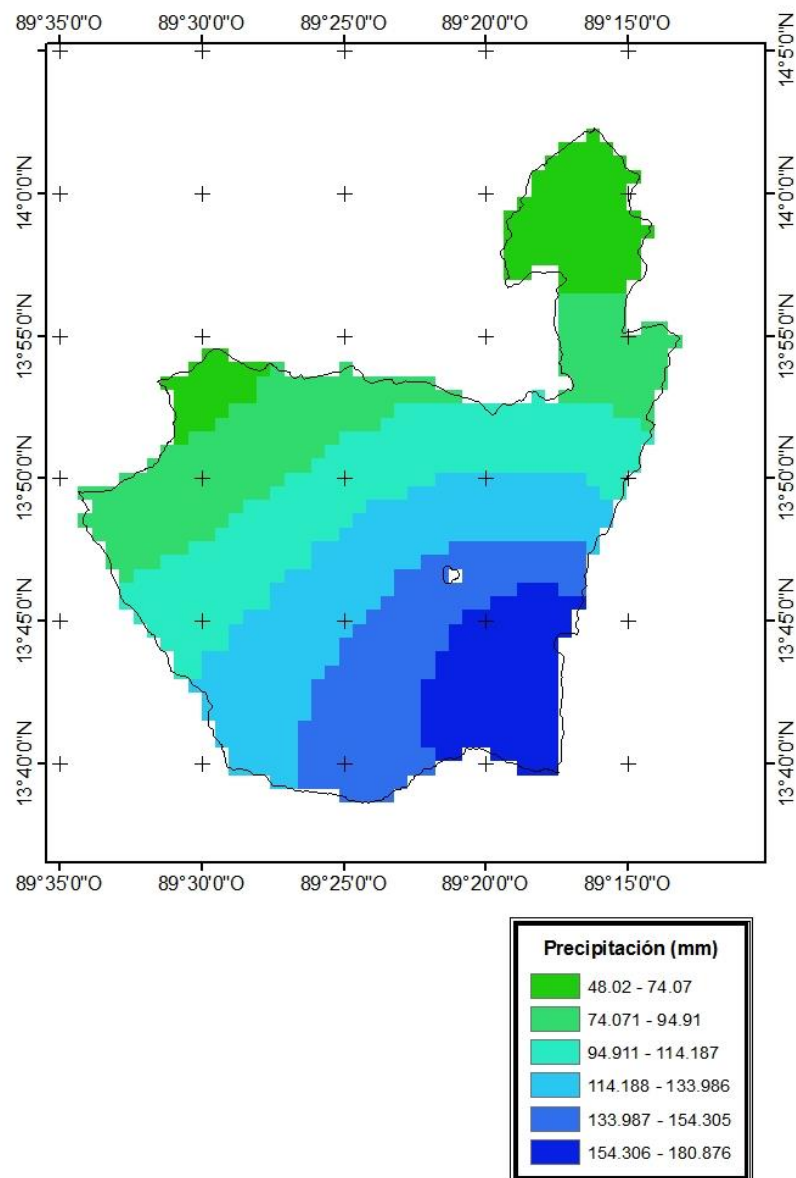


Figura 3. 47: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 15/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 16 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

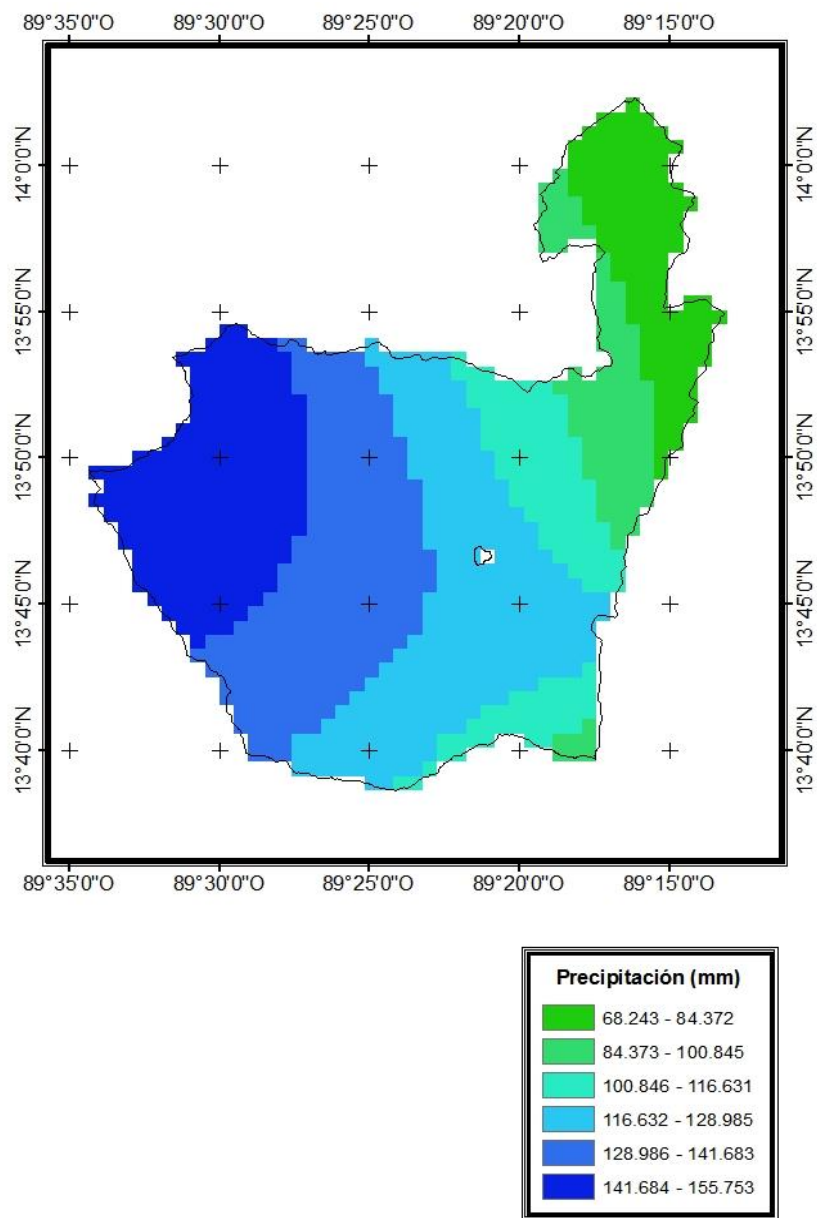


Figura 3. 48: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 16/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 17 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

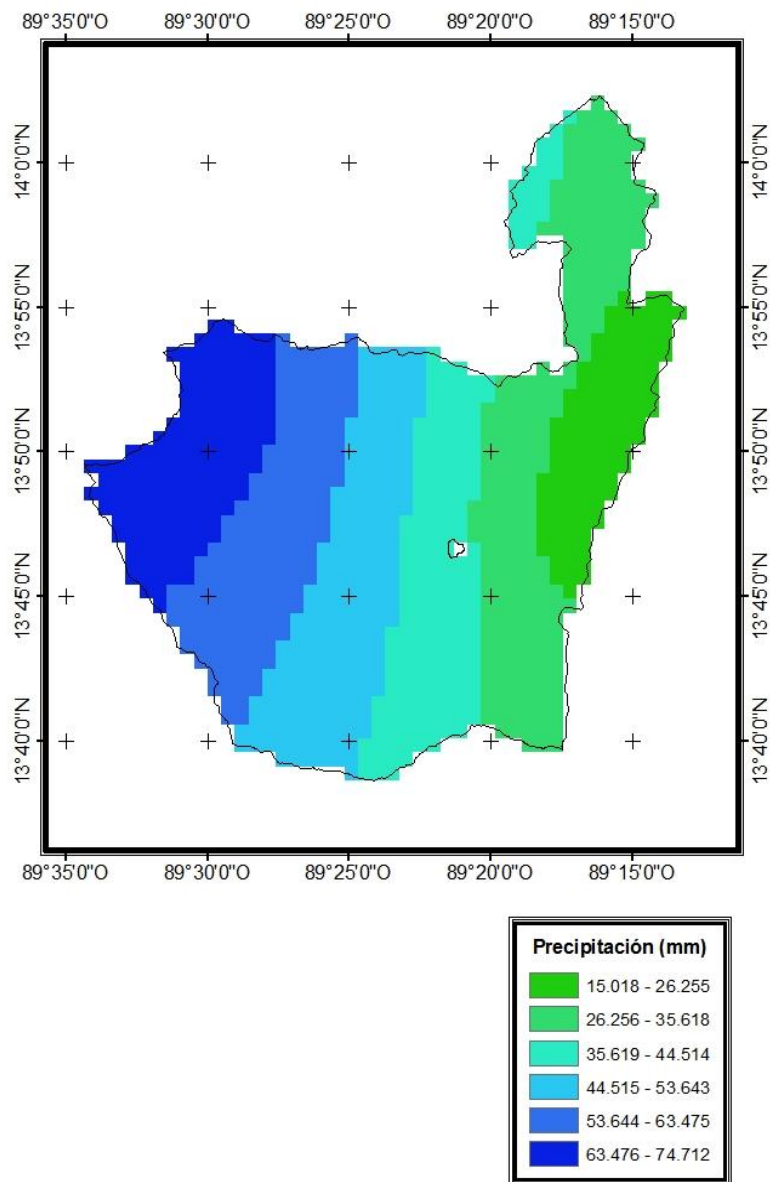


Figura 3. 49: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 17/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 18 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

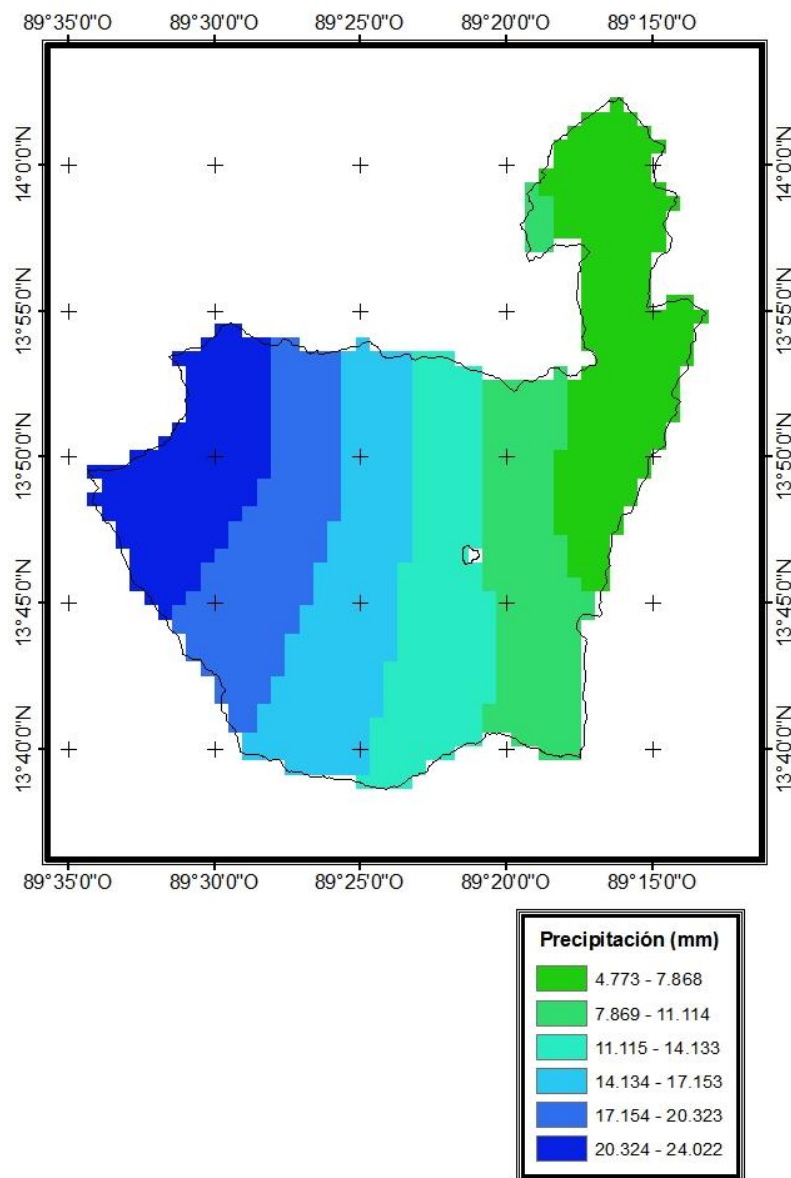


Figura 3. 50: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 18/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 19 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

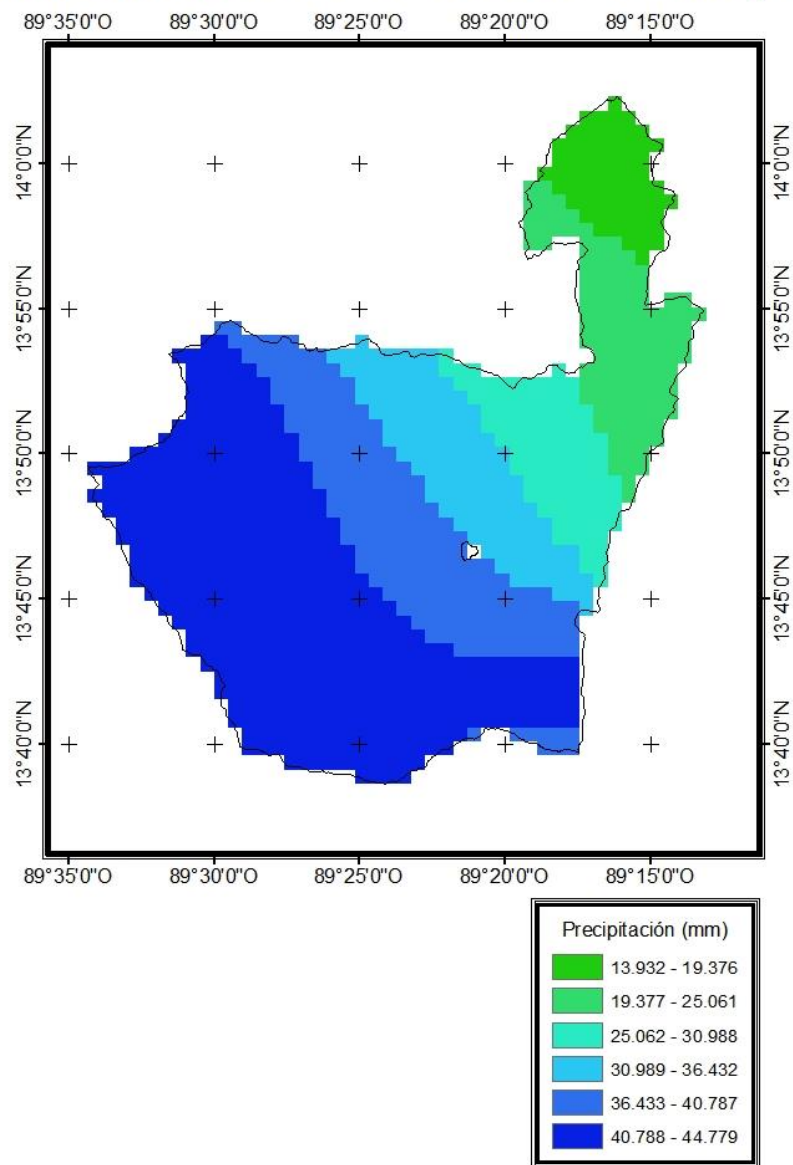


Figura 3. 51: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 19/10/11

PRECIPITACIÓN DEL DIA 20 DE OCTUBRE DE 2011 (DT 12-E)

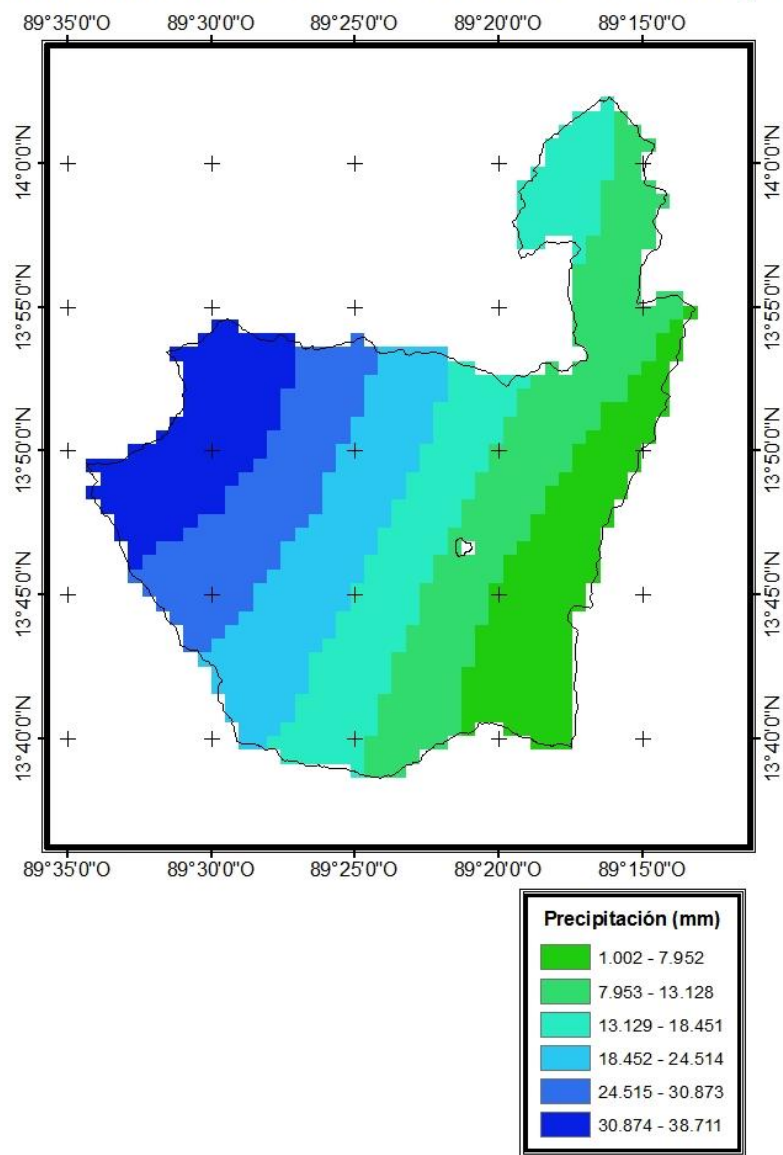


Figura 3. 52: Mapa de precipitación registrada acumulada a 24 horas para el 20/10/11

CAPITULO IV:

APLICACIÓN DEL MODELO

MESOESCALAR WRF (WEATHER

RESEARCH FORECAST MODEL) EN

LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE

LA CUENCA DEL RÍO SUCIO

4.1 INTRODUCCIÓN

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo meteorológico de última generación que permite obtener campos de viento, presión, temperatura, precipitación entre otros. El modelo WRF puede ser configurado regionalmente para representar dominios espaciales en diferentes escalas de acuerdo al estudio que desee realizarse.

Para los 2 eventos atmosféricos seleccionados (evento aislado del día 17 de octubre del 2015 y para la Depresión Tropical 12E), que han tenido incidencia en la Cuenca del Río Sucio, se extrajo la información del modelo de predicción meteorológica global GFS, ya que estos datos globales son los datos de entrada del modelo WRF, para poder así regionalizarlo al dominio seleccionado.

Con el software ArcGIS 10.4 se visualizan los resultados de la modelación con WRF, lo cual permite hacer cálculos para las variables de precipitación requeridas, y hacer el cálculo para el período en análisis.

4.2 WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL (WRF)

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO WRF²¹

El modelo de Investigación y Predicción Meteorológica (WRF) es considerado un modelo de última generación, diseñado para ser aplicado tanto en pronósticos operativos del tiempo, como en investigación de fenómenos meteorológicos.

Es un modelo de simulación de la atmósfera de área limitada, no hidrostático (con opción hidrostática), sensible a las características del terreno y diseñado para predecir la circulación atmosférica a escala sinóptica, mesoescalar y regional.²² Este modelo está disponible libremente en internet (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>) y está diseñado para funcionar sobre una amplia variedad de plataformas.

El esfuerzo por desarrollar WRF comenzó en la última parte de la década de 1990 y fue una asociación de colaboración principalmente entre el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)(representada por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el (entonces) Forecast Systems Laboratory (FSL) el cual ahora es Earth System Research Laboratory (ESRL)), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, la University of Oklahoma, y la Federal Aviation Administration (FAA).

WRF puede generar simulaciones atmosféricas utilizando datos reales (predicción numérica del tiempo real) o condiciones idealizadas, modelación de la calidad del aire

²¹ <http://www.wrf-model.org/index.php>

²² <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://robotica.unileon.es/vmo/pubs/jp2012.pdf>

y estudios de interacción océano-atmósfera mediante el acoplamiento con modelos oceánicos.

WRF ofrece predicción operativa de una plataforma flexible y computacionalmente eficiente, al tiempo que proporciona los últimos avances de la física, la asimilación de datos aportados por los desarrolladores a través de la comunidad de investigación muy amplia. Está actualmente en uso operacional en NCEP, AFWA, y otros centros.

WRF tiene una gran comunidad mundial de usuarios registrados (más de 30.000 en más de 150 países), y talleres y tutoriales se llevan a cabo cada año en NCAR.

4.2.2 COMPONENTES DEL MODELO WRF ²³

Como se puede observar en la Figura 4. 1, el sistema de modelado WRF consiste en estos programas principales:

- The WRF Preprocessing System (WPS)
- WRF-DA
- ARW solver
- Post-processing & Visualization tools

²³ ARW Version 3 Modeling System User's Guide, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale & Microscale Meteorology Division, Julio 2016.Pags. 1,1 -1,2.

La Figura 4. 1 muestra el diagrama de flujo del sistema de modelado WRF versión 3.

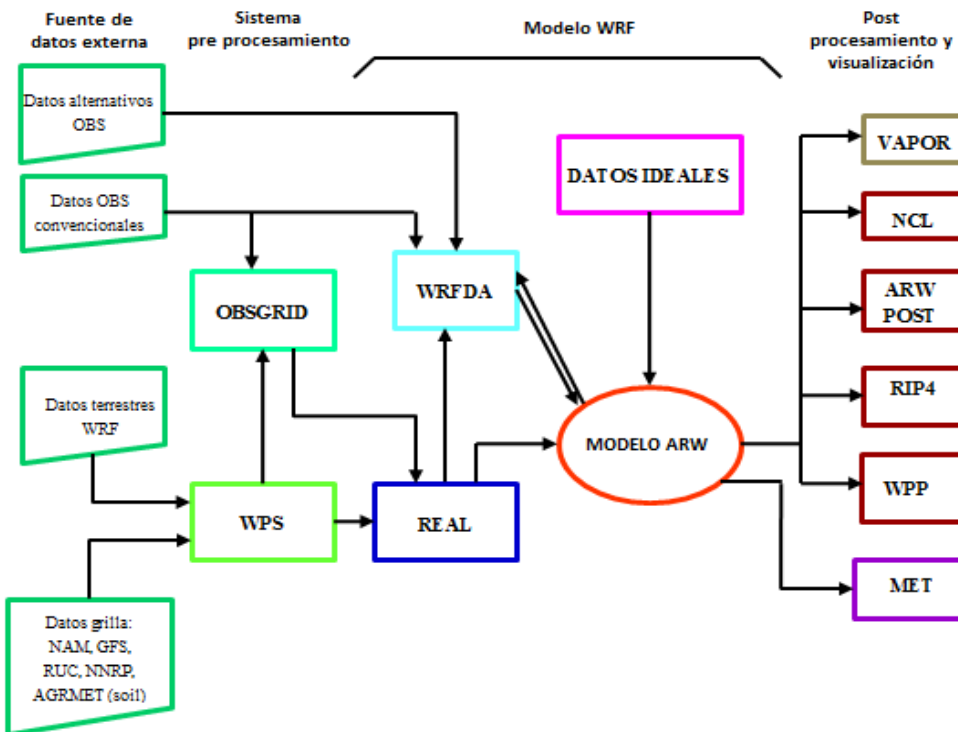


Figura 4. 1: COMPONENTES DEL MODELO WRF (V3)

4.2.2.1 SISTEMA DE PREPROCESAMIENTO DE WRF (WPS)²⁴

El Sistema de Procesamiento previo WRF (WPS) es un conjunto de tres programas cuya función colectiva es generar las condiciones iniciales para el modelo WRF. Este programa se utiliza principalmente para las simulaciones en datos reales.

²⁴ ARW Version 3 Modeling System User's Guide, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale & Microscale Meteorology Division, Julio 2016. Pags. 3, 1 -3, 4.

El WPS consta de tres programas independientes (ver Figura 4. 2):

Geogrid: Este programa calcula la posición de los puntos de rejilla de acuerdo a las especificaciones de resolución, número de puntos, posición del centro, etc, provistas por el usuario. Una vez posicionados los puntos de la rejilla, interpola los datos de topografía, uso de suelo, tipo de suelo, albedo, cobertura vegetal y demás datos que en el futuro puedan ser utilizados por el modelo.

Ungrib: Este programa permite decodificar datos que vienen en formato grib y escribirlos en el formato que pide el programa metgrid para que puedan ser interpolados a la rejilla del modelo WRF.

Metgrid: Este programa interpola horizontalmente los datos de atmósfera extraídos por el programa ungrid a la rejilla definida por el programa geogrid. Por ejemplo puede tomar un análisis y un pronóstico global e interpolarlo a la rejilla del modelo.

El trabajo de interpolación vertical para WRF se lleva a cabo dentro del programa real.

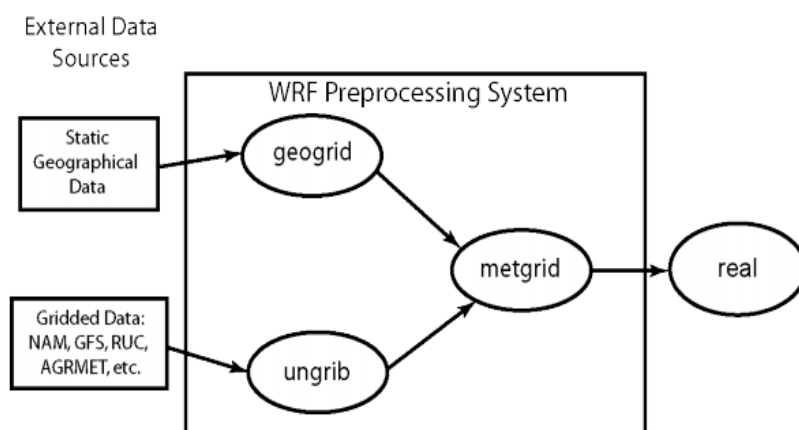


Figura 4. 2: Flujo de datos entre los programas del WPS
Fuente: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201607/wps_general.pdf

4.2.2.2 DATA ASSIMILATION WRF-DA²⁵

Este programa es opcional y se encarga de incorporar observaciones a los análisis interpolados creados por el WPS. También se puede utilizar para actualizar las condiciones iniciales del modelo WRF cuando el modelo WRF se ejecuta en modo de ciclo. Está disponible gratuitamente para la comunidad, junto con la documentación adicional, en la página web: (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/index.html>).

4.2.2.3 SISTEMA DE WRF²⁶

Este es el componente clave del sistema de modelado, está compuesto de varios programas de iniciación para simulaciones de casos ideales o reales, y un programa de integración. Hay dos solucionadores dinámicos en el WRF:

- * **Núcleo ARW** (Advanced Research WRF). El ARW ha sido ampliamente desarrollado y mantenido por el Laboratorio de MMM (Mesoscale and Microscale Meteorology) de el NCAR, y su página de usuarios es: WRF-ARW User's Page.

Entre las aplicaciones de este modelo se encuentran:

- ✓ NWP en tiempo real
- ✓ Simulaciones idealizadas (convección, ondas baroclínicas)
- ✓ Investigación sobre el clima regional
- ✓ Investigación en el desarrollo de nuevas parametrizaciones.
- ✓ Investigación y desarrollo en la asimilación de datos.
- ✓ Investigación y desarrollo en el pronóstico del tiempo.
- ✓ Educación

²⁵ ARW Version 3 Modeling System User's Guide, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale & Microscale Meteorology Division, Julio 2016. Pags. 1, 3.

²⁶ <http://www.wrf-model.org/index.php>

* **Núcleo NMM** (Nonhydrostatic Mesoscale Model). El núcleo NMM fue desarrollado por los Centros Nacionales de Predicción del Medio Ambiente, y su apoyo a los usuarios es proporcionada por el Banco de Pruebas del Centro de Desarrollo (Developmental Testbed Center DTC). Su página de usuarios es: WRF-NMM Users' Page. Entre las aplicaciones de este modelo se encuentran:

- ✓ NWP en tiempo real
- ✓ Investigación en el desarrollo de nuevas parametrizaciones.
- ✓ Investigación y desarrollo en la asimilación de datos.
- ✓ Investigación y desarrollo en el pronóstico del tiempo.
- ✓ Educación

4.2.2.3.1 ARW SOLVER

Es el proceso central, donde se llevan a cabo la preparación de los datos del pre-proceso y el cálculo e interpolación de acuerdo a las ecuaciones definidas para las diferentes variables con respecto al tiempo.²⁷

Algunas características clave del modelo WRF incluyen²⁸:

- Ecuaciones no hidrostáticas completamente compresibles con opción hidrostática.
- Aplicaciones regionales y globales.
- Grilla horizontal: de clase Arakawa-C.
- Cuatro proyecciones de mapas son soportados para simulaciones con datos reales: polares, Lambert, Mercator y Latitud - Longitud.

²⁷Presentaciones: El Weather Research Forecast Model WRF para El Salvador; Por: Ing. Juan José Amides Figueroa Urbano, para la DGOA/MARN.

²⁸ ARW Version 3 Modeling System User's Guide, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale & Microscale Meteorology Division, Julio 2016. Pags. 1,4 -1,5.

El código del modelo WRF contiene un programa de inicialización (ya sea para-datos reales, *real.exe*, o los datos idealizados, *ideal.exe*; y un programa de integración numérica, *wrf.exe*.



Figura 4. 3: Caso de modelación real
Fuente: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Introduction/start.htm>



Figura 4. 4: Caso de modelación ideal
<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Introduction/start.htm>

- **REAL:** realiza la interpolación vertical desde los niveles de presión hasta el sistema de coordenadas normalizadas sigma de WRF. Se trata de la definición de un sistema de coordenadas, que sigue las irregularidades propias del terreno, adaptándose a los distintos tipos de orografía presente en los dominios de predicción.
- **WRF:** El módulo WRF contiene las ecuaciones físicas de pronóstico y diagnóstico que permiten realizar una predicción con un horizonte temporal prefijado. En este módulo se incluyen también las parametrizaciones que permiten describir los fenómenos físicos cuya escala espacial/temporal es inferior a la resolución fijada en las simulaciones.

4.2.2.4 MODELOS FÍSICOS

Las opciones físicas del modelo WRF están divididas en 5 categorías, las cuales pueden ser elegidas y modificadas. Las categorías se describen brevemente a continuación.

- **Microfísica:** Esquemas simplificados para simulaciones idealizadas y esquemas complejos que incorporan explícitamente procesos de precipitación, vapor de agua y nubes.
- **Parametrizaciones de cúmulos:** esquemas ajustados y de flujo-masa al modelado de mesoescala.
- **Física de la superficie:** modelos de superficie multicapa que van desde un simple modelo termal a un completo modelo de vegetación y humedad del suelo, incluyendo cobertura de nieve y hielo marino.
- **Física de la capa límite planetaria:** predicción de energía cinética turbulenta o esquemas K no locales.
- **Física de la radiación atmosférica:** esquemas de ondas cortas y largas con bandas multiespectrales, un esquema simple de onda corta adecuado para aplicaciones meteorológicas. Los efectos de nubes y flujos de la superficie son también incluidos.

4.2.2.5 SALIDAS DE WRF.

Las salidas que proporciona el modelo WRF contienen información pronosticada, para un intervalo de tiempo determinado, de diferentes variables meteorológicas. Los ficheros que componen estas salidas cumplen con las especificaciones de un formato conocido como netCDF.

NetCDF (Network Common Data Form) es un conjunto de interfaces de acceso para datos en forma de array y una colección de librerías, libremente distribuidas, de acceso para datos implementadas para C, Fortran, C++, Java y otros lenguajes. Las librerías proporcionan un formato, multiplataforma, para representar información científica.²⁹

4.2.2.5.1 VARIABLES DE SALIDA DE WRF

La siguiente es una lista de salida editado desde el comando netCDF.

Tabla 4. 1: Variables de salida de WRF

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
LU_INDEX	"LAND USE CATEGORY"
ZNU	"eta values on half (mass) levels"
ZNW	"eta values on full (w) levels"
ZS	"DEPTHS OF CENTERS OF SOIL LAYERS"
DZS	"THICKNESSES OF SOIL LAYERS"
U	"x-wind component"
V	"y-wind component"
W	"z-wind component"
PH	"perturbation geopotential"
PHB	"base-state geopotential"
T	"perturbation potential temperature (theta-t0)"
MU	"perturbation dry air mass in column"
MUB	"base state dry air mass in column"
NEST	"_"
P	"perturbation pressure"
PB	"BASE STATE PRESSURE"
FNM	"upper weight for vertical stretching"
FNP	"lower weight for vertical stretching"
RDNW	"inverse d(eta) values between full (w) levels"

²⁹ Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL; Guerrero Higuera, Á. M., García Ortega, E., Matellán Olivera, V., & Sánchez Gómez, J. L. (2013). Pag. 3.

RDN	"inverse d(eta) values between half (mass) levels"
DNW	"d(eta) values between full (w) levels"
DN	"d(eta) values between half (mass) levels"
CFN	"extrapolation constant"
CFN1	"extrapolation constant"
P_HYD	"hydrostatic pressure"
Q2	"QV at 2 M"
T2	"TEMP at 2 M"
TH2	"POT TEMP at 2 M"
PSFC	"SFC PRESSURE"
U10	"U at 10 M"
V10	"V at 10 M"
RDX	"INVERSE X GRID LENGTH"
RDY	"INVERSE Y GRID LENGTH"
RESM	"TIME WEIGHT CONSTANT FOR SMALL STEPS"
ZETATOP	"ZETA AT MODEL TOP"
CF1	"2nd order extrapolation constant"
CF2	"2nd order extrapolation constant"
CF3	"2nd order extrapolation constant"
ITIMESTEP	
XTIME	"minutes since simulation start"
QVAPOR	"Water vapor mixing ratio"
QCLOUD	"Cloud water mixing ratio"
QRAIN	"Rain water mixing ratio"
LANDMASK	"LAND MASK (1 FOR LAND, 0 FOR WATER)"
TSLB	"SOIL TEMPERATURE"
SMOIS	"SOIL MOISTURE"
SH2O	"SOIL LIQUID WATER"
SEAICE	"SEA ICE FLAG"
XICEM	"SEA ICE FLAG (PREVIOUS STEP)"
SFROFF	"SURFACE RUNOFF"
UDROFF	"UNDERGROUND RUNOFF"
IVGTYP	"DOMINANT VEGETATION CATEGORY"
ISLTYP	"DOMINANT SOIL CATEGORY"
VEGFRA	"VEGETATION FRACTION"
GRDFLX	"GROUND HEAT FLUX"
SNOW	"SNOW WATER EQUIVALENT"
SNOWH	"PHYSICAL SNOW DEPTH"
RHOSN	" SNOW DENSITY"
CANWAT	"CANOPY WATER"
SST	"SEA SURFACE TEMPERATURE"
SSTSK	"SKIN SEA SURFACE TEMPERATURE"
MAPFAC_M	"Map scale factor on mass grid"
MAPFAC_U	"Map scale factor on u-grid"
MAPFAC_V	"Map scale factor on v-grid"
MAPFAC_MX	"Map scale factor on mass grid, x direction"
MAPFAC_MY	"Map scale factor on mass grid, y direction"
MAPFAC_UX	"Map scale factor on u-grid, x direction"
MAPFAC_UY	"Map scale factor on u-grid, y direction"
MAPFAC_VX	"Map scale factor on v-grid, x direction"

MF_VX_INV	"Inverse map scale factor on v-grid, x direction"
MAPFAC_VY	"Map scale factor on v-grid, y direction"
F	"Coriolis sine latitude term"
E	"Coriolis cosine latitude term"
SINALPHA	"Local sine of map rotation"
COSALPHA	"Local cosine of map rotation"
HGT	"Terrain Height"
HGT_SHAD	"Height of orographic shadow"
TSK	"SURFACE SKIN TEMPERATURE"
P_TOP	"PRESSURE TOP OF THE MODEL"
T00	"BASE STATE TEMPERATURE"
P00	"BASE STATE PRESURE"
TLP	"BASE STATE LAPSE RATE"
TISO	"TEMP AT WHICH THE BASE T TURNS CONST"
MAX_MSTFX	"Max map factor in domain"
MAX_MSTFY	"Max map factor in domain"
RAINCL	"ACCUMULATED TOTAL CUMULUS PRECIPITATION"
RAINSH	"ACCUMULATED SHALLOW CUMULUS PRECIPITATION"
RAINNC	"ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE PRECIPITATION"
PRATEC	"PRECIP RATE FROM CUMULUS SCHEME"
RAINCV	"TIME-STEP CUMULUS PRECIPITATION"
SNOWNC	"ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE SNOW AND ICE"
GRAUPELNC	"ACCUMULATED TOTAL GRID SCALE GRAUPEL"
SWDOWN	"DOWNWARD SHORT WAVE FLUX AT GROUND SURFACE"
GLW	"DOWNWARD LONG WAVE FLUX AT GROUND SURFACE"
SWNORM	"NORMAL SHORT WAVE FLUX AT GROUND SURFACE"
OLR	"TOA OUTGOING LONG WAVE"
XLAT	"LATITUDE, SOUTH IS NEGATIVE"
XLONG	"LONGITUDE, WEST IS NEGATIVE"
XLAT_U	"LATITUDE, SOUTH IS NEGATIVE"
XLONG_U	"LONGITUDE, WEST IS NEGATIVE"
XLAT_V	"LATITUDE, SOUTH IS NEGATIVE"
XLONG_V	"LONGITUDE, WEST IS NEGATIVE"
ALBEDO	"ALBEDO"
ALBBCK	"BACKGROUND ALBEDO"
EMISS	"SURFACE EMISSIVITY"
NOAHRES	"RESIDUAL OF THE NOAH SURFACE ENERGY BUDGET"
TMN	"SOIL TEMPERATURE AT LOWER BOUNDARY"
XLAND	"LAND MASK (1 FOR LAND, 2 FOR WATER)"
ZNT	"TIME-VARYING ROUGHNESS LENGTH"
UST	"U* IN SIMILARITY THEORY"
PBLH	"PBL HEIGHT"
HFX	"UPWARD HEAT FLUX AT THE SURFACE"
QFX	"UPWARD MOISTURE FLUX AT THE SURFACE"
LH	"LATENT HEAT FLUX AT THE SURFACE"
SNOWC	"FLAG INDICATING SNOW COVERAGE (1 FOR SNOW COVER)"

Fuente: basado en el Manual de Usuario ARW V3

4.2.2.6 POST- PROCESAMIENTO

WRF proporciona salidas en formato netCDF; sin embargo, esta información es necesario procesarla y generar una serie de gráficas que permitan analizarla y entenderla de una manera visual. Hay un buen número de herramientas disponibles para visualizar la información de modelo WRF. Esta información puede ser visualizada desde cualquier herramienta capaz de reconocer el formato netCDF. Entre las más conocidas destacan GrADS, RIP4, Vis5D, VAPOR y NCL.³⁰

Programas SIG como QGIS Y ArcGIS son herramientas que también permiten visualizar las salidas del modelo WRF en formato netCDF.

4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO WRF

4.3.1 INSTALACIÓN DEL SOFTWARE

El modelo en general corre con hardware de 32 o de 64 bits, con su ejecución en un sistema operativo UNIX. También puede usar el arranque dual en un sistema operativo UNIX (Por ejemplo, Windows con Linux en paralelo)

El modelo se instaló en una computadora con las siguientes características:

- ✓ Sistema Operativo Ubuntu v10.04 LTS (Lucid) Núcleo Linux 2.6.32-35 generic
- ✓ 4 núcleos i5 (cada uno con 2.80GHz)
- ✓ Memoria RAM 8 Gb
- ✓ Disco Duro 250 GB

³⁰ Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL; Guerrero Higuera, Á. M., García Ortega, E., Matellán Olivera, V., & Sánchez Gómez, J. L. (2013). Pag. 4.

Para obtener el procedimiento completo de la instalación de todos los paquetes del modelo <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Introduction/index.html> o en el manual de usuario WRF-ARW. De igual manera se encuentra el paso a paso de la manera de descargar todos los paquetes necesarios y de su instalación en la página <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201607/compiling.pdf>.

4.3.2 REQUERIMIENTOS DEL SOFTWARE

La versión de WRF a instalar es la WRF V3.6, la cual tiene los siguientes requerimientos de software según el manual de instalación:

- * Fortran 90 o 95 y compilador de C
- * Perl 5.04 o superior
- * Librerías MPI y OpenMP
- * Librerías de netCDF

4.3.3 DESCARGA DE DATOS GLOBALES

La descarga de los datos se realizó desde el Sistema de Pronóstico Global, GFS, con una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ y temporal de 1 hora. Estos datos están en formato GRIB³¹.

CASO 1: PRECIPITACIÓN 17 OCTUBRE DEL 2015

El periodo de tiempo considerado va desde el 17 de Octubre de 2015, a las 12:00 hrs UTC hasta las 19:00 hrs UTC del día 18 de Octubre de 2015.

³¹ GRIB (Gridded Binary) son archivos que contienen datos de predicciones meteorológicas (presión a nivel del mar, viento, temperatura, etc.) resultado de modelos de predicción realizados con ordenador.

CASO 2: DEPRESIÓN TROPICAL 12-E

El periodo de tiempo considerado va desde el 1 de Octubre de 2011 a las 00:00 hrs UTC hasta las 00:00 hrs UTC del día 31 de Octubre de 2011.

4.3.4 PARAMETRIZACIONES UTILIZADAS

A continuación se presentan las parametrizaciones que los expertos de la DGOA han considerado ir modificándolas a medida avanza la investigación, las demás parametrizaciones que utilizan son las que utiliza por defecto el modelo, ya que con su experiencia en la investigación del modelo han considerado que proporcionan resultados aceptables.

Las parametrizaciones con las que se realizó de la modelación son las siguientes:

- ✓ Microfísica: WSM6 class (WRF Single-Moment 6-class).
- ✓ Opciones de cúmulos: New Kain-Fritsch scheme.
- ✓ Espaciado horizontal entre puntos de malla: 15 km
- ✓ Numero de niveles en la vertical: 28 niveles.

Estas parametrizaciones se utilizaron para los dos casos en estudio. Para ver más sobre otras parametrizaciones posibles y la descripción de ellas se puede consultar el manual de usuarios de WRF- ARW y el manual de investigación avanzada del WRF-ARW V3.

4.3.5 ETAPA DE PREPROCESAMIENTO

En esta etapa se ejecutarán los archivos *geogrid.exe*, *ungrib.exe* y *metgrid.exe*, la salida de los archivos del preprocesamiento serán utilizados luego en la etapa de procesamiento.

- Definir el dominio de trabajo.

- ✓ **Caso 1: precipitación 17 octubre del 2015**

Dominio: Región limitada a El Salvador (Figura 4. 5).

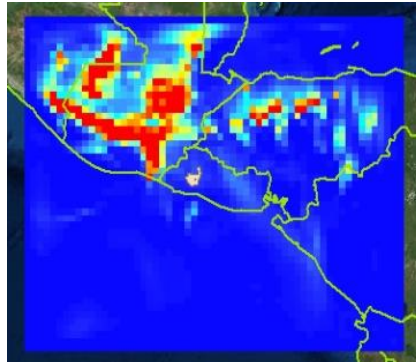


Figura 4. 5: Dominio limitado para El Salvador
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

- ✓ **Caso 2: depresión tropical 12-E**

Dominio: contiene a Centro América y El Caribe (Figura 4. 6).

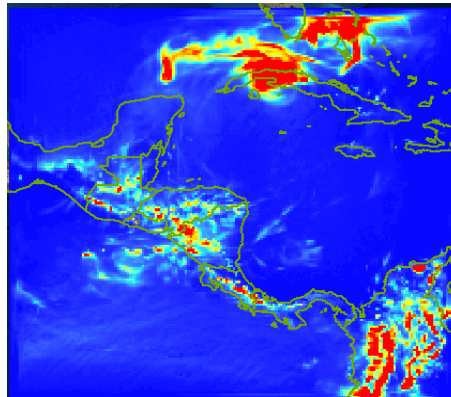


Figura 4. 6: Dominio para Centro América y El Caribe
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

- Ejecutar el programa geogrid.exe.
- Ejecutar el programa ungrib.exe, para descomprimir los archivos GRIB y convertirlos en archivos intermedios
- Ejecutar el programa metgrid.exe, para interpolar los datos de entrada en el dominio seleccionado.

4.3.6 ETAPA DE PROCESAMIENTO.

En esta etapa se corre el modelo. Los dos archivos principales a ejecutar en esta etapa son el *real.exe* y *wrf.exe*.

- Ejecutar del programa *real.exe*. Interpola verticalmente los archivos generados por *metgrid.exe* y crea los datos de la condición inicial y condiciones de contorno. Además realiza algunos chequeos de consistencia entre los datos.
- Ejecutar del programa *wrf.exe*. Aquí se realiza la simulación en base a todo el proceso anteriormente hecho.

En la Figura 4. 7 se puede observar en forma más detallado de los archivos del preprocesamiento y procesamiento.

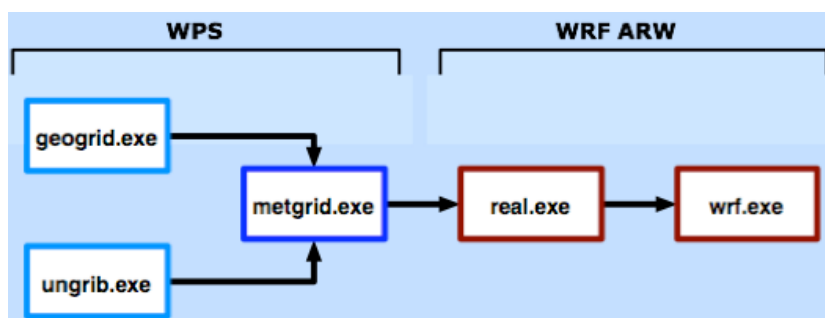


Figura 4. 7: Diagrama de flujo entre el preprocesamiento y el procesamiento
Fuente: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/index.html>

4.3.7 ETAPA DE POST PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN

Para visualizar los archivos netCDF, que generó la modelación regional WRF, correspondientes a los casos en estudio y para la determinación de los valores medios de lluvia se utilizó el software ArcGis 10.4.

Como la precipitación que se obtendrá será de 7:00 am hora El Salvador a 7:00 am del día siguiente, se debe tener en cuenta que, el modelo WRF trabajó con hora UTC (Tiempo Universal Coordinado/Coordinated Universal Time) y la zona horaria donde se encuentra El Salvador es conocida como **UTC/GMT -6**, por lo que a las 7:00 am de El Salvador se le suman las 6 horas que corresponden a las 13:00 UTC en el modelo.

✓ **Caso 1: precipitación del 17 octubre del 2015**

Para obtener la precipitación del período de 7:00 am del día 17 de octubre a las 7:00 am del día 18 de octubre de 2015, se comienza a calcular la precipitación obtenida del modelo a las 13 UTC del día 17 octubre a las 12 UTC del día 18 octubre de 2015.

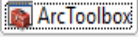

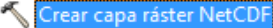
✓ **Caso 2: depresión tropical 12-E**

Para este caso la precipitación requerida es del 10 de octubre de 2011 al 20 de octubre de 2011. De la misma manera que el caso 1 se requiere obtener precipitación de 7:00 am a las 7:00 am del día siguiente por ejemplo para el día 10 de octubre se requiere el cálculo desde las 13 UTC (Hora del modelo) del día 10 octubre a las 12 UTC del día 11 octubre. El período total se calcula desde las 13 UTC del día 10 de octubre hasta las 12 UTC del día 21 de octubre de 2011.

La precipitación total producida por el modelo es la sumatoria de las variables RAINC (Precipitación cúmulus o precipitación calculada por el esquema de cúmulus) y RAINNC (Precipitación no cúmulus o precipitación calculada por el esquema de microfísica). En ArcGIS mediante operaciones algebraicas se obtiene el dato de lluvia acumulada para intervalos de 3 horas.

4.3.7.1 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA LLUVIA MEDIA

1º) Crear la capa raster con el archivo netCDF generado por el modelo WRF.

En la ventana  desplegar la herramienta  luego hacer clic a la función de crear capa raster .

Se abra un cuadro de dialogo como muestra la Figura 4. 8 en el cual se introduce el archivo netCDF del caso en estudio y la variable que se desea obtener en este caso se crea un capa raster para la variable RAINC y luego para la variable RAINNC.

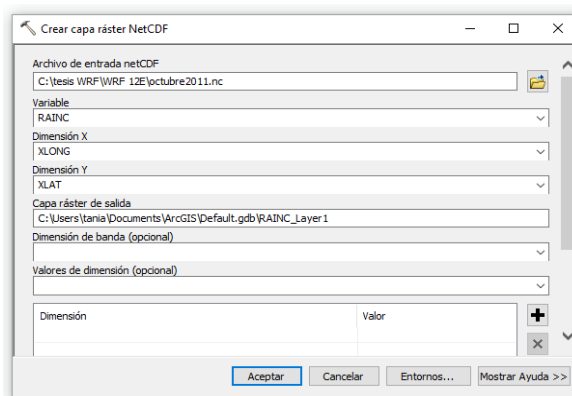


Figura 4. 8: cuadro de dialogo para crear una capa raster a partir de un archivo netCDF

Dar clic en Aceptar y en la tabla de contenido se puede visualizar los raster generados como se muestra en la Figura 4. 9.

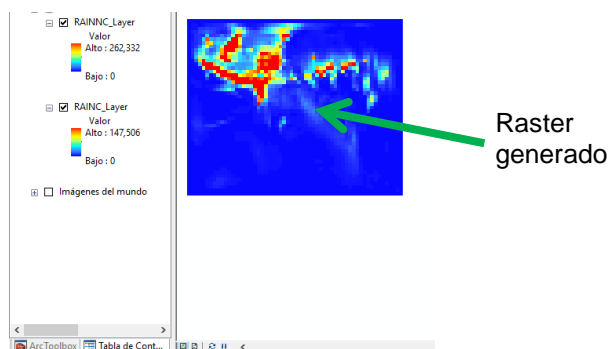


Figura 4. 9: Capa raster

2º) Añadir el shape de la cuenca.

Se realiza igual a como se describió en el capítulo III para añadir datos. Se añade el shape de la cuenca (Figura 4. 10).

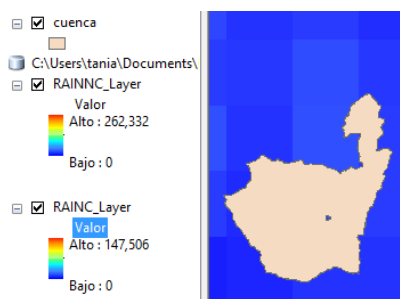
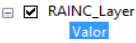
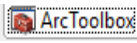




Figura 4. 10: Shape de la cuenca

3º) Se evalúa hora con hora y se suman las variables.

En la tabla de contenido hacer clic en  y definir la hora que se evaluará, esto se hace para las dos variables RAINC y RAINNC. Luego se suman hora con hora requerida las variables, en la ventana  desplegar la herramienta  **Álgebra de mapas** luego hacer clic a la función  **Calculadora ráster**. Por ejemplo como se muestra en la Figura 4. 11, en donde se suma las dos variables para la misma hora.

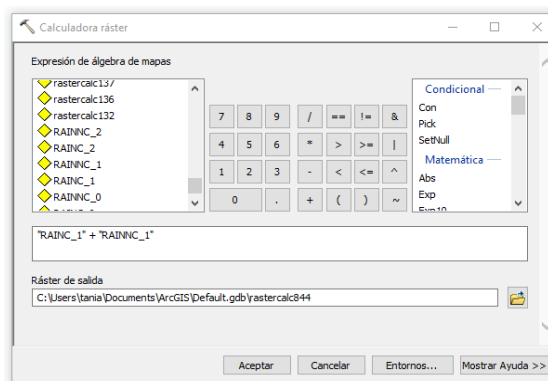



Figura 4. 11: Calculadora raster.

4º) Cálculo de la lluvia en intervalos de 3 horas.

El modelo WRF produce resultados a cada hora en cada una de sus variables, dato de lluvia acumulada, por lo que para un período determinado es necesario extraer ese período del conjunto total. Por ejemplo para las primeras 3 horas acumuladas del día 17 de octubre del 2015, la suma de las variables RAINC y RAINNC a las 15 UTC (Hora del modelo) se le resta la suma de las variables RAINC y RAINNC a las 12 UTC (Hora del modelo), dando como resultado el acumulado de la primeras 3 horas del día 17 de Octubre del 2015. Esta operación se realiza utilizando de nueva cuenta la calculadora raster.

5º) Generación de la lluvia media acumulada en intervalos de 3 horas.

De igual manera como se indicó en el Capítulo III se generan tablas con la herramienta

 Estadísticas zonales como tabla , luego estas tablas son exportadas a Excel.

4.3.7.2 RESULTADOS

Tabla 4. 2: Lluvia media en intervalos de 3 horas para el evento 17 de Octubre del 2015

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	17/10/2015	0,307
3-6 hrs	10:00-12:00	17/10/2015	5,922
6-9 hrs	13:00-15:00	17/10/2015	18,930
9-12 hrs	16:00-18:00	17/10/2015	23,367
12-15 hrs	19:00-21:00	17/10/2015	24,174
15-18 hrs	22:00-0:00	18/10/2015	31,618
18-21 hrs	1:00-3:00	18/10/2015	36,586
21-24 hrs	4:00-6:00	18/10/2015	39,869

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 3: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 10 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	10/10/2011	0,073
3-6 hrs	10:00-12:00	10/10/2011	0,023
6-9 hrs	13:00-15:00	10/10/2011	0,000
9-12 hrs	16:00-18:00	10/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	10/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	11/10/2011	0,495
18-21 hrs	1:00-3:00	11/10/2011	1,663
21-24 hrs	4:00-6:00	11/10/2011	0,973

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 4: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 11 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	11/10/2011	4,091
3-6 hrs	10:00-12:00	11/10/2011	1,813
6-9 hrs	13:00-15:00	11/10/2011	0,263
9-12 hrs	16:00-18:00	11/10/2011	0,137
12-15 hrs	19:00-21:00	11/10/2011	0,007
15-18 hrs	22:00-0:00	12/10/2011	2,309
18-21 hrs	1:00-3:00	12/10/2011	4,927
21-24 hrs	4:00-6:00	12/10/2011	0,371

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 5: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 12 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	12/10/2011	2,346
3-6 hrs	10:00-12:00	12/10/2011	2,367
6-9 hrs	13:00-15:00	12/10/2011	0,003
9-12 hrs	16:00-18:00	12/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	12/10/2011	0,002
15-18 hrs	22:00-0:00	13/10/2011	2,200
18-21 hrs	1:00-3:00	13/10/2011	2,974
21-24 hrs	4:00-6:00	13/10/2011	0,225

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 6: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 13 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	13/10/2011	0,010
3-6 hrs	10:00-12:00	13/10/2011	0,000
6-9 hrs	13:00-15:00	13/10/2011	0,000
9-12 hrs	16:00-18:00	13/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	13/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	14/10/2011	1,786
18-21 hrs	1:00-3:00	14/10/2011	8,083
21-24 hrs	4:00-6:00	14/10/2011	3,755

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 7: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 14 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	14/10/2011	0,033
3-6 hrs	10:00-12:00	14/10/2011	0,000
6-9 hrs	13:00-15:00	14/10/2011	0,000
9-12 hrs	16:00-18:00	14/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	14/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	15/10/2011	1,642
18-21 hrs	1:00-3:00	15/10/2011	10,455
21-24 hrs	4:00-6:00	15/10/2011	4,663

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 8: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 15 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	15/10/2011	6,892
3-6 hrs	10:00-12:00	15/10/2011	1,552
6-9 hrs	13:00-15:00	15/10/2011	0,000
9-12 hrs	16:00-18:00	15/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	15/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	16/10/2011	0,748
18-21 hrs	1:00-3:00	16/10/2011	4,369
21-24 hrs	4:00-6:00	16/10/2011	2,234

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 9: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 16 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	16/10/2011	0,173
3-6 hrs	10:00-12:00	16/10/2011	0,121
6-9 hrs	13:00-15:00	16/10/2011	0,000
9-12 hrs	16:00-18:00	16/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	16/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	17/10/2011	0,224
18-21 hrs	1:00-3:00	17/10/2011	1,477
21-24 hrs	4:00-6:00	17/10/2011	0,029

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 10: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 17 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	17/10/2011	0,002
3-6 hrs	10:00-12:00	17/10/2011	0,000
6-9 hrs	13:00-15:00	17/10/2011	0,004
9-12 hrs	16:00-18:00	17/10/2011	0,050
12-15 hrs	19:00-21:00	17/10/2011	1,682
15-18 hrs	22:00-0:00	18/10/2011	8,903
18-21 hrs	1:00-3:00	18/10/2011	4,347
21-24 hrs	4:00-6:00	18/10/2011	2,398

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 11: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 18 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	18/10/2011	4,690
3-6 hrs	10:00-12:00	18/10/2011	2,074
6-9 hrs	13:00-15:00	18/10/2011	0,523
9-12 hrs	16:00-18:00	18/10/2011	0,003
12-15 hrs	19:00-21:00	18/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	19/10/2011	0,003
18-21 hrs	1:00-3:00	19/10/2011	0,380
21-24 hrs	4:00-6:00	19/10/2011	0,024

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 12: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 19 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	19/10/2011	0,000
3-6 hrs	10:00-12:00	19/10/2011	0,000
6-9 hrs	13:00-15:00	19/10/2011	0,000
9-12 hrs	16:00-18:00	19/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	19/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	20/10/2011	0,000
18-21 hrs	1:00-3:00	20/10/2011	0,000
21-24 hrs	4:00-6:00	20/10/2011	0,065

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

Tabla 4. 13: Lluvia media en intervalos de 3 horas para DT-12E del día 20 de Octubre del 2011

PERIODO	HORA LOCAL	FECHA	LLUVIA MEDIA (MM)
0-3 hrs	7:00-9:00	20/10/2011	0,000
3-6 hrs	10:00-12:00	20/10/2011	0,000
6-9 hrs	13:00-15:00	20/10/2011	0,000
9-12 hrs	16:00-18:00	20/10/2011	0,000
12-15 hrs	19:00-21:00	20/10/2011	0,000
15-18 hrs	22:00-0:00	21/10/2011	0,000
18-21 hrs	1:00-3:00	21/10/2011	0,000
21-24 hrs	4:00-6:00	21/10/2011	0,179

Fuente: elaborado por el Grupo de Tesis.

4.3.7.3 MAPAS DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA A 24 HORAS

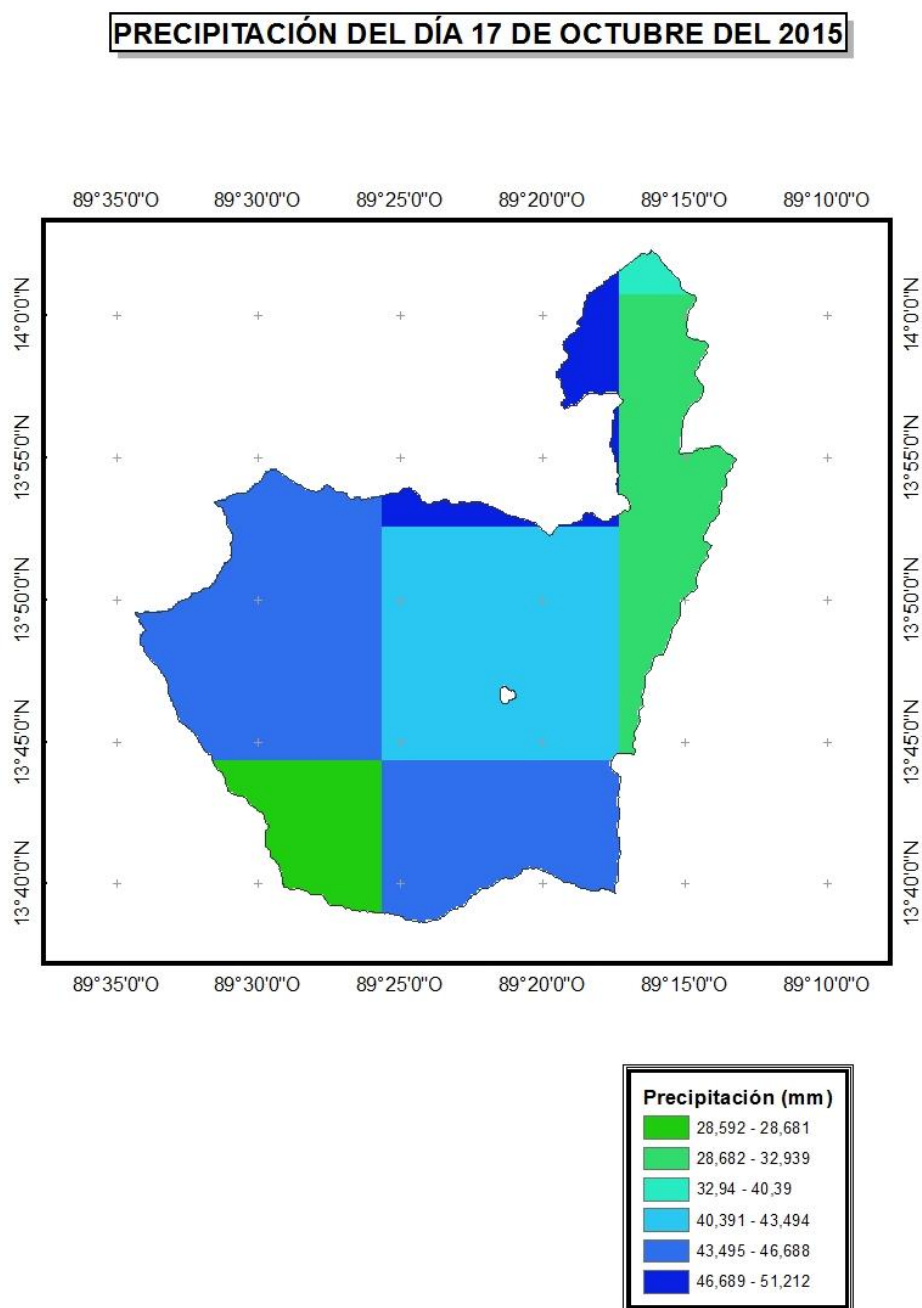


Figura 4. 12: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el 17/10/15

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 10 DE OCTUBRE DEL 2011

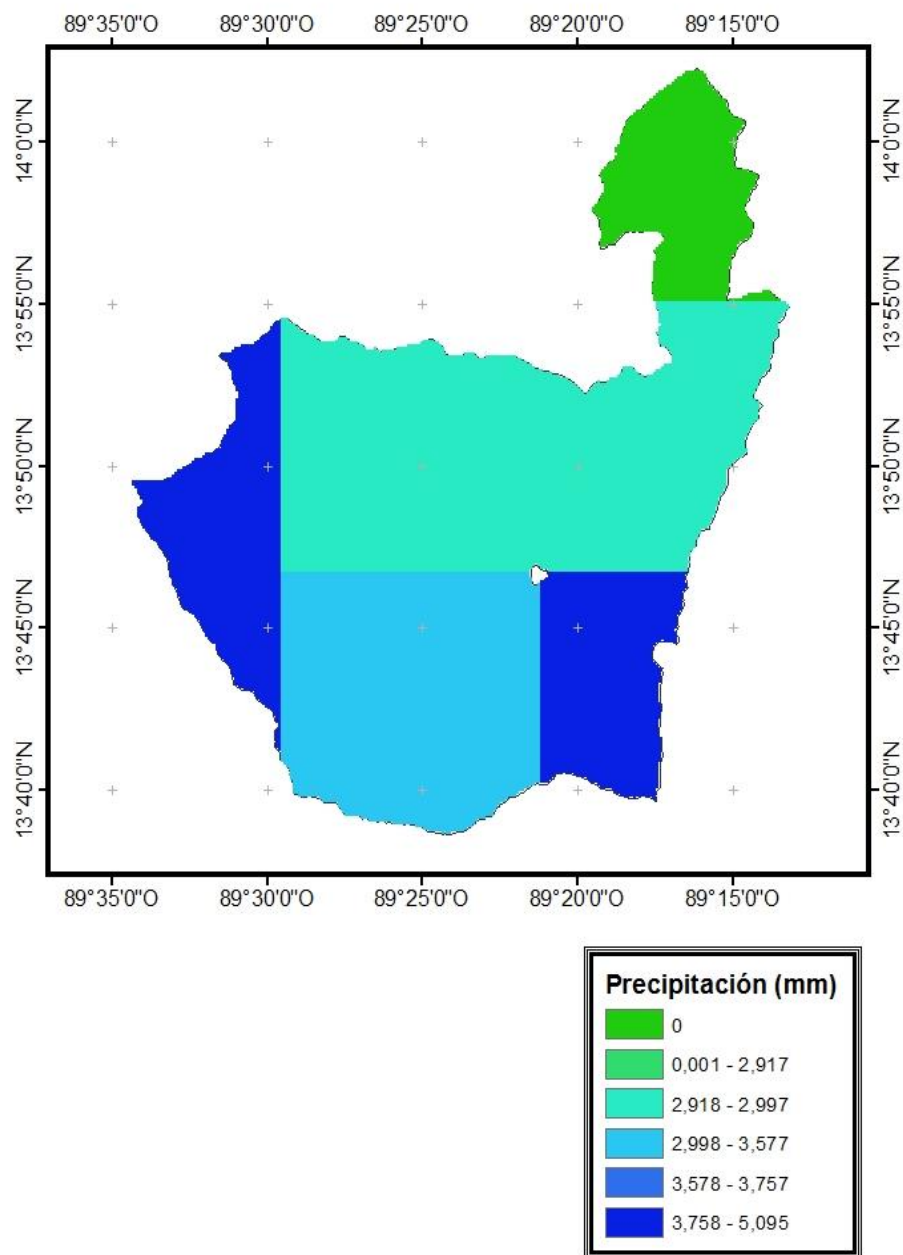


Figura 4. 13: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 10/10/11
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 11 DE OCTUBRE DEL 2011

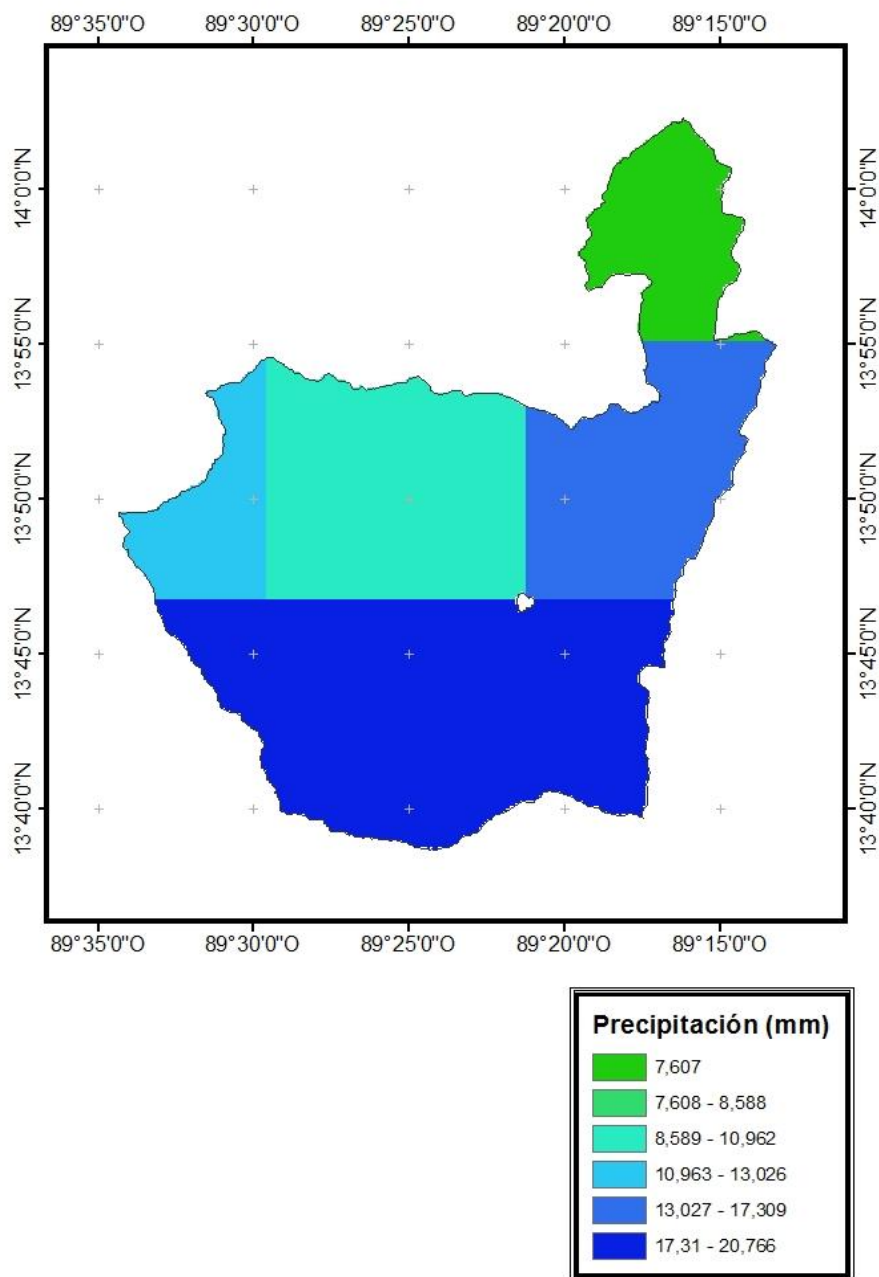


Figura 4. 14: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 11/10/11
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 12 DE OCTUBRE DEL 2011

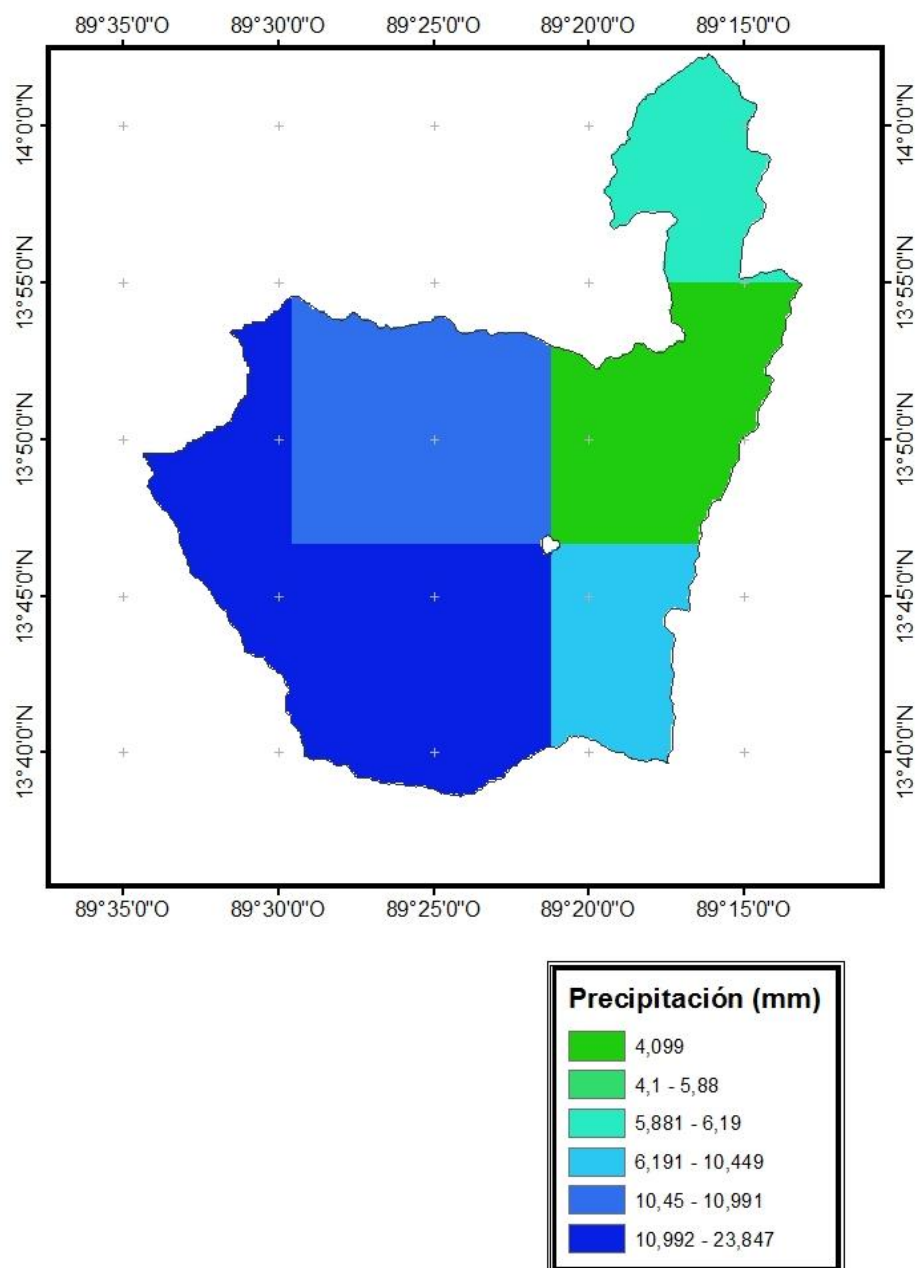


Figura 4. 15: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 12/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

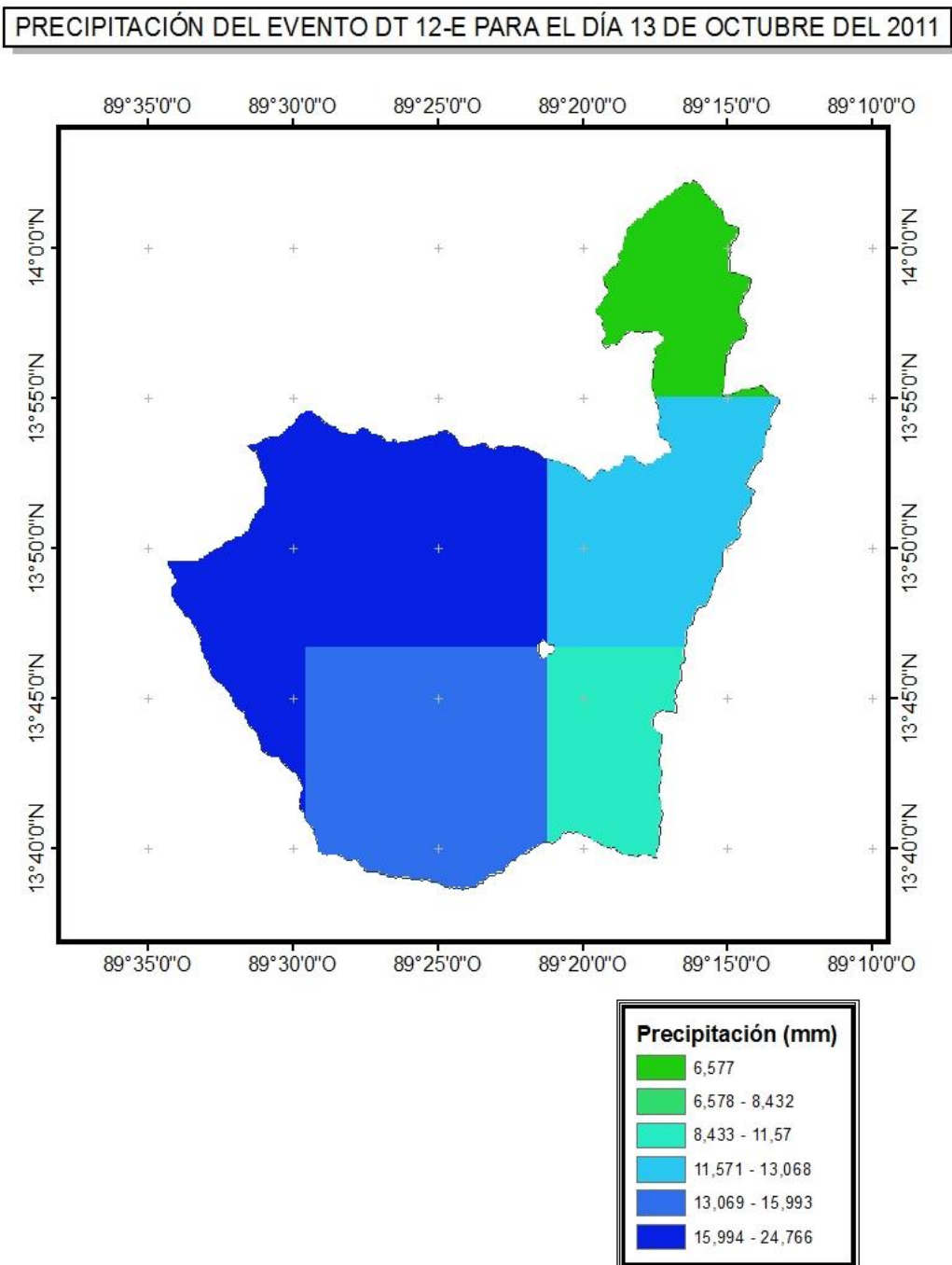


Figura 4. 16: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 13/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 14 DE OCTUBRE DEL 2011

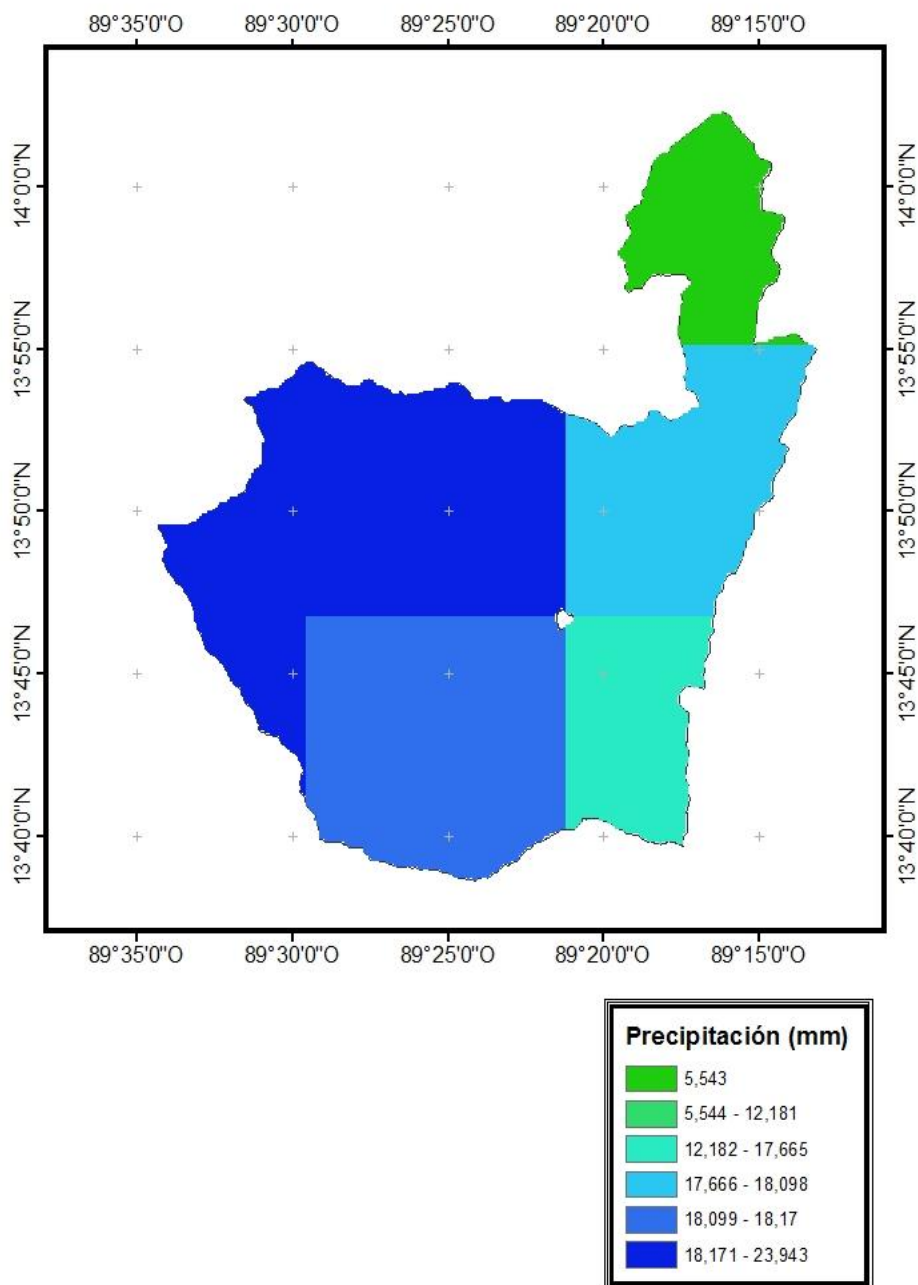


Figura 4. 17: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 14/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 15 DE OCTUBRE DEL 2011

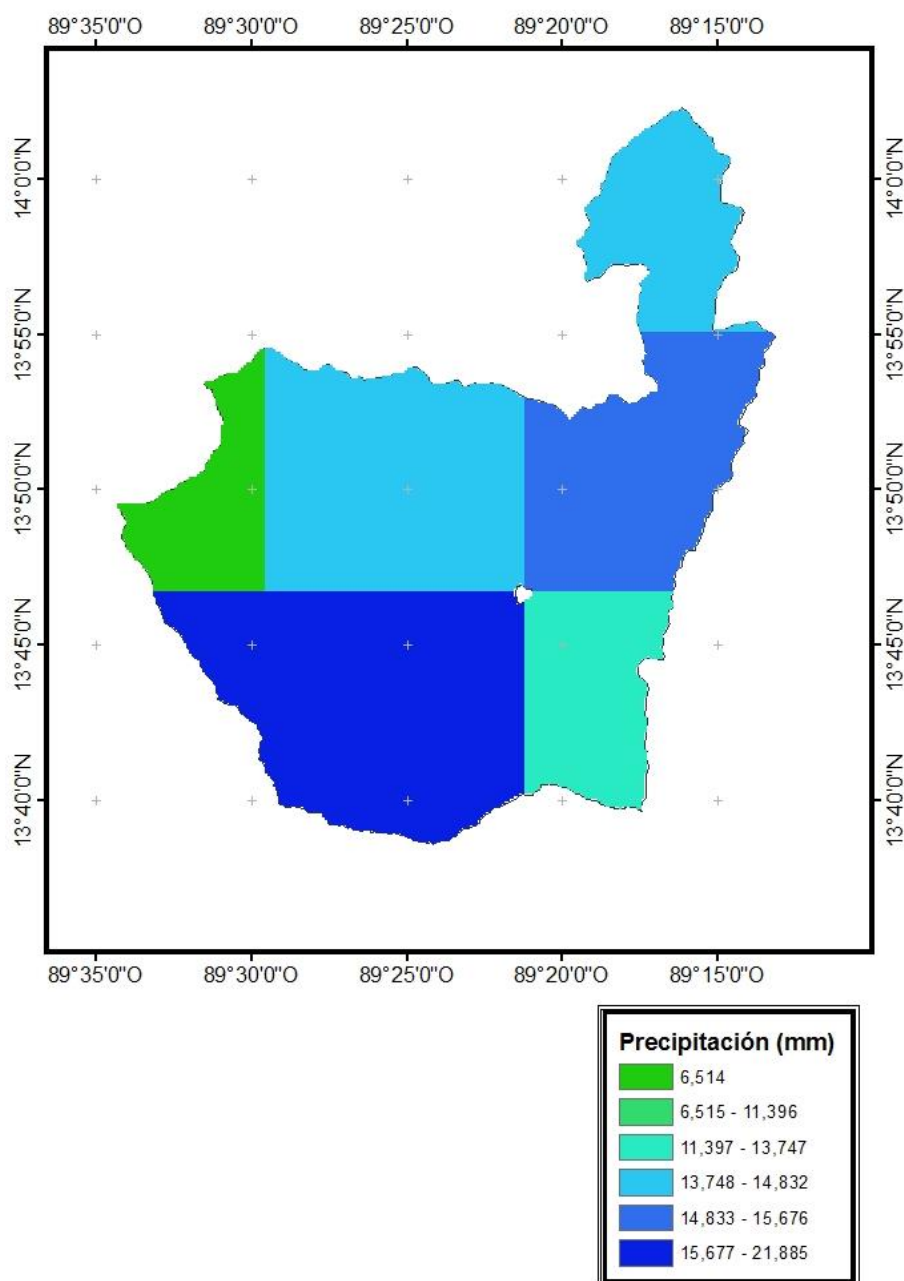


Figura 4. 18: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 15/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 16 DE OCTUBRE DEL 2011

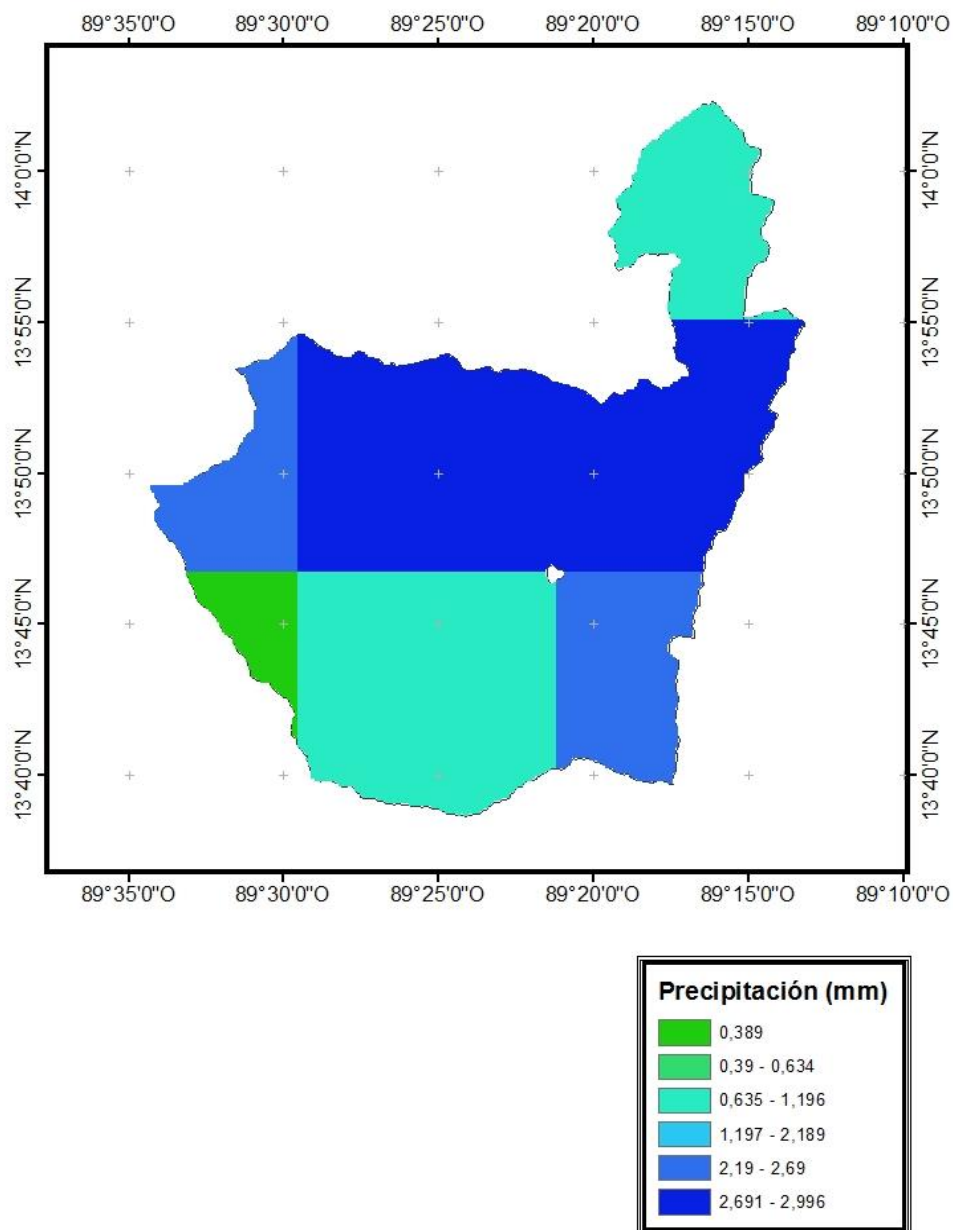


Figura 4. 19: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 16/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 17 DE OCTUBRE DEL 2011

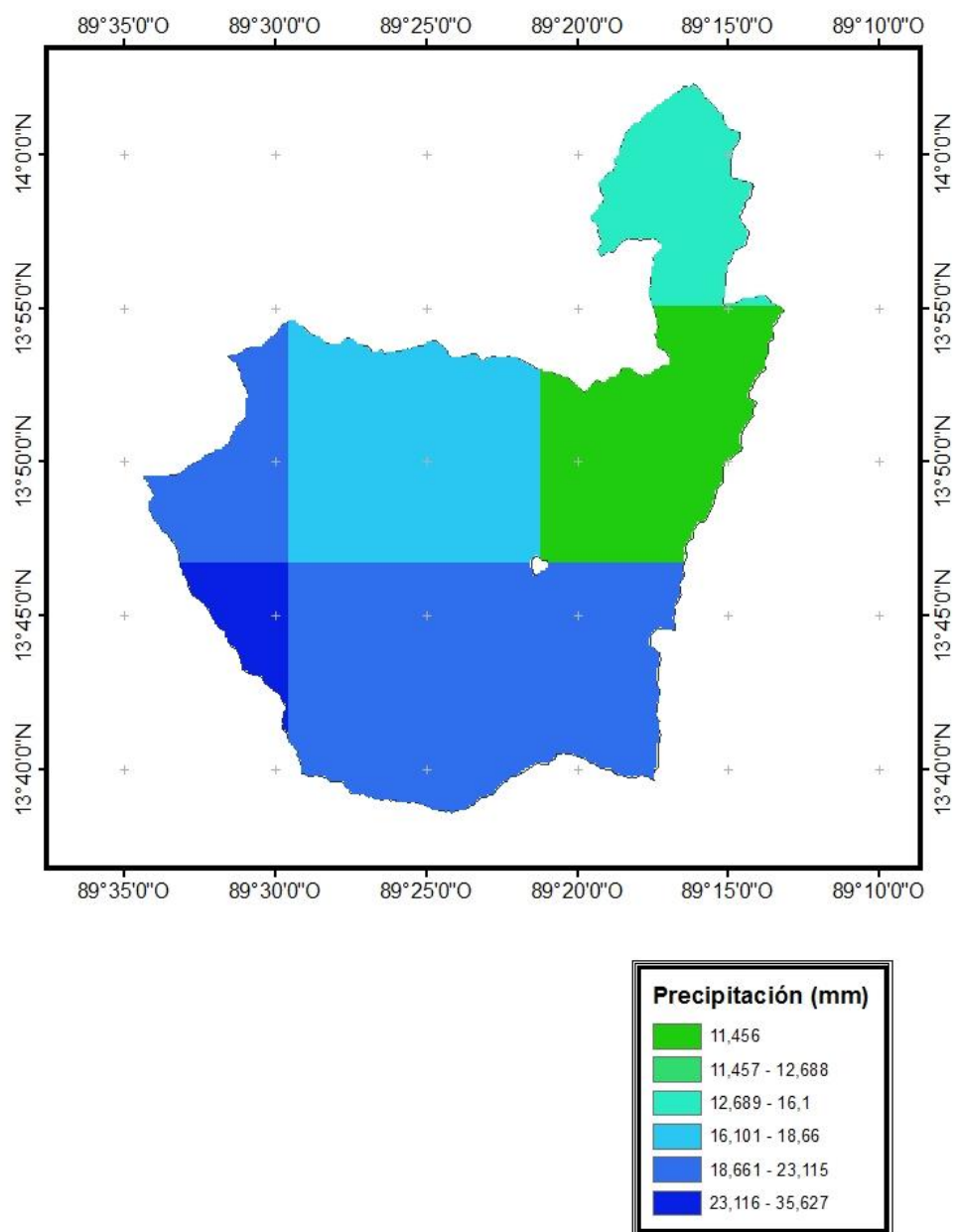


Figura 4. 20: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 17/10/11
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 18 DE OCTUBRE DEL 2011

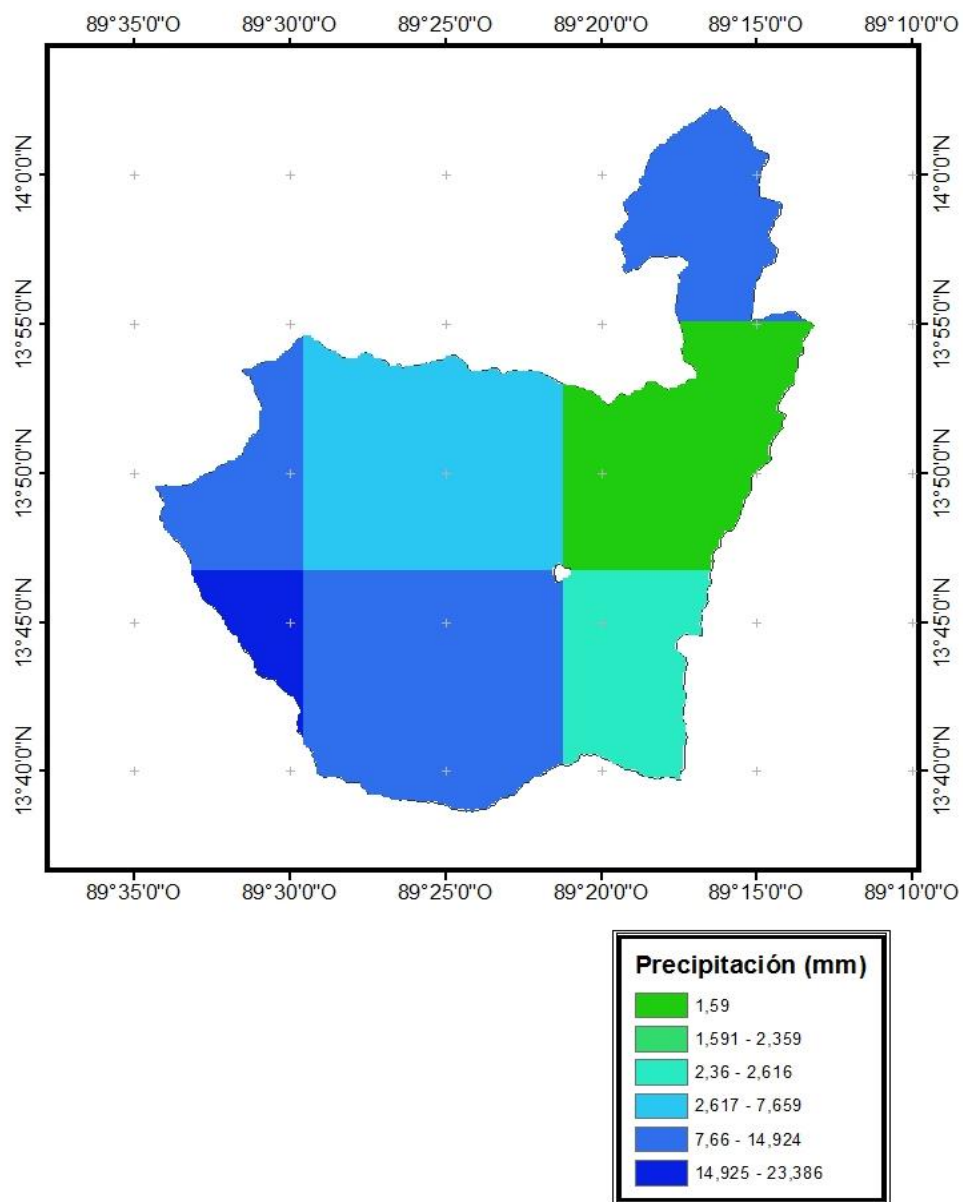


Figura 4. 21: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 18/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 19 DE OCTUBRE DEL 2011

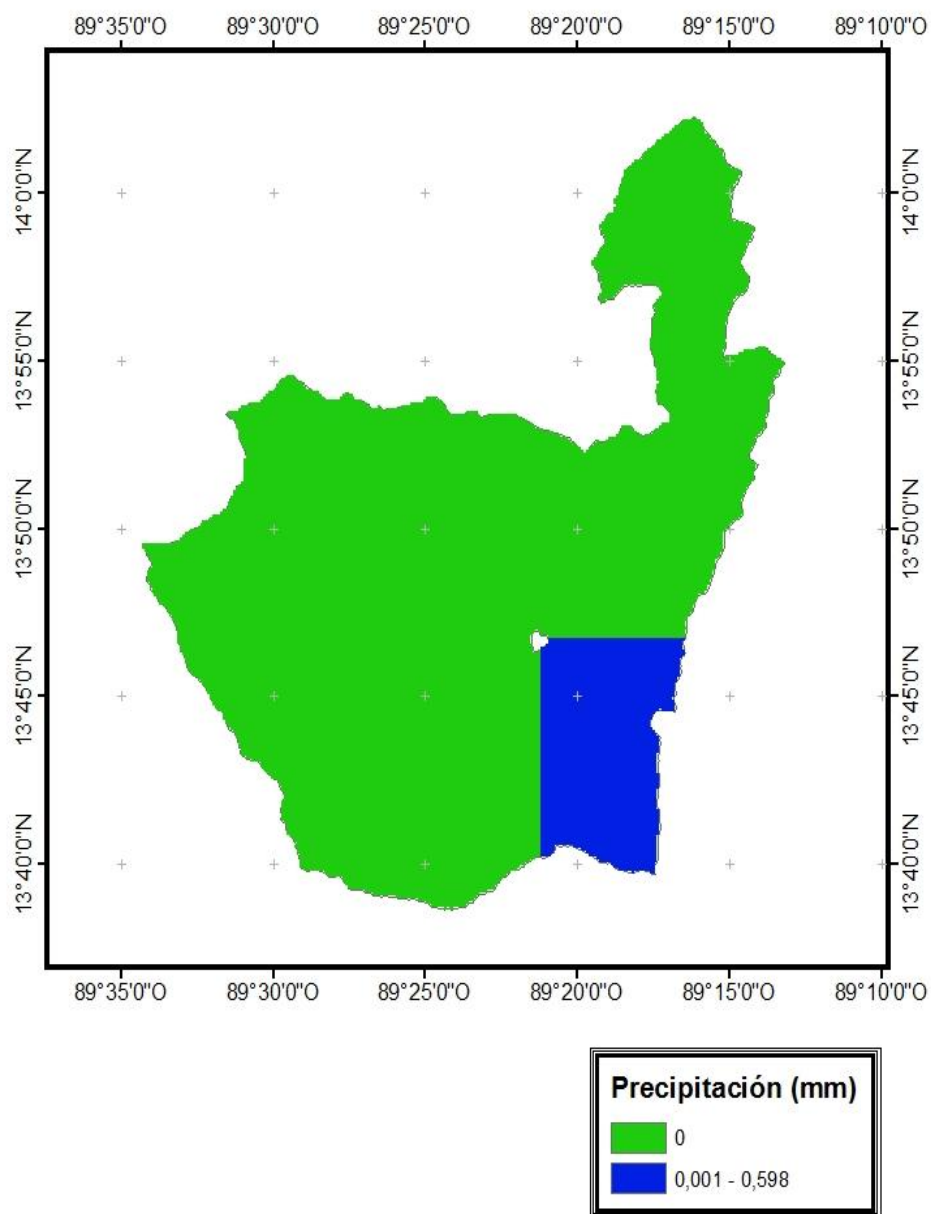


Figura 4. 22: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 19/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

PRECIPITACIÓN DEL EVENTO DT 12-E PARA EL DÍA 20 DE OCTUBRE DEL 2011

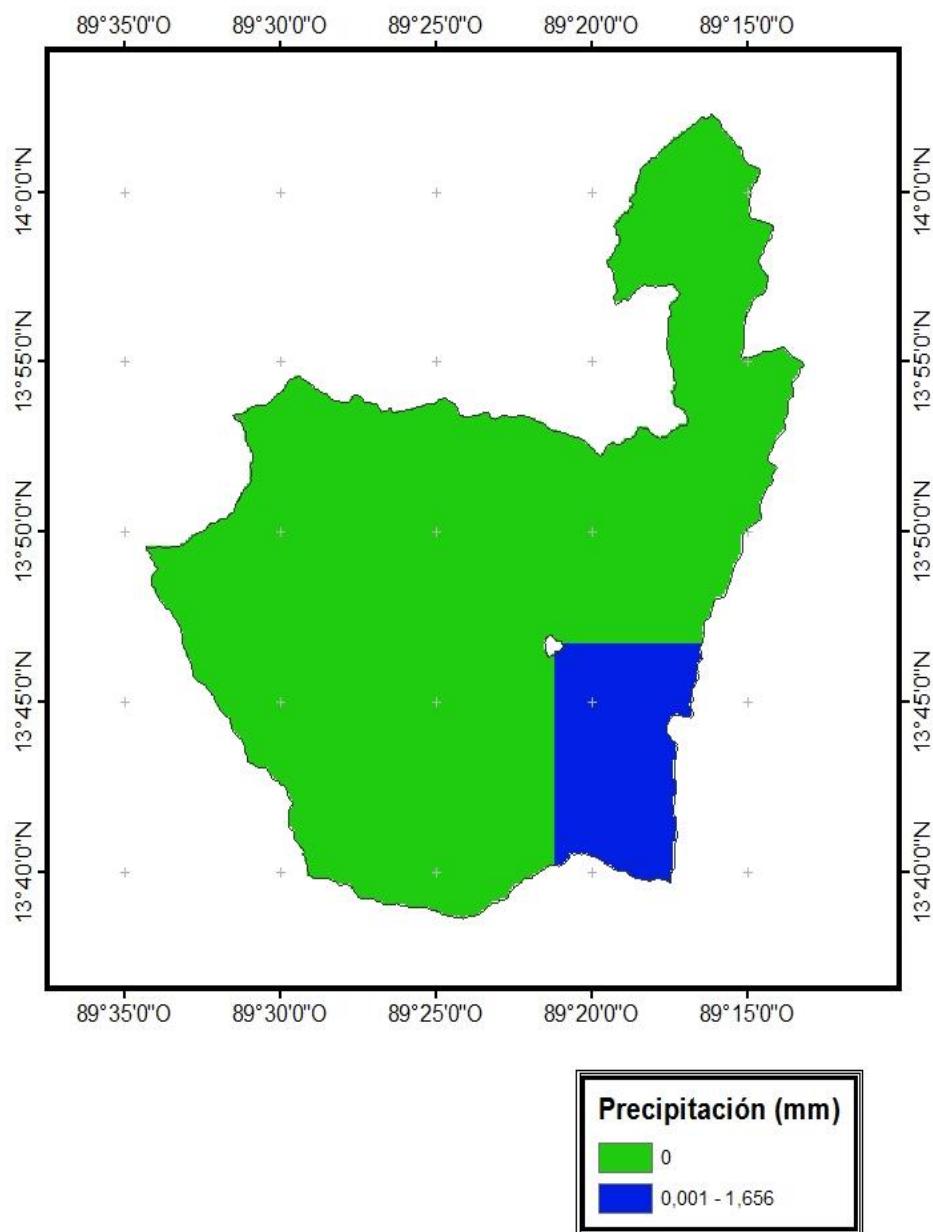


Figura 4. 23: Mapa de precipitación acumulada a 24 horas para el día 20/10/11

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

CAPITULO V:
VERIFICACIÓN DEL MODELO
METEOROLÓGICO WRF

5.1 INTRODUCCIÓN

Al implementar el modelo meteorológico WRF, es importante conocer si los resultados que se obtienen tienen concordancia con la realidad, es decir, con los datos de lluvia registrados por las estaciones telemétricas y automáticas de la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

En este sentido, en el presente capítulo se evalúa el desempeño del modelo en la predicción de variables meteorológicas, comparándolas con observaciones de estaciones meteorológicas que se seleccionaron, cercanas o dentro de la Cuenca del Río Sucio, de tal manera que, en los Capítulos precedentes III y IV, se analizaron los valores observados registrados y los pronosticados respectivamente, hasta obtener los mismos componentes que pudieran ser comparados, en este caso, la lluvia media.

5.2 VERIFICACIÓN DE PRONOSTICOS Y TABLAS DE CONTINGENCIA

5.2.1 GENERALIDADES

La verificación, es la valoración y cuantificación de la relación de coincidencia entre conjuntos de pronósticos y observaciones. Las actividades de verificación son útiles si ellas conducen a toma de decisiones con relación al producto verificado. Esta decisión debe generar cambios en la forma como se elaboran los pronósticos o conducir a una decisión de “No hacer nada” y considerar que el producto es satisfactorio. Por cuanto se asume que las observaciones son una representación precisa de la realidad, por lo general se requiere asumir que un punto de observación representa adecuadamente a los eventos dentro un área determinada.

El proceso de verificación involucra medición de la relación entre un pronóstico o conjunto de pronósticos y las correspondientes observaciones del predictando. Por eso cualquier método de verificación de pronóstico envuelve necesariamente la comparación entre pares coincidentes de pronósticos y observaciones a las cuales ellos pertenecen.

5.2.2 PROPÓSITOS DE LA VERIFICACIÓN

Los propósitos de la verificación para esta tesis, son principalmente de conocer la confiabilidad del modelo WRF a través de análisis estadísticos, para verificar si sus resultados están acorde con la realidad, y si es posible utilizarlo en un futuro para predecir el comportamiento de la atmosfera sobre el territorio salvadoreño.

Además, es importante determinar con detalle, para determinar qué acciones hay que tomar para mejorar la calidad del pronóstico, es decir, suministrar información para la investigación y el desarrollo.

5.2.3 COMPARACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

De todas las variables atmosféricas pronosticadas por los modelos numéricos del tiempo, la precipitación es una de las más difíciles de predecir con precisión. Los errores en la predicción cuantitativa de la precipitación puede deberse principalmente a errores en las observaciones y a errores propios del modelo. El conocimiento detallado de la humedad en la atmósfera y los campos con movimientos verticales son críticos para la predicción de la localización e intensidad de la precipitación, sin embargo estas cantidades son difíciles de obtener con precisión. En general es dificultoso para los modelos representar la dinámica de las nubes y los procesos microfísicos involucrados en la generación de la precipitación, por lo tanto se recurre a las parametrizaciones. En este apartado se verificará el desempeño del modelo WRF para simulaciones de dos eventos descritos en el Capítulo III.

Como el periodo simulado para las comparaciones, va desde el día 17/10/15 a las 13:00 hrs UTC hasta el 18/10/15 a las 13:00 hrs UTC, es decir 24 horas, para el evento aislado; en cambio, para el evento prolongado, las simulaciones van desde el día 10/10/11 a las 13:00 UTC hasta el 21/10/11 a las 13:00 UTC, siendo 11 días simulados, con la variante que al momento de analizar los datos que arroja el modelo numérico, se hace el análisis por periodos de 24 horas. Cabe destacar que aunque hayan sido en total 12 días simulados, este periodo de tiempo es insuficiente para

realizar una verdadera validación del modelo, ya que para esto debería evaluarse al menos durante todo un año. Sin embargo, el periodo considerado dará una idea de cuán razonables son los valores de las variables predichas por el modelo, por medio de la verificación de los datos pronosticados respecto a los observados.

5.2.4 ATRIBUTOS DEL DESEMPEÑO DE UN PRONÓSTICO

Los atributos de un pronóstico dan información sobre uno o varios aspectos de la calidad de un producto de pronóstico. Por eso, un sistema de verificación incluye el cálculo de algunas medidas (Índices) escogidas para describir los atributos que son más pertinentes para alcanzar el objetivo de la verificación. No existe una única medida de verificación que suministre información completa sobre localización del producto de pronóstico.

El desempeño del pronóstico se evalúa usando una o varias medidas escalares (O sea, unidimensionales) o atributos. Muchos de estos índices han sido derivados de la experiencia.

5.2.4.1 DESVIACIÓN ESTANDAR

La desviación típica o desviación estándar (Denotada con el símbolo σ o s , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos) es una medida de dispersión para variables de razón (Variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

La desviación típica es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N p_i (x_i - \mu)^2}$$

Ecuación 5. 1: Desviación Estándar

Donde $\mu = \sum_{i=1}^N p_i x_i$

5.2.4.2 COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

De manera menos formal, se puede definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables, siempre y cuando ambas sean cuantitativas; en este caso las variables corresponden a

la lluvia media observada y pronosticada El valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1,1]:

- **Si $r = 1$** , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- **Si $0 < r < 1$** , existe una correlación positiva.
- **Si $r = 0$** , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- **Si $-1 < r < 0$** , existe una correlación negativa.
- **Si $r = -1$** , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante. La expresión que permite calcularlo es la siguiente:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Ecuación 5. 2: Coeficiente de Correlación de Pearson

Dónde:

σ_{XY} es la covarianza de (X,Y)

σ_X es la desviación típica de la variable X

σ_Y es la desviación típica de la variable Y

5.2.4.3 MEAN ERROR (BIAS) O ME

El error medio o sistemático (sesgo), se calcula mediante la diferencia media entre el pronóstico y las observaciones, donde n es el número total de pronósticos comparados. Debido a que el ME carece de términos en valor absoluto o al cuadrado, se permite la cancelación de errores individuales positivos y negativos, poniendo en evidencia solamente el exceso, es decir el error sistemático.

$$ME = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)$$

Ecuación 5. 3: Mean Error

El sesgo es el más simple y más familiar de las puntuaciones y puede proporcionar información muy útil sobre el comportamiento local de un parámetro de tiempo determinado (Por ejemplo, temperatura máxima cerca de la costa o la temperatura mínima sobre el suelo cubierto de nieve). El rango del ME va desde menos infinito hasta infinito, y una puntuación perfecta es, $ME = 0$. Sin embargo, es posible llegar a una puntuación perfecta para un conjunto de datos con errores grandes, si hay errores de compensación de un signo inverso. El ME no es una medida de precisión, ya que no proporciona información sobre la magnitud de los errores de pronóstico. Una medida sencilla para compensar los posibles errores positivos y negativos que puede generar el ME es mediante el cálculo del MAE.

5.2.4.4 MEAN ABSOLUTE ERROR (MAE)

El error absoluto medio es el promedio del valor absoluto de la diferencia entre el pronóstico y la observación, donde n es el número total de comparaciones pronosticadas. Es error absoluto porque tiene en cuenta tanto errores positivos como negativos.

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |y_i - o_i|$$

Ecuación 5. 4: Mean Absolute Error

El rango del MAE es de cero al infinito y, como en el ME, una puntuación perfecta es igual $MAE = 0$, y aumenta a medida que las discrepancias entre las predicciones y observaciones se hacen más grandes. Podemos interpretar el MAE como una magnitud típica del error de pronóstico en un conjunto de datos de verificación dado, y por tanto, es una medida escalar de precisión de los pronósticos. Es recomendable ver siempre el ME y el MAE simultáneamente.

5.2.4.5 MEAN SQUARED ERROR (MSE)

El error cuadrático medio, se calcula elevando al cuadrado la diferencia media del pronóstico y las observaciones, donde n es el número total de comparaciones pronosticadas, el RMSE (Ecuación 5.6) es la raíz cuadrada del MSE (Ecuación 5.5) la medida de error total. El RMSE incluye los componentes sistemáticos y al azar, los cuales se pueden separar usando medidas para el error sistemático y el error al azar, tales como error de sesgo y desviación estándar.

$$MSE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2$$

Ecuación 5. 5: Mean Squared Error

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2}$$

Ecuación 5. 6: Raíz cuadrada del MSE

Al igual que con el MAE, su alcance es de cero al infinito, con una puntuación perfecta de $MSE = 0$ o $RMSE = 0$. Debido a la segunda potencia, el MSE y RMSE son mucho más sensibles a grandes errores de pronóstico que el MAE. Esto puede ser especialmente perjudicial en la presencia de posibles valores atípicos en los conjuntos de datos y, en consecuencia, al menos con conjuntos de datos pequeños o limitados se prefiere el uso del MAE.

5.3 ANALISIS DE LOS VALORES DE LLUVIA MEDIA OBSERVADOS Y PRONOSTICADOS

Esta comparación se realizó para cada uno de los 12 días evaluados, creándose tablas que contienen el periodo, lluvia media pronosticada y observada, así como la diferencia existente entre el valor pronosticado y observado; además, los periodos con sus correspondientes acumulados de lluvia para 24 horas. Con cada una de las tablas se crearon gráficos que muestran de forma individual la lluvia media, así como la comparación de lo observado con lo pronosticado. Se presentan los gráficos de dispersión que muestran la distribución de los datos registrados con los estimados por el modelo, a su vez, se realiza un análisis estadístico para cada día, analizando los resultados obtenidos.

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.307	4.774	-4.467	0-3 hrs	0.307	4.774
3-6 hrs	5.613	17.843	-12.230	0-6 hrs	5.922	22.618
6-9 hrs	13.007	1.477	11.530	0-9 hrs	18.930	24.095
9-12 hrs	4.438	2.035	2.403	0-12 hrs	23.367	26.130
12-15 hrs	0.807	6.424	-5.617	0-15 hrs	24.174	32.553
15-18 hrs	7.443	2.231	5.213	0-18 hrs	31.618	34.784
18-21 hrs	4.968	8.246	-3.278	0-21 hrs	36.586	43.030
21-24 hrs	3.284	5.241	-1.957	0-24 hrs	39.869	48.271

Tabla 5. 1: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 17/10/15

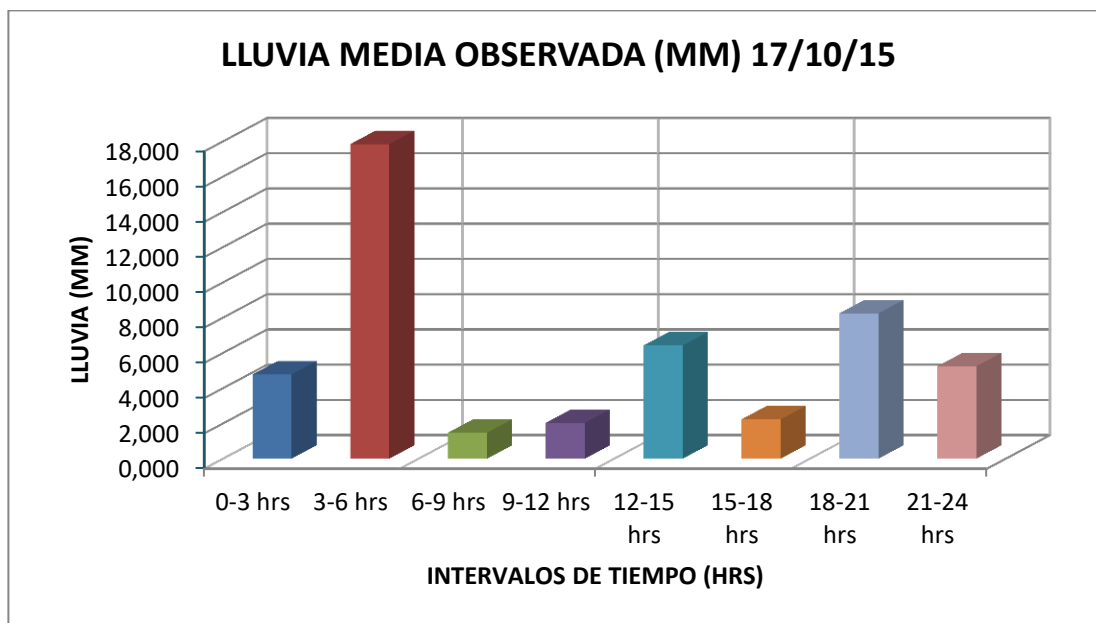


Figura 5. 1: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 17 de Octubre de 2015

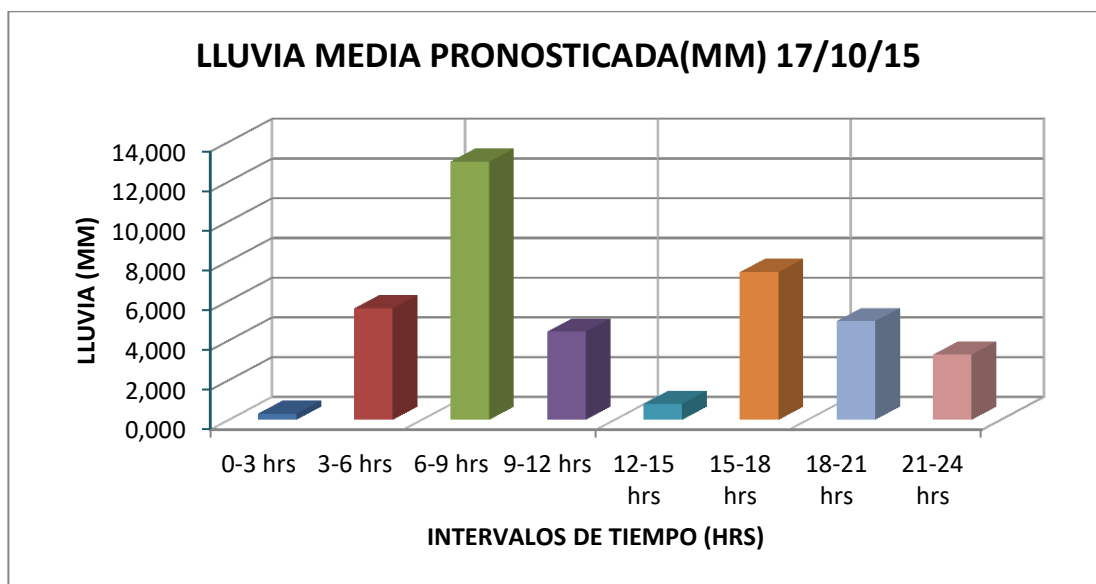


Figura 5. 2: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 17 de Octubre de 2015

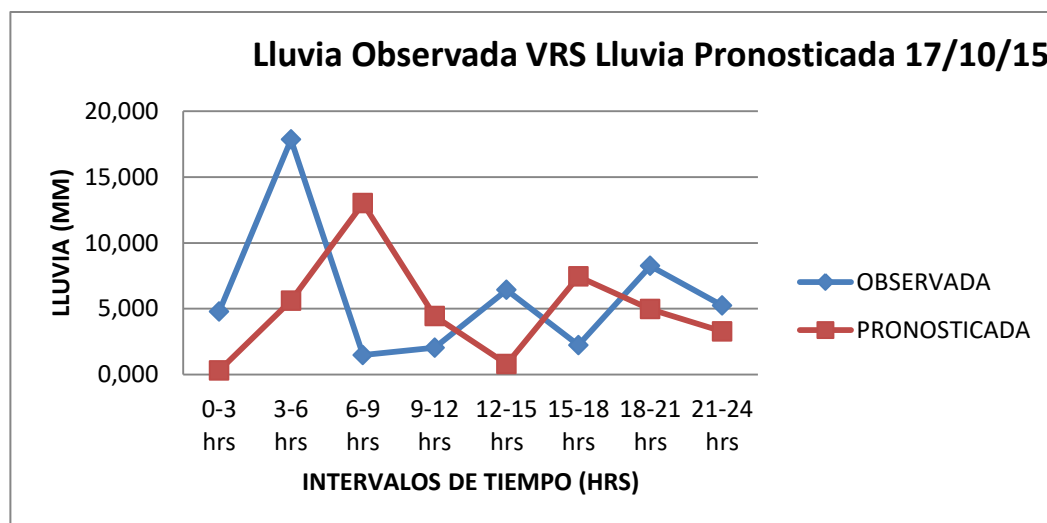


Figura 5. 3: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 17/10/15

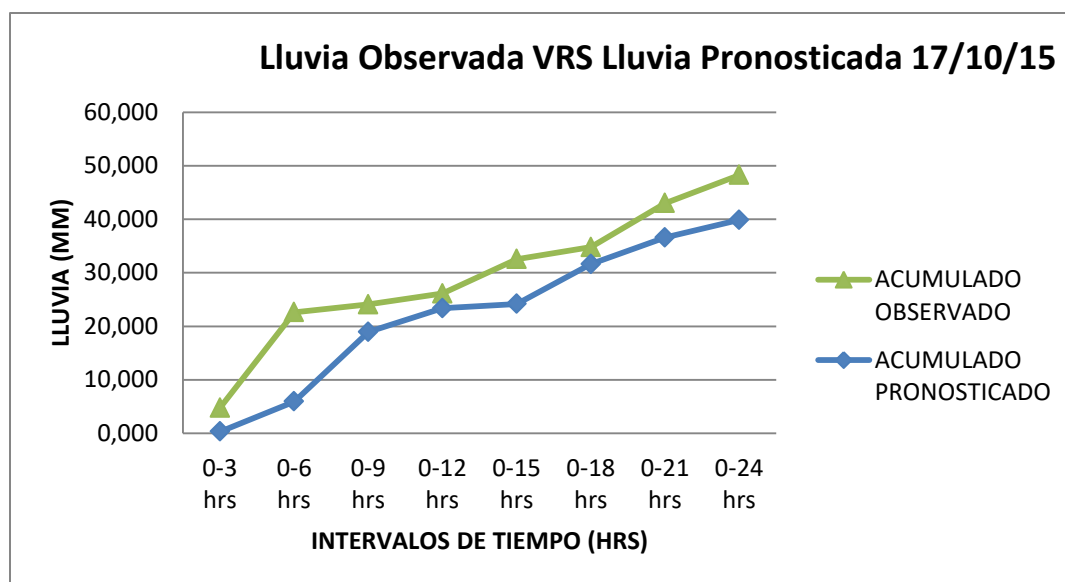
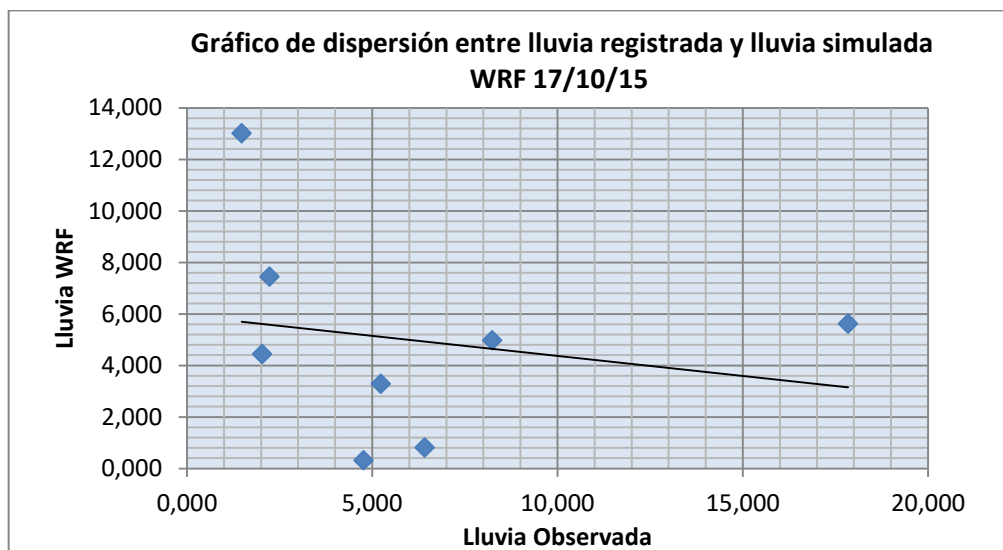


Figura 5. 4: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 17/10/15



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.21		
Máximo lluvia interpolada	17.843	Máximo lluvia WRF	13.007
Promedio lluvia interpolada	6.034	Promedio lluvia WRF	4.983
Desviación Estándar lluvia interpolada	5.318	Desviación Estándar lluvia WRF	4.024

Figura 5. 5: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 17/10/15

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.073	0.019	0.054	0-3 hrs	0.073	0.019
3-6 hrs	0.023	2.701	-2.678	0-6 hrs	0.096	2.720
6-9 hrs	0.000	0.642	-0.642	0-9 hrs	0.096	3.361
9-12 hrs	0.000	0.017	-0.017	0-12 hrs	0.096	3.378
12-15 hrs	0.000	0.136	-0.136	0-15 hrs	0.096	3.515
15-18 hrs	0.495	0.321	0.174	0-18 hrs	0.592	3.836
18-21 hrs	1.663	2.050	-0.387	0-21 hrs	2.255	5.885
21-24 hrs	0.973	5.461	-4.488	0-24 hrs	3.228	11.346

Tabla 5. 2: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 10/10/11 de la DT 12-E

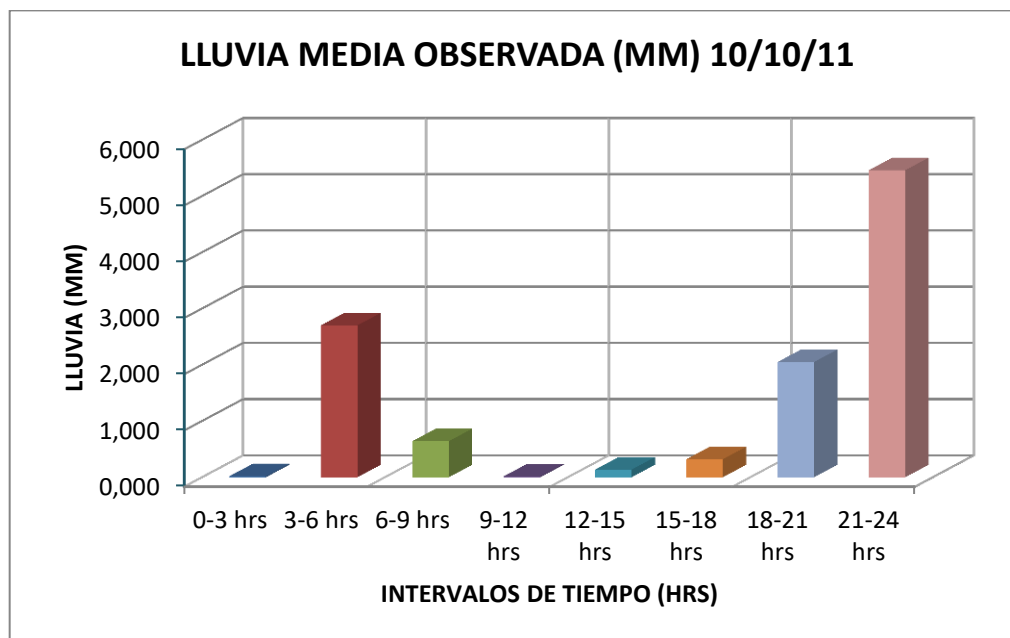


Figura 5. 6: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 10 de Octubre de 2011,
DT 12-E

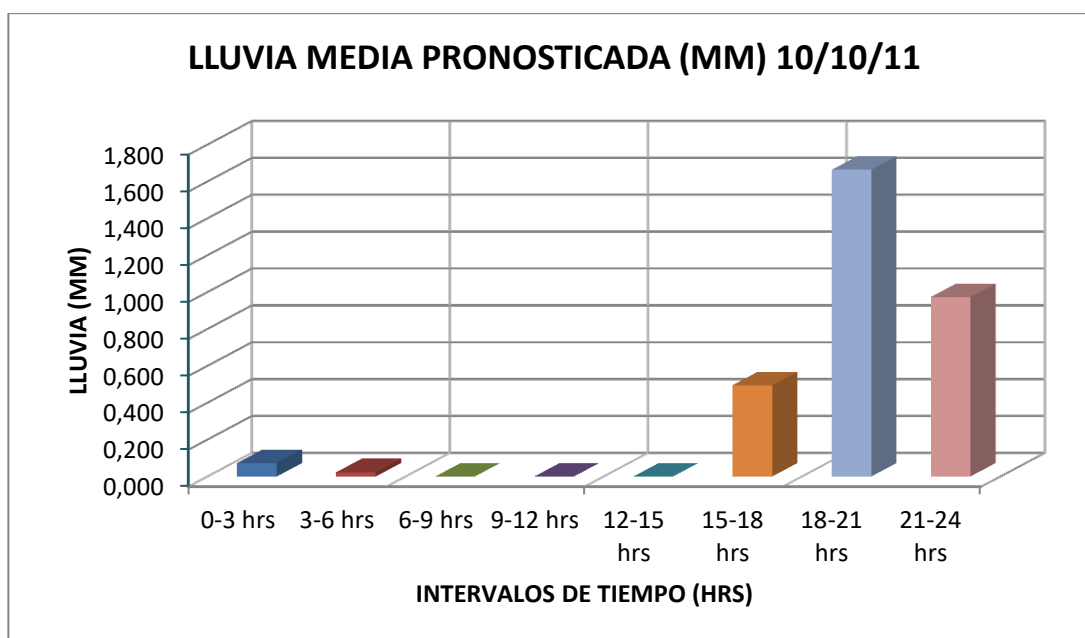


Figura 5. 7: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 10 de Octubre de 2011,
DT 12-E

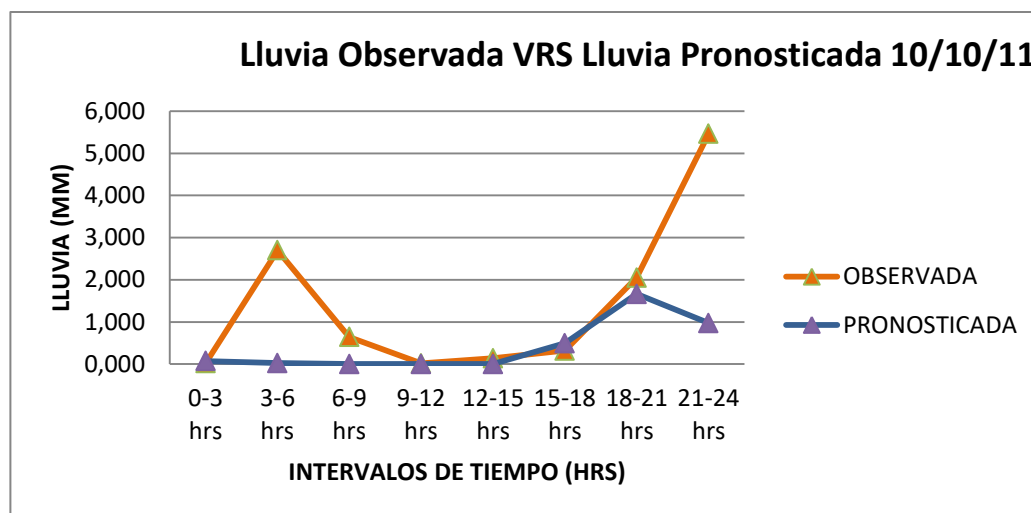


Figura 5. 8: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 10/10/11, DT 12-E

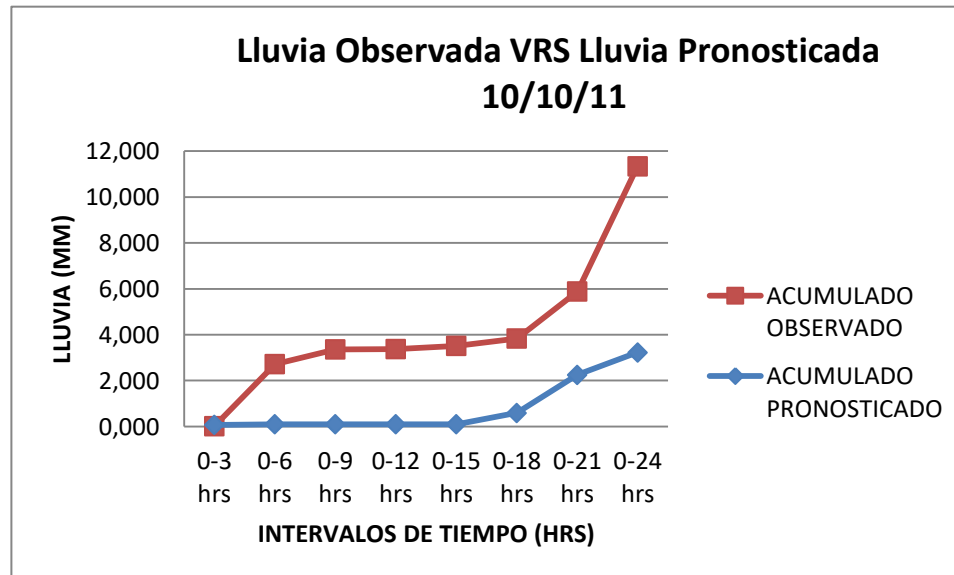
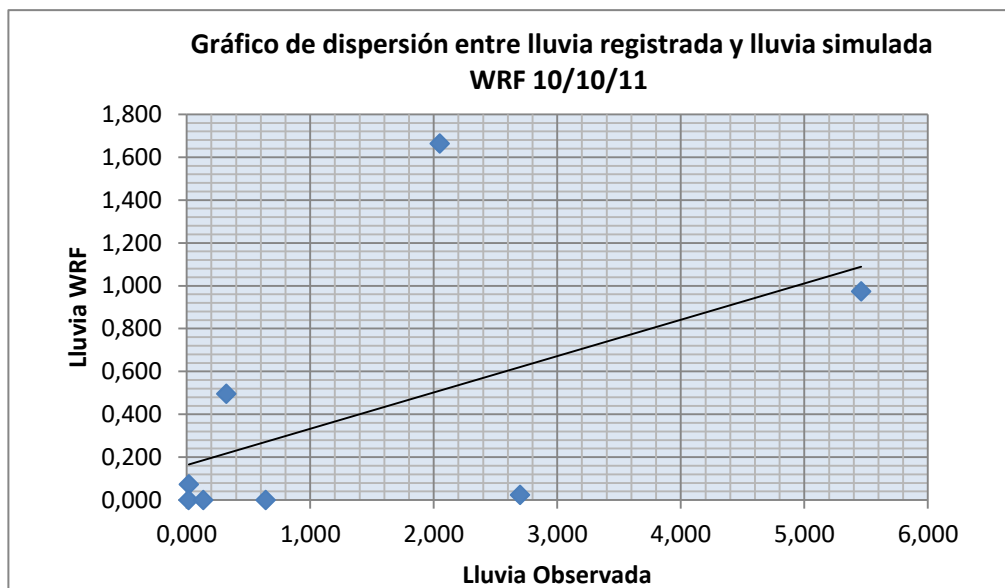


Figura 5. 9: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 10/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	0.53		
Máximo lluvia interpolada	5.461	Máximo lluvia WRF	1.663
Promedio lluvia interpolada	1.418	Promedio lluvia WRF	0.404
Desviación Estándar lluvia interpolada	1.918	Desviación Estándar lluvia WRF	0.617

Figura 5. 10: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 10/10/11, DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	4.091258	0.951	3.141	0-3 hrs	4.091	0.951
3-6 hrs	1.812813	3.341	-1.528	0-6 hrs	5.904	4.292
6-9 hrs	0.263266	1.030	-0.766	0-9 hrs	6.167	5.321
9-12 hrs	0.136948	29.321	-29.185	0-12 hrs	6.304	34.643
12-15 hrs	0.006521	8.932	-8.926	0-15 hrs	6.311	43.575
15-18 hrs	2.309406	7.187	-4.878	0-18 hrs	8.620	50.762
18-21 hrs	4.926767	17.319	-12.393	0-21 hrs	13.547	68.081
21-24 hrs	0.371012	21.487	-21.116	0-24 hrs	13.918	89.568

Tabla 5. 3: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 11/10/11 de la DT 12-E

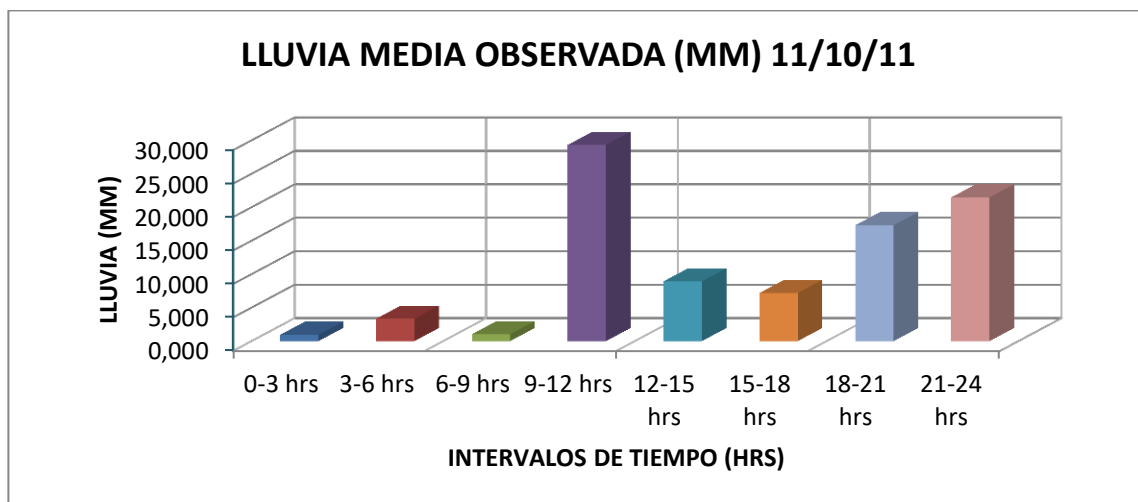


Figura 5. 11: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 11 de Octubre de 2011, DT 12-E

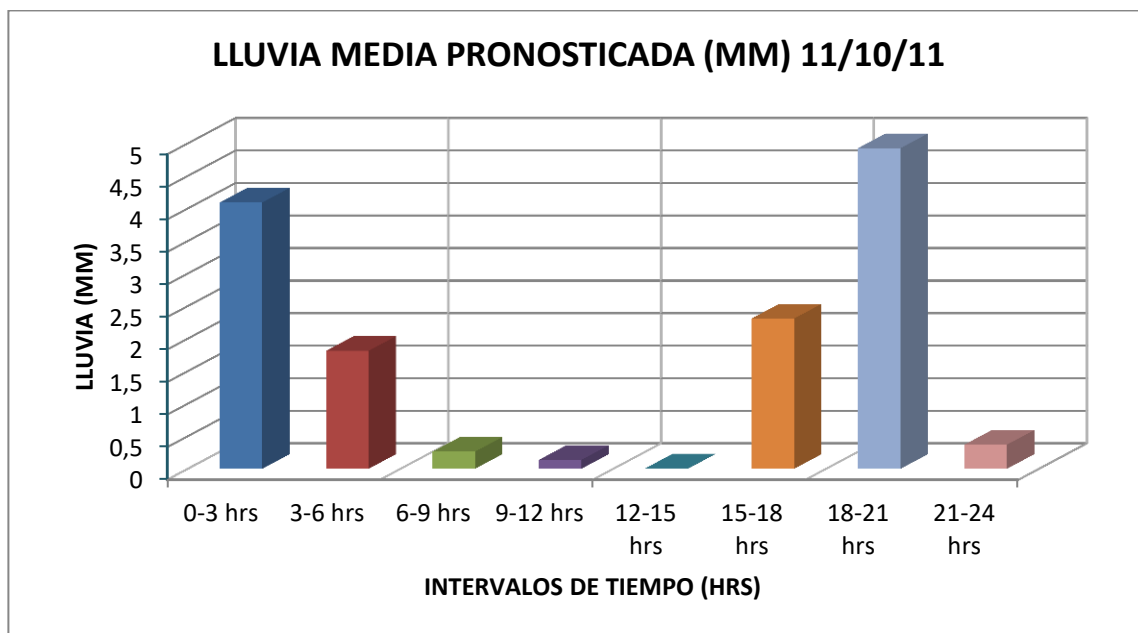


Figura 5. 12: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 11 de Octubre de 2011, DT 12-E

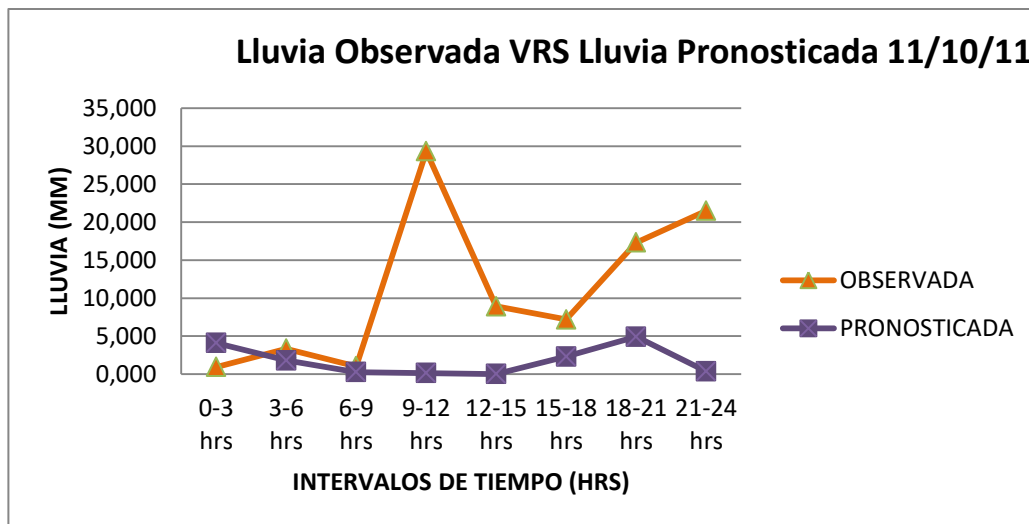


Figura 5. 13: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 11/10/11, DT 12-E

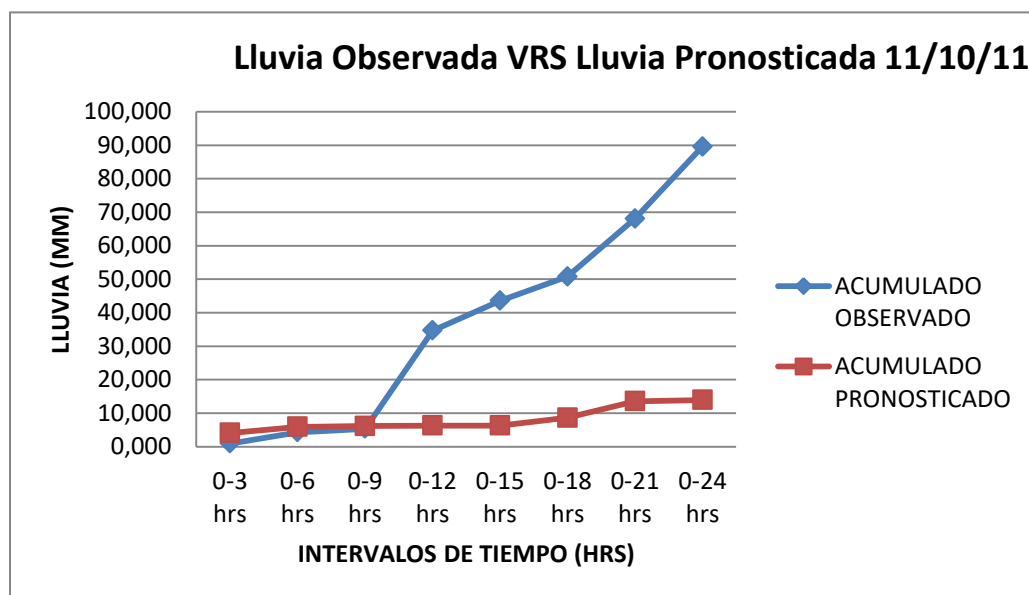
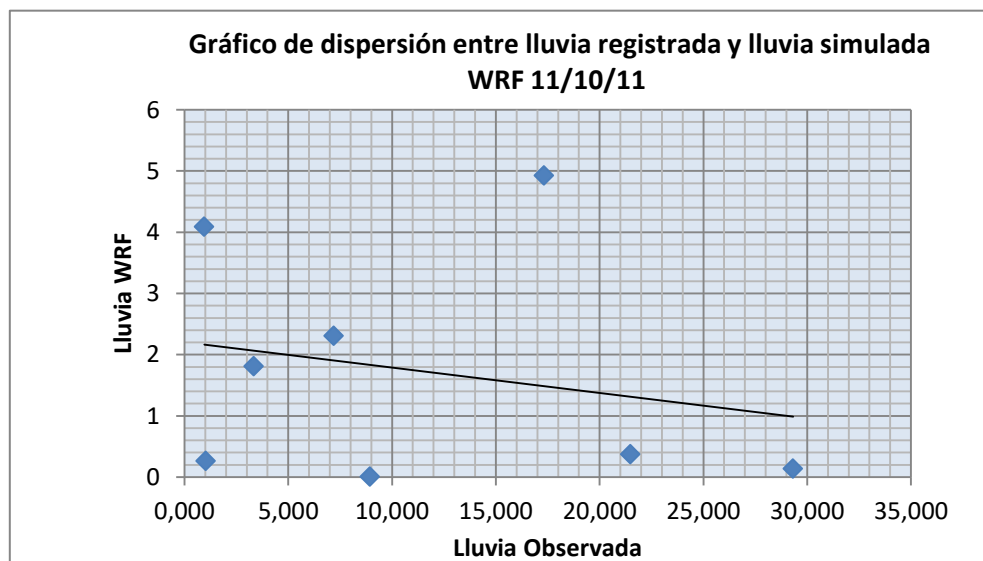


Figura 5. 14: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 11/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.23		
Máximo lluvia interpolada	29.321	Máximo lluvia WRF	4.927
Promedio lluvia interpolada	11.196	Promedio lluvia WRF	1.740
Desviación Estándar lluvia interpolada	10.441	Desviación Estándar lluvia WRF	1.914

Figura 5. 15: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 11/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODOO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	2.346	18.571	-16.225	0-3 hrs	2.346	18.571
3-6 hrs	2.367	20.202	-17.835	0-6 hrs	4.713	38.773
6-9 hrs	0.003	16.359	-16.356	0-9 hrs	4.716	55.131
9-12 hrs	0.000	13.059	-13.059	0-12 hrs	4.716	68.190
12-15 hrs	0.002	13.512	-13.511	0-15 hrs	4.717	81.703
15-18 hrs	2.200	14.282	-12.083	0-18 hrs	6.917	95.985
18-21 hrs	2.974	6.292	-3.318	0-21 hrs	9.891	102.277
21-24 hrs	0.225	7.601	-7.376	0-24 hrs	10.116	109.878

Tabla 5. 4: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 12/10/11 de la DT 12-E

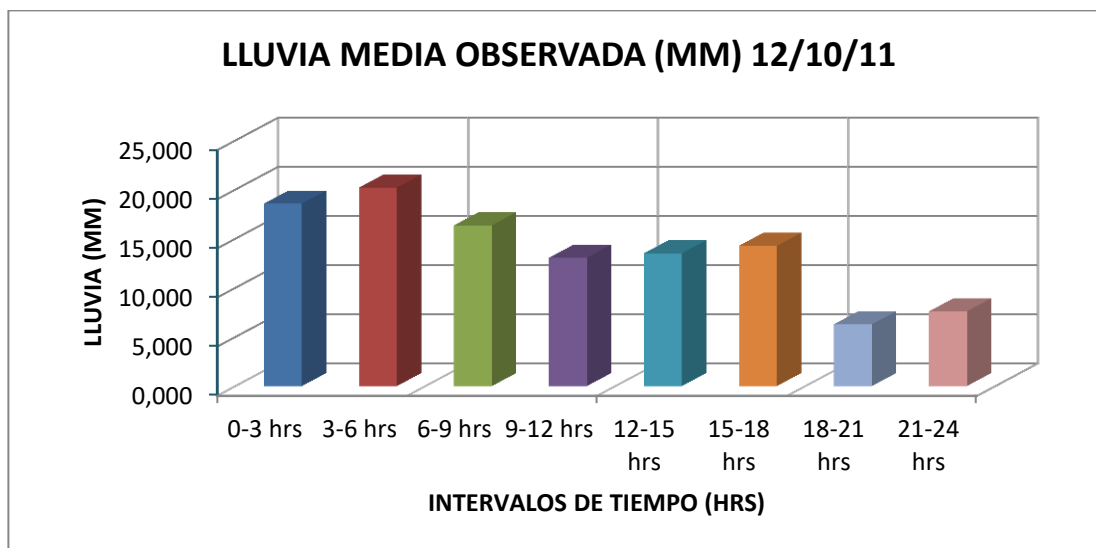


Figura 5. 16: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 12 de Octubre de 2011, DT 12-E

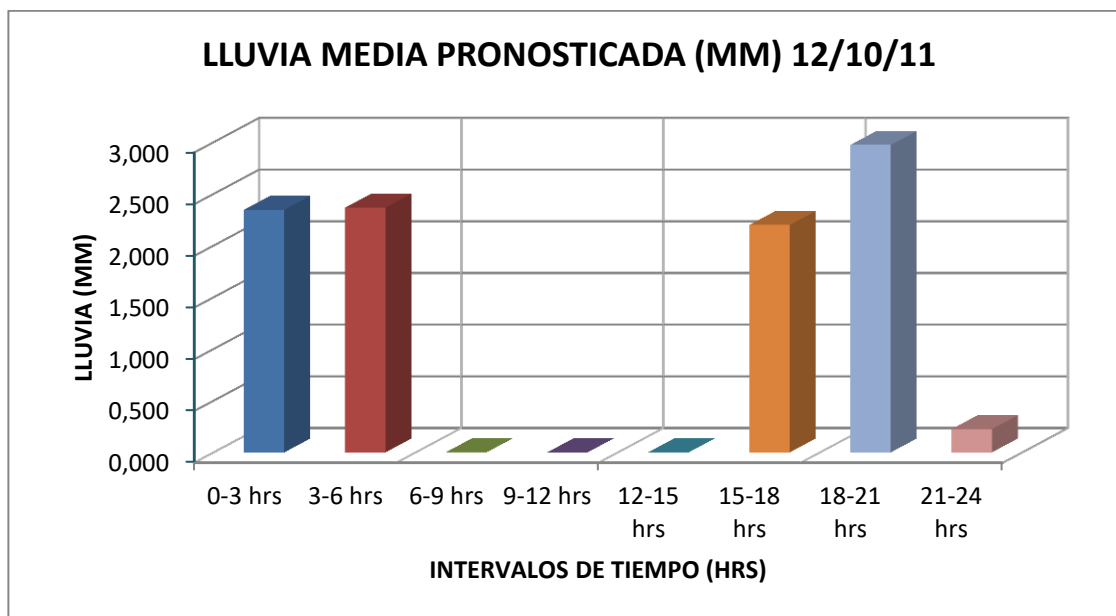


Figura 5. 17: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 12 de Octubre de 2011, DT 12-E

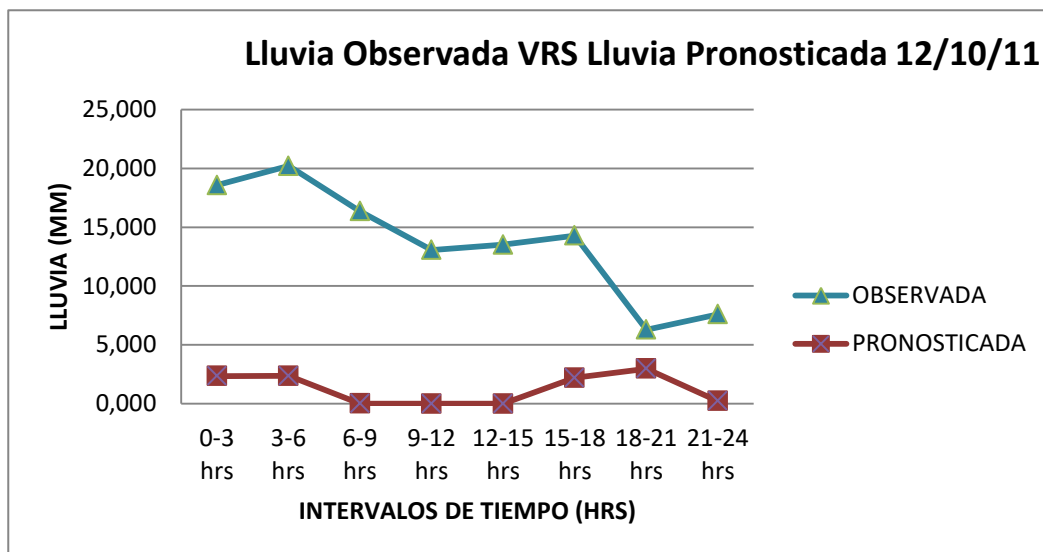


Figura 5. 18: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 12/10/11, DT 12-E

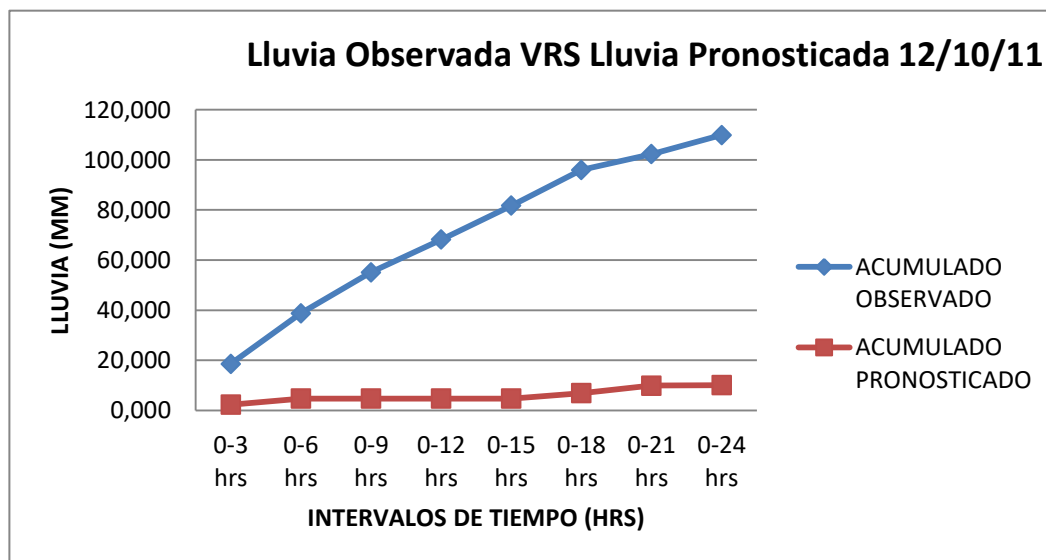
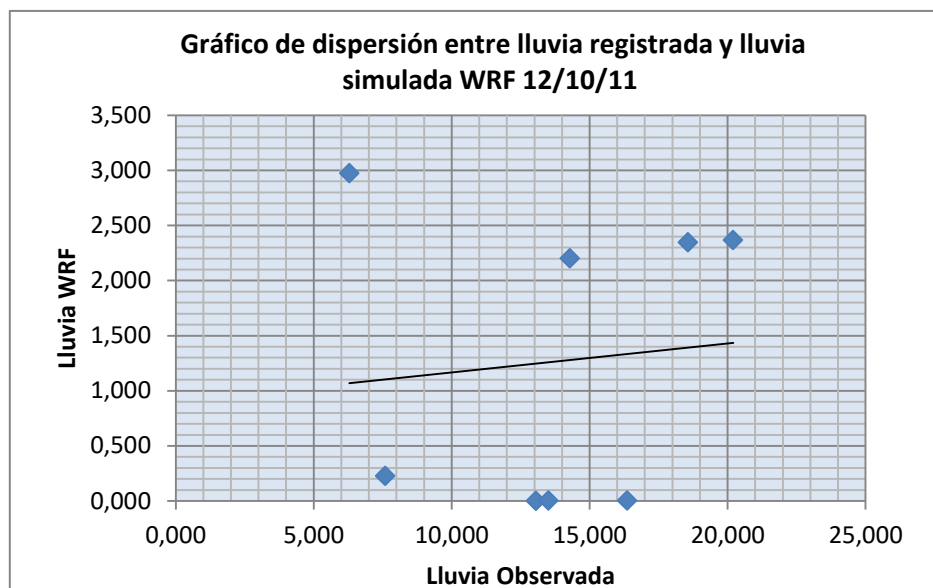


Figura 5. 19: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 12/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	0.10		
Máximo lluvia interpolada	20.202	Máximo lluvia WRF	2.974
Promedio lluvia interpolada	13.735	Promedio lluvia WRF	1.264
Desviación Estándar lluvia interpolada	4.869	Desviación Estándar lluvia WRF	1.312

Figura 5. 20: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 12/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.010	7.605	-7.594	0-3 hrs	0.010	7.605
3-6 hrs	0.000	7.642	-7.641	0-6 hrs	0.011	15.246
6-9 hrs	0.000	6.114	-6.114	0-9 hrs	0.011	21.360
9-12 hrs	0.000	5.946	-5.946	0-12 hrs	0.011	27.306
12-15 hrs	0.000	5.991	-5.991	0-15 hrs	0.011	33.297
15-18 hrs	1.786	4.126	-2.340	0-18 hrs	1.797	37.423
18-21 hrs	8.083	1.976	6.107	0-21 hrs	9.880	39.400
21-24 hrs	3.755	1.666	2.088	0-24 hrs	13.635	41.066

Tabla 5. 5: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 13/10/11 de la DT 12-E

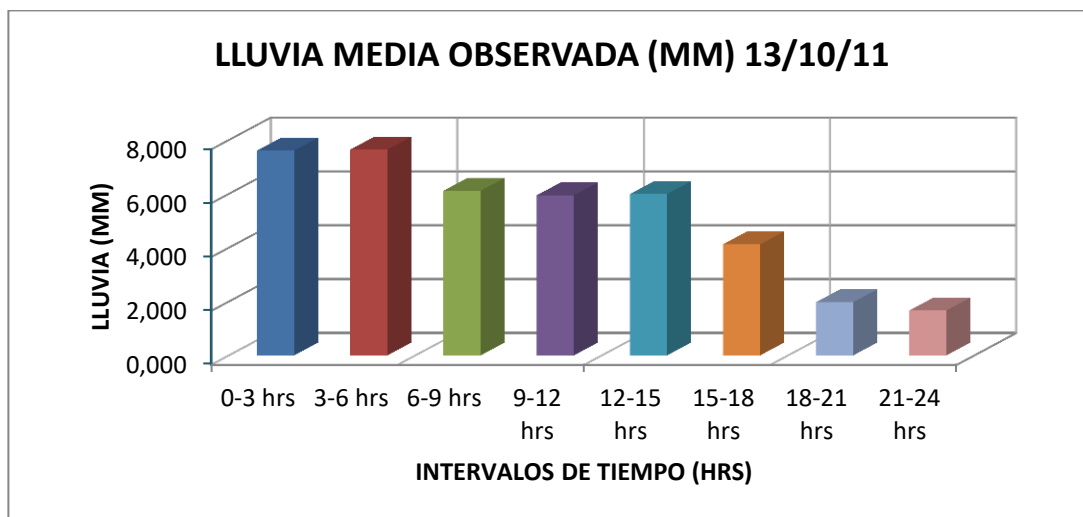


Figura 5. 21: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 13 de Octubre de 2011, DT 12-E

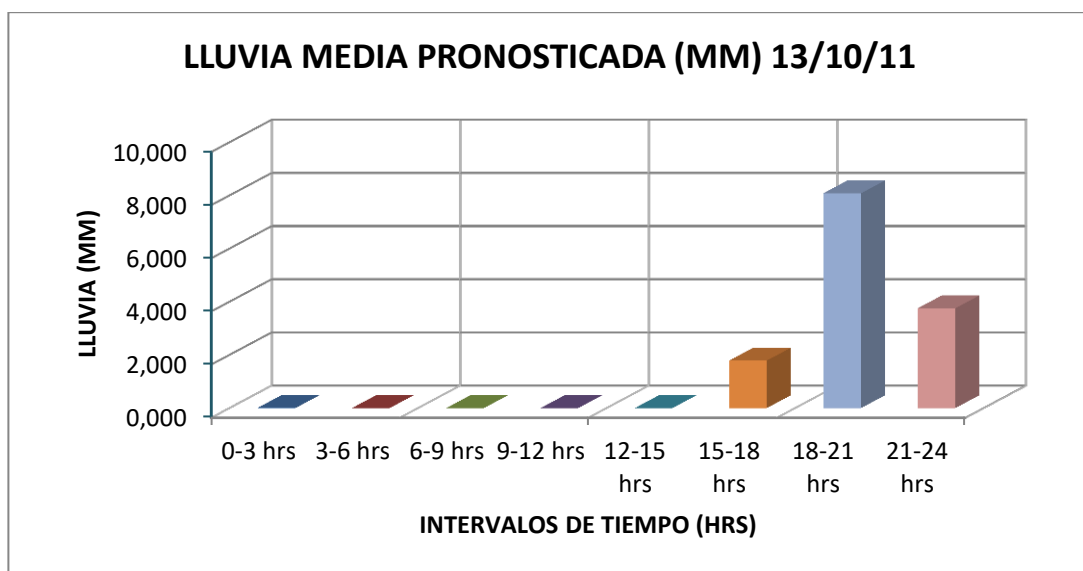


Figura 5. 22: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 13 de Octubre de 2011, DT 12-E

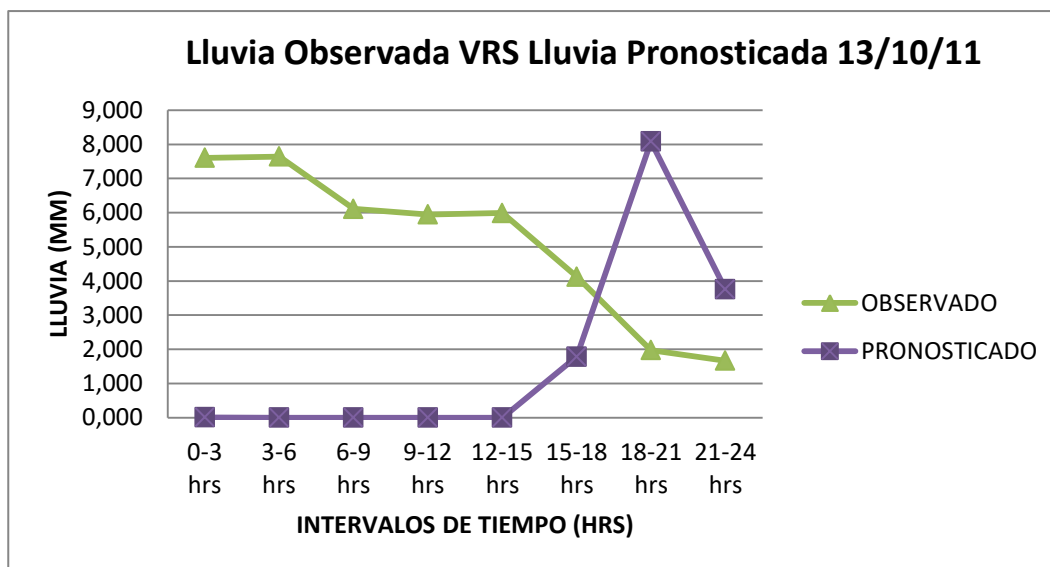


Figura 5. 23: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 13/10/11, DT 12-E

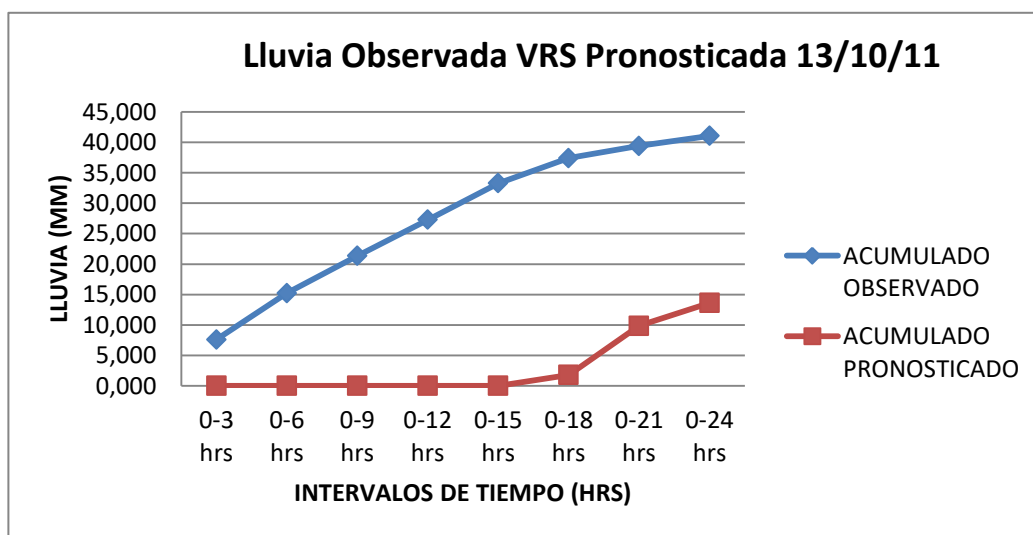
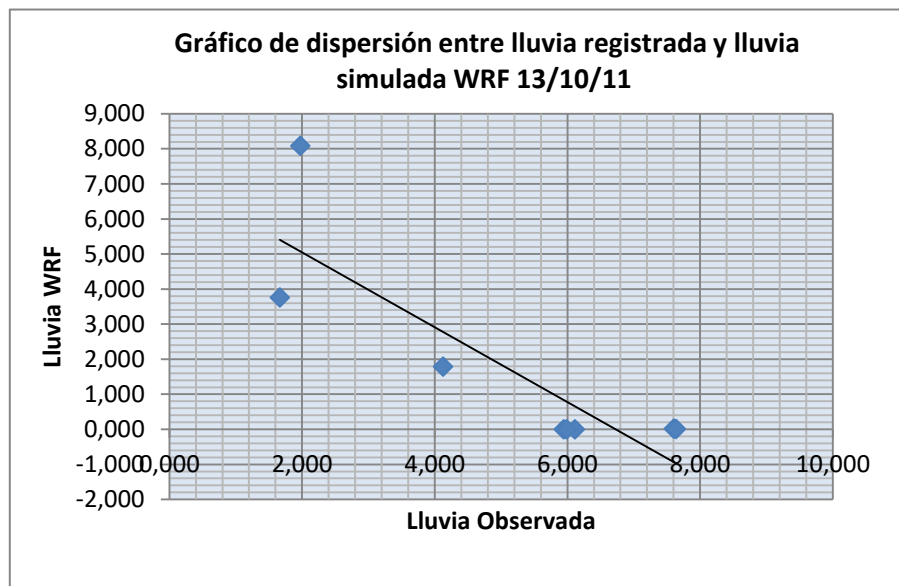


Figura 5. 24: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 13/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.85		
Máximo lluvia interpolada	7.642	Máximo lluvia WRF	8.083
Promedio lluvia interpolada	5.133	Promedio lluvia WRF	1.704
Desviación Estándar lluvia interpolada	2.322	Desviación Estándar lluvia WRF	2.913

Figura 5. 25: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 13/10/11, DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.033	9.585	-9.553	0-3 hrs	0.033	9.585
3-6 hrs	0.000	5.790	-5.790	0-6 hrs	0.033	15.375
6-9 hrs	0.000	13.868	-13.868	0-9 hrs	0.033	29.243
9-12 hrs	0.000	1.507	-1.507	0-12 hrs	0.033	30.750
12-15 hrs	0.000	0.510	-0.510	0-15 hrs	0.033	31.260
15-18 hrs	1.642	0.753	0.889	0-18 hrs	1.674	32.013
18-21 hrs	10.455	1.480	8.975	0-21 hrs	12.129	33.492
21-24 hrs	4.663	1.847	2.816	0-24 hrs	16.792	35.339

Tabla 5. 6: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 14/10/11 de la DT 12-E

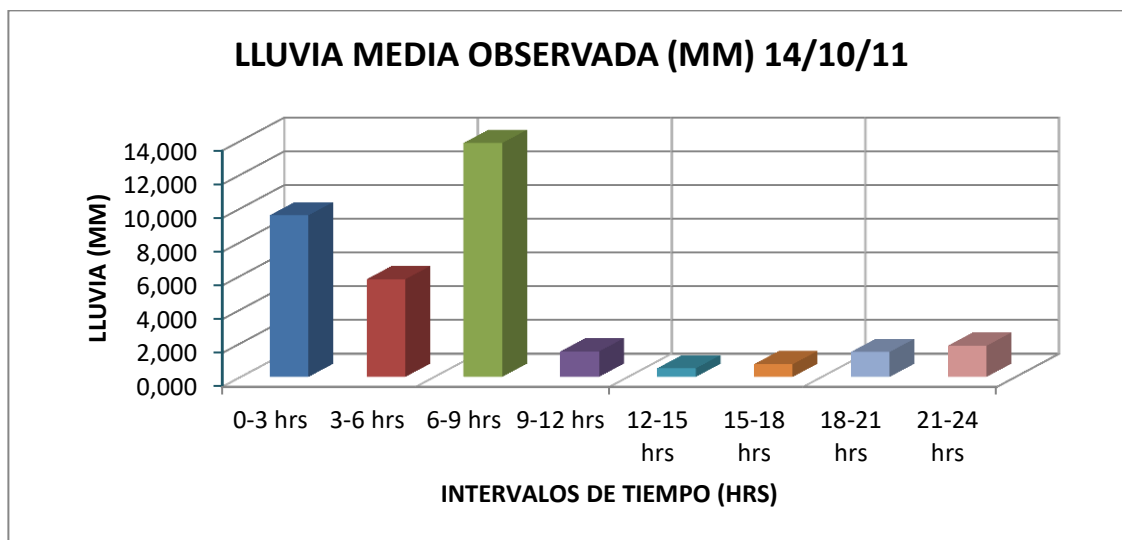


Figura 5. 26: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 14 de Octubre de 2011 ,
DT 12-E

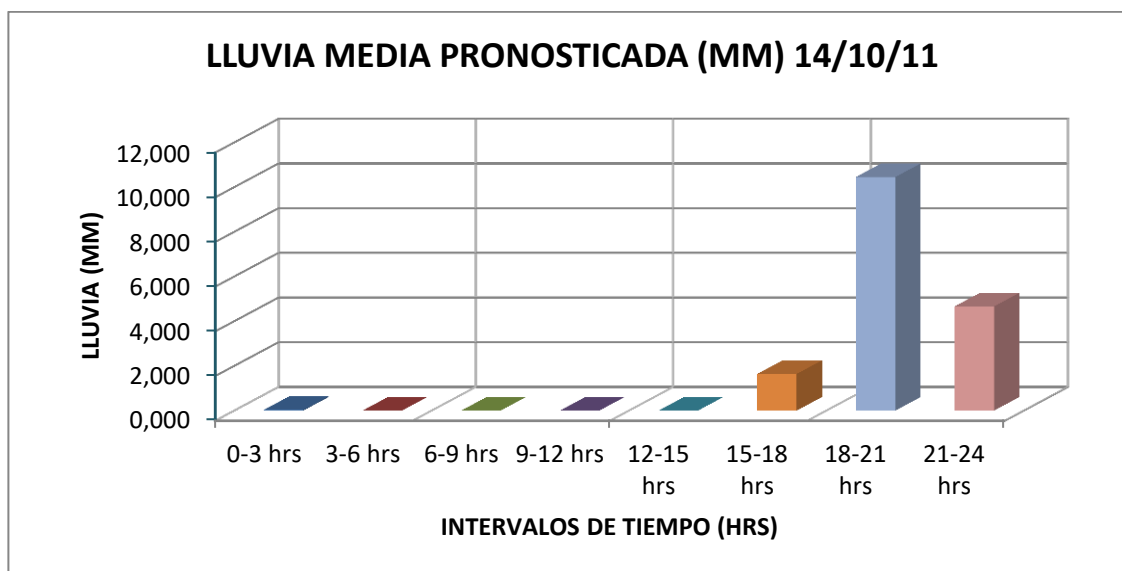


Figura 5. 27: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 14 de Octubre de 2011,
DT 12-E

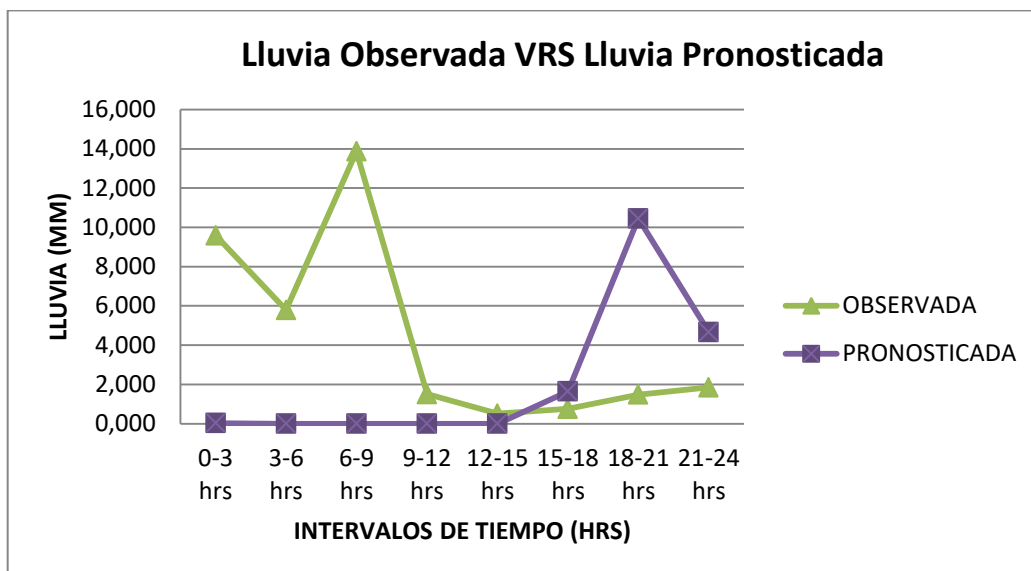


Figura 5. 28: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 14/10/11, DT 12-E

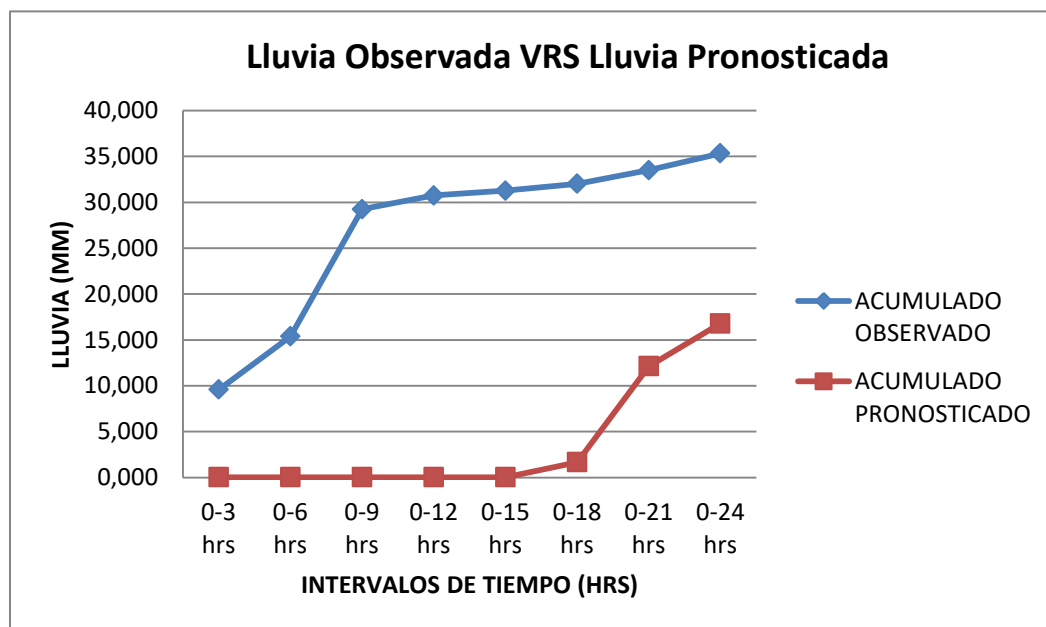
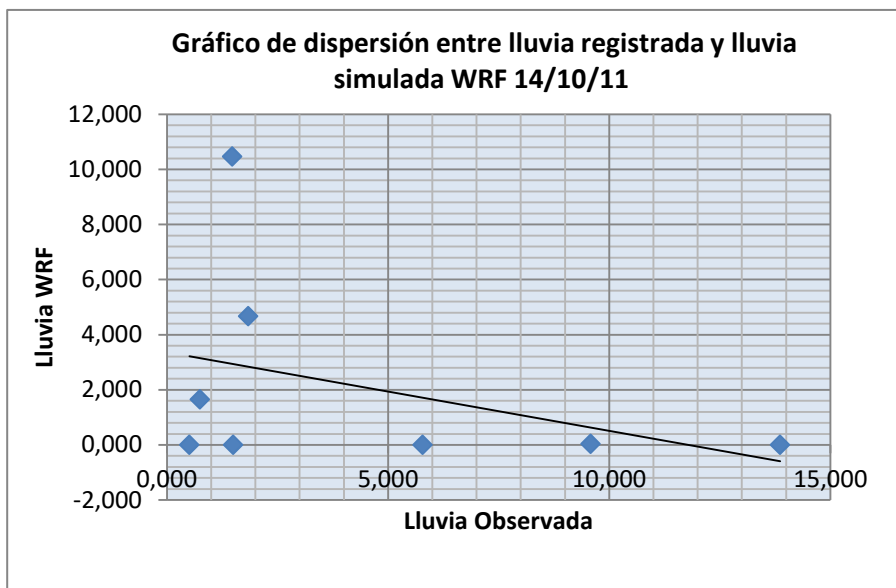


Figura 5. 29: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 14/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.37		
Máximo lluvia interpolada	13.868	Máximo lluvia WRF	10.455
Promedio lluvia interpolada	4.417	Promedio lluvia WRF	2.099
Desviación Estándar lluvia interpolada	4.933	Desviación Estándar lluvia WRF	3.751

Figura 5. 30: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 14/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	6.892	2.524	4.368	0-3 hrs	6.892	2.524
3-6 hrs	1.552	2.366	-0.814	0-6 hrs	8.444	4.890
6-9 hrs	0.000	5.001	-5.001	0-9 hrs	8.444	9.891
9-12 hrs	0.000	13.904	-13.904	0-12 hrs	8.444	23.795
12-15 hrs	0.000	25.777	-25.777	0-15 hrs	8.444	49.571
15-18 hrs	0.748	23.964	-23.216	0-18 hrs	9.191	73.535
18-21 hrs	4.369	27.078	-22.709	0-21 hrs	13.561	100.614
21-24 hrs	2.234	11.706	-9.472	0-24 hrs	15.795	112.320

Tabla 5. 7: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 15/10/11 de la DT 12-E

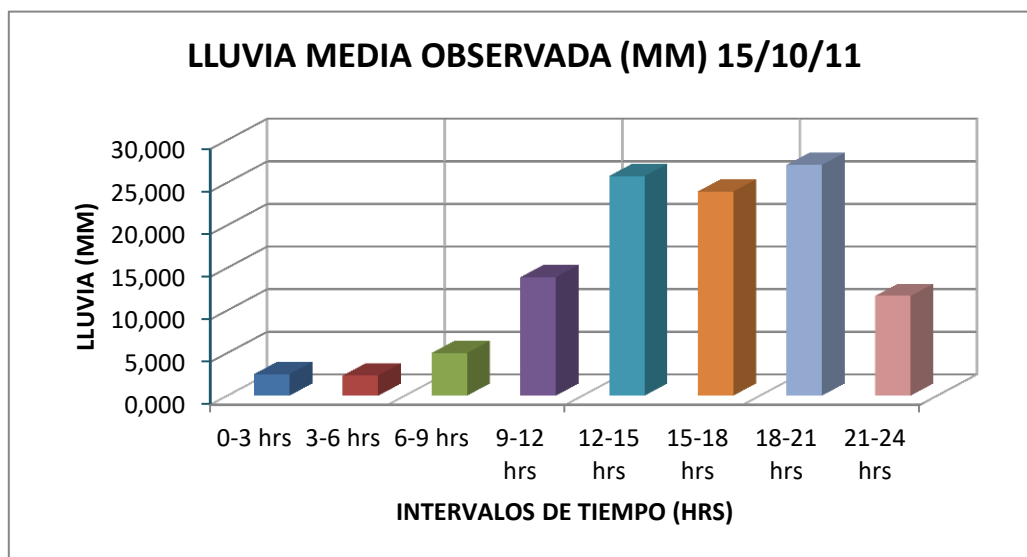


Figura 5. 31: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 15 de Octubre de 2011,
DT 12-E

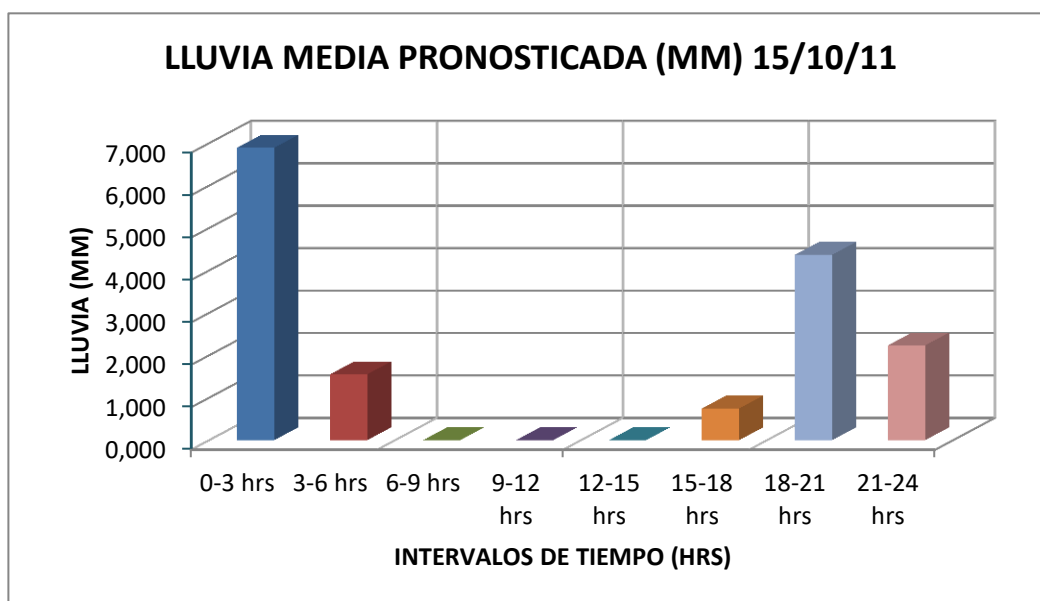


Figura 5. 32: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 15 de Octubre de 2011,
DT 12-E

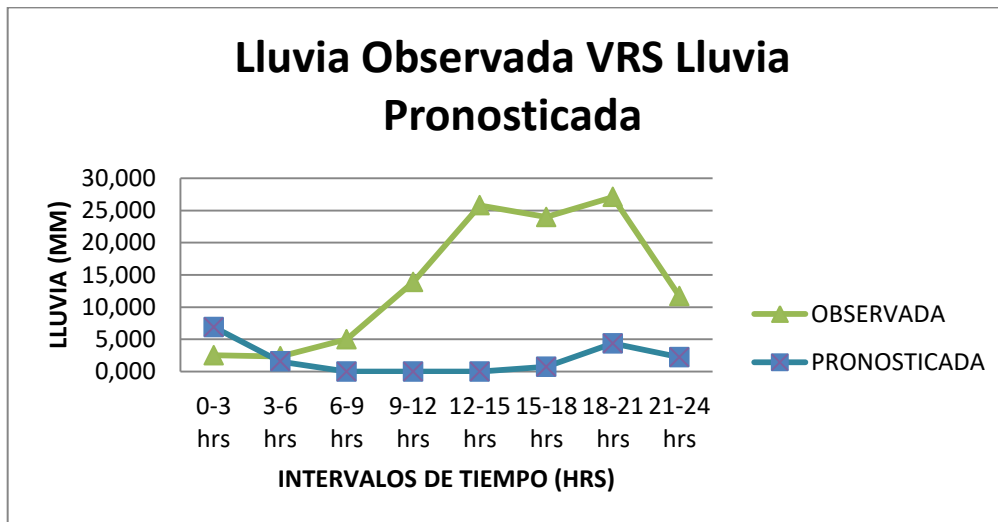


Figura 5. 33: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 15/10/11, DT 12-E

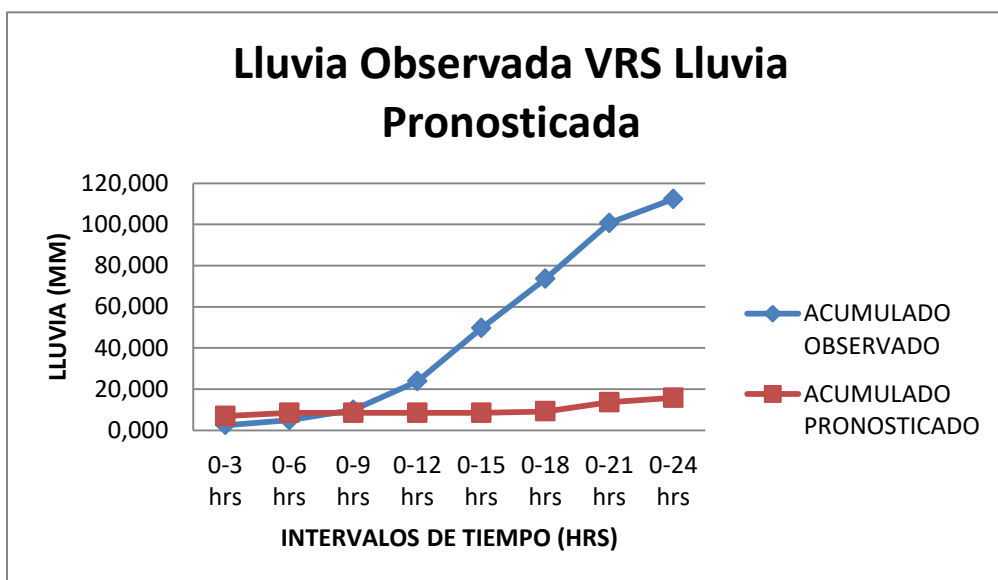
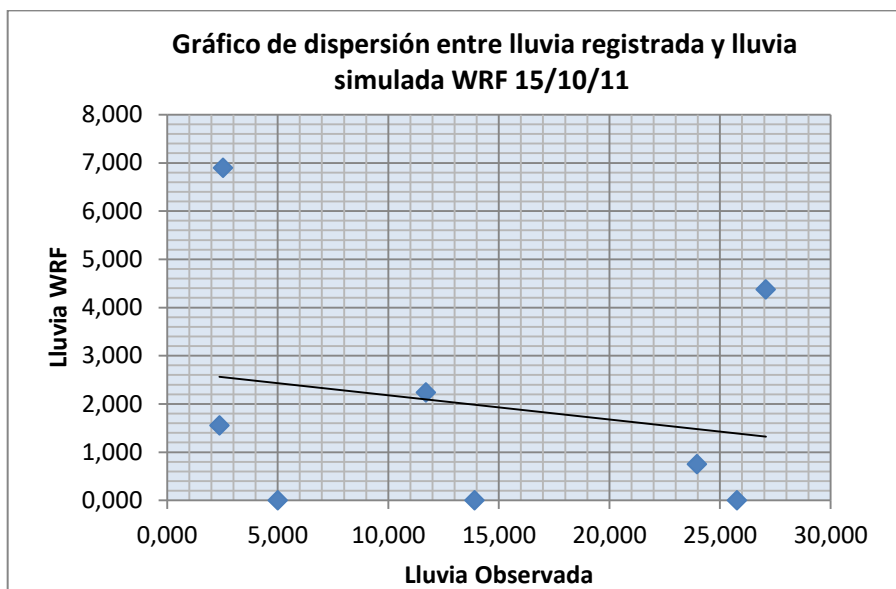


Figura 5. 34: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 15/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.21		
Máximo lluvia interpolada	27.078	Máximo lluvia WRF	6.892
Promedio lluvia interpolada	14.040	Promedio lluvia WRF	1.974
Desviación Estándar lluvia interpolada	10.435	Desviación Estándar lluvia WRF	2.489

Figura 5. 35: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 15/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.173	20.776	-20.603	0-3 hrs	0.173	20.776
3-6 hrs	0.121	16.264	-16.143	0-6 hrs	0.294	37.040
6-9 hrs	0.000	20.215	-20.215	0-9 hrs	0.294	57.254
9-12 hrs	0.000	12.544	-12.544	0-12 hrs	0.294	69.799
12-15 hrs	0.000	13.133	-13.133	0-15 hrs	0.294	82.931
15-18 hrs	0.224	13.394	-13.170	0-18 hrs	0.517	96.325
18-21 hrs	1.477	9.482	-8.005	0-21 hrs	1.995	105.808
21-24 hrs	0.029	7.596	-7.567	0-24 hrs	2.024	113.404

Tabla 5. 8: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 16/10/11 de la DT 12-E

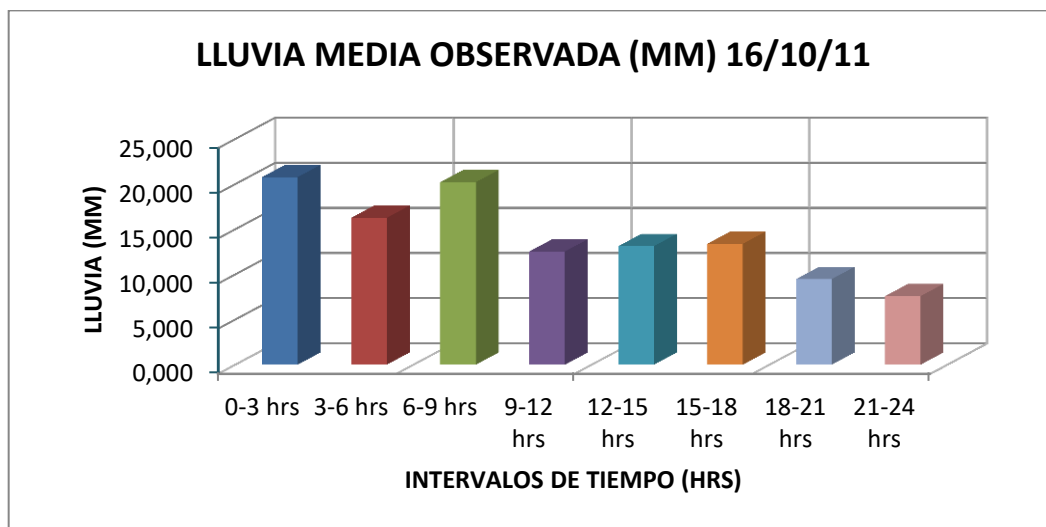


Figura 5. 36: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 16 de Octubre de 2011, DT 12-E

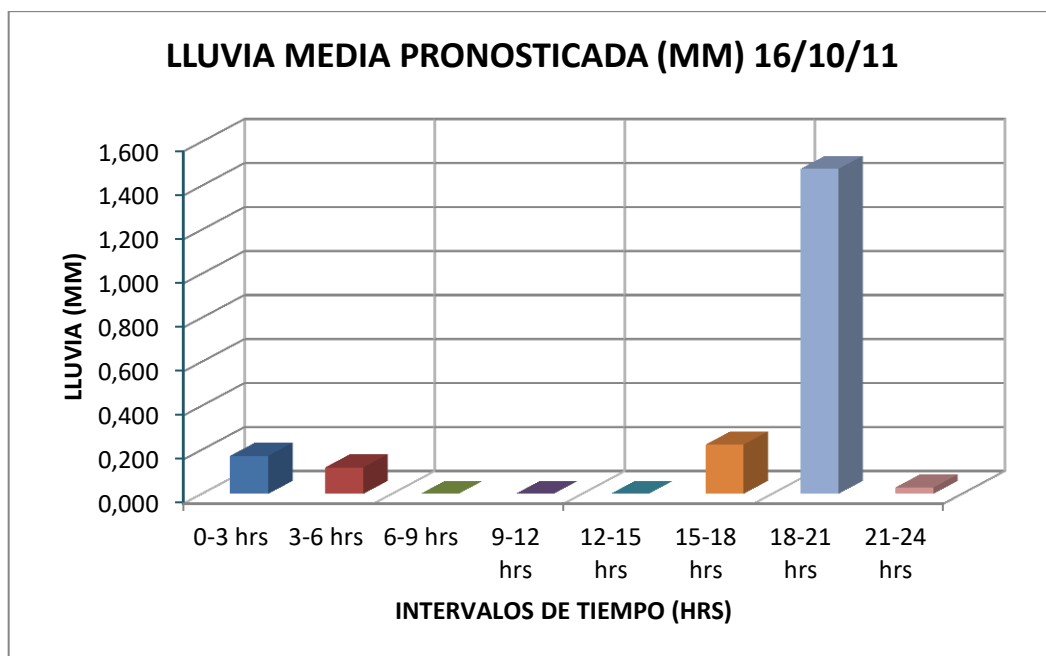


Figura 5. 37: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 16 de Octubre de 2011, DT 12-E

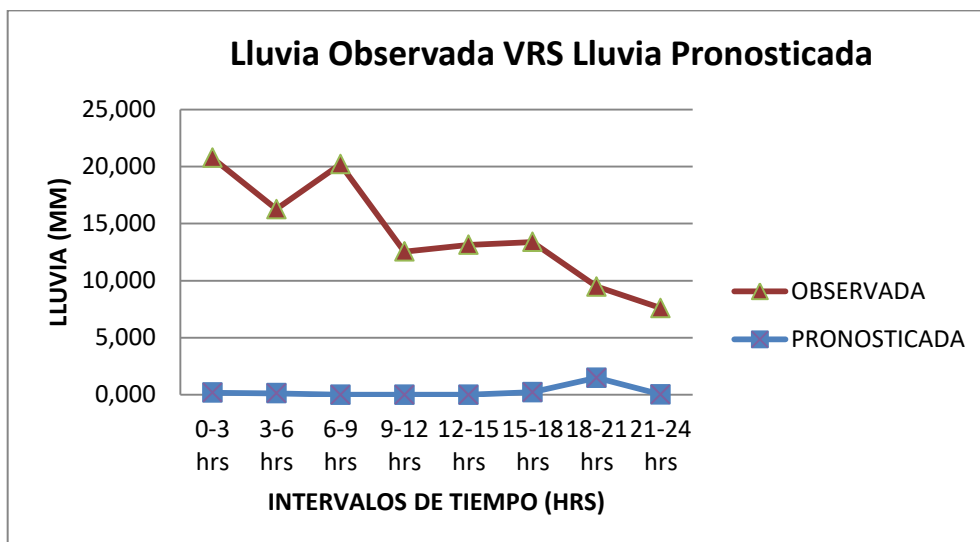


Figura 5. 38: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 16/10/11, DT 12-E

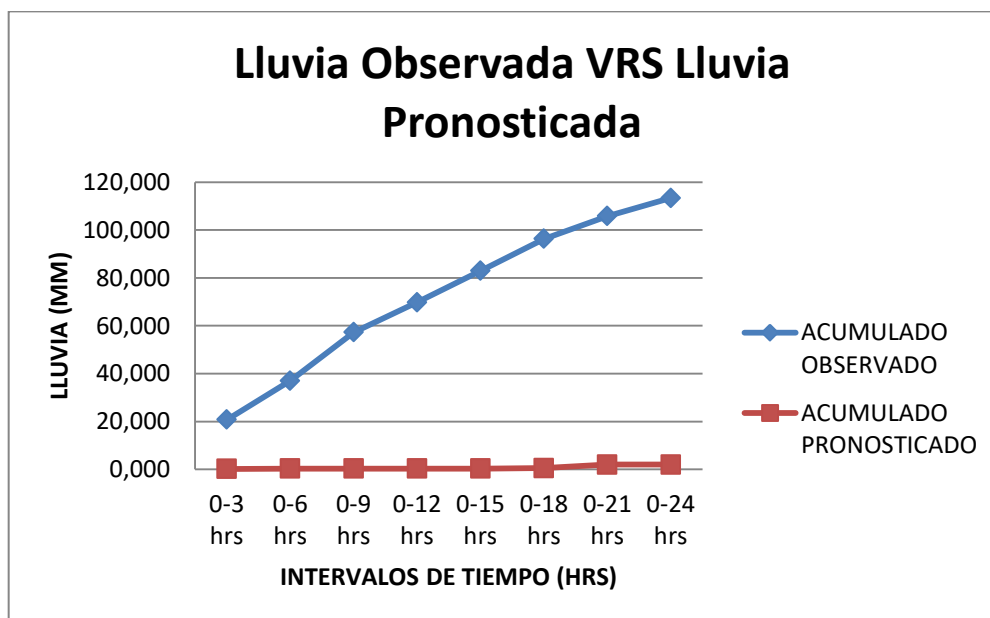
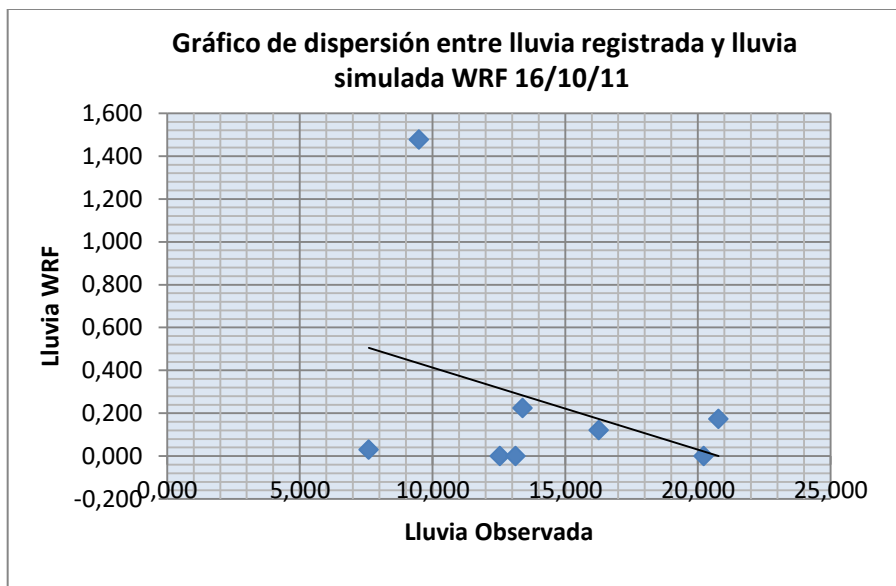


Figura 5. 39: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 16/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.36		
Máximo lluvia interpolada	20.776	Máximo lluvia WRF	1.477
Promedio lluvia interpolada	14.176	Promedio lluvia WRF	0.253
Desviación Estándar lluvia interpolada	4.691	Desviación Estándar lluvia WRF	0.502

Figura 5. 40: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 16/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.002	8.666	-8.664	0-3 hrs	0.002	8.666
3-6 hrs	0.000	8.524	-8.524	0-6 hrs	0.002	17.190
6-9 hrs	0.004	7.326	-7.322	0-9 hrs	0.006	24.516
9-12 hrs	0.050	6.735	-6.685	0-12 hrs	0.056	31.251
12-15 hrs	1.682	7.138	-5.456	0-15 hrs	1.738	38.389
15-18 hrs	8.903	4.445	4.458	0-18 hrs	10.640	42.834
18-21 hrs	4.347	1.120	3.226	0-21 hrs	14.987	43.955
21-24 hrs	2.398	0.957	1.441	0-24 hrs	17.385	44.912

Tabla 5. 9: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 17/10/11 de la DT 12-E

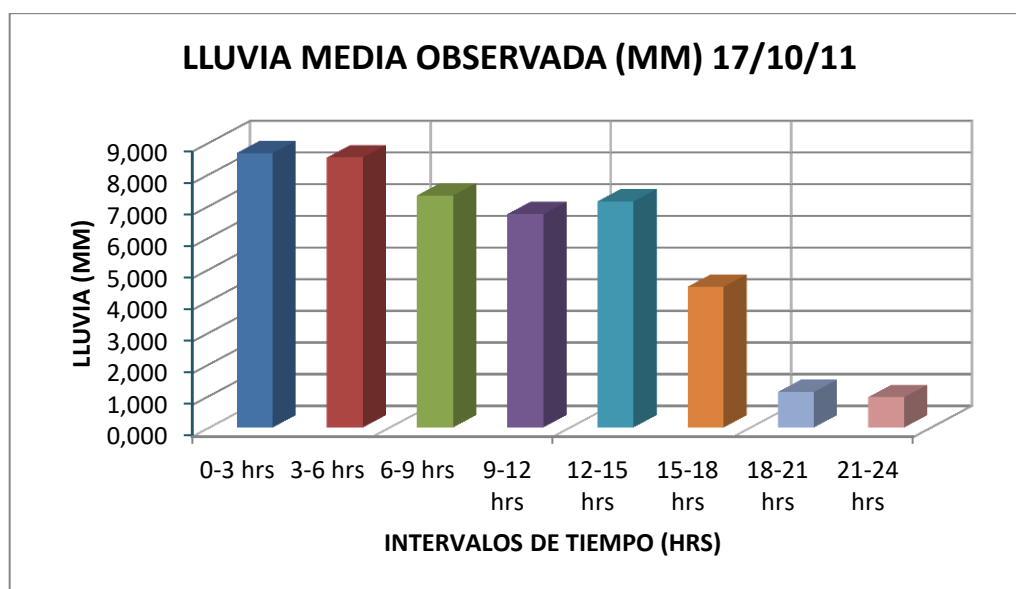


Figura 5. 41: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 17 de Octubre de 2011,
DT 12-E

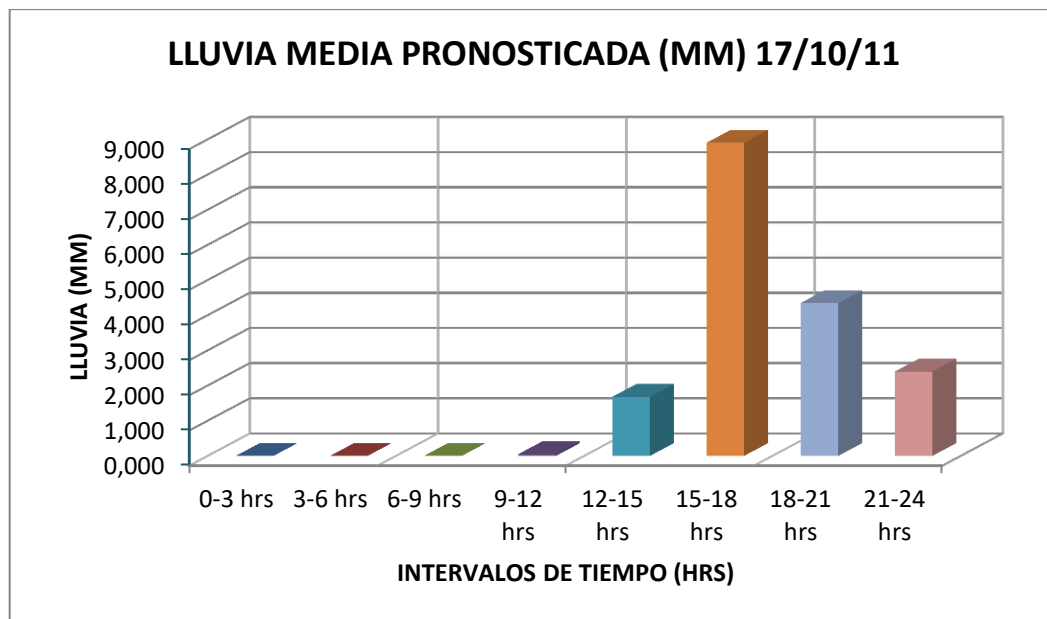


Figura 5. 42: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 17 de Octubre de 2011,
DT 12-E

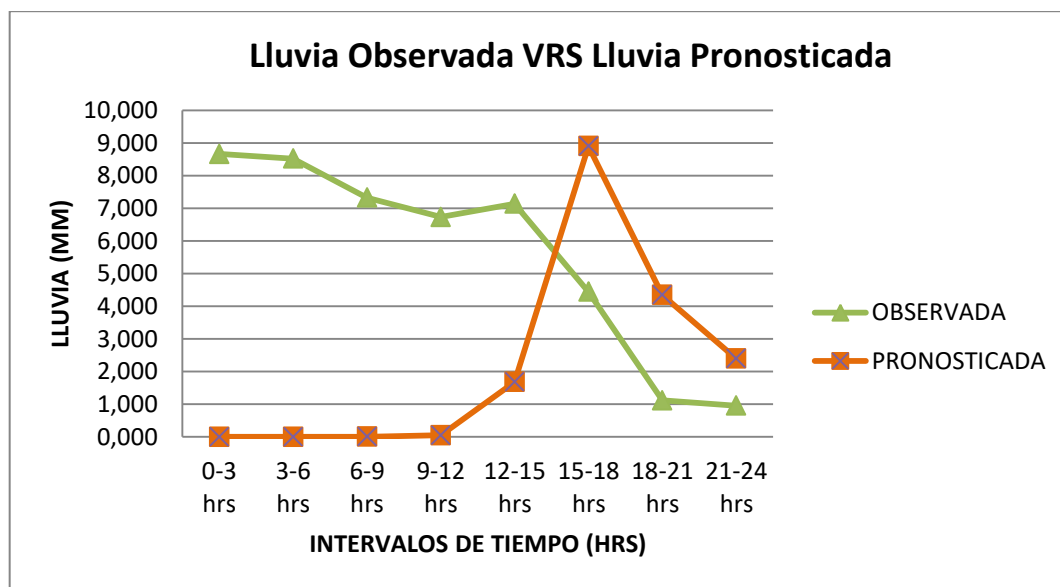


Figura 5. 43: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 17/10/11, DT 12-E

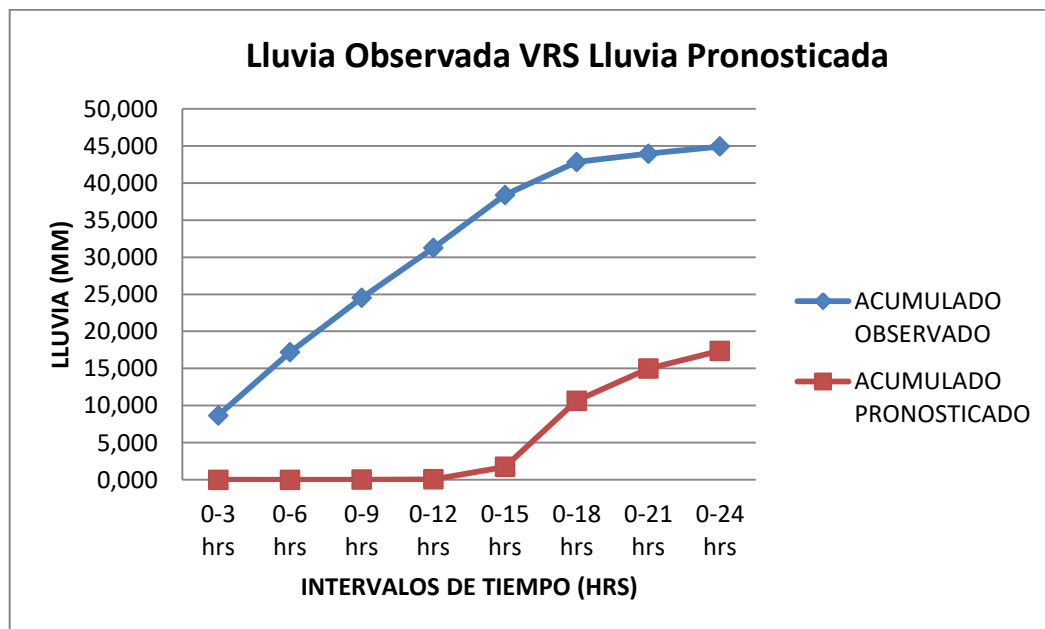
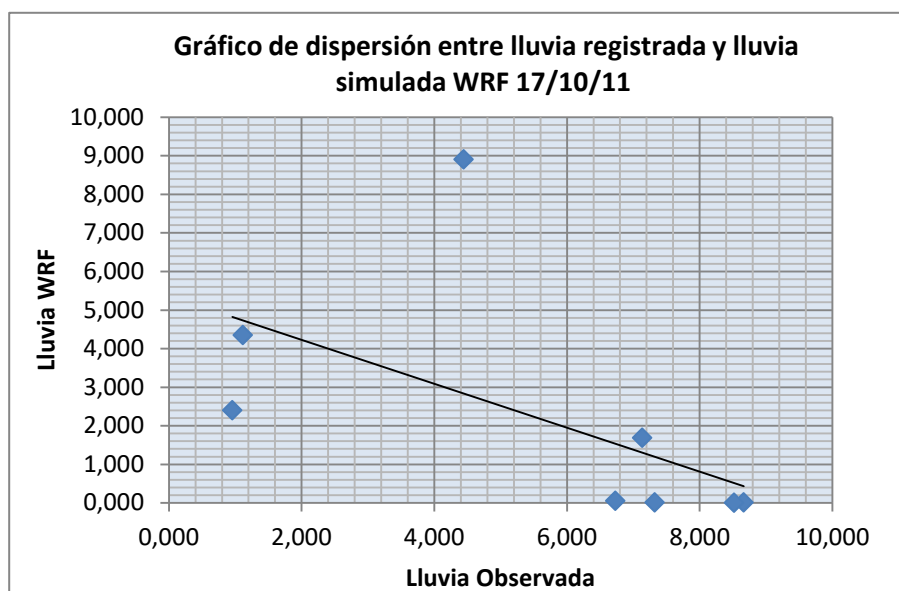


Figura 5. 44: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 17/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.56		
Máximo lluvia interpolada	8.666	Máximo lluvia WRF	8.903
Promedio lluvia interpolada	5.614	Promedio lluvia WRF	2.173
Desviación Estándar lluvia interpolada	3.106	Desviación Estándar lluvia WRF	3.139

Figura 5. 45: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 17/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	4.690	1.165	3.524	0-3 hrs	4.690	1.165
3-6 hrs	2.074	1.086	0.988	0-6 hrs	6.763	2.251
6-9 hrs	0.523	0.094	0.429	0-9 hrs	7.286	2.346
9-12 hrs	0.003	0.642	-0.639	0-12 hrs	7.289	2.988
12-15 hrs	0.000	2.252	-2.252	0-15 hrs	7.289	5.240
15-18 hrs	0.003	1.397	-1.394	0-18 hrs	7.292	6.637
18-21 hrs	0.380	2.270	-1.890	0-21 hrs	7.672	8.907
21-24 hrs	0.024	4.671	-4.646	0-24 hrs	7.696	13.578

Tabla 5. 10: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 18/10/11 de la DT 12-E

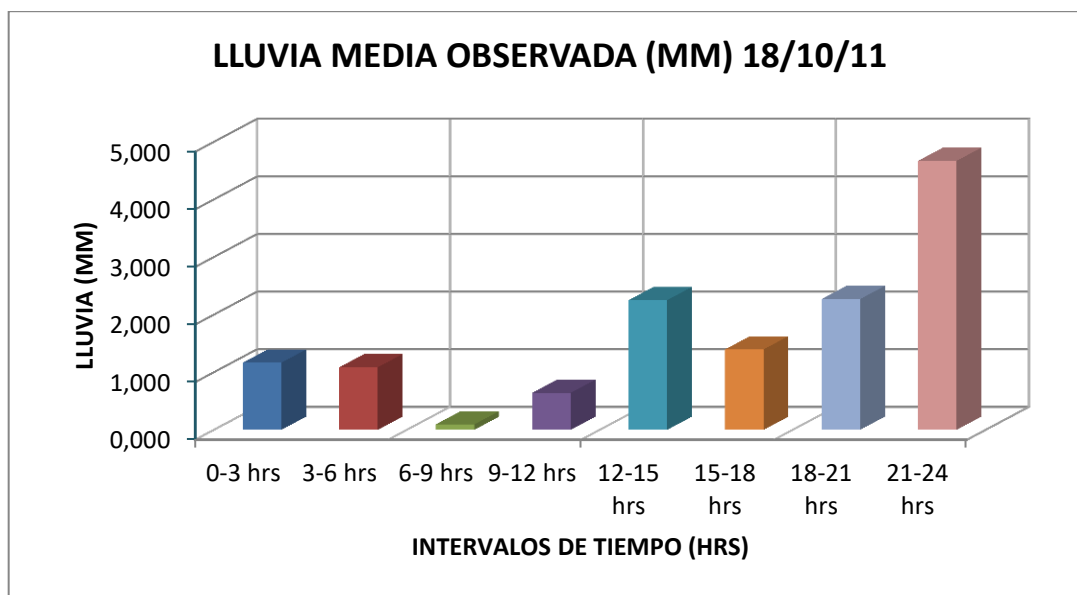


Figura 5. 46: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 18 de Octubre de 2011, DT 12-E

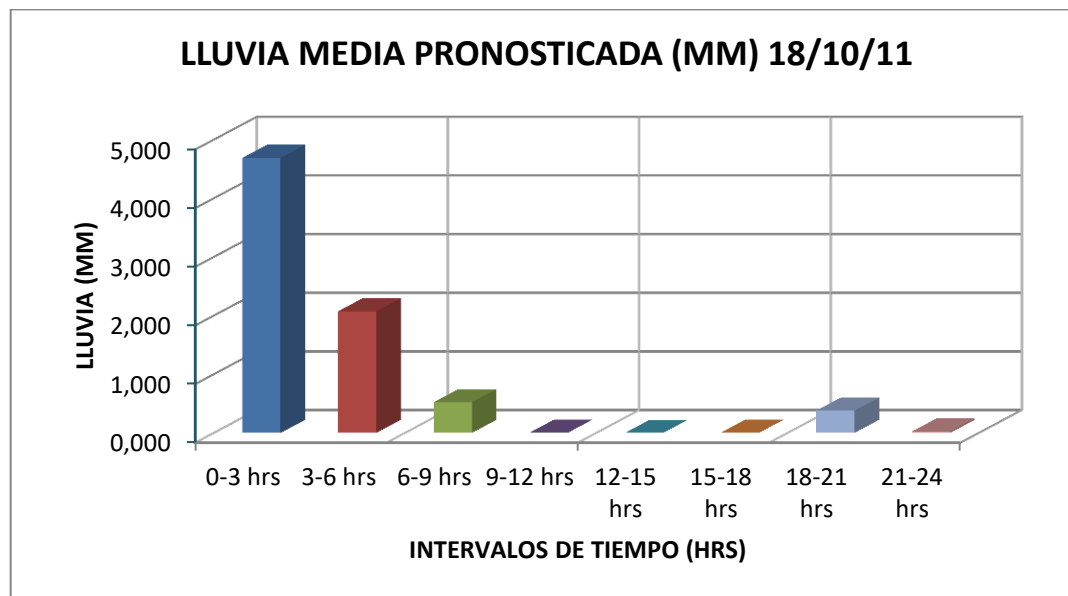


Figura 5. 47: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 18 de Octubre de 2011, DT 12-E

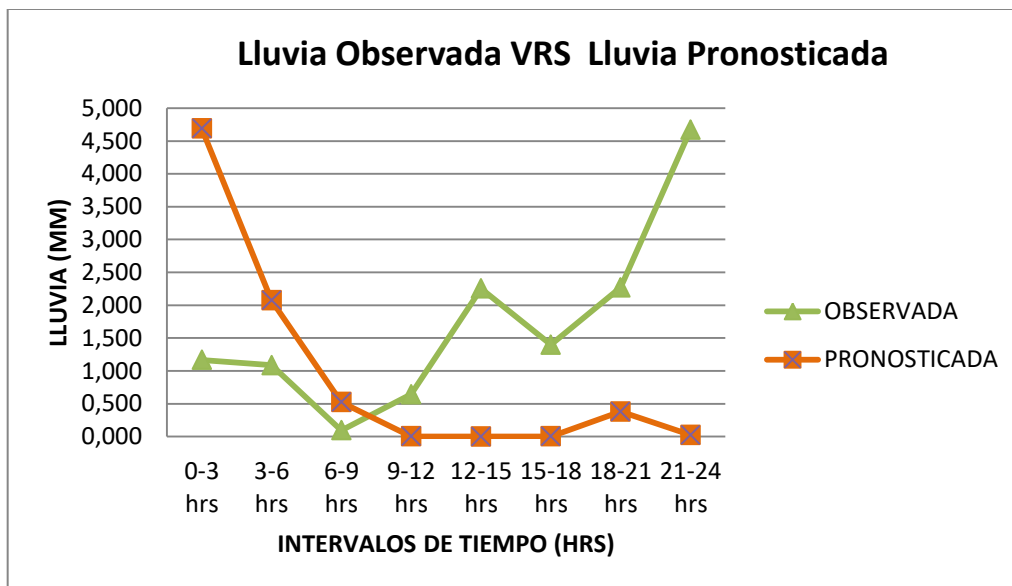


Figura 5. 48: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 18/10/11, DT 12-E

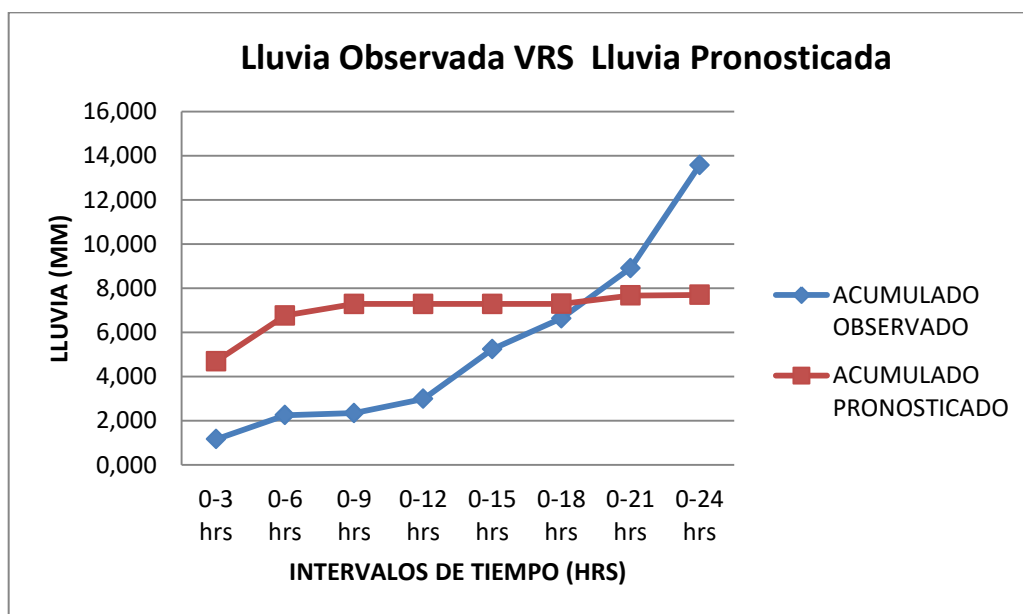
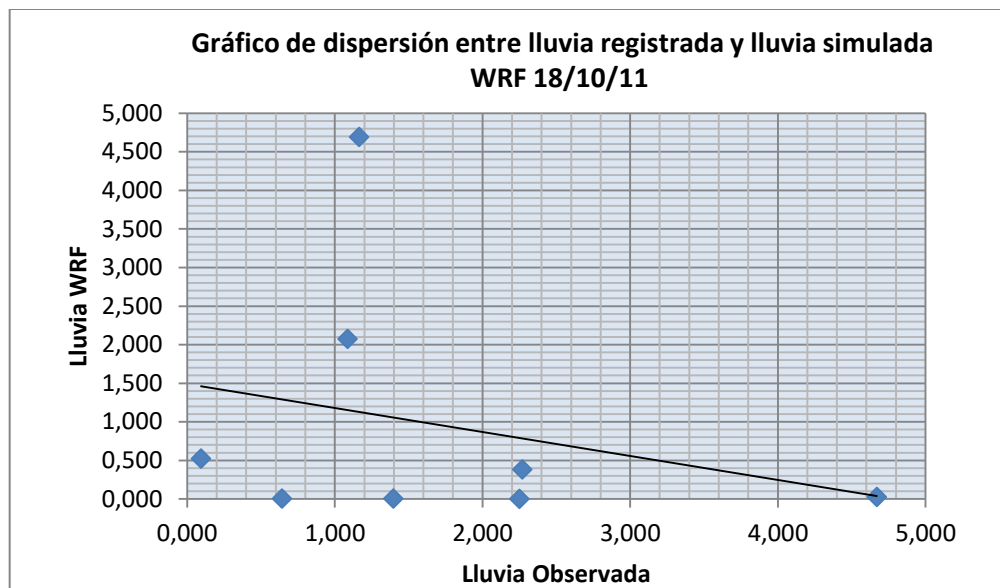


Figura 5. 49: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 18/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.26		
Máximo lluvia interpolada	4.671	Máximo lluvia WRF	4.690
Promedio lluvia interpolada	1.697	Promedio lluvia WRF	0.962
Desviación Estándar lluvia interpolada	1.409	Desviación Estándar lluvia WRF	1.661

Figura 5. 50: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 18/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.000	13.544	-13.544	0-3 hrs	0.000	13.544
3-6 hrs	0.000	5.933	-5.933	0-6 hrs	0.000	19.477
6-9 hrs	0.000	3.410	-3.410	0-9 hrs	0.000	22.887
9-12 hrs	0.000	2.126	-2.126	0-12 hrs	0.000	25.013
12-15 hrs	0.000	2.132	-2.132	0-15 hrs	0.000	27.145
15-18 hrs	0.000	2.456	-2.456	0-18 hrs	0.000	29.601
18-21 hrs	0.000	3.117	-3.117	0-21 hrs	0.000	32.719
21-24 hrs	0.065	3.119	-3.054	0-24 hrs	0.065	35.837

Tabla 5. 11: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 19/10/11 de la DT 12-E

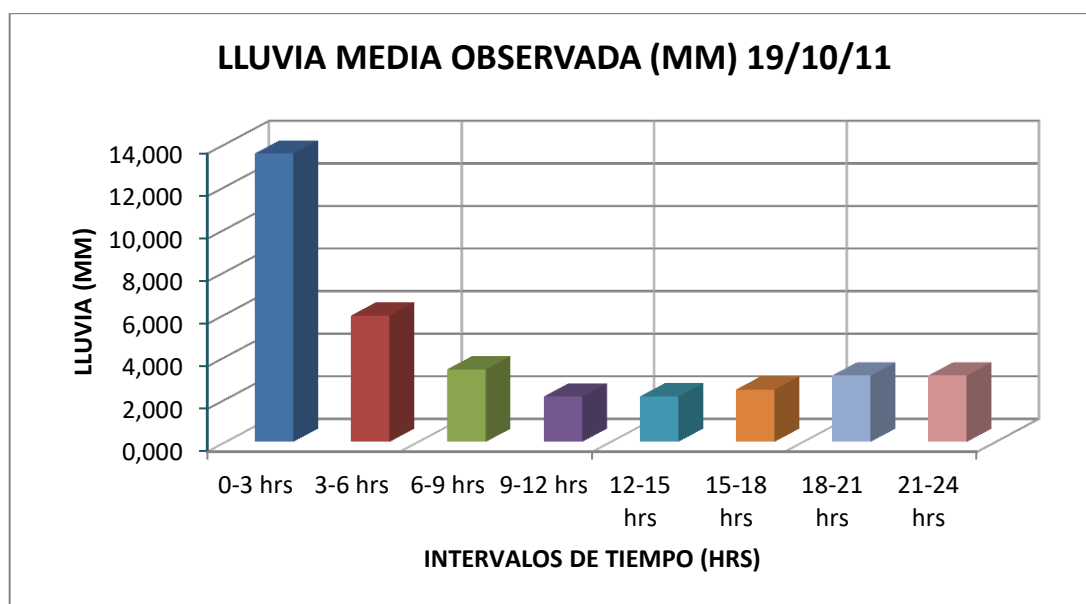


Figura 5. 51: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 19 de Octubre de 2011, DT 12-E

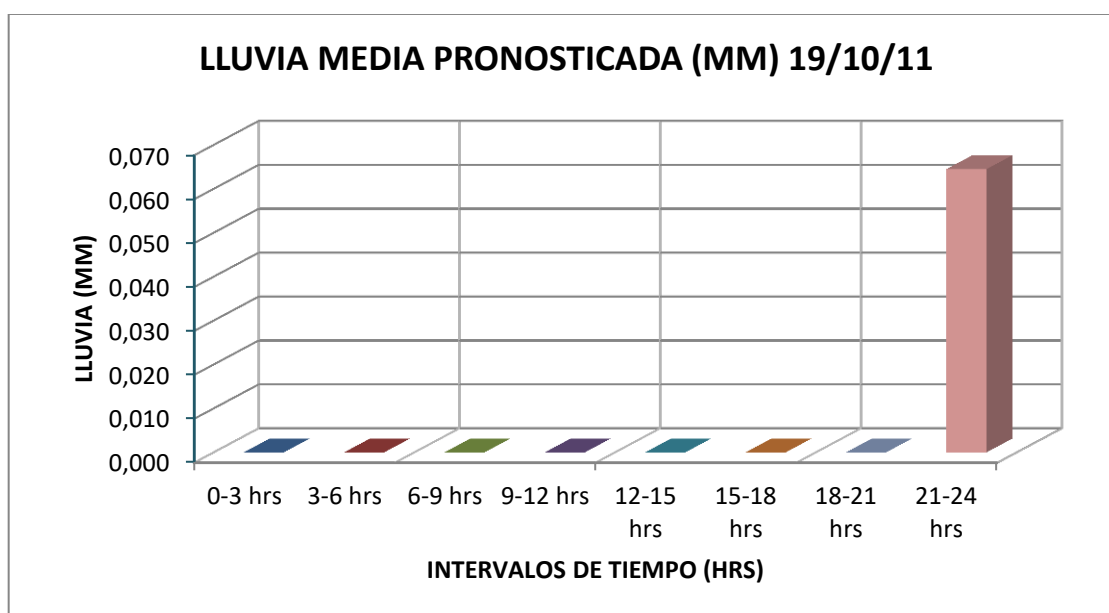


Figura 5. 52: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 19 de Octubre de 2011, DT 12-E

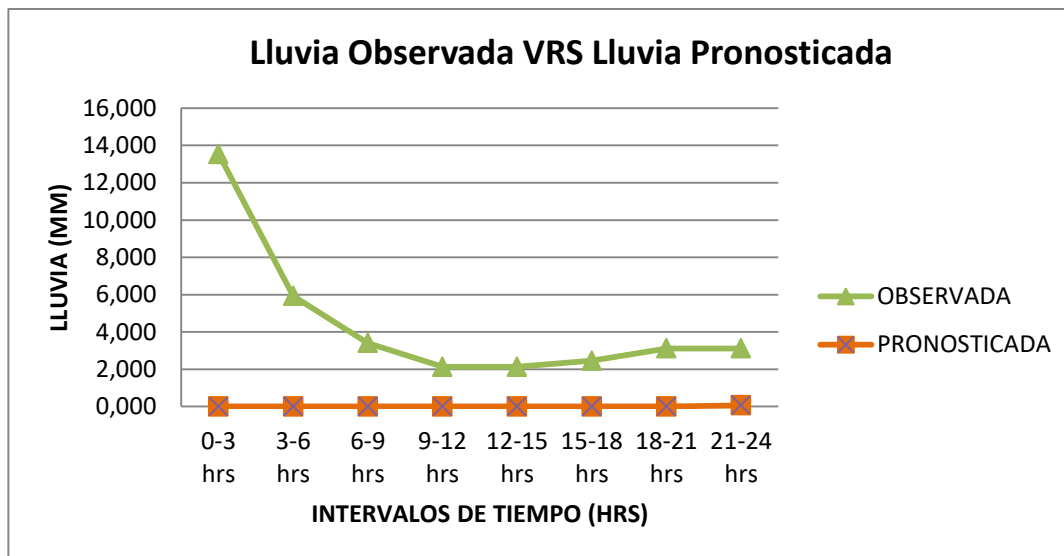


Figura 5. 53: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 19/10/11, DT 12-E

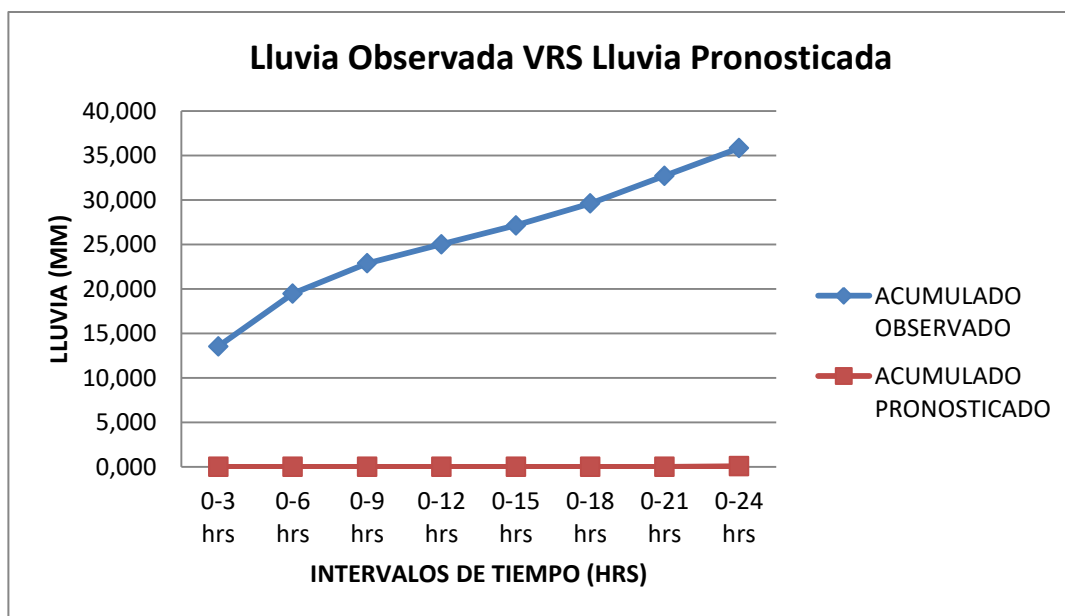
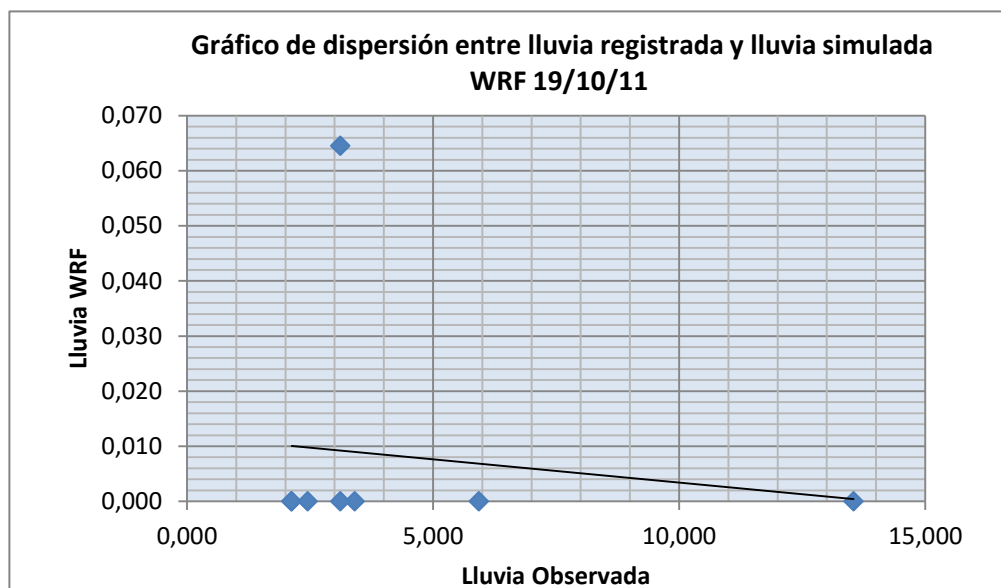


Figura 5. 54: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 19/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.14		
Máximo lluvia interpolada	13.544	Máximo lluvia WRF	0.065
Promedio lluvia interpolada	4.480	Promedio lluvia WRF	0.008
Desviación Estándar lluvia interpolada	3.860	Desviación Estándar lluvia WRF	0.023

Figura 5. 55: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 19/10/11,
DT 12-E

PERIODO	PRONOSTICADO WRF (MM)	OBSERVADO (MM)	DIFERENCIA (WRF-OBSERVADO)	PERIODO	ACUMULADO LLUVIA (MM)	
					PRONOSTICADO	OBSERVADO
0-3 hrs	0.000	3.117	-3.117	0-3 hrs	0.000	3.117
3-6 hrs	0.000	3.117	-3.117	0-6 hrs	0.000	6.235
6-9 hrs	0.000	3.117	-3.117	0-9 hrs	0.000	9.352
9-12 hrs	0.000	3.117	-3.117	0-12 hrs	0.000	12.470
12-15 hrs	0.000	3.414	-3.414	0-15 hrs	0.000	15.884
15-18 hrs	0.000	1.781	-1.781	0-18 hrs	0.000	17.665
18-21 hrs	0.000	0.000	0.000	0-21 hrs	0.000	17.665
21-24 hrs	0.179	0.000	0.179	0-24 hrs	0.179	17.665

Tabla 5. 12: Lluvia media pronosticada y observada en intervalos de 3 horas, la diferencia entre los valores pronosticados y observados en los intervalos, así como la lluvia acumulada para el periodo de 24 horas correspondiente al 20/10/11 de la DT 12-E

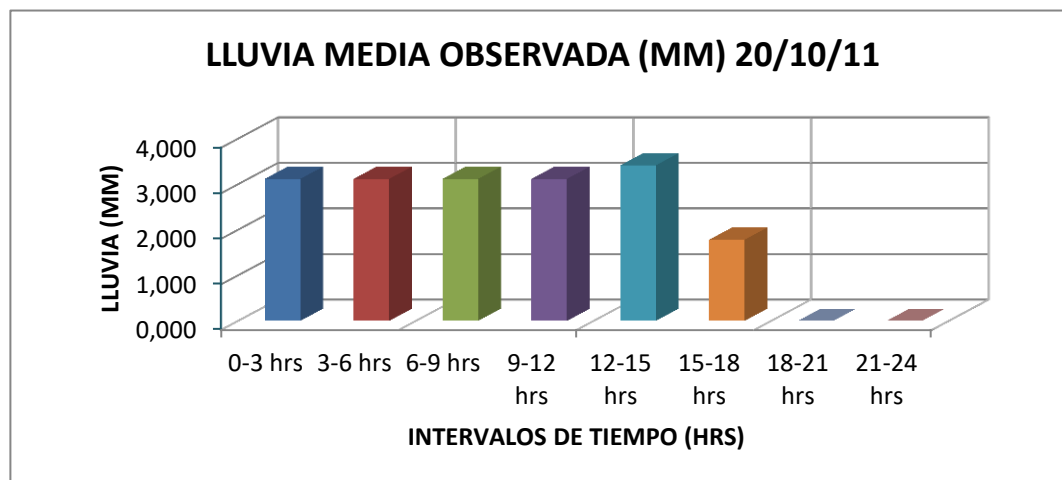


Figura 5. 56: Lluvia media observada para intervalos de 3 horas, del 20 de Octubre de 2011,
DT 12-E

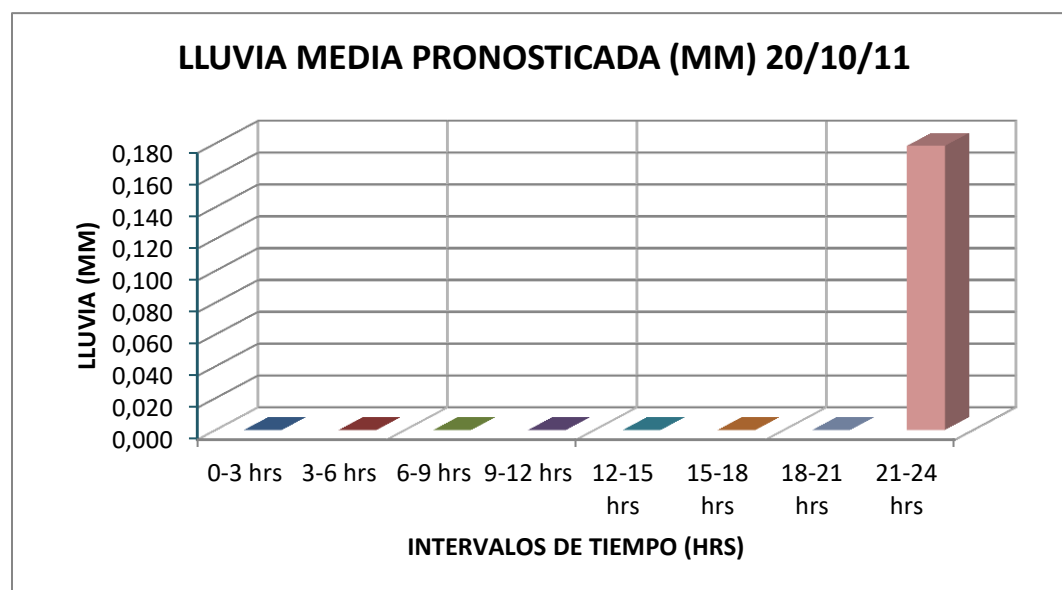


Figura 5. 57: Lluvia media pronosticada para intervalos de 3 horas, del 20 de Octubre de 2011,
DT 12-E

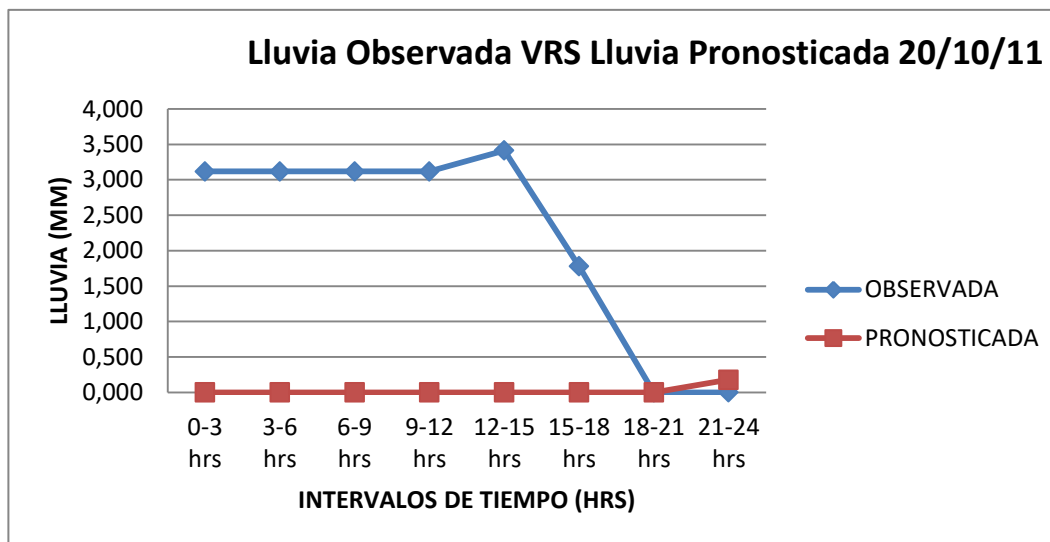


Figura 5. 58: Comparación de lluvia media observada y pronosticada para intervalos de 3 horas del 20/10/11, DT 12-E

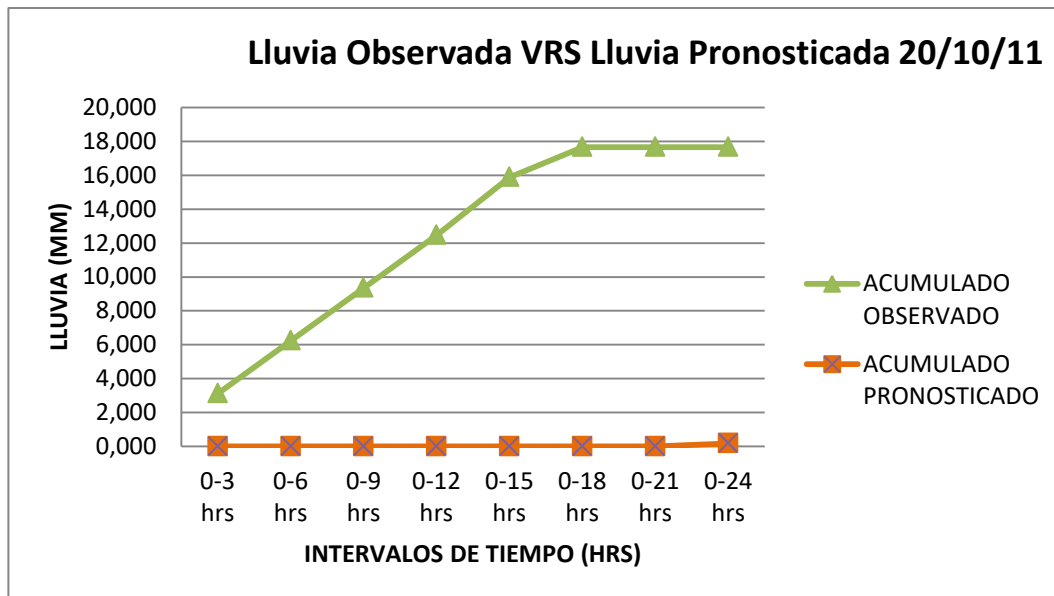
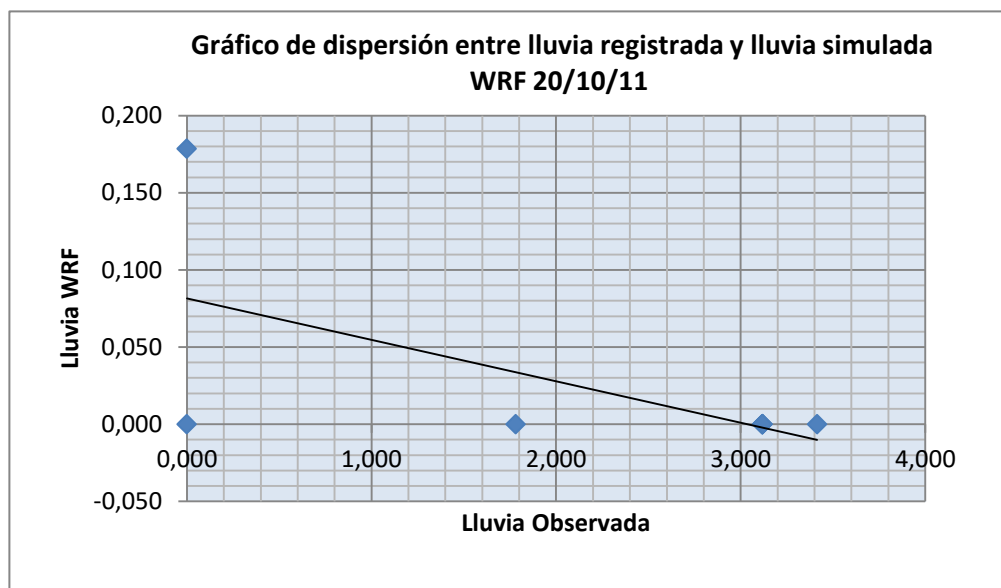


Figura 5. 59: Comparación de lluvia media acumulada observada y pronosticada para el 20/10/11, DT 12-E



Correlación, Coeficiente Pearson (r)	-0.62		
Máximo lluvia interpolada	3.414	Máximo lluvia WRF	0.179
Promedio lluvia interpolada	2.208	Promedio lluvia WRF	0.022
Desviación Estándar lluvia interpolada	1.449	Desviación Estándar lluvia WRF	0.063

Figura 5. 60: Resultados análisis estadístico entre precipitación observada y estimada 20/10/11,
DT 12-E

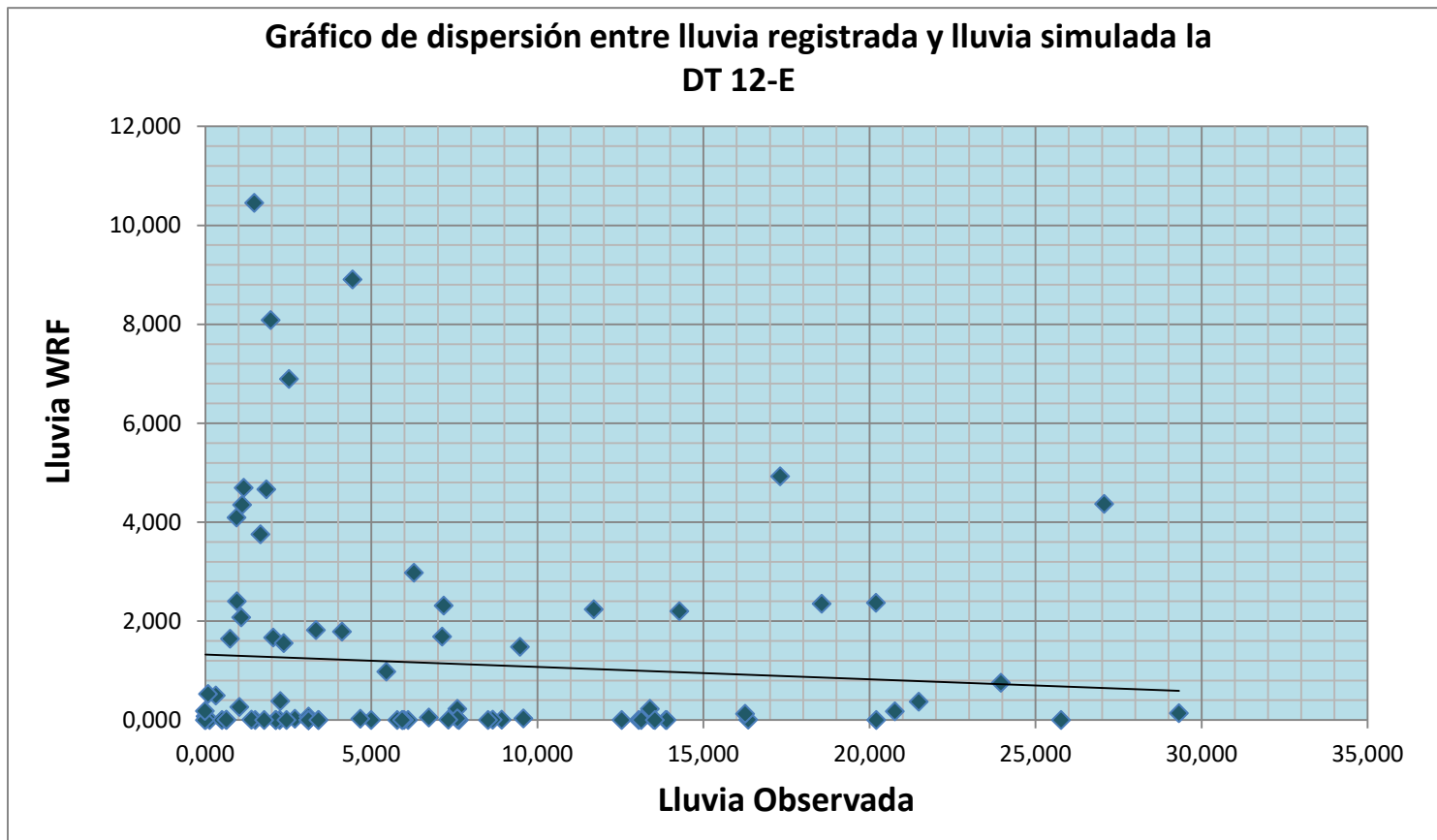


Figura 5. 61: Gráfico de dispersión correspondiente a todos los datos del evento de la DT 12-E

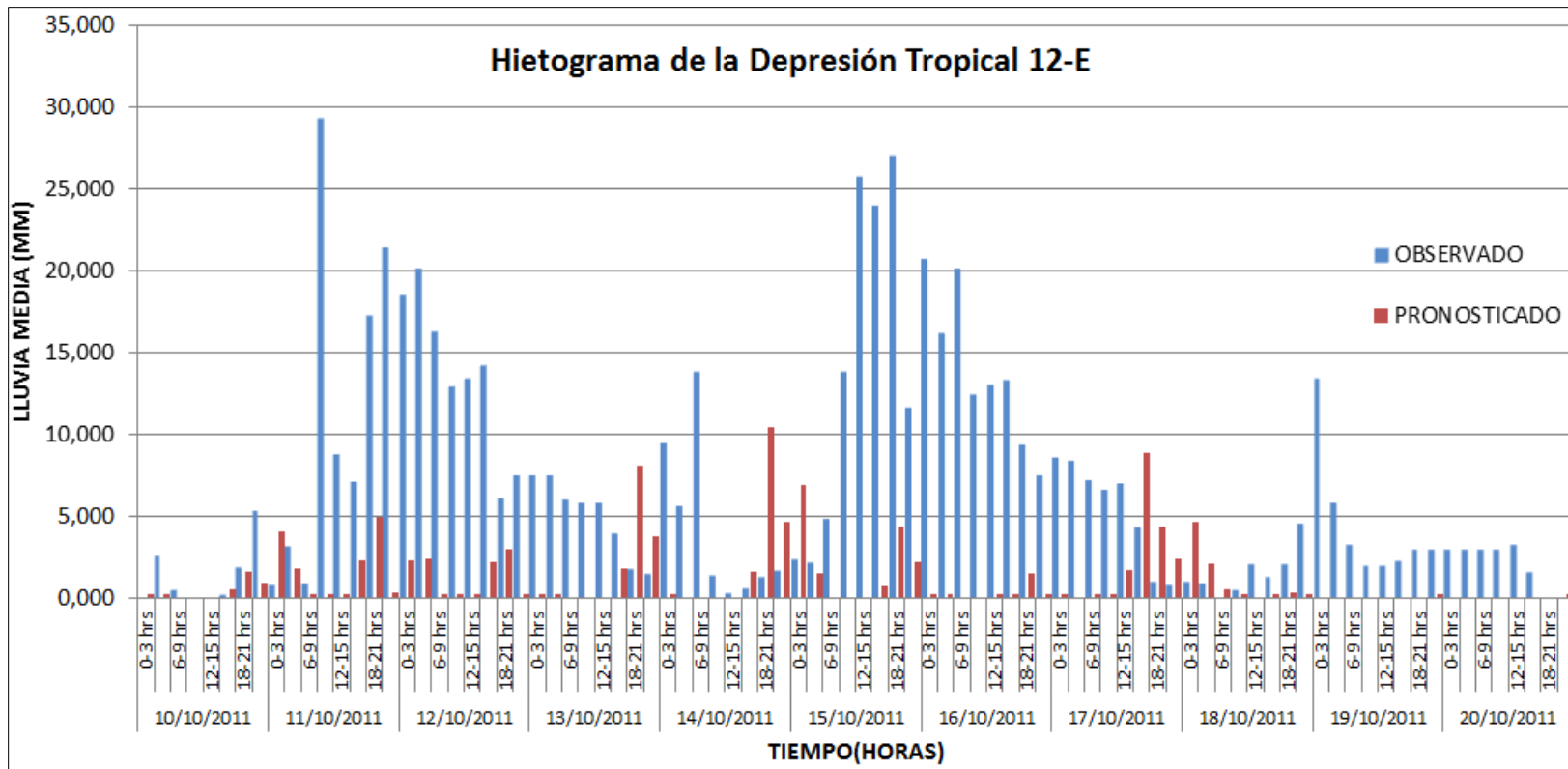


Figura 5. 62: Hietograma de la DT 12-E, por cada periodo, para todo el evento

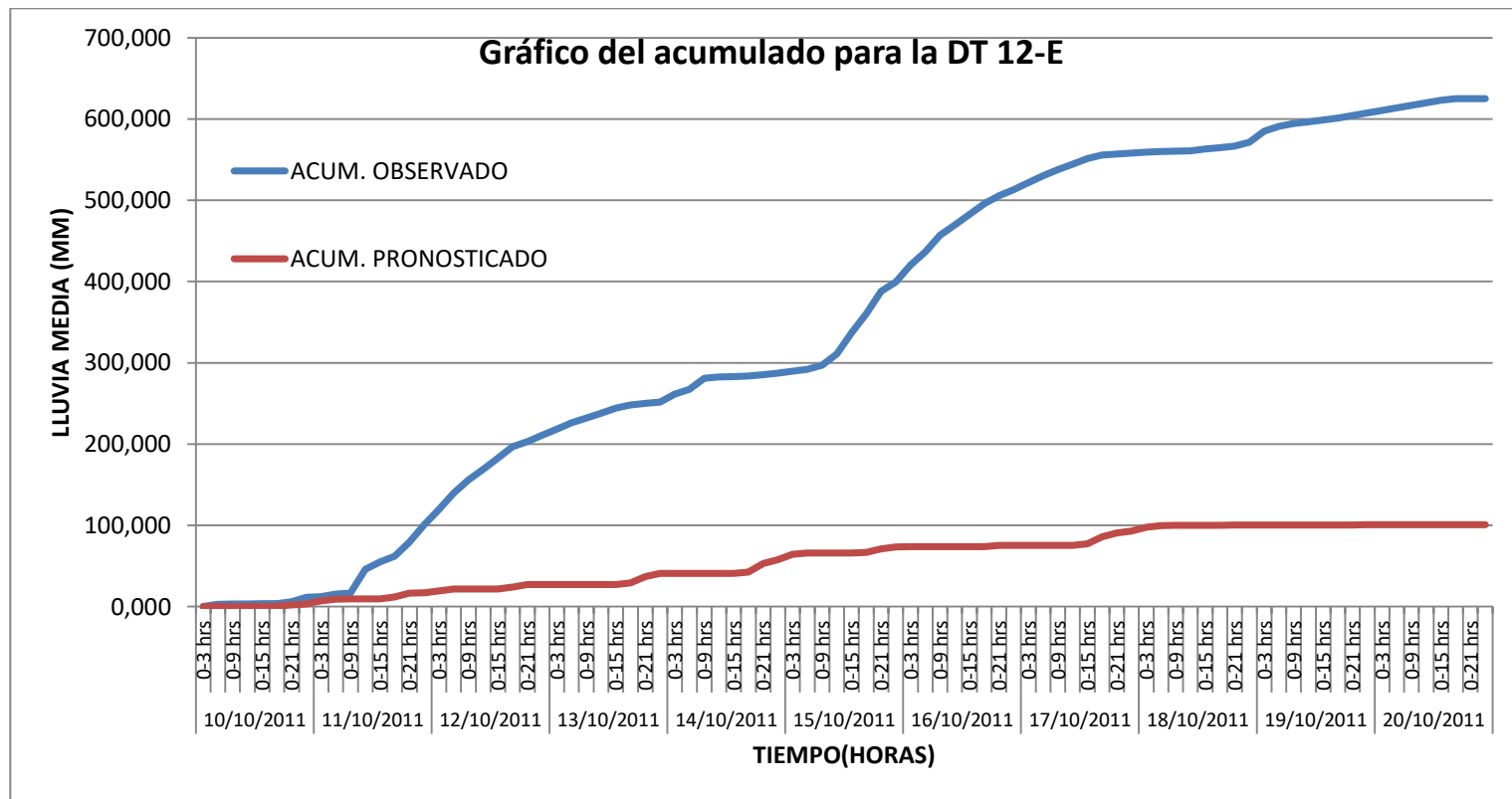


Figura 5. 63: Gráfico del acumulado por cada día de la DT 12-E, para todo el evento

Día	Correlación	Lluvia Interpolada			Lluvia WRF			Diferencia Máximos (WRF- Interpolada)	Diferencia Máximos (ABS)
		Max	Prom	Desv	Max	Prom	Desv		
17/10/2015	-0.21	17.843	6.034	5.318	13.007	4.983	4.024	-4.836	4.836
10/10/2011	0.53	5.461	1.418	1.918	1.663	0.404	0.617	-3.798	3.798
11/10/2011	-0.23	29.321	11.196	10.441	4.927	1.74	1.914	-24.394	24.394
12/10/2011	0.1	20.202	13.735	4.869	2.974	1.264	1.312	-17.228	17.228
13/10/2011	-0.85	7.642	5.133	2.322	8.083	1.704	2.913	0.441	0.441
14/10/2011	-0.37	13.868	4.417	4.933	10.455	2.099	3.751	-3.413	3.413
15/10/2011	-0.21	27.078	14.04	10.435	6.892	1.974	2.489	-20.186	20.186
16/10/2011	-0.36	20.776	14.176	4.691	1.477	0.253	0.502	-19.299	19.299
17/10/2011	-0.56	8.666	5.614	3.106	8.903	2.173	3.139	0.237	0.237
18/10/2011	-0.26	4.671	1.697	1.409	4.690	0.962	1.661	0.019	0.019
19/10/2011	-0.14	13.544	4.48	3.86	0.065	0.008	0.023	-13.479	13.479
20/10/2011	-0.62	3.414	2.208	1.449	0.179	0.022	0.063	-3.235	3.235

Tabla 5. 13: Resultados obtenidos para los 12 casos de evaluación

Día	Sesgo (BIAS)	Error Absoluto Medio (MAE)	Error Cuadrático Medio (MSE)	Medida de Error Total (RMSE)	Evaluación de los casos		%
17/10/2015	-0.131	0.131	0.138	0.372	Total de casos evaluados	12	100
10/10/2011	-0.127	0.127	0.129	0.359	Total sobreestimados	3	25
11/10/2011	-1.182	1.182	11.177	3.343	Total subestimados	9	75
12/10/2011	-1.559	1.559	19.441	4.409	Correlación máxima	0.53	
13/10/2011	-0.429	0.429	1.470	1.212	Correlación mínima	-0.85	
14/10/2011	-0.290	0.290	0.672	0.820	Correlación promedio	-0.265	
15/10/2011	-1.508	1.508	18.199	4.266	Diferencia máxima	0.441	
16/10/2011	-1.740	1.740	24.231	4.923	Diferencia mínima	-24.394	
17/10/2011	-0.430	0.430	1.480	1.217	Total de casos con diferencias de máximos menores a 20 mm	10	
18/10/2011	-0.092	0.092	0.068	0.260			
19/10/2011	-0.559	0.559	2.500	1.581			
20/10/2011	-0.273	0.273	0.597	0.773			
	MAE	0.693					

Tabla 5. 14: Resultados obtenidos para los 12 casos de evaluación

5.4 COMPARACIÓN DE DISTRIBUCION ESPACIAL DE LA LLUVIA PRONOSTICADA Y LLUVIA REGISTRADA

Los mapas de distribución espacial de la lluvia observada y pronosticada, muestran visualmente como está distribuida la lluvia sobre la cuenca en estudio por medio de los colores del ráster, ya que cada color indica un rango de valores, en este caso, se establecieron 6 clases. Los mapas de lluvia se elaboraron, usando herramientas de ArcGIS, con el acumulado de lluvia para 24 horas. En las figuras siguientes, se muestra la comparación de los mapas generados en ArcGIS para la precipitación observada y pronosticada:

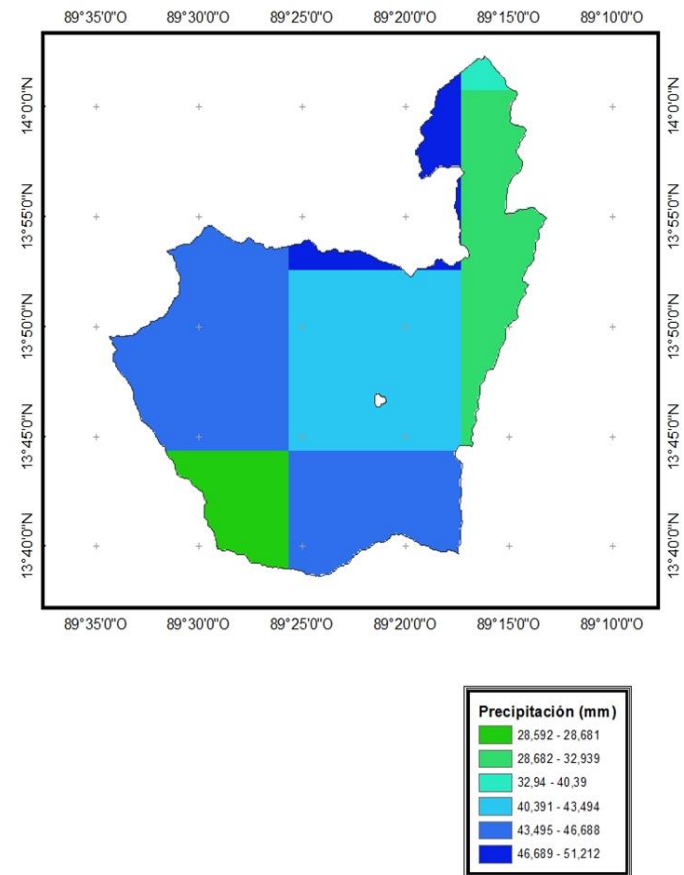
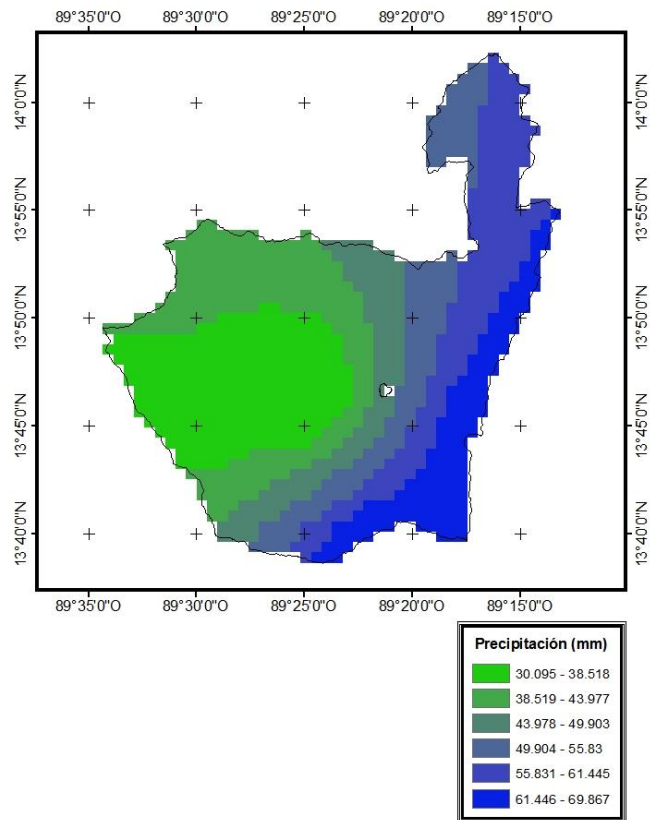


Figura 5. 64: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 17/10/15

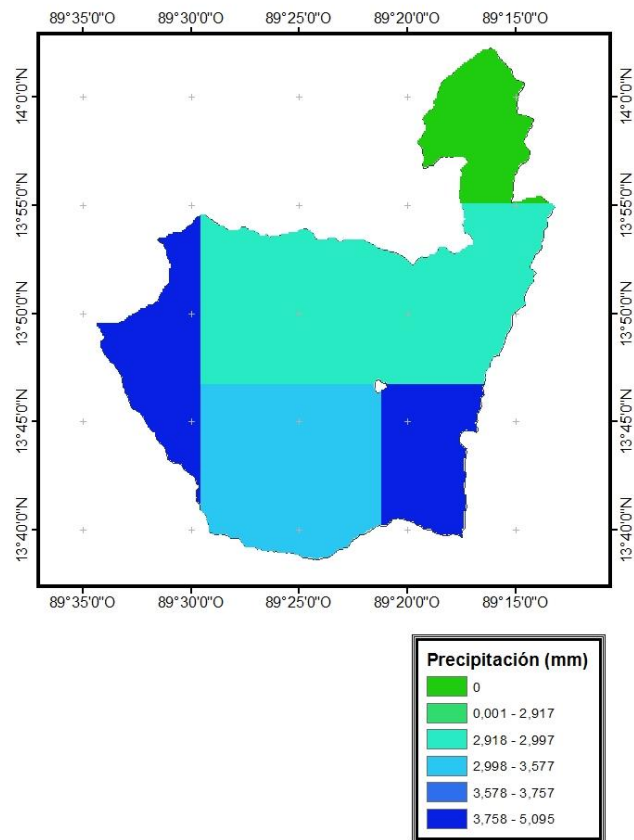
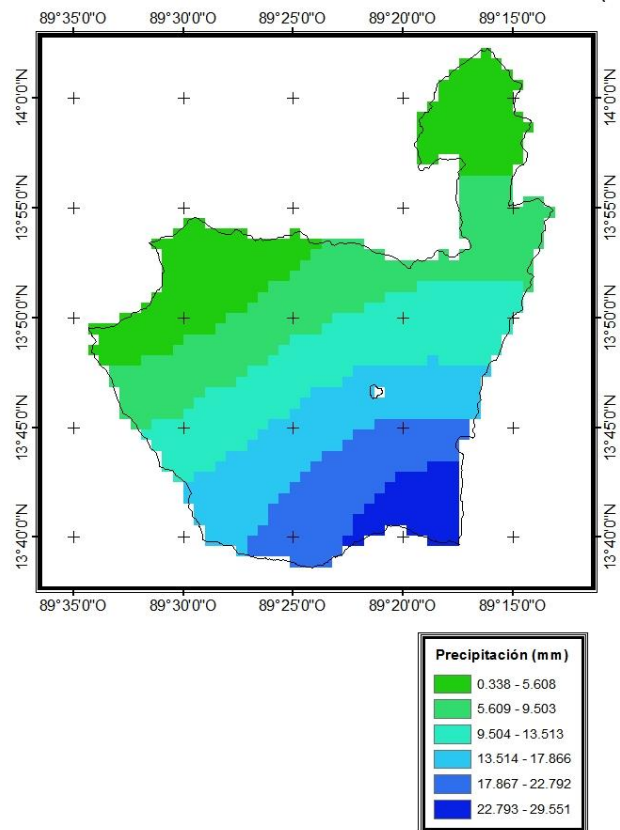


Figura 5. 65: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 10/10/11

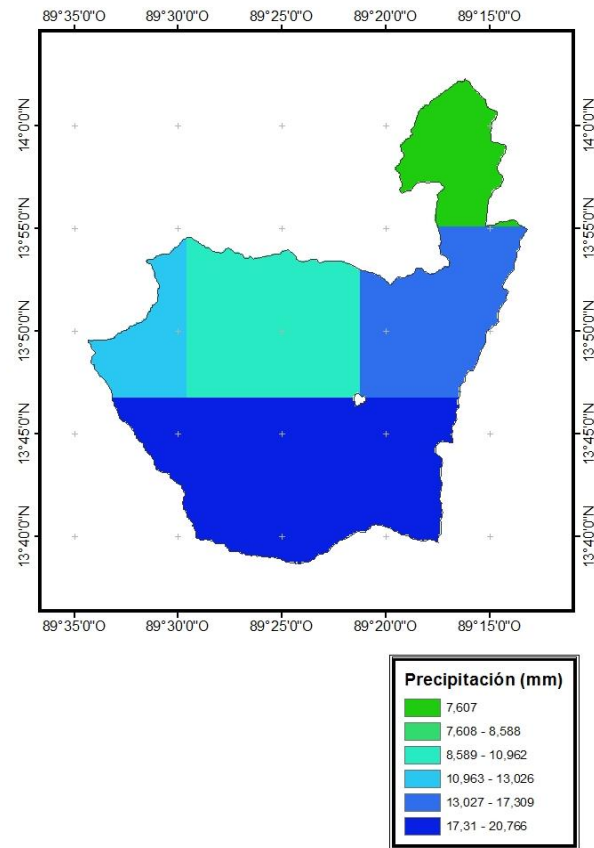
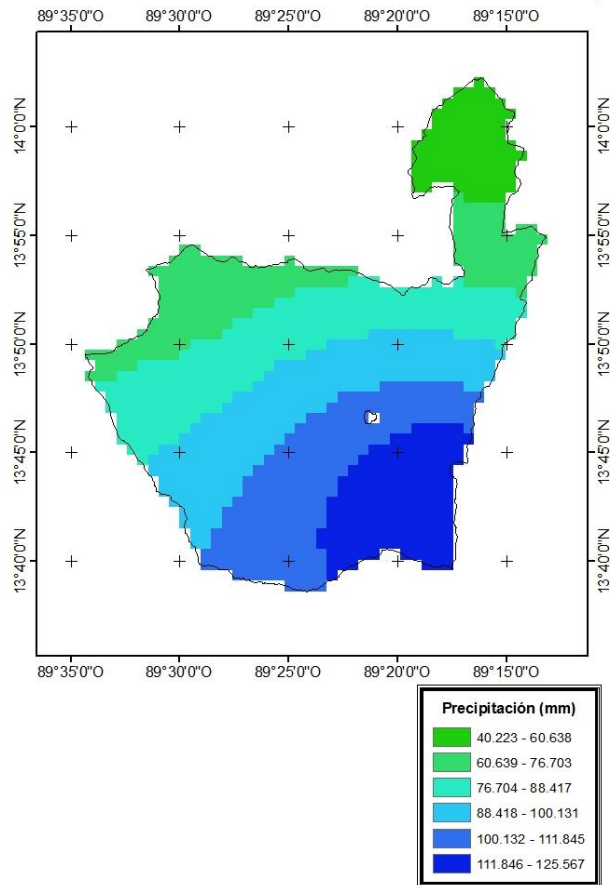


Figura 5. 66: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 11/10/11

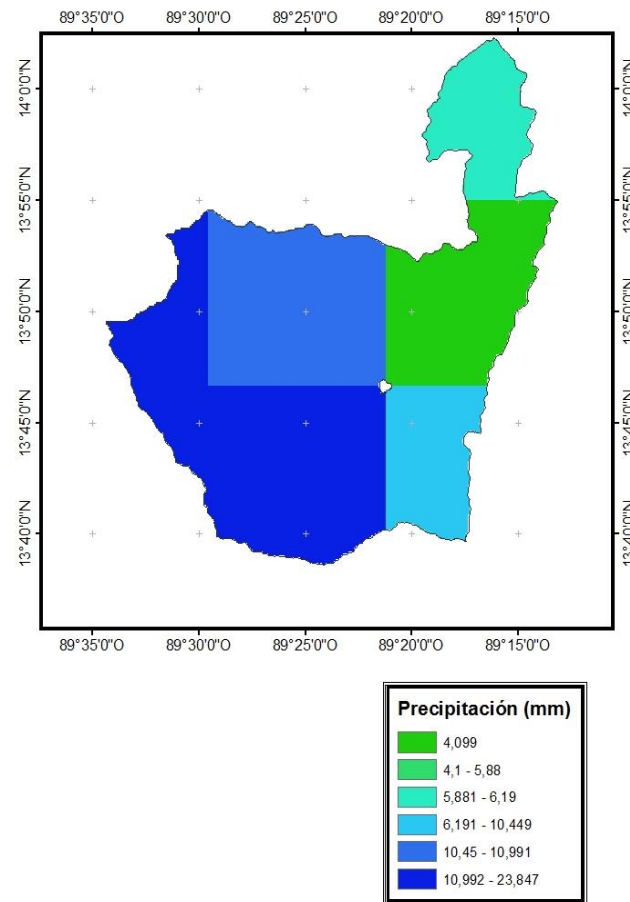
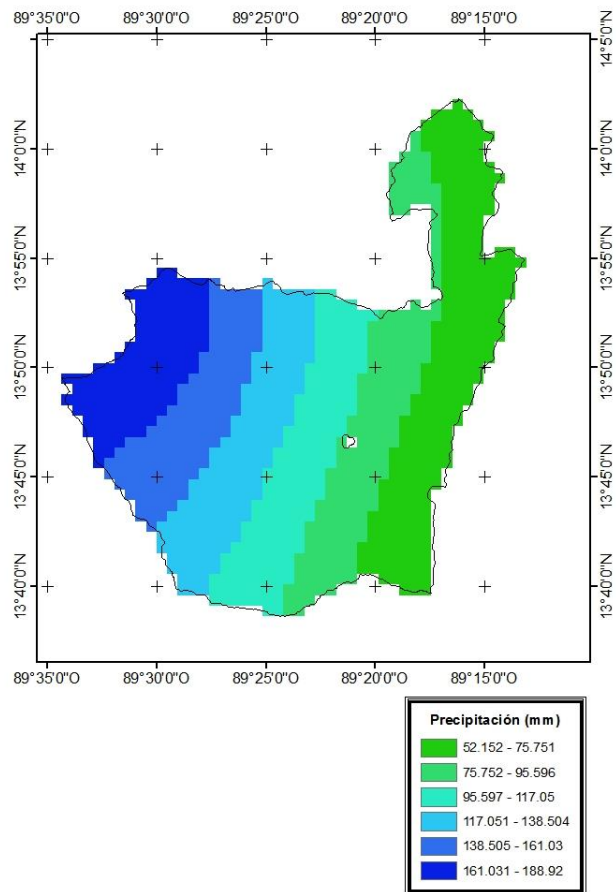


Figura 5. 67: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 12/10/11

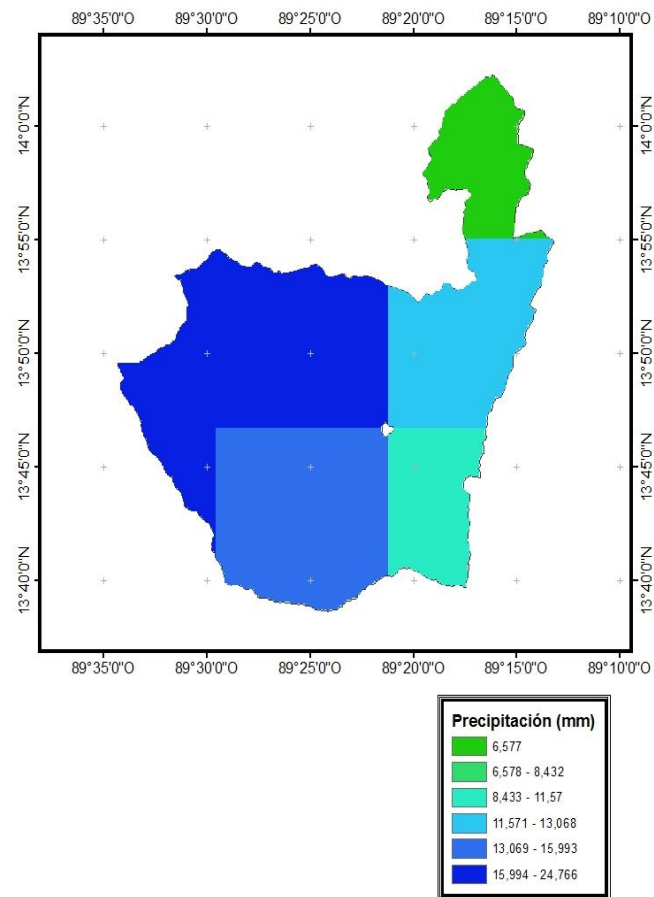
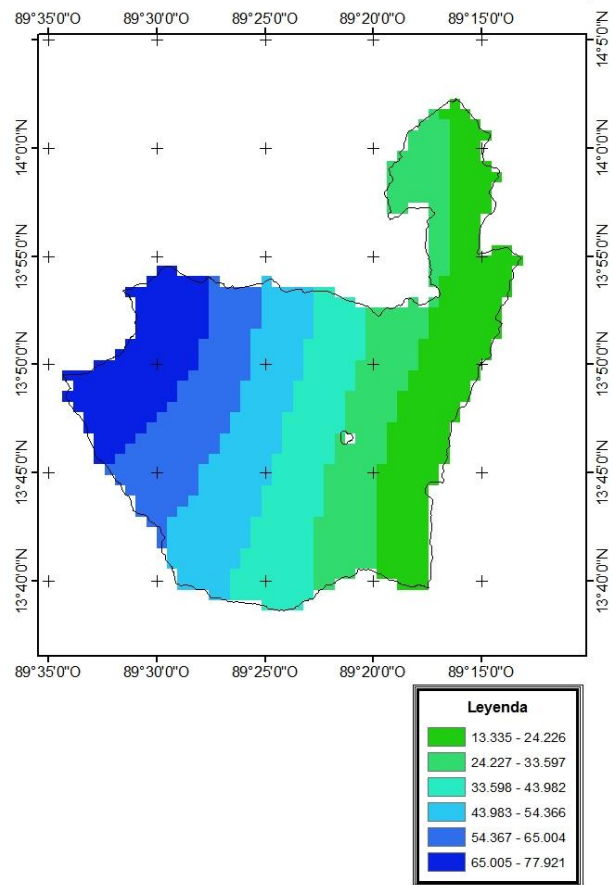


Figura 5. 68: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 13/10/11

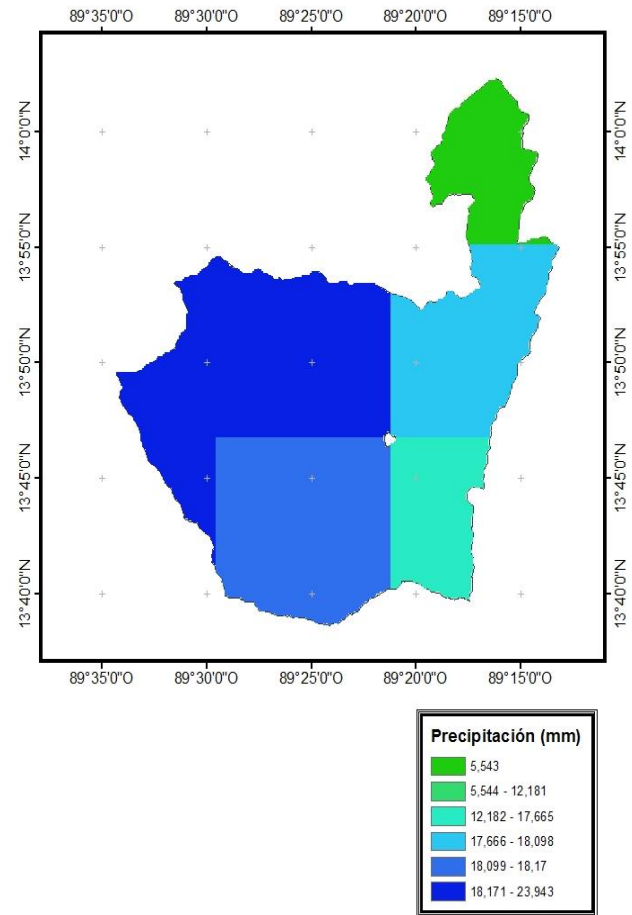
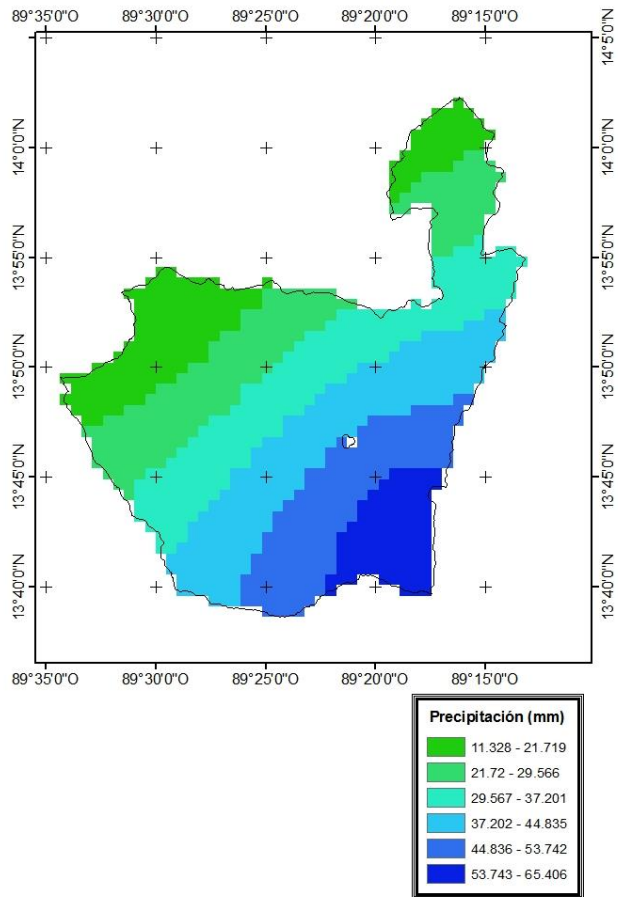


Figura 5. 69: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 14/10/11

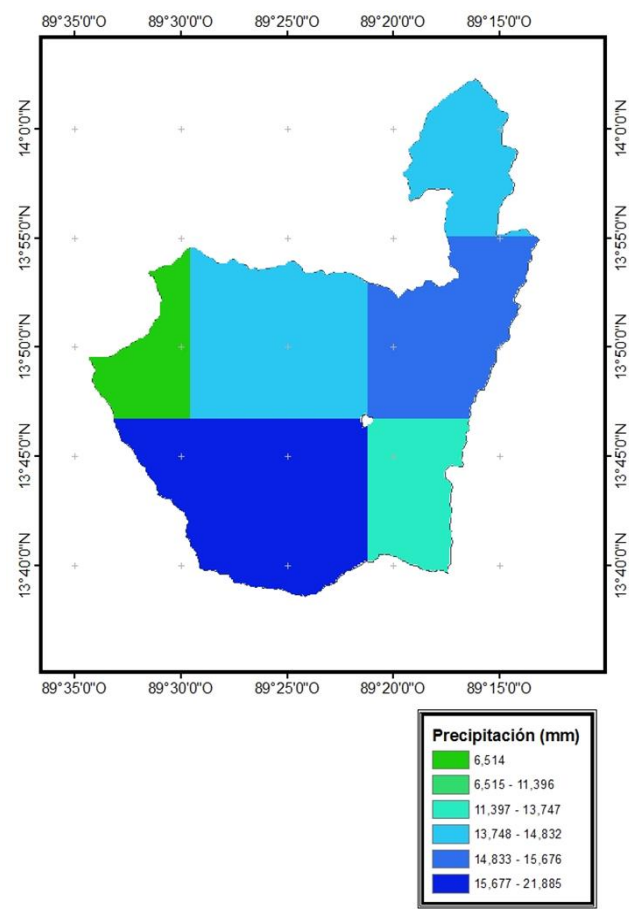
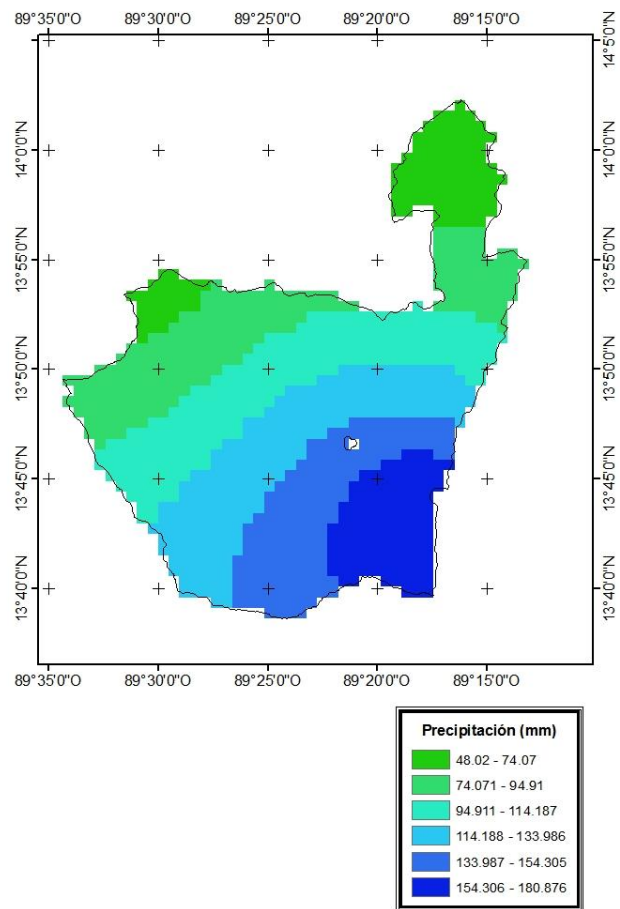


Figura 5. 70: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 15/10/11

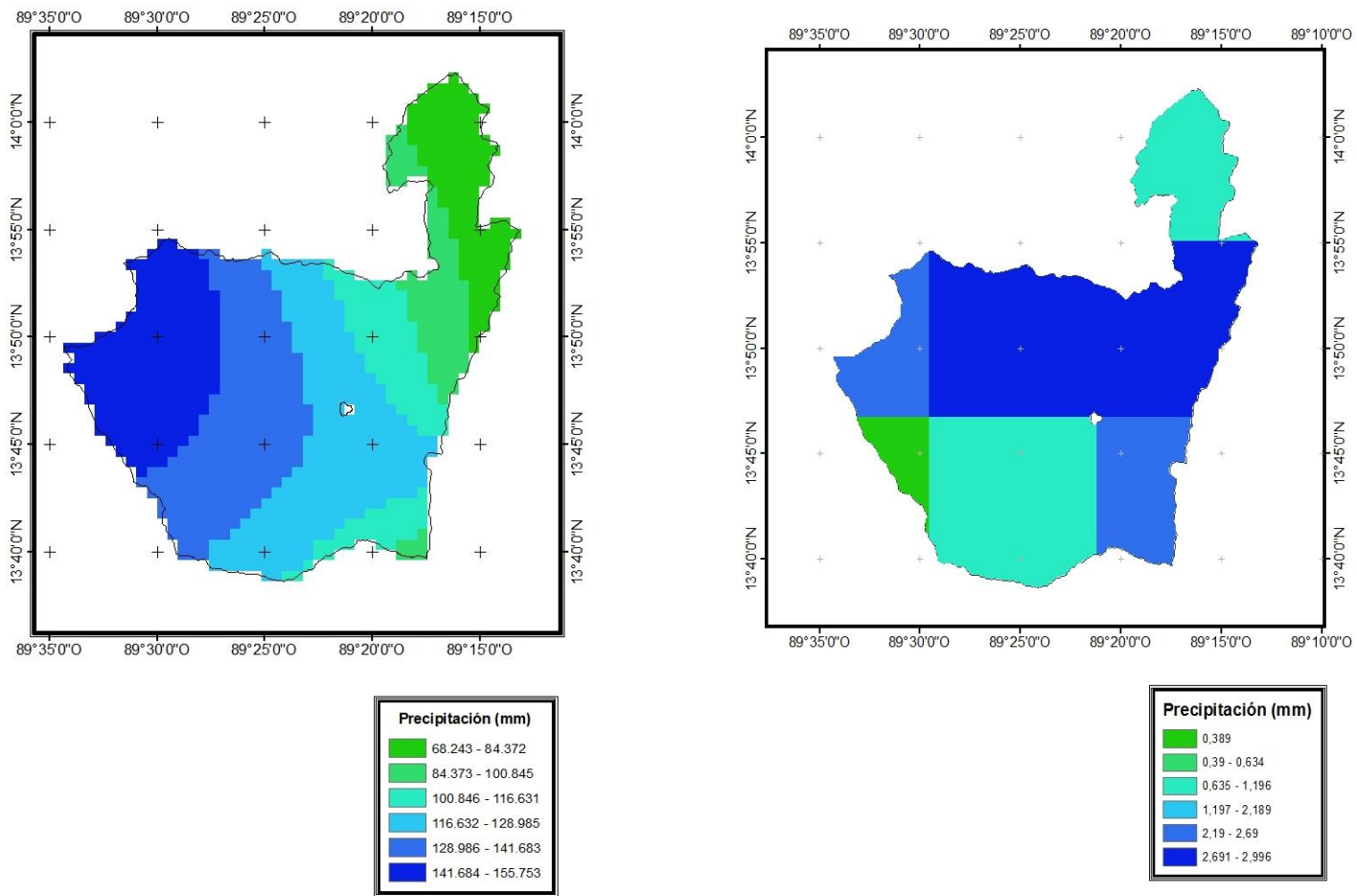


Figura 5. 71: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 16/10/11

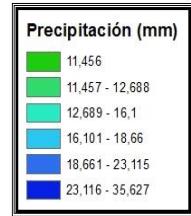
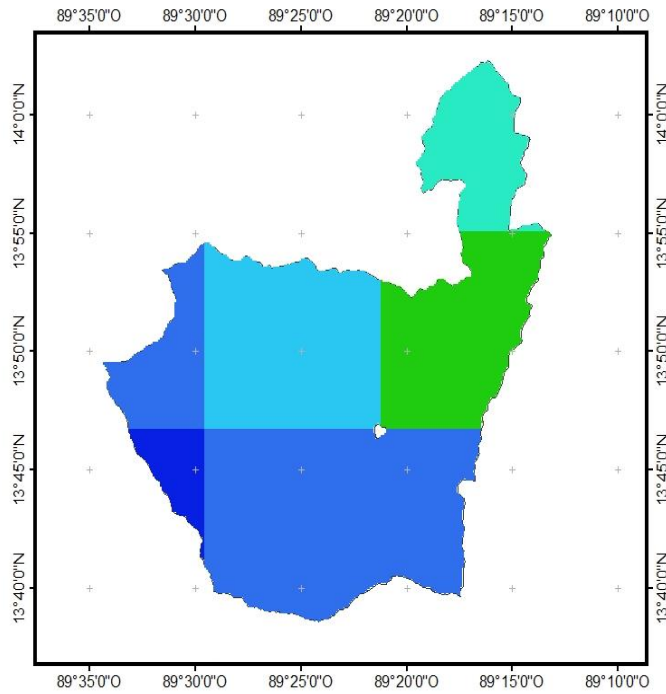
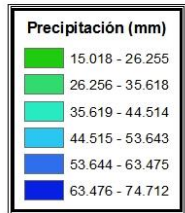
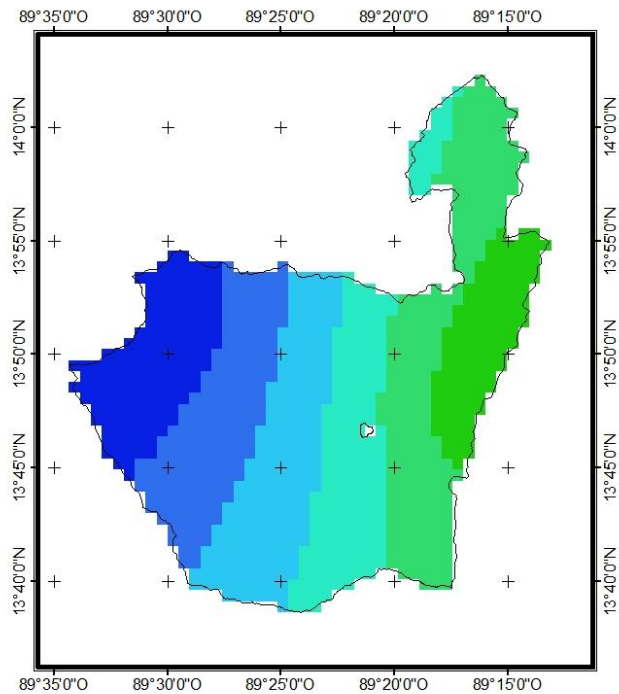


Figura 5. 72: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 17/10/11

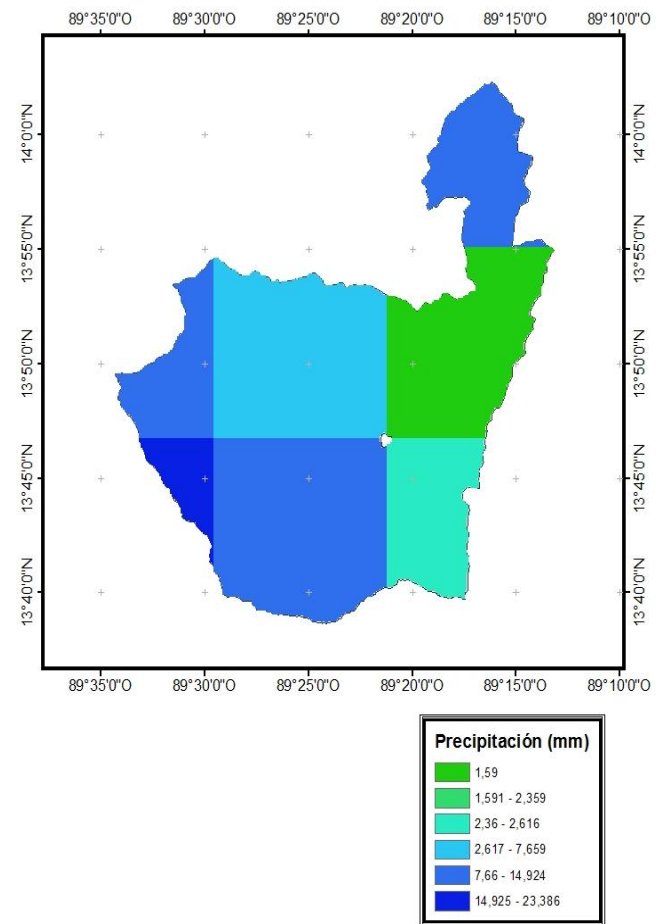
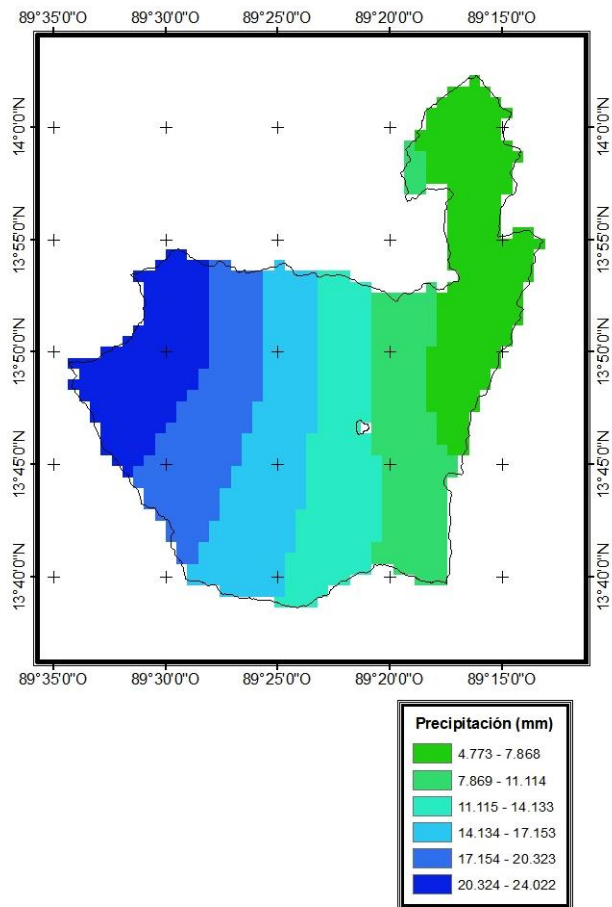


Figura 5. 73: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 18/10/11

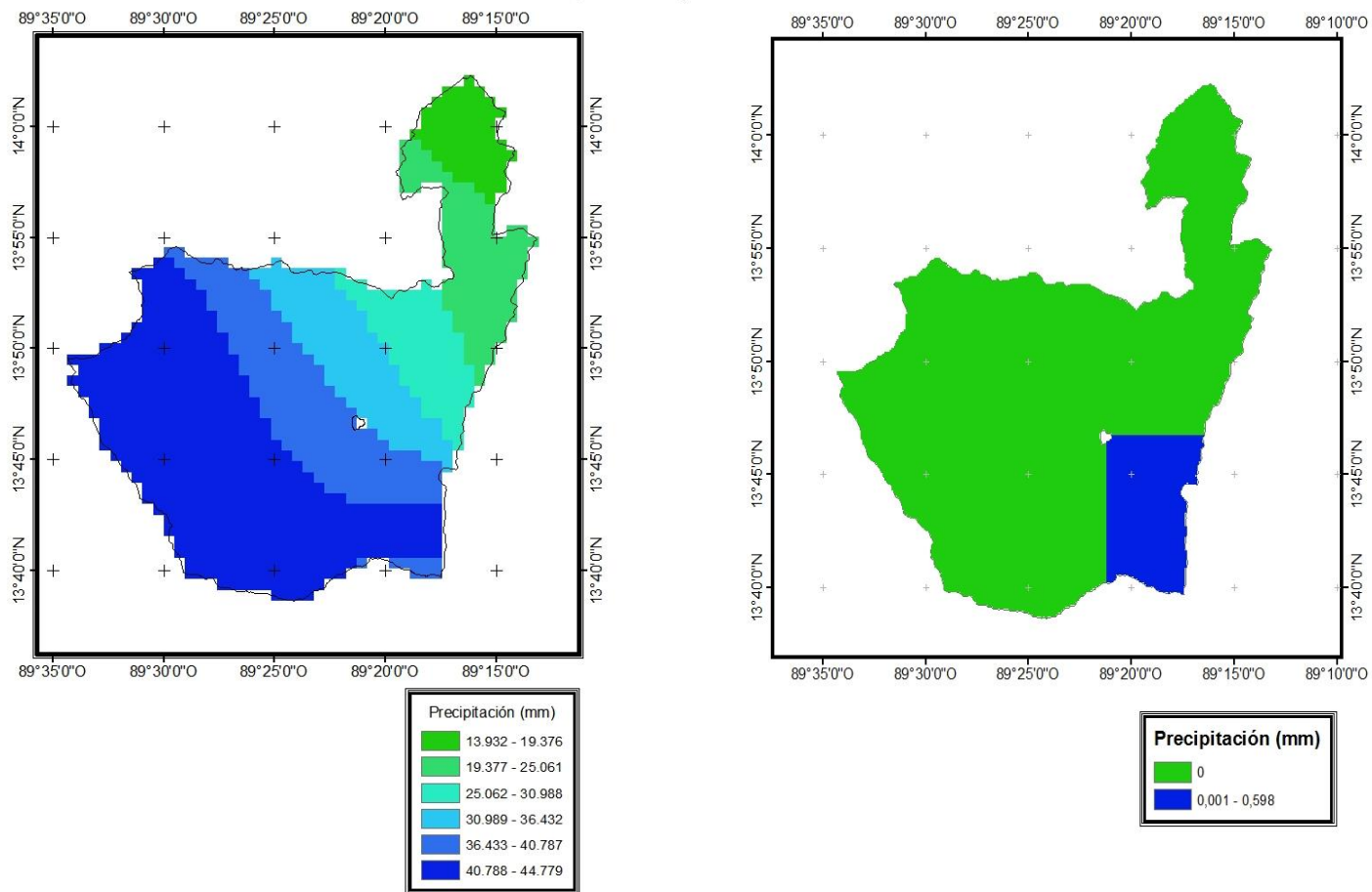


Figura 5. 74: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 19/10/11

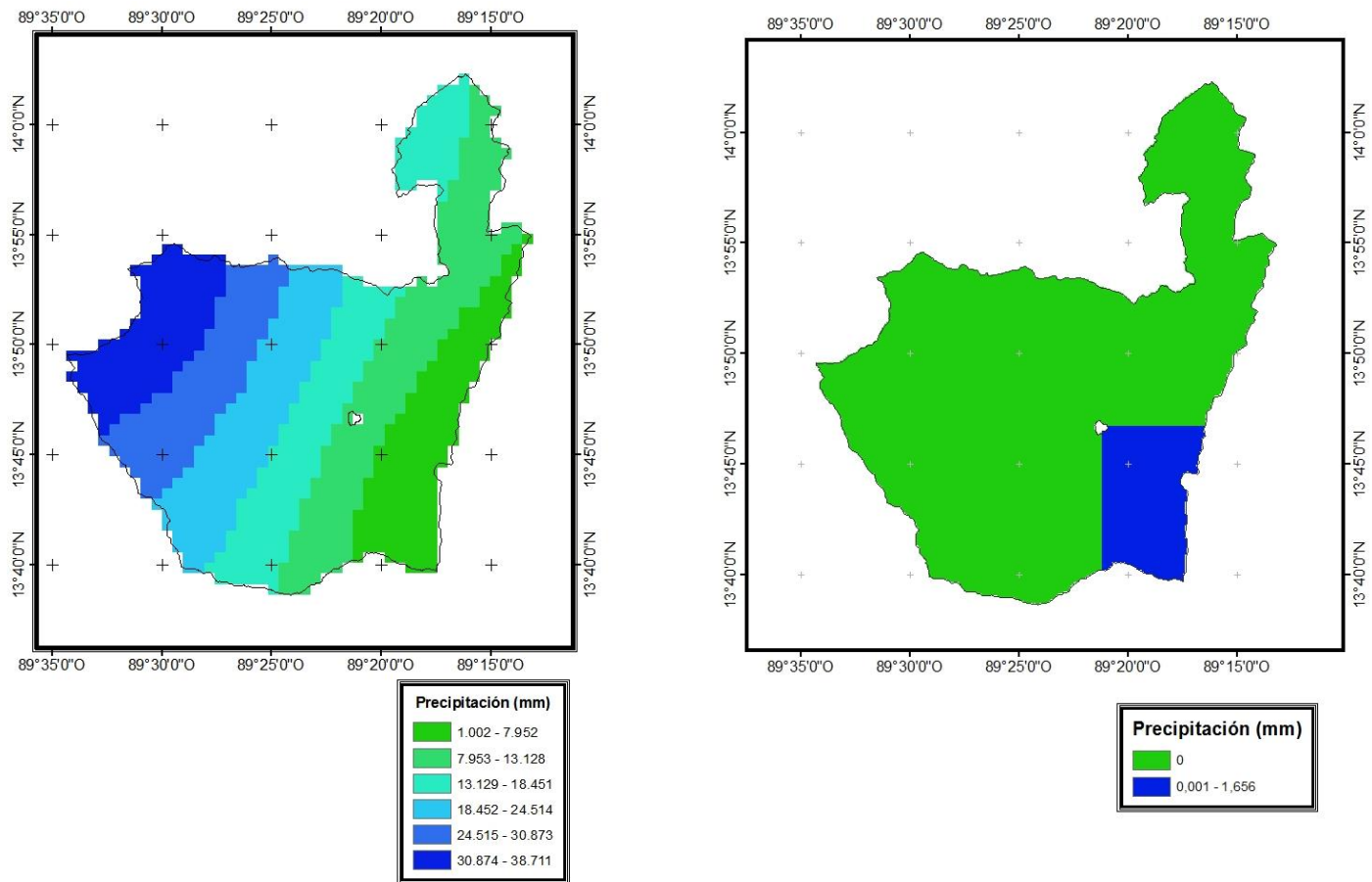


Figura 5. 75: Mapas de Lluvia Observada VRS Lluvia Pronosticada para el 20/10/11

5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para poder realizar el análisis de resultados, se tuvo que definir un rango aceptable entre la lluvia registrada y la simulada, por lo que se definió que las diferencias entre los máximos de lluvia interpolada y la lluvia simulada está dentro de un rango de diferencia aceptable cuando el total de casos con diferencias de máximos es menor a 20 mm, en base al documento denominado “Desarrollo de una metodología de evaluación del WRF El Salvador con datos de lluvia registrada por estaciones de la red nacional” del Ing. Juan José Amides Figueroa del Servicio Meteorológico Nacional del MARN. Al analizar los datos obtenidos se puede observar que:

- Visualmente, por medio de los gráficos, es evidente que el pronóstico es inferior a lo real, así como la visualización por medio de tablas. En los gráficos que muestran la variación existente entre los valores reales de lluvia media y lluvia pronosticada, las distribuciones indican que en su mayoría las correlaciones son negativas entre los valores de las variables, para los dos eventos evaluados. Se nota de manera más clara en el Figura 5.61, de dispersión para todos los valores del evento de la DT 12-E, que la tendencia en la comparación se concentra dentro del rango de 15 mm para la interpolada y 5 mm para WRF; mientras que en el gráfico de dispersión únicamente del evento del 17 de Octubre, la distribución se concentra dentro del rango de 8 mm.

- Al observar el hietograma de la Figura 5.62 de la DT 12-E, hubo la mayor cantidad de lluvia registrada el día 11 de Octubre, en el periodo de 9-12 horas, con 29.321 mm, mientras que la máxima pronosticada se dio el 14 de Octubre, en el periodo de 18-21 horas, con 10.455 mm de lluvia. El mayor valor de desviación estándar para la lluvia observada corresponde al 11/10/11 con un valor de 10.441, mientras que el menor valor se dio el 18/10, con un valor de 1.409. Para el caso del pronóstico, el máximo valor de desviación estándar se dio para el día 14/10, de 3.751, y el menor el 19/10 de 0.023.
- Fueron 10 correlaciones negativas y 2 positivas, en ninguno de los casos existe una correlación perfecta, valor de 1 que pudiera ser positiva (Al crecer o decrecer X, crece o decrece Y), o negativa (al crecer o decrecer X, decrece o crece Y), puesto que al observar la tabla 5.13, el valor más bajo positivo es de 0.10, lo que significa que para el 12 de octubre de 2011, fue cuando menos hubo relación entre las variables pronosticadas y observadas, mientras que para el día 13 de octubre de 2011, se obtuvo una correlación de -0.85, correspondiente a una correlación negativa alta, es decir, fue el día en que se obtuvo la mayor relación entre las variables, además, para este día se obtuvo diferencia de máximos, mínima, de 0.441 mm.
- Del total de casos evaluados, 3 casos, es decir el 25 % de los casos del modelo sobreestimó la lluvia, es decir, la lluvia del modelo es mayor que la lluvia real, mientras que 9 casos, el 75 % de los casos del modelo, subestimó la lluvia, lo

que significa que en la mayoría de los casos, la lluvia pronosticada es menor a la real.

- Todos los valores del sesgo tienen un signo negativo, lo que significa que los valores de lluvia pronosticada son menores a los observados. El menor sesgo se tuvo el día 18/10/11, con un valor de 0.092, que coincide con la menor diferencia de máximos, de 0.019; el valor del sesgo examina la diferencia entre la medición promedio pronosticada y un valor de referencia, indica que para el 18 de Octubre, se tienen valores más próximos entre sí.
- El valor más pequeño del error cuadrático medio MSE, se generó para el día 18/10/11, con un valor de 0.068, así mismo, para el mismo día la medida del error total RMSE fue de 0.260, el valor más bajo. En general, el 18 de Octubre, corresponde al día más exacto, entre lluvia pronosticada y observada, según los índices establecidos.
- A pesar que para el día 11/10/11, hubo una mayor diferencia de máximos, en el día 16/10/11, se dio el mayor valor de sesgo, de -1.740, el valor más alto del error cuadrático medio de 24.231, así como la medida del error total, 4.923; lo que significa que para el día en mención hubieron más discrepancias entre los datos de las variables.
- El cálculo del error absoluto medio MAE dio un valor de 0.693, que es como una magnitud típica del error de pronóstico en el conjunto de datos que se

tienen. Según el parámetro establecido se tienen 10 casos de los 12, con diferencias de máximos menos a 20 mm.

- En la comparación de distribución espacial de la lluvia pronosticada y lluvia registrada, según los rangos, a pesar de no coincidir en los valores de rangos, en su mayoría, el modelo "SI" acertó respecto a la predicción, ya que en las zonas donde el modelo arrojó lluvia, en efecto, si se registró lluvia. En su totalidad, afirmar que estos resultados son ciertos, no es correcto, ya que al observar los mapas generados de lo observado y pronosticado, es evidente que el tamaño de celda de datos ráster no es igual, es mucho más grande en los mapas correspondientes al pronóstico. Respecto al pronóstico, para el evento convectivo, se obtuvo un dominio limitado para El Salvador, para la DT 12-E, un dominio que contiene a Centro América y El Caribe. En el análisis de los datos registrados, se obtuvo un dominio limitado por la Cuenca del Río Sucio.

Como los dominios varían, el tamaño de celda no es igual, por lo tanto no se tiene el mismo nivel de detalle. Cuanto mayor sea la resolución de un ráster, más pequeño será el tamaño de celda, y por lo tanto, mayor será el detalle, además, visualmente se obtienen mapas más suavizados.

Por todo lo mencionado anteriormente, se considera que los mapas de lluvia no son representativos, más sin embargo, dan una idea breve de cómo se distribuye la lluvia espacialmente.

CAPITULO VI:
PRONOSTICO HIDROLOGICO

6.1 INTRODUCCIÓN

En el campo de la Hidrología, existen una gran variedad de modelos predictivos, siendo el Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU., (HEC-HMS); uno de los más utilizados, ya que es un programa computacional gratuito y de amplia utilización internacional en el estudio de avenidas, el cual provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y tránsito de caudales.

Este modelo utiliza métodos de precipitación-escorrentía para estimar los hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones en una cuenca o región durante un período especificado. Es un programa muy flexible que permite la selección de diferentes métodos para el cálculo de pérdidas, hidrogramas, flujo base y propagación en cauces. Posibilita realizar simulaciones de los procesos hidrológicos a nivel de eventos o en forma continua. Los primeros simulan el comportamiento de un sistema hídrico durante un evento de precipitación. La simulación continua puede comprender un período de tiempo con varios de estos eventos.

Para la modelación en HEC-HMS, es necesario ingresar información de la cuenca, en donde se ingresan todas las características físicas de la misma, se necesita además colocar los eventos de precipitación seleccionados que influyen sobre esta área, además del periodo de estudio, para poder llevar a cabo la simulación, y poder obtener tablas de sumatorias globales, que contienen la información sobre el volumen de lluvia total escurrida.

6.2 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO HEC- HMS

El modelo HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”) fue diseñado para simular procesos de lluvia-escorrentamiento en sistemas dendríticos de cuencas. Se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.

Es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. Surge como evolución del programa HEC-1 (En Lenguaje Fortran), pero incluye muchas mejoras, como una interface gráfica que facilita al usuario las labores de pre y post-proceso y la posibilidad de conectarse a un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS).

El HEC-HMS se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Puede hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo, tiene la capacidad de salvar toda la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo, y la habilidad de comenzar una nueva corrida de simulación, basada en la información de estado previamente guardada.

Los resultados de la simulación se pueden ver en el mapa de la cuenca. Se generan tablas sumarias globales y de elemento, que incluyen la información sobre el flujo máximo y el volumen total. También están disponibles, una tabla de serie de tiempo, el gráfico por elementos, los resultados de múltiples elementos y corridas de simulación.

Finalmente, el programa HEC-HMS tiene la capacidad de imprimir todos los gráficos y tablas que se generan.

El período de tiempo de una simulación es controlado por las especificaciones de control que incluyen: la fecha y hora de inicio, de terminación y un intervalo de tiempo.

6.3 COMPONENTES DE UN PROYECTO EN HEC-HMS

Para llevar a cabo una simulación se deben considerar los siguientes componentes:

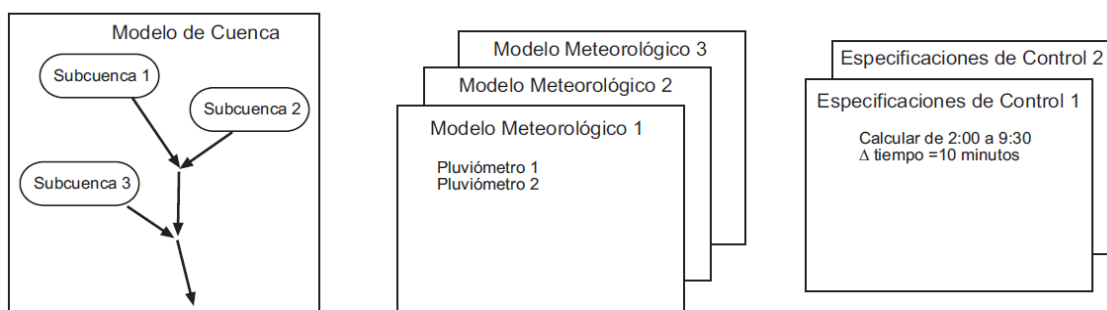


Figura 6. 1: Componentes de un proyecto en HEC
Fuente; HEC-HMS. Manual Elemental

- Modelo de cuenca
- Modelos meteorológicos
- Especificaciones de control
- Datos series de tiempo

A continuación se explica en qué consiste cada componente:

6.3.1 MODELO DE CUENCA

El modelo de cuenca representa la cuenca física, es decir describe hidrológicamente la cuenca en estudio; para lo que se agregan y conectan elementos hidrológicos.

Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos:

- a. **Subcuencas (subbasins):** Se usa para representar la cuenca física. Dada la precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula restando las pérdidas a la precipitación y transformación del exceso de precipitación en caudal en el punto de salida de la subcuenca, sumando finalmente el caudal base.
- b. **Tamos de tránsito (routing reach):** Se usa para transportar el agua generada en algún punto de la cuenca hacia aguas abajo hasta otro punto de la cuenca, definidos ambos en el modelo de la cuenca. La respuesta de este transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.
- c. **Uniones (junctions):** Se usa para sumar flujos de agua que provienen de elementos hidrológicos situados aguas arriba de la unión. La respuesta es simplemente la suma de los hidrogramas de todos los elementos conectados a la unión.
- d. **Embalses (reservoirs):** Se usa para modelar la retención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o depósito de retención. La entrada puede provenir de uno o varios elementos hidrológicos situados aguas arriba del depósito. La salida puede calcularse de dos maneras: El usuario define una relación almacenamiento-salida o cota-área-salida o bien el usuario define una relación cota-almacenamiento o cota-área y una o más estructuras de salida.
- e. **Fuentes (Sources):** Se usa para introducir agua dentro del modelo de la cuenca. Este elemento no tiene entrada y la salida está definida por el usuario.

- f. **Sumideros (sinks):** Se usa para representar el punto de salida de la cuenca. La entrada puede provenir de uno o varios elementos situados aguas arriba del sumidero. Este elemento no tiene salida.
- g. **Derivaciones (diversions):** Se usa para modelar un flujo de agua que abandona un tramo de cauce. La entrada proviene de uno o varios elementos de aguas arriba. La salida de este elemento consiste en un flujo derivado y otro no derivado (que sigue por el cauce). El flujo derivado se define por el usuario. Tanto los flujos derivados como los no derivados se pueden conectar aguas abajo con otros elementos.

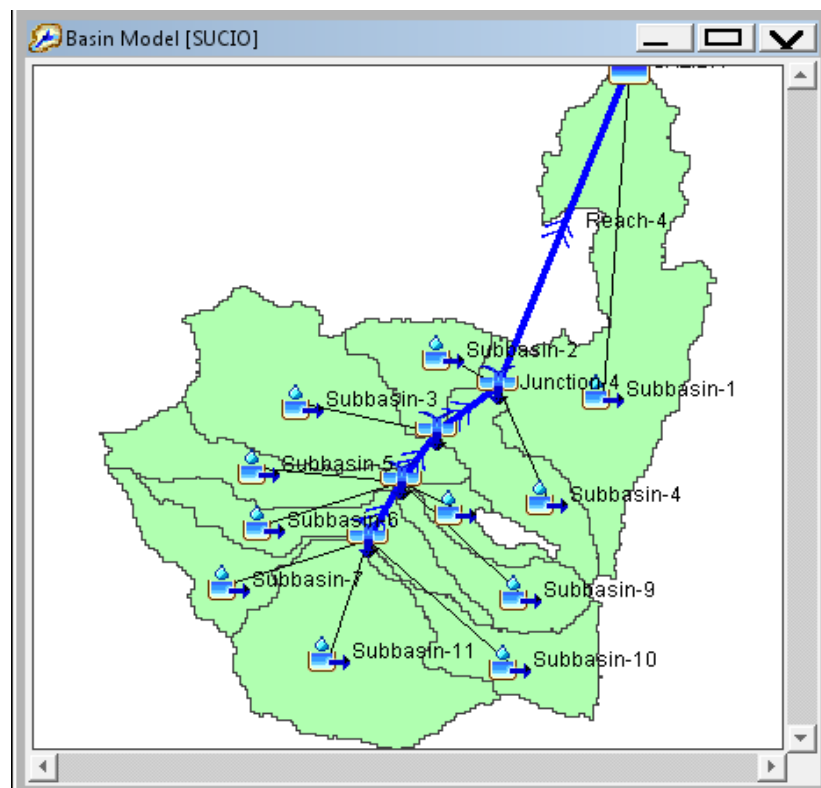


Figura 6. 2: Modelos de cuenca (Basin Models)
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

Generalmente los procesos asociados a los elementos hidrológicos ya mencionados son:

Elemento hidrológico	Procesos	Método	Datos y Parámetros necesarios
Sub Cuenca	Separación lluvia bruta-neta	SCS	<ul style="list-style-type: none"> • Número de curva • Porcentaje de área impermeable de la cuenca
	Transformación lluvia neta en escurrimiento	Hidrograma Unitario SCS	<ul style="list-style-type: none"> • Área de la cuenca • Tiempo de retardo de la punta (Tlag) • Duración de la tormenta (intervalo de cálculo)
	Caudal base	Constant monthly	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal base que circula por el río
Nudo	Unión de hidrogramas	Suma	-
Tramo de río	Propagación de hidrogramas	Muskingum	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de viaje (K) • Forma de almacenamiento (X) • Número de subtramos

Tabla 6. 1: Elementos hidrológicos y procesos asociados.
Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis.

Para que la representación física de la cuenca quede bien definida, además de lo mencionado anteriormente se deben completar las fases para un trabajo realizado con HEC-HMS, las cuales son:

6.3.1.1 FASES DE TRABAJO DE HEC-HMS

Fases de trabajo con HEC:

- a. **Perdidas (Loss):** Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escurrimiento directo.
- b. **Transformación (Transform):** Cálculo del escurrimiento directo producido por esa lluvia neta.
- c. **Flujo Base (Baseflow):** Suma del escurrimiento directo y el base, si existía previamente. Cálculo de la evolución del escurrimiento base a lo largo del tiempo.
- d. **Tránsito de avenidas (Routing):** Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que discurre a lo largo del cauce.

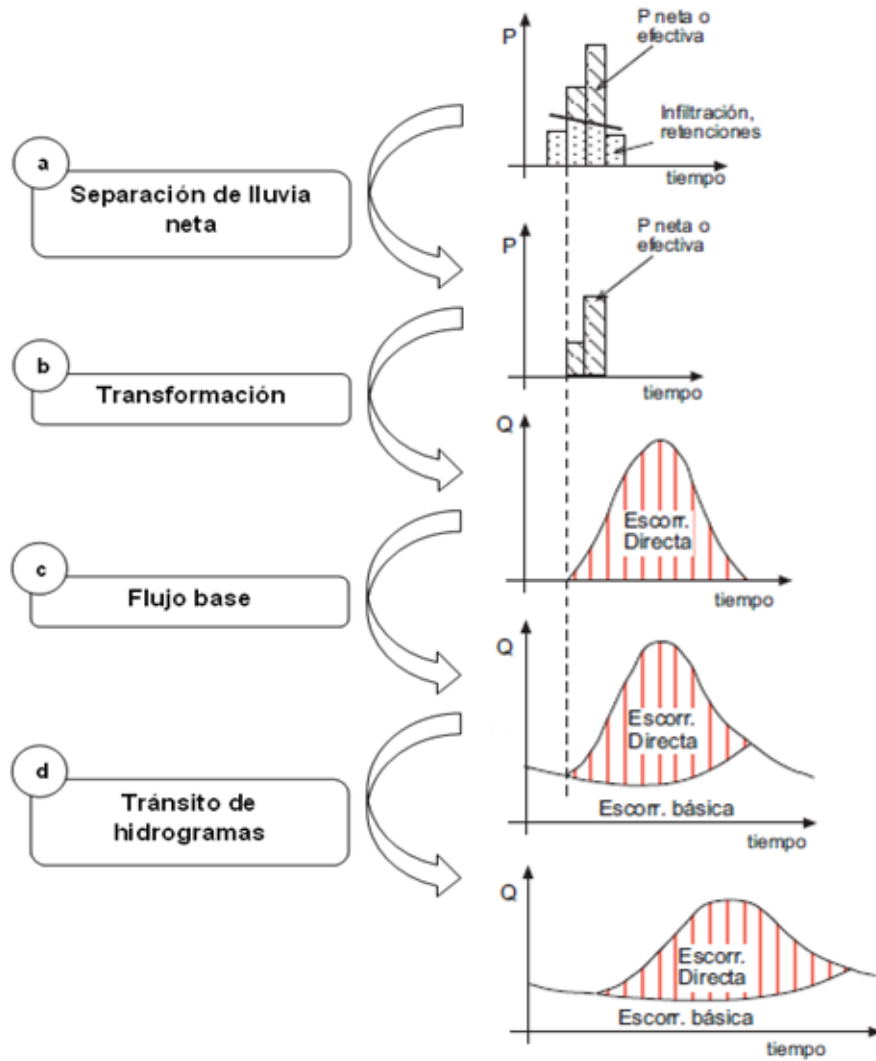


Figura 6. 3: Esquema de las fases de HEC-HMS

Fuente: HEC-HMS, Manual Elemental

En el caso de constar con varias subcuencas, el programa realiza los cálculos de las primeras tres fases para cada subcuenca y la última para cada tránsito a lo largo de un cauce (la evolución del hidrograma que, generado en la salida de una subcuenca, circula por otra distinta). En los puntos de unión, suma los caudales generados por varios elementos.

La fase “a” se desglosa en tres distintos aspectos que dan lugar a “Perdidas” (Precipitaciones que no llegan a generar escorrentía directa: abstracciones):

- **Canopy:** Si existe vegetación, parte de la precipitación será retenida en las hojas para evaporarse después (Interceptación).
- **Surface Storage:** Precipitación que puede quedar retenida en pequeñas retenciones superficiales, para infiltrarse o evaporarse después. Suele utilizarse solamente en modelos de simulación continua.
- **Loss:** Precipitación que se infiltra. Habitualmente, los dos aspectos anteriores no se tienen en cuenta ya que se incluyen en las características del apartado actual, por lo que en HEC-HMS no aparecen activos; **es la parte fundamental de la separación de lluvia neta.**

6.3.2 MODELO METEOROLÓGICO

El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca. El modelo meteorológico puede usar precipitación puntual o por celdas y puede modelar precipitación sólida y líquida junto con la evapotranspiración. Los métodos de evapotranspiración incluyen el método constante mensual y el de Priestley Taylor.

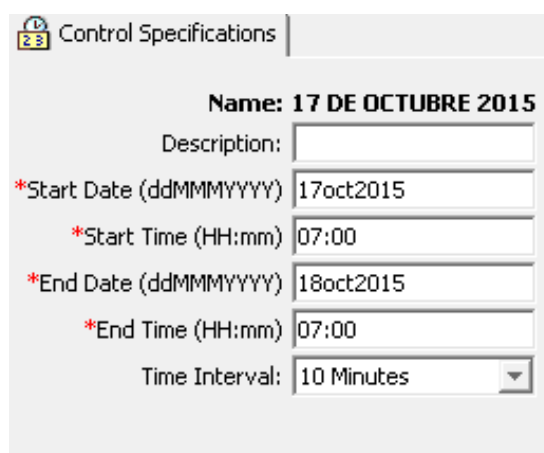
Un método de evapotranspiración se requiere únicamente cuando se desee una respuesta de la cuenca continua o a largo plazo. Una breve descripción de los métodos disponibles para calcular la precipitación media en la cuenca o celda a celda se incluyen en la siguiente tabla:

Métodos de Precipitación	Descripción
Tormenta asociada a frecuencia	Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes a distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia uniforme.
Pluviómetros con pesos	Este método aplica pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el desee.
Precipitación por celdas	Este método permite usar productos con precipitación por celdas, como por ejemplo los datos de radar.
Inversa de la distancia	Se usa para calcular la precipitación media en una subcuenca aplicado una ponderación basada en la inversa de la distancia al cuadrado.
Tormenta SCS	Este método aplica una distribución temporal tipo SCS a un volumen total de lluvias en 24 horas.
Hietograma especificado	Este método aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de subcuenca.
Tormenta de proyecto estándar	Este método aplica una distribución temporal a un volumen índice de precipitación (este índice se extrae de un manual del Corp of Engineers y es válido solo para Estados Unidos. Esta actualmente en desuso).

Tabla 6. 2: Descripción de los métodos del modelo meteorológico
Fuentes: Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS.

6.3.3 ESPECIFICACIONES DE CONTROL

En las especificaciones de control se fija el lapso de tiempo de una corrida de simulación. Se establece la fecha y hora de inicio de la lluvia y el término de la misma con un intervalo de tiempo que puede variar según nuestra conveniencia (Este intervalo debe ser menor que el 29% del tiempo de retardo esto fue sacado de los manuales técnicos de HEC-HMS).



Name: 17 DE OCTUBRE 2015	
Description:	<input type="text"/>
*Start Date (ddMMMYYYY)	17oct2015
*Start Time (HH:mm)	07:00
*End Date (ddMMMYYYY)	18oct2015
*End Time (HH:mm)	07:00
Time Interval:	10 Minutes

Figura 6. 4: Especificaciones de control

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

6.3.4 DATOS SERIES DE TIEMPO

En este apartado se crea y se especifican las series temporales de lluvia u otras series de tiempo correspondientes a las distintas estaciones existentes en la cuenca. Una vez creada una estación pluviométrica (Gage) se pueden introducir los datos de precipitación manualmente, o bien importar los datos externos de la estación en formato HEC-DSS.

6.4 SIMULACIÓN

Esta opción se encuentra en el menú “Compute” luego se procede a crear una nueva simulación seleccionando la opción create “compute” seguido de “Simulation run”, como se muestra en la siguiente figura.

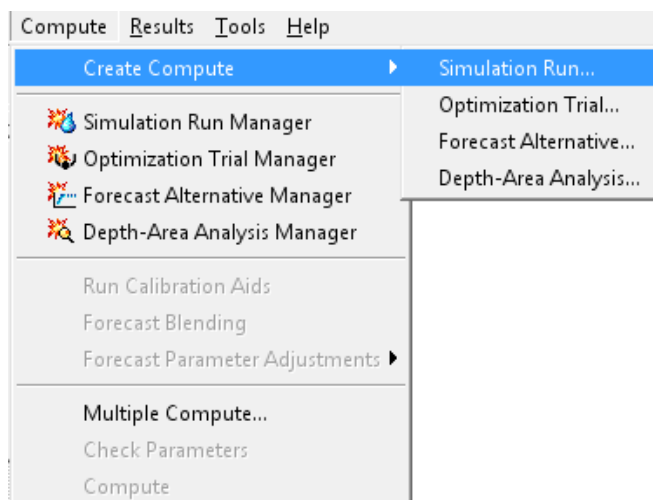


Figura 6. 5 : Simulation run

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

En SIMULATION RUN se debe generar el caso de simulación específico (Run), en el que intervienen los distintos elementos comentados anteriormente. Para dicha simulación se procede al cálculo de los hidrogramas y a la visualización de resultados. Para cada subcuenca, unión y tramo pueden visualizarse tanto gráficos como tablas de los hidrogramas en dichos puntos. Finalmente, se puede representar y exportar el hidrograma en el punto de salida de la red de drenaje (OutFlow).

6.5 DISEÑO DEL PROGRAMA

6.5.1 INTERFAZ DE USUARIO



Figura 6. 6: Interfaz de usuario

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

La interfaz de usuario consiste de una barra de menú, una barra de herramientas, y cuatro paneles importantes, Empezando desde la esquina izquierda superior en la Figura 6.6 y moviéndose en sentido contrario al de las agujas del reloj, estos paneles son conocidos como el explorador de cuenca, el editor de componentes, los mensajes de registro, y el escritorio.

6.5.1.1 PANELES QUE CONFORMAN LA INTERFAZ DE USUARIO DE HEC-HMS:

6.5.1.1.1 EXPLORADOR DE CUENCAS

El explorador de cuencas brinda un acceso rápido a todos los componentes en un proyecto de HEC-HMS. Se puede navegar fácilmente desde el modelo de cuencas hasta una estación de precipitación y luego al modelo meteorológico sin utilizar las opciones de menú.

Los componentes del modelo están organizados en carpetas individuales. Cuando un componente es seleccionado, el explorador de cuencas expande los sub-componentes de este elemento. Los signos más (+) y menos (-) pueden usarse para expandir o colapsar el explorador.

El Explorador de cuencas está dividido en tres partes:

- **Componentes (Components):** En esta pestaña se encuentra la estructura jerárquica de los componentes del modelo, tales como el modelo de la cuenca, el modelo meteorológico, las especificaciones de control, etc. (Figura 6.7)
- **Cálculos (Compute):** Se puede acceder a las simulaciones, optimizaciones y análisis.
- **Resultados (Results):** Se encuentran todos los resultados del proyecto. Incluso los resultados de diferentes simulaciones pueden compararse en un mismo gráfico o tabla.

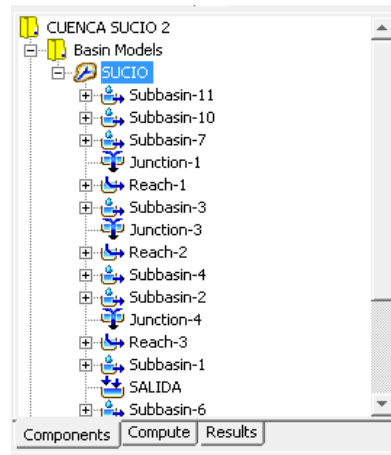


Figura 6. 7: Explorador de cuencas

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

6.5.1.1.2 EDITOR DE COMPONENTES

Cuando un componente o sub-componente se activa en el explorador de cuenca haciendo clic en el nombre, se abre un editor de componentes específico. Todos los datos requeridos por los componentes se ingresan en el editor de componentes (Figura 6.8).

 A screenshot of a 'Basin Model' component editor window. The title bar says 'Basin Model'. The main area has the following fields:

- Name:** SUCIO
- Description:** [Empty text box]
- Grid Cell File:** [Empty text box]
- Local Flow:** No (dropdown menu)
- Flow Ratios:** No (dropdown menu)
- Replace Missing:** No (dropdown menu)
- Unit System:** Metric (dropdown menu)
- Sediment:** No (dropdown menu)
- Water Quality:** No (dropdown menu)

 There are small icons for help and file selection next to the Description and Grid Cell File fields.

Figura 6. 8: Editor de componentes

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

6.5.1.1.3 REGISTRO DE MENSAJES

Las notas, avisos (Warning) y errores, se muestran en el registro de mensajes. Los mensajes son útiles para identificar porque una simulación a fallado o porque una acción requerida no ha sido completada.

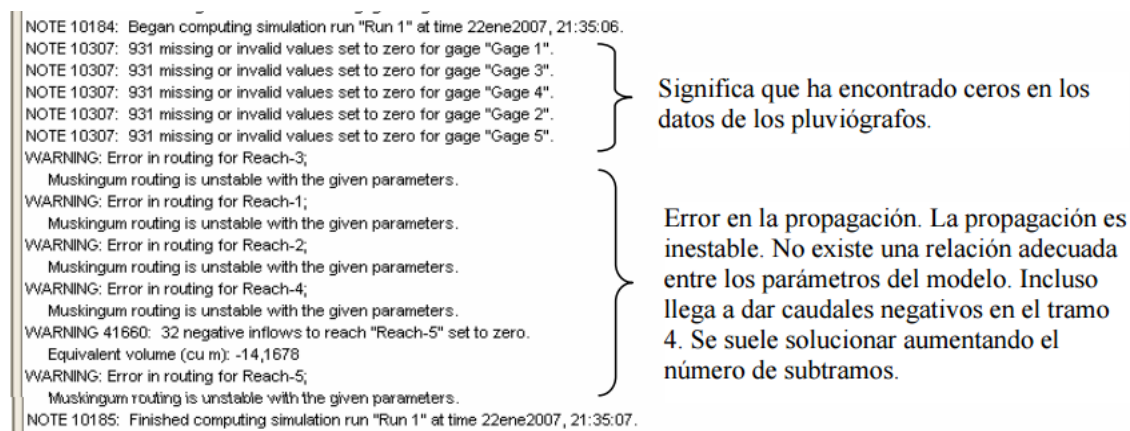


Figura 6. 9: Registro de mensajes

Fuente: Manual Básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1

6.5.1.2 ESCRITORIO

En el escritorio pueden aparecer varias ventanas, incluyendo tablas de resumen, de series temporales, gráficos, editores globales y el modelo de la cuenca. El mapa de modelo de cuenca está confinado al área del escritorio, pero las ventanas de resultado no lo están. Una opción de configuración del programa permite mostrar los resultados fuera del área de escritorio. El mapa del modelo de la cuenca se usa para dar forma al modelo de la cuenca. Los distintos elementos pueden añadirse a partir de la barra de herramientas y conectados para representar la red de drenaje del área de estudio. Pueden importarse también mapas de fondo para ayudar a visualizar la cuenca. En la figura 6.10 se muestra un ejemplo.

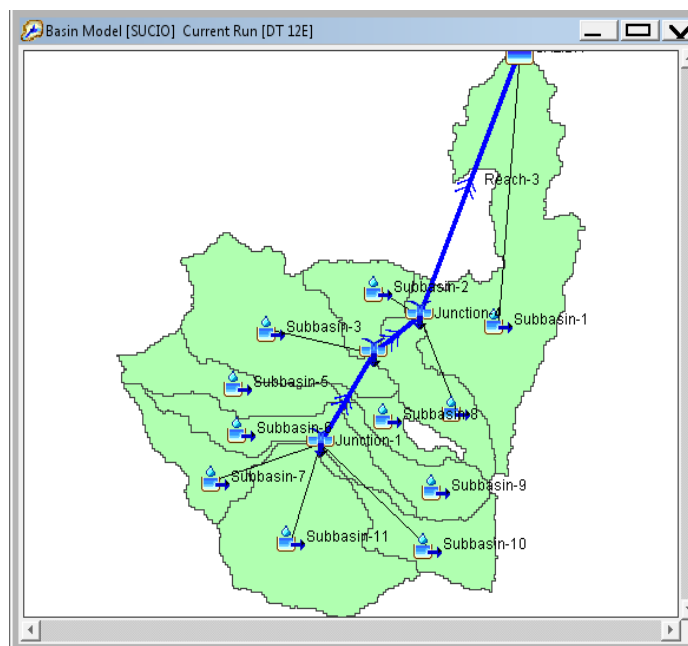


Figura 6. 10: Mapa de modelo de la cuenca

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

6.6 MODELACION HIDROLOGICA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO CON HEC-HMS

Lo primero que se hace es dividir la cuenca en sub cuencas, y calcular todas sus características. En este caso se toma como referencia un estudio hidrológico, realizado en el trabajo de graduación “UTILIZACION DEL MODELO HEC-HMS EN SISTEMAS DE PRONOSTICOS HIDROLOGICOS Y VERIFICACION DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MODELO CMPORH EN LA CUENCA DEL RIO SUCIO” por estudiantes de la Universidad de El Salvador, dichas características se muestran a continuación:

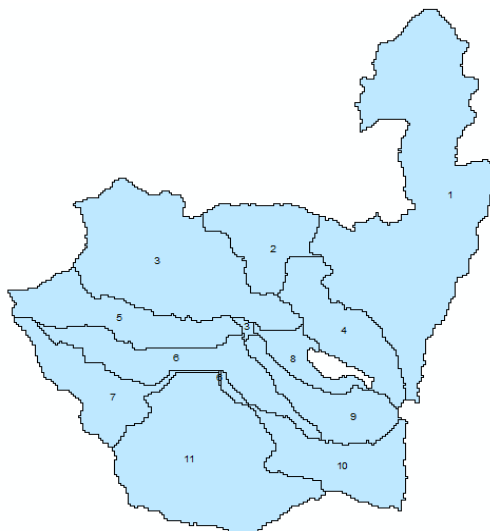


Figura 6. 11: Subcuencas de la cuenca del Río Sucio

Fuente: Información tomada del trabajo de graduación "UTILIZACION DEL MODELO HEC-HMS EN SISTEMAS DE PRONOSTICOS HIDROLOGICOS Y VERIFICACION DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MODELO CMPORH EN LA CUENCA DEL RIO SUCIO"

SUBCUENCA	AREA (Km ²)	T _{lag} (min)
SC-1	210.94	268.8
SC-2	42.13	66.6
SC-3	120.83	126.6
SC-4	49.46	118.8
SC-5	52.62	106.8
SC-6	53.88	158.4
SC-7	44.54	81.6
SC-8	19.24	124.2
SC-9	38.77	51
SC-10	54.68	96
SC-11	131.38	70.2
TOTAL	818.43	

Tabla 6. 3: Características de las subcuencas del río sucio
Fuentes: Elaborado por el Grupo de Tesis.

Anteriormente en las generalidades se explicó que para generar el modelo con HEC-HMS se necesitan completar los componentes que solicita el software para poder realizar la modelación, a continuación se muestra lo anterior, aplicado a la cuenca del río sucio.

6.6.1 MODELO DE CUENCA

Para lograr definir el modelo de cuenca generalmente se carga un shapefile de las subcuencas, no es obligatorio, pero ayuda a que se haga una mejor distribución espacial de los elementos hidrológicos que componen a la cuenca del Rio Sucio, en nuestro caso compuesto por 11 subcuencas, 1 sumidero (Corresponde al punto de salida de la cuenca), y 3 tramos, después se ingresan las áreas de cada subcuenca.

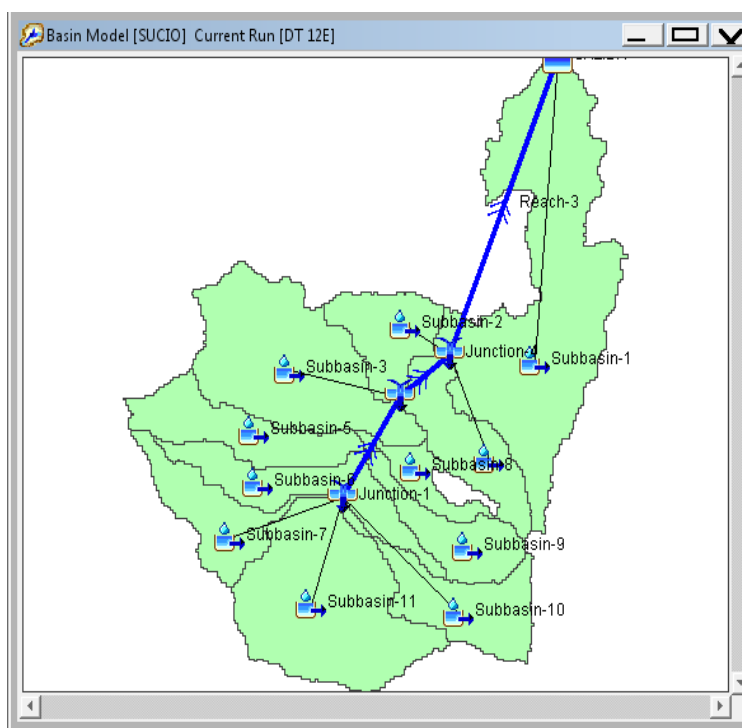


Figura 6. 12: Modelo de cuenca
Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

6.6.1.1 MÉTODO DE PÉRDIDAS INICIALES (LOSS)

Las pérdidas básicamente se consideran como el agua que queda retenida en el suelo, y no debe interpretarse como pérdidas de agua no recuperable, sino como una parte de la precipitación que no alimenta de una forma rápida la red de cauces y por consiguiente no participa en la generación de caudales punta de tormenta.

El método de pérdidas seleccionado para la simulación es el “Numero de Curva”, Este método fue elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica (U.S. Soil Conservation Service) y se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial a partir de las características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal.

Tomando en cuenta las condiciones precedentes de humedad, considerando la cantidad de lluvia caída en un periodo de 5 días anteriores al día de análisis; estableciendo tres clases de relaciones:

- **Condición I:** Suelo seco, se utiliza cuando apenas se ha producido lluvia.
- **Condición II:** Suelo medio (Condición de humedad normal)
- **Condición III:** Suelo húmedo, los suelos en la cuenca se encuentran en estado muy húmedo, debido a lluvias intensas o lluvias ligeras y temperaturas muy bajas.
-

CONDICION DE HUMEDAD PRECEDENTE		
CONDICIÓN	Lluvia total durante los cinco días anteriores (mm)	
	Periodo húmedo: may-oct	Periodo Seco: nov-abr
I	Menos de 12.5	Menos de 35. 5
II	De 12. 5 a 28.0	De 35. 5 a 53.0
III	Más de 28.0	Más de 53.0

Tabla 6. 4: Condiciones de humedad precedente

Fuentes: Calculo de caudales de avenida “JOSE CARLOS ROBREDO SANCHEZ PROF. TITULAR DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA E.T.S INGENIERO DE MONTES UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID”

El número de curva se trata de un parámetro adimensional cuyos valores oscilan entre 0 y 100, un valor de $NC=100$ significa una capacidad de retención nula en la cuenca y un valor de $NC=0$ significa una capacidad de retención máxima.

Para el cálculo del número de curva empleado en esta simulación se han utilizado los número de curva en condiciones de humedad normales obtenidos en el trabajo de graduación “UTILIZACION DEL MODELO HEC-HMS EN SISTEMAS DE PRONOSTICOS HIDROLOGICOS Y VERIFICACION DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MODELO CMPORH EN LA CUENCA DEL RIO SUCIO”, ya que este análisis se llevara a cabo para una **CONDICION III**, con la ecuación:

$$NC = \frac{23.NC(II)}{10 + 0.13.NC(II)}$$

Corroborando condición de humedad:

REGISTRO DE DATOS CINCO DIAS ANTES DEL EVENTO PROLONGADO

(DT 12E)

ESTACION: PROCAFE

DIA	LL (mm)
05/10/2011	13.2
06/10/2011	25
07/10/2011	0.4
08/10/2011	0
09/10/2011	25.2
SUMA	63.8

Tabla 6. 5: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento DT 12E estación procafe
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

ESTACION: **BOQUERON**

DIA	LL (mm)
05/10/2011	34.6
06/10/2011	14.8
07/10/2011	2.6
08/10/2011	0.2
09/10/2011	0
SUMA	52.2

Tabla 6. 6: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento DT 12E estación boquerón
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

ESTACION: **PICACHO**

DIA	LL (mm)
05/10/2011	25.8
06/10/2011	11.2
07/10/2011	5.8
08/10/2011	0
09/10/2011	0.2
SUMA	43

Tabla 6. 7: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento DT 12E estación picacho
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

$$LL_{pro} = \frac{63.8 + 52.2 + 43}{3} = 52.7 \text{ mm}$$

CONDICION DE HUMEDAD PRECEDENTE		
CONDICION	Lluvia total durante los cinco días anteriores (mm)	
	Período húmedo: may-oct	Período Seco: nov-abr
I	Menos de 12.5	Menos de 35.5
II	De 12.5 a 28.0	De 35.5 a 53.0
III	Más de 28.0	Más de 53.0

Tabla 6. 4: Condiciones de humedad precedente

Fuentes: Calculo de caudales de avenida "JOSE CARLOS ROBREDO SANCHEZ PROF. TITULAR DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA E.T.S INGENIERO DE MONTES UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID"

**REGISTRO DE DATOS CINCO DIAS ANTES DEL EVENTO CONVECTIVO
(17 DE OCTUBRE DE 2015)**

ESTACION: PROCAFE

DIA	LL (mm)
12/10/2015	1.2
13/10/2015	1
14/10/2015	0.2
15/10/2015	38.6
16/10/2015	8.8
SUMA	49.8

Tabla 6. 8: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento 17 de octubre de 2015
estación procafe

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

ESTACION: BOQUERON

DIA	LL (mm)
12/10/2015	4.8
13/10/2015	0.2
14/10/2015	0
15/10/2015	14.8
16/10/2015	11.2
SUMA	31

Tabla 6. 9: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento 17 de octubre de 2015
estación boquerón

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

ESTACION: ZAPOTITAN

DIA	LL (mm)
12/10/2015	0
13/10/2015	0
14/10/2015	4.6
15/10/2015	6.8
16/10/2015	3.6
SUMA	15

Tabla 6. 10: Lluvia precedente 5 días antes del inicio del evento 17 de octubre de 2015
estación picacho

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

$$LL_{pro} = \frac{49.8 + 31 + 15}{3} = 31.93 \text{ mm}$$

CONDICION DE HUMEDAD PRECEDENTE		
CONDICION	Lluvia total durante los cinco días anteriores (mm)	
	Período húmedo: may-oct	Período Seco: nov-abr
I	Menos de 12.5	Menos de 35.5
II	De 12.5 a 28.0	De 35.5 a 53.0
III	Más de 28.0	Más de 53.0

Tabla 6. 4: Condiciones de humedad precedente

Fuentes: Calculo de caudales de avenida "JOSE CARLOS ROBREDO SANCHEZ PROF. TITULAR DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA E.T.S INGENIERO DE MONTES UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID"

NC utilizados para una condición de humedad III

SUBCUENCA	NC
1	90.29
2	91.27
3	90.59
4	88.91
5	90.73
6	87.93
7	90.73
8	88.15
9	87.22
10	87.34
11	85.54

Tabla 6. 11: Numero de curva para ((condición (III))

Fuentes: Elaborado por el Grupo de Tesis.

6.6.1.2 MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN (TRANSFORM)

La transformación del exceso de precipitación (precipitación neta) en escorrentía superficial al final de cada subdivisión, se realiza por el método de Hidrograma Unitario del SCS. Se basa en la definición de un hidrograma unitario adimensional, solo requiere del parámetro T_{lag} , tiempo de retardo, que se define como la diferencia de tiempo entre el centro de masa del exceso de precipitación y la punta del Hidrograma Unitario. El T_{lag} puede ser relacionado con el tiempo de concentración mediante la siguiente expresión:

$$T_{lag} = 0.7 T_c$$

El tiempo de concentración se define como: tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado. Este punto es aquel desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida.

Los datos de T_{lag} utilizados se muestran en la Tabla 6.3 que se presentó anteriormente.

6.6.1.3 FLUJO BASE (BASEFLOW)

Este método permite sumar a la escorrentía directa la escorrentía básica, si existía previamente. El flujo base ocurre siempre que exista un almacenamiento subterráneo. Este ocurre cuando los cauces interceptan el agua subterránea, ya sea desde el nivel freático como de acuíferos más profundos. Es también llamado caudal base.

En este caso se consideró constante el flujo base que circula a través de la cuenca, y este se calculó en base a datos proporcionados por el MARN la DGOA y este anda alrededor de $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$, se calculó de la siguiente manera:

AFOROS EN RIO SUCIO PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL BASE

RIO: **SUCIO** LATITUD: **13°49' 25.1"**

ESTACION: **JOYA DE CEREN** LONGITUD: **89 ° 21' 21.8"**

Fecha	Ubicación	Lectura mira (m)	hora	CAUDAL	
				(m3/s)	(lts/seg)
10/01/2011	20 Mts. Aguas arriba de estación	0.47	09:45/10:07	4.1650	4165.00
15/02/2011	20 Mts. Aguas arriba de estación	0.43	08:35/09:00	5.9240	5924.00
15/03/2011	20 Mts. Aguas arriba de estación	0.43	08:07/08:30	4.9390	4939.00
14/04/2011	20 Mts. Aguas arriba de estación	0.37	08:10/08:35	4.4140	4414.00
24/06/2011	22 Mts. Aguas arriba de estación	0.66/0.65	10:00/10:30	10.2150	10215.00
15/07/2011	20 Mts. Aguas arriba de estación	0.60	09:20/09:45	9.8430	9843.00
25/07/2011	40 Mts. Aguas arriba de estación	0.49	10:57/11:20	5.8420	5842.00
10/09/2011	20 Mts. Aguas arriba de estación	0.52	09:50/10:20	6.6310	6631.00
30/09/2011	40 Mts. Aguas arriba de estación	0.62	10:00/10:30	8.5760	8576.00

Tabla 6. 12: Aforos del rio sucio, estacion joya de ceren
Fuente: MARN

$$\text{Caudal promedio} = 6.7 \text{ m}^3/\text{s}$$

RIO: **SUCIO** LATITUD: **14°015' 8.4"**

ESTACION: **LOS DOS CERROS** LONGITUD: **89 ° 16' 31"**

Fecha	Ubicación	lectura mira (m)	hora	CAUDAL	
				(m3/s)	(lts/seg)
20/01/2011	5 Mts. Aguas abajo de estación	0.69	10:30/11:15	4.9780	4978.00
04/03/2011	10 Mts. Aguas abajo de estación	0.67	09:40/10:05	3.6790	3679.00
04/04/2011	6 Mts. Aguas abajo de estación	0.63	10:17/10:35	3.9990	3999.00
22/07/2011	8 Mts. Aguas abajo de estación	0.91	10:21/10:50	9.5900	9590.00
06/09/2011	5 Mts. Aguas abajo de estación	0.93	10:00/10:35	9.6170	9617.00
20/01/2011	5 Mts. Aguas abajo de estación	0.69	10:30/11:15	4.9780	4978.00
04/03/2011	10 Mts. Aguas abajo de estación	0.67	09:40/10:05	3.6790	3679.00
04/04/2011	6 Mts. Aguas abajo de estación	0.63	10:17/10:35	3.9990	3999.00

Tabla 6. 13: Aforos del rio sucio, estacion los dos cerros

Fuente: MARN

$$Caudal\ promedio = 6.4\ m^3/s$$

$$Caudal\ promedio\ TOTAL = 6.6\ m^3/s$$

6.6.1.4 ROUTING

Permite calcular cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce o a través de un depósito o embalse. Existen diferentes métodos para su cálculo.

En el método de Muskingum, la ecuación está planteada pensando en que el almacenamiento en un tramo de río se puede dividir en dos partes. El primero es un almacenamiento en prisma, que depende solamente de las salidas y sería el único si el nivel de superficie libre del agua fuera paralelo al fondo del río. Este almacenamiento se puede comparar con el que se tiene en el caso de un vaso. El otro tipo de almacenamiento, que en general no existe en el caso de vasos, llamado almacenamiento en cuña, se debe al efecto de la pendiente de la superficie libre del agua en el gasto. Ésta pendiente depende tanto de las entradas como de las salidas, y en el método de Muskingum el almacenamiento en cuña se toma como una función lineal de la diferencia de ambas.

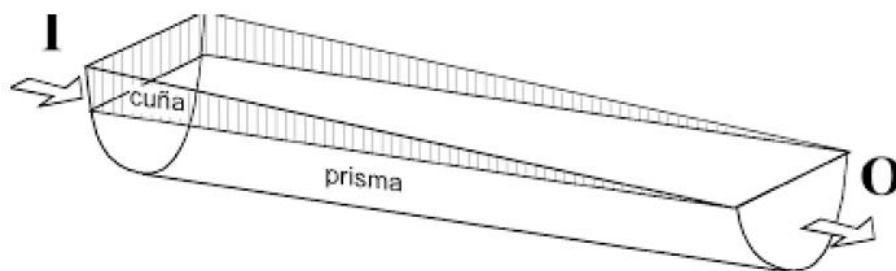


Figura 6. 13: Esquema del método de Muskingum

Fuente: TRANSITO DE EVENIDAS-2do MATERIAL DE APOYO UNIDAD 7.pdf

Durante el período de crecida, el caudal de entrada en una sección aguas arriba es superior al de salida en una sección aguas abajo. El almacenamiento toma la forma de un prisma con la base aguas arriba.

Así y suponiendo que el área de la sección transversal del flujo de creciente es directamente proporcional al caudal en la sección, el volumen de almacenamiento por prisma es igual a KQ donde K es un factor de proporcionalidad, y el volumen de almacenamiento por cuña es igual a $KX(I-Q)$, donde X es un factor de ponderación dentro del rango $0 < X < 0.5$. El almacenamiento total es por consiguiente la suma de dos componentes.

El valor de X depende de la forma de almacenamiento por cuña modelado. El valor de X varía desde 0.0 para un almacenamiento tipo embalse, donde no existe una cuña, hasta 0.5 para una cuña completamente desarrollada, donde no habría un pico. En términos generales, si “ x ” se aproxima a 0.0 son cauces muy caudalosos y de pendiente pequeña y si “ x ” se aproxima a 0.5 sucede lo contrario. Es recomendable tomar $x = 0.2$ como un valor medio.

El parámetro K es el tiempo de tránsito de una onda de creciente a través del tramo de canal. En el HEC – HMS el elemento reach, es el que permite definir el tránsito de avenidas.³²

³² Desde Métodos de transformación hasta Routing la Información se extrajo del trabajo de graduación “UTILIZACION DEL MODELO HEC-HMS EN SISTEMAS DE PRONOSTICOS HIDROLOGICOS Y VERIFICACION DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MODELO CPMORH EN LA CUENCA DEL RIO SUCIO”

TRAMO	K (HORAS)	X	SUBTRAMOS
1-2	0.943	0.2	3
2-3	1.079	0.2	3
3-SALIDA	2.729	0.2	7

Tabla 6. 14: Parametros de Muskingum para la simulación en HEC-HMS
Fuentes: Elaborado por el Grupo de Tesis.

6.6.2 MODELO METEOROLÓGICO.

Se definieron 4 modelos meteorológicos, debido a que se han analizado los eventos de lluvia observada y lluvia pronosticada del evento aislado del 17 de octubre de 2015 y el evento extenso de la depresión tropical DT 12E respectivamente.

Las características a ingresar para definir el modelo meteorológico para los eventos de lluvia pronosticada son:

- Se selecciona el método de precipitación del “hidrograma especificado”
- Sistema de unidades “métrico”
- Para este modelo se asume un pluviómetro por subcuenca.

The image shows two side-by-side screenshots of the HEC-HMS Meteorology Model configuration window. Both windows have tabs for 'Basins' and 'Options'. The left window is titled 'Met Name: 17 DE OCTUBRE 2015' and the right window is titled 'Met Name: DT 12E'. Both configurations have the following settings:

- Description: (empty text box)
- Shortwave: --None--
- Longwave: --None--
- Precipitation: Specified Hyetograph
- Evapotranspiration: --None--
- Snowmelt: --None--
- Unit System: Metric
- Replace Missing: Set To Default

Figura 6. 14: Modelo meteorologico de los eventos pronosticados

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

Las características a ingresar para definir el modelo para los eventos de lluvia observada son:

- Se selecciona el método de precipitación de “Peso de pluviometro”, para el cual se necesita el porcentaje de influencia que tiene cada pluviometro en cada subcuenca. (calculado con el software ArcGis 10.3.1.)

SUBCUENCA	ESTACION	% INFLUENCIA
SC-1	BOQUERON	0.73
	COATEPEQUE	0.80
	PICACHO	98.46
SC-2	COATEPEQUE	91.06
	PICACHO	8.94
SC-3	COATEPEQUE	95.34
	PICACHO	4.66
SC-4	BOQUERON	12.66
	COATEPEQUE	0.81
	PICACHO	86.54
SC-5	COATEPEQUE	100.00
SC-6	BOQUERON	9.16
	COATEPEQUE	71.32
	PROCAFE	19.53
SC-7	COATEPEQUE	100.00
SC-8	BOQUERON	77.90
	COATEPEQUE	2.27
	PICACHO	19.84
SC-9	BOQUERON	66.85
	COATEPEQUE	2.08
	PROCAFE	31.07
SC-10	BOQUERON	2.93
	COATEPEQUE	1.05
	PROCAFE	96.02
SC-11	COATEPEQUE	28.75
	PROCAFE	71.25

Tabla 6. 15: Porcentaje de influencia de cada pluviómetro en cada subcuenca evento DT 12E

Fuente: Elaborado por grupo de tesis.

SUBCUENCA	ESTACION	% INFLUENCIA
SC-1	BOQUERON	67.93
	COATEPEQUE	10.25
	ZAPOTITAN	21.82
SC-2	COATEPEQUE	19.59
	ZAPOTITAN	80.41
SC-3	COATEPEQUE	67.79
	ZAPOTITAN	32.21
SC-4	BOQUERON	41.33
	ZAPOTITAN	58.67
SC-5	COATEPEQUE	62.10
	ZAPOTITAN	37.90
SC-6	COATEPEQUE	20.31
	PROCAFE	0.86
	ZAPOTITAN	78.83
SC-7	COATEPEQUE	35.33
	ZAPOTITAN	64.67
SC-8	BOQUERON	14.64
	ZAPOTITAN	85.36
SC-9	BOQUERON	43.09
	PROCAFE	15.00
	ZAPOTITAN	41.90
SC-10	BOQUERON	4.74
	PROCAFE	70.43
	ZAPOTITAN	24.84
SC-11	PROCAFE	10.86
	ZAPOTITAN	89.14

Tabla 6. 16: Porcentaje de influencia de cada pluviómetro en cada subcuena evento 17 de Octubre de 2015 y el evento extenso de la depresión tropical DT 12E.

Fuente: Elaborado por grupo de tesis.

Meteorology Model Basins Options		Meteorology Model Basins Options	
Met Name:	17 DE OCTUBRE 2015(OBSER	Met Name:	DT 12E (OBSERVADO)
Description:		Description:	
Shortwave:	--None--	Shortwave:	--None--
Longwave:	--None--	Longwave:	--None--
Precipitation:	Gage Weights	Precipitation:	Gage Weights
Evapotranspiration:	--None--	Evapotranspiration:	--None--
Snowmelt:	--None--	Snowmelt:	--None--
Unit System:	Metric	Unit System:	Metric
Replace Missing:	Set To Default	Replace Missing:	Set To Default

Figura 6. 15: Modelo meteorologico de los eventos observados

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

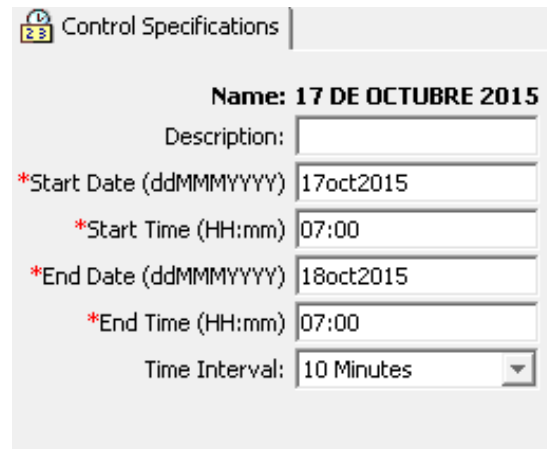
6.6.3 ESPECIFICACIONES DE CONTROL

Solamente se crearon 2 especificaciones de control, porque para nuestro caso, se consideran el mismo periodo de estudio tanto para lluvia pronosticada, como para la observada, para el mismo evento. (En las figuras siguientes, se observa el periodo de estudio para cada caso).

Control Specifications	
Name:	DT 12E
Description:	
*Start Date (ddMMMYYYY)	10oct2011
*Start Time (HH:mm)	07:00
*End Date (ddMMMYYYY)	21oct2011
*End Time (HH:mm)	07:00
Time Interval:	10 Minutes

Figura 6. 16: Especificaciones de control para el evento DT 12E

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis



Control Specifications	
Name:	17 DE OCTUBRE 2015
Description:	
*Start Date (ddMMYYYY)	17oct2015
*Start Time (HH:mm)	07:00
*End Date (ddMMYYYY)	18oct2015
*End Time (HH:mm)	07:00
Time Interval:	10 Minutes

Figura 6. 17: Especificaciones de control para el evento 17 DE OCTUBRE DE 2015

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

6.6.4 DATOS SERIES DE TIEMPO

Al momento de hacer la modelacion de la cuenca, ademas de los componentes antes mencionados, hay un componente adicional que se llama Datos series de tiempo, que es donde se crean los pluviometros necesarios para poder llevar a cabo la simulacion, ademas se coloca el periodo de estudio en el que se tomara en cuenta los datos de cada pluviometro, intervalo de tiempo, en nuestro caso, cada 3 horas, independientemente del evento en cuestion, las unidades, dependen de si es un evento de lluvia pronosticado u observado, ya que para esta simulacion se emplearon, para los eventos pronosticados unidades "Milimetros incremental", y para los observados, "Acumulado milimetros"; y se agregan los datos de lluvia de cada pluviometro.

En este caso se tomo como periodo de estudio 3 horas para ambos eventos, suponiendo que con ese periodo se establecen buenos resultado ya que comparando

con el tiempo de concentracion en promedio que es 170 minutos, se encuentra en un tiempo que es compable con el mismo.

6.6.5 SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Se crearon 4 simulaciones que se detallan a continuacion:

1. Evento: 17 de octubre de 2015 (Observado).

- Agregamos el nombre de la simulacion en este caso 17_OCT_2015(OBSERVADO)
- Se selecciona el modelo de cuenca creado en este caso “Sucio”
- Se selecciona el modelo meteorologico que influira en la simulacion, en este caso “17 de octubre de 2015 (observado)”.
- Se selecciona las especificaciones de control que rigen la simulacion en este caso “17 de octubre de 2015”, por ultimo solo se selecciona “Finish” y automaticamente aparece la simulacion en el explorador de cuencas opcion compute.

2. Evento: 17 de octubre de 2015 (Pronosticado).

- Agregamos el nombre de la simulacion en este caso 17_OCT_2015
- Se selecciona el modelo de cuenca creado en este caso “Sucio”
- Se selecciona el modelo meteorologico que influira en la simulacion en este caso “17 de octubre de 2015”.
- Se selecciona las especificaciones de control que rigen la simulacion en este caso “17 de octubre de 2015”, por ultimo solo se selecciona “Finish” y automaticamente aparece la simulacion en el explorador de cuencas opcion compute.


3. Evento: DT-12E (Observado).

- Agregamos el nombre de la simulacion en este caso DT 12E(OBSERVADA)
- Se selecciona el modelo de cuenca creado en este caso “Sucio”
- Se selecciona el modelo meteorologico que influira en la simulacion en este caso “DT 12E(OBSERVADO)”.
- Se selecciona las especificaciones de control que rigen la simulacion en este caso “DT 12E”, por ultimo solo se selecciona “Finish” y automaticamente aparece la simulacion en el explorador de cuencas opcion compute.

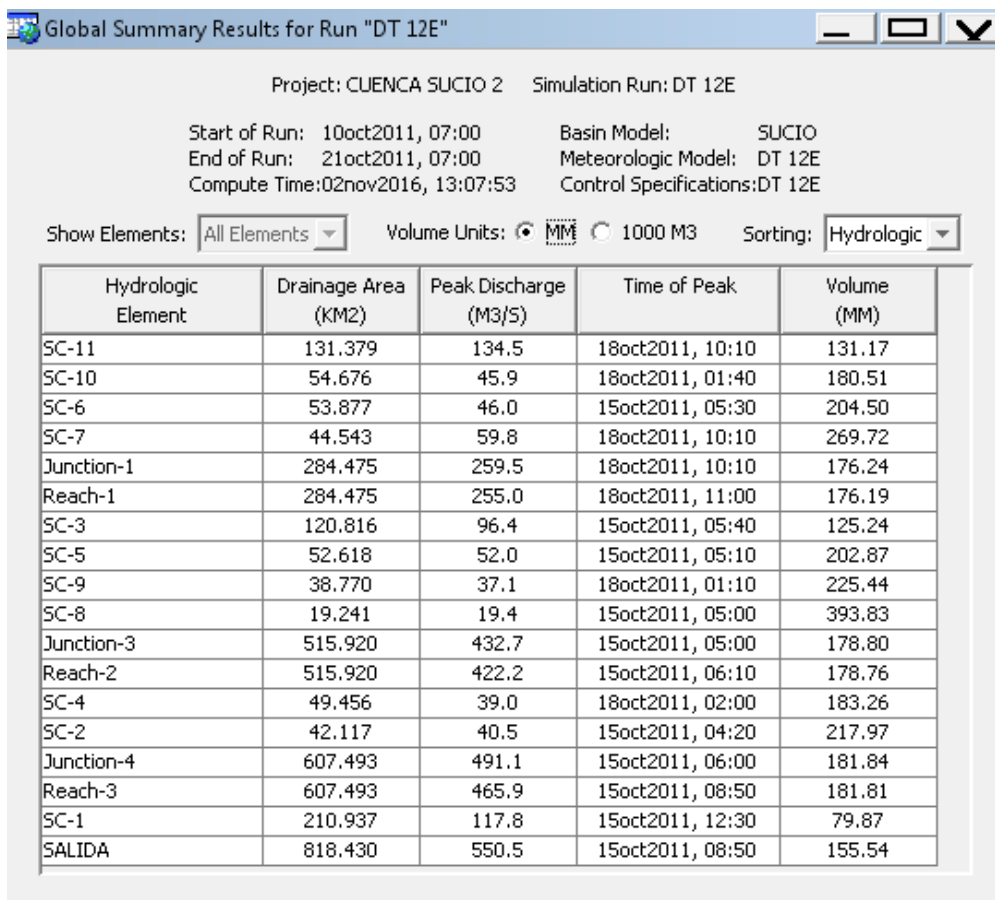
4. Evento: DT-12E (Observado).

- Agregamos el nombre de la simulacion en este caso DT 12E
- Se selecciona el modelo de cuenca creado en este caso “Sucio”
- Se selecciona el modelo meteorologico que influira en la simulacion en este caso “DT 12E”. Se selecciona las especificaciones de control que rigen la simulacion en este caso “DT 12E”, por ultimo solo se selecciona “Finish” y automaticamente aparece la simulacion en el explorador de cuencas opcion compute.

Para que correr las simulaciones creadas, hay que acceder al menu “compute” del explorador de cuenca, abrimos la carpeta “Simulation Runs” y seleccionamos la simulacion la cual se quiere correr, una vez seleccionada la simulacion solamente se le

da clic al boton , se espera a que cargue el 100% y a continuación "Close". (Se hace lo mismo con las 3 simulaciones restantes)

El resultado que interesa es el elemento de SALIDA, que es el que representa la salida física de la cuenca.



Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-11	131.379	134.5	18oct2011, 10:10	131.17
SC-10	54.676	45.9	18oct2011, 01:40	180.51
SC-6	53.877	46.0	15oct2011, 05:30	204.50
SC-7	44.543	59.8	18oct2011, 10:10	269.72
Junction-1	284.475	259.5	18oct2011, 10:10	176.24
Reach-1	284.475	255.0	18oct2011, 11:00	176.19
SC-3	120.816	96.4	15oct2011, 05:40	125.24
SC-5	52.618	52.0	15oct2011, 05:10	202.87
SC-9	38.770	37.1	18oct2011, 01:10	225.44
SC-8	19.241	19.4	15oct2011, 05:00	393.83
Junction-3	515.920	432.7	15oct2011, 05:00	178.80
Reach-2	515.920	422.2	15oct2011, 06:10	178.76
SC-4	49.456	39.0	18oct2011, 02:00	183.26
SC-2	42.117	40.5	15oct2011, 04:20	217.97
Junction-4	607.493	491.1	15oct2011, 06:00	181.84
Reach-3	607.493	465.9	15oct2011, 08:50	181.81
SC-1	210.937	117.8	15oct2011, 12:30	79.87
SALIDA	818.430	550.5	15oct2011, 08:50	155.54

Figura 6. 18: Resultado sumatoria global DT 12E

Fuente: Grupo de Tesis

Global Summary Results for Run "DT 12E (OBSERVADA)"

Project: CUENCA SUCIO 2 Simulation Run: DT 12E (OBSERVADA)

Start of Run: 10oct2011, 07:00 Basin Model: SUCIO
 End of Run: 21oct2011, 07:00 Meteorologic Model: DT 12E (OBSERVADO)
 Compute Time: 02nov2016, 13:08:04 Control Specifications: DT 12E

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-11	131.379	291.7	12oct2011, 22:00	659.64
SC-10	54.676	277.1	15oct2011, 22:40	698.14
SC-6	53.877	288.6	16oct2011, 00:00	792.78
SC-7	44.543	120.0	12oct2011, 22:00	862.36
Junction-1	284.475	749.1	16oct2011, 03:20	724.00
Reach-1	284.475	745.1	16oct2011, 04:20	723.99
SC-3	120.816	307.4	12oct2011, 22:10	758.39
SC-5	52.618	140.4	12oct2011, 22:00	840.73
SC-9	38.770	212.7	15oct2011, 22:00	759.69
SC-8	19.241	96.1	15oct2011, 23:10	897.33
Junction-3	515.920	1250.1	16oct2011, 04:20	753.10
Reach-2	515.920	1232.0	16oct2011, 05:20	753.06
SC-4	49.456	191.3	15oct2011, 23:10	578.83
SC-2	42.117	110.2	12oct2011, 22:00	846.24
Junction-4	607.493	1436.1	16oct2011, 05:10	745.34
Reach-3	607.493	1401.9	16oct2011, 07:40	744.70
SC-1	210.937	646.2	16oct2011, 02:40	463.75
SALIDA	818.430	1872.3	16oct2011, 06:20	672.29

Figura 6. 19: Resultado sumatoria global DT 12E(OBSERVADO)

Fuente: Grupo de Tesis

Global Summary Results for Run "17_OCT_2015"

Project: CUENCA SUCIO 2 Simulation Run: 17_OCT_2015

Start of Run: 17oct2015, 07:00 Basin Model: SUCIO
End of Run: 18oct2015, 07:00 Meteorologic Model: 17 DE OCTUBRE 2015
Compute Time: 02nov2016, 13:08:11 Control Specifications: 17 DE OCTUBRE 2015

Show Elements: Volume Units: MM 1000 M3 Sorting:

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-11	131.379	50.6	18oct2015, 01:20	15.09
SC-10	54.676	43.1	18oct2015, 01:40	27.44
SC-6	53.877	28.3	18oct2015, 03:40	24.84
SC-7	44.543	29.5	17oct2015, 16:50	30.92
Junction-1	284.475	140.5	18oct2015, 01:40	21.79
Reach-1	284.475	137.2	18oct2015, 02:30	21.08
SC-3	120.816	61.6	18oct2015, 03:10	24.02
SC-5	52.618	32.0	18oct2015, 02:10	30.92
SC-9	38.770	30.3	18oct2015, 01:10	30.79
SC-8	19.241	14.6	18oct2015, 02:50	43.28
Junction-3	515.920	266.5	18oct2015, 02:30	24.33
Reach-2	515.920	262.5	18oct2015, 03:30	23.21
SC-4	49.456	28.2	18oct2015, 02:40	26.23
SC-2	42.117	31.8	18oct2015, 01:20	35.54
Junction-4	607.493	316.6	18oct2015, 03:30	24.31
Reach-3	607.493	307.7	18oct2015, 06:20	20.79
SC-1	210.937	63.4	18oct2015, 06:40	13.04
SALIDA	818.430	371.1	18oct2015, 06:30	18.79

Figura 6. 20: Resultado sumatoria global 17 de octubre de 2015

Fuente: Grupo de Tesis

Global Summary Results for Run "17_OCT_2015(OBSERVADO)"

Project: CUENCA SUCIO 2 Simulation Run: 17_OCT_2015(OBSERVADO)

Start of Run: 17oct2015, 07:00 Basin Model: SUCIO
 End of Run: 18oct2015, 07:00 Meteorologic Model: 17 DE OCTUBRE 2015(OBSERVADO)
 Compute Time: 02nov2016, 13:08:19 Control Specifications: 17 DE OCTUBRE 2015

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SC-11	131.379	44.7	18oct2015, 04:20	12.13
SC-10	54.676	48.0	18oct2015, 04:40	34.14
SC-6	53.877	20.0	18oct2015, 05:20	19.56
SC-7	44.543	24.8	17oct2015, 13:50	27.81
Junction-1	284.475	134.3	18oct2015, 04:30	20.22
Reach-1	284.475	132.1	18oct2015, 05:20	19.27
SC-3	120.816	58.4	17oct2015, 14:30	22.77
SC-5	52.618	30.9	17oct2015, 14:10	28.82
SC-9	38.770	37.9	18oct2015, 04:10	39.49
SC-8	19.241	14.2	18oct2015, 05:00	40.78
Junction-3	515.920	259.9	18oct2015, 04:50	23.39
Reach-2	515.920	256.1	18oct2015, 05:50	22.06
SC-4	49.456	38.3	18oct2015, 05:00	31.92
SC-2	42.117	24.0	17oct2015, 13:30	27.57
Junction-4	607.493	308.1	18oct2015, 05:40	23.24
Reach-3	607.493	276.6	18oct2015, 07:00	19.54
SC-1	210.937	156.7	18oct2015, 07:00	27.84
SALIDA	818.430	433.3	18oct2015, 07:00	21.68

Figura 6. 21: Resultado sumatoria global 17 de octubre de 2015 (Observado)

Fuente: Grupo de Tesis

En la Figura 6. 34 Se muestra de manera gráfica los caudales de salida de la cuenca del rio sucio para el evento DT 12E, en la cual se puede apreciar que en el primer día de precipitación los caudales son muy similares, y se puede observar que en el día 16 de octubre de 2011 es en el cual se da la mayor diferencia de caudales que es de 1743.4 m³/s, en el evento aislado del día 17 de octubre del 2015 que se puede apreciar en la Figura 6. 305 la mayor diferencia de caudales es de 216.3 m³/s que se da en el rango de tiempo de 17:00-17:05, y el caudal inicial se mantiene similar las primeras 4 horas de duración del evento.

COMPARACION DE RESULTADOS DEL EVENTO DT-12E POR DIA

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

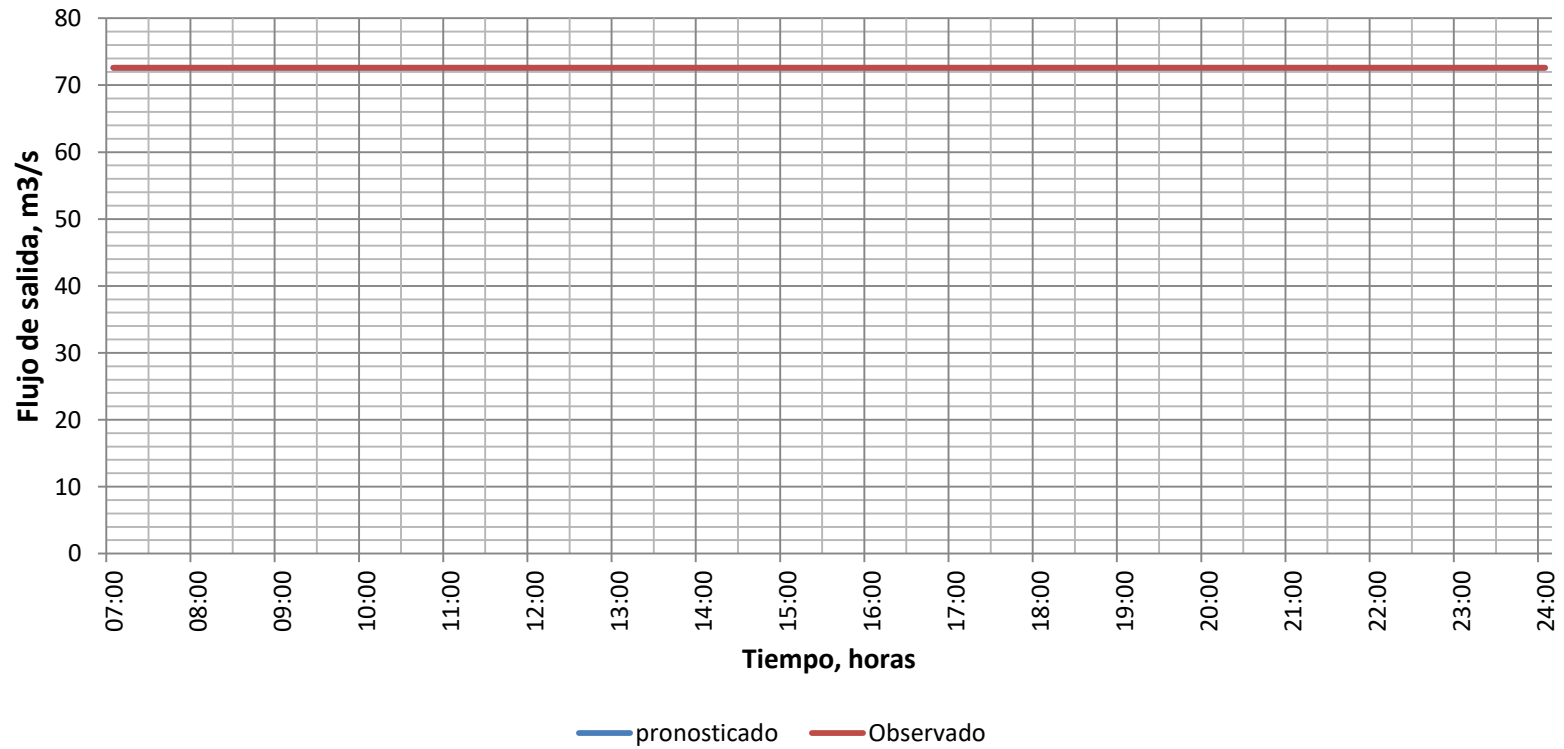


Figura 6. 22: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 10 de Octubre de 2011

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

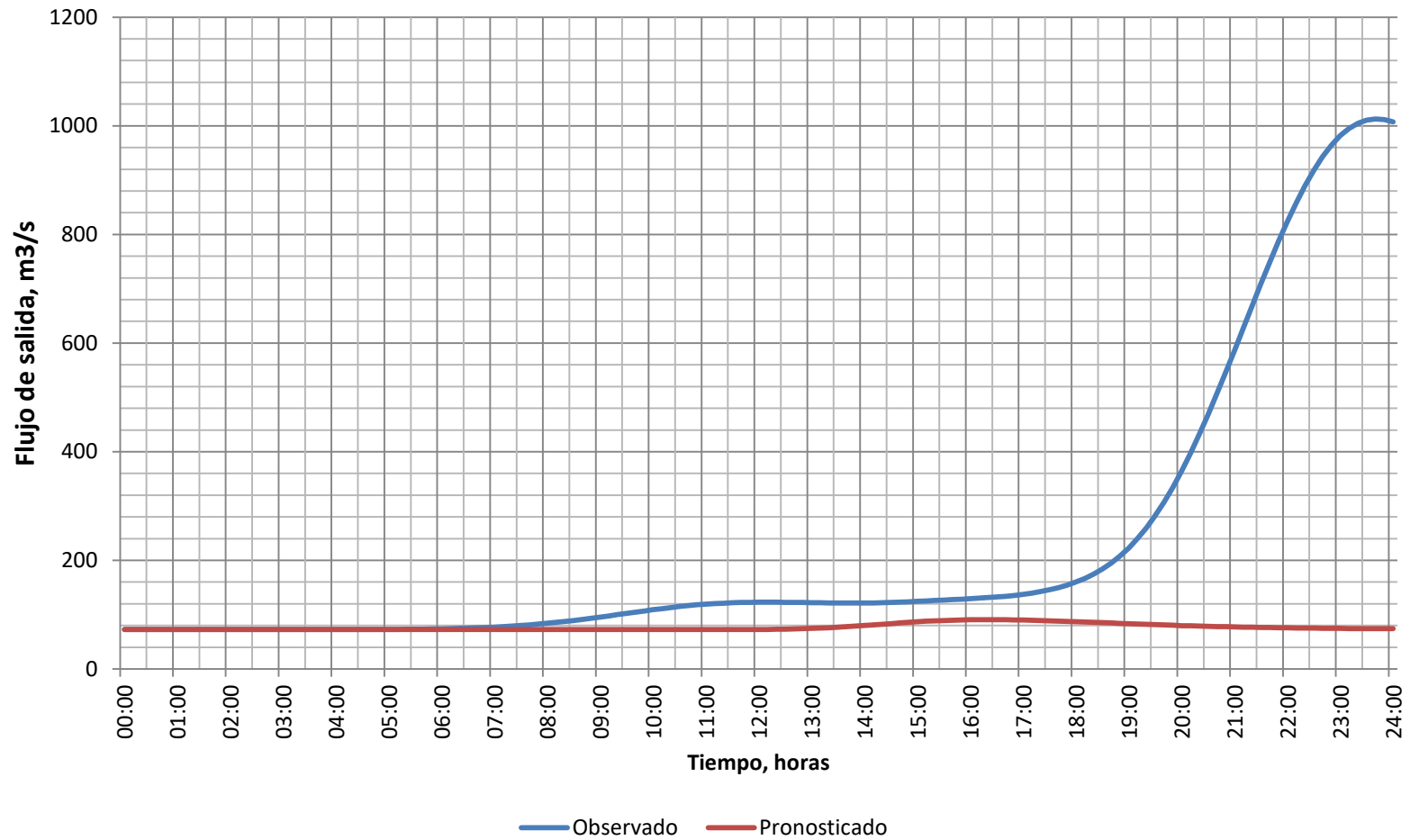


Figura 6. 23: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 11 de Octubre de 2011

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

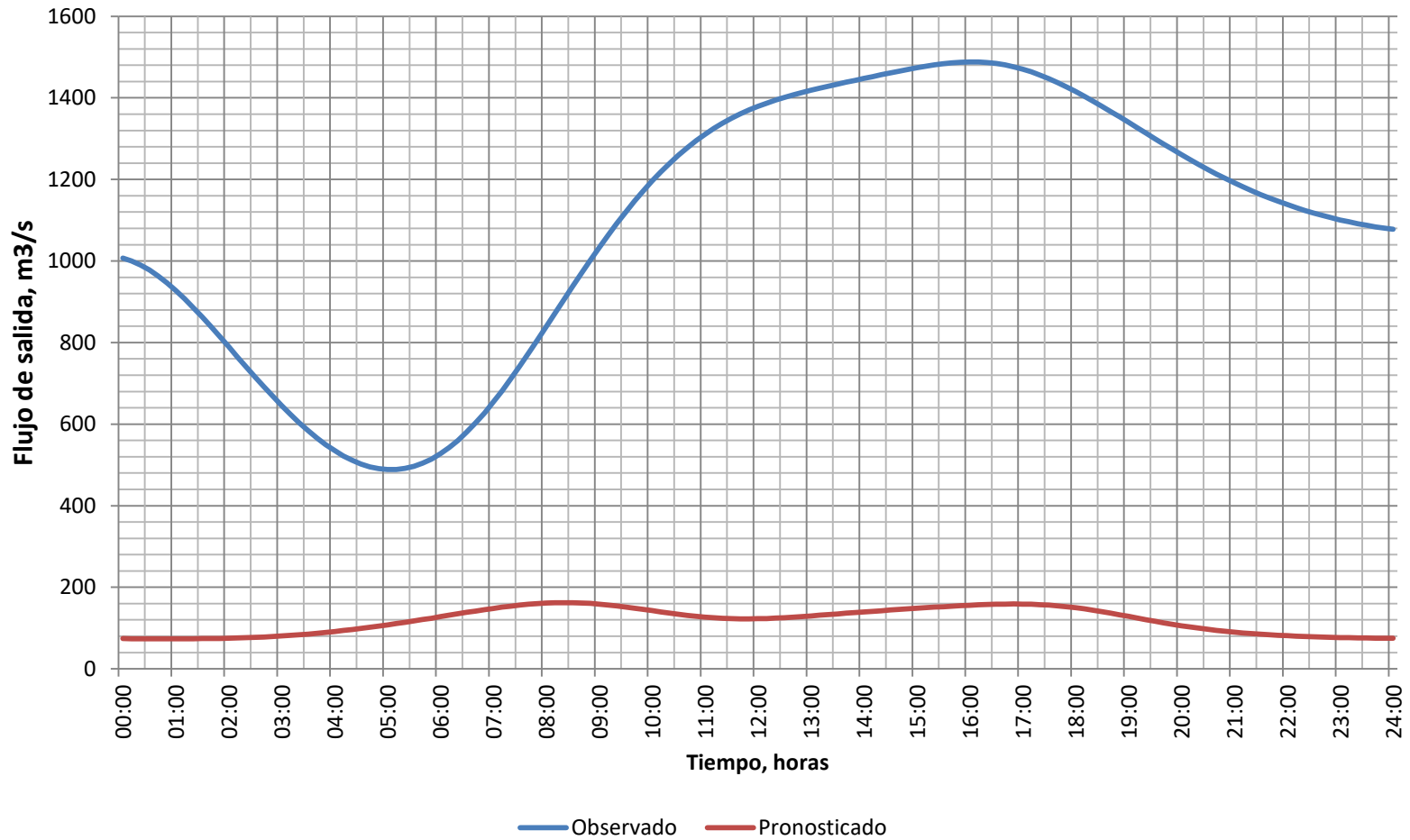


Figura 6. 24: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 12 de Octubre de 2011

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

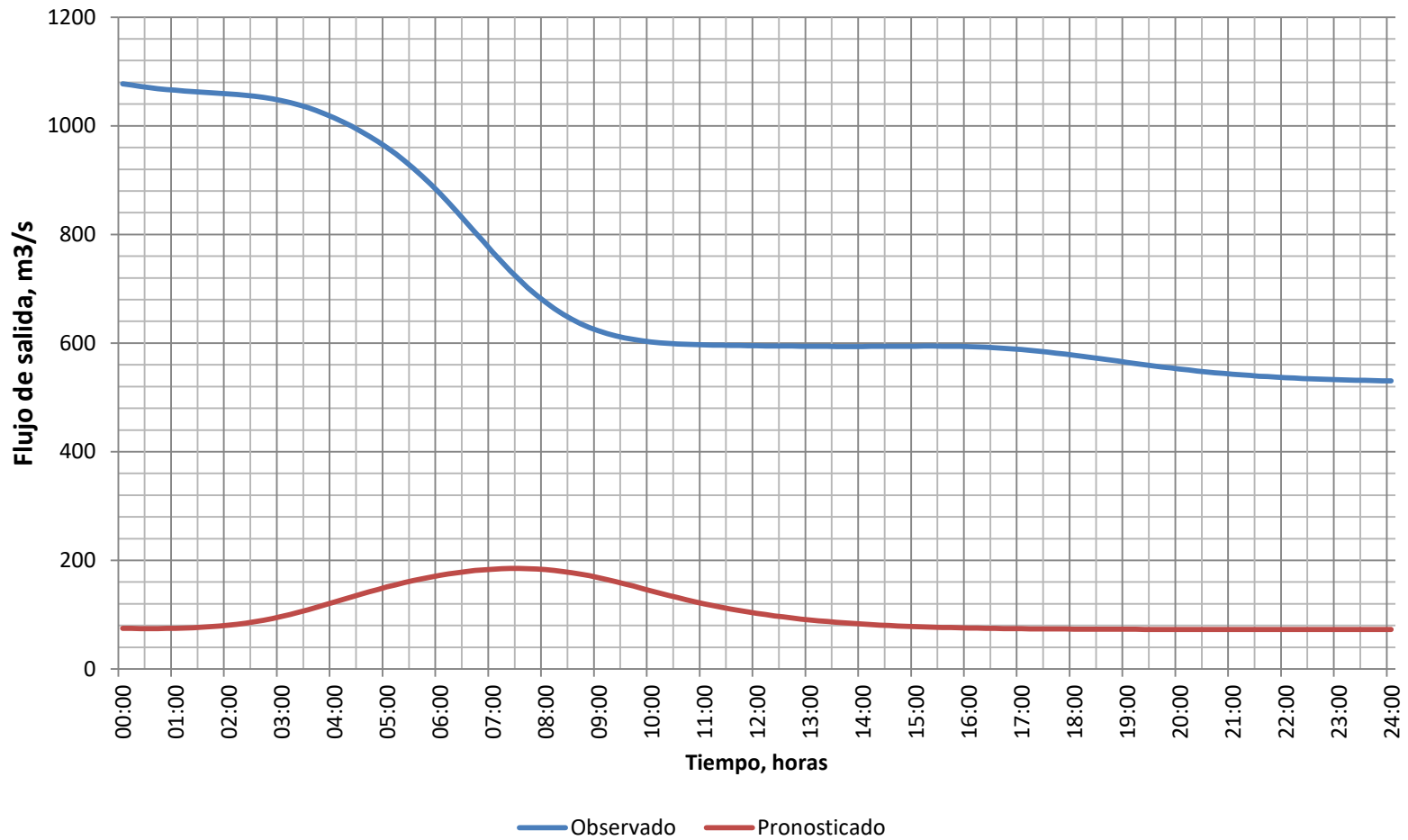


Figura 6. 25: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 13 de Octubre de 2011
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

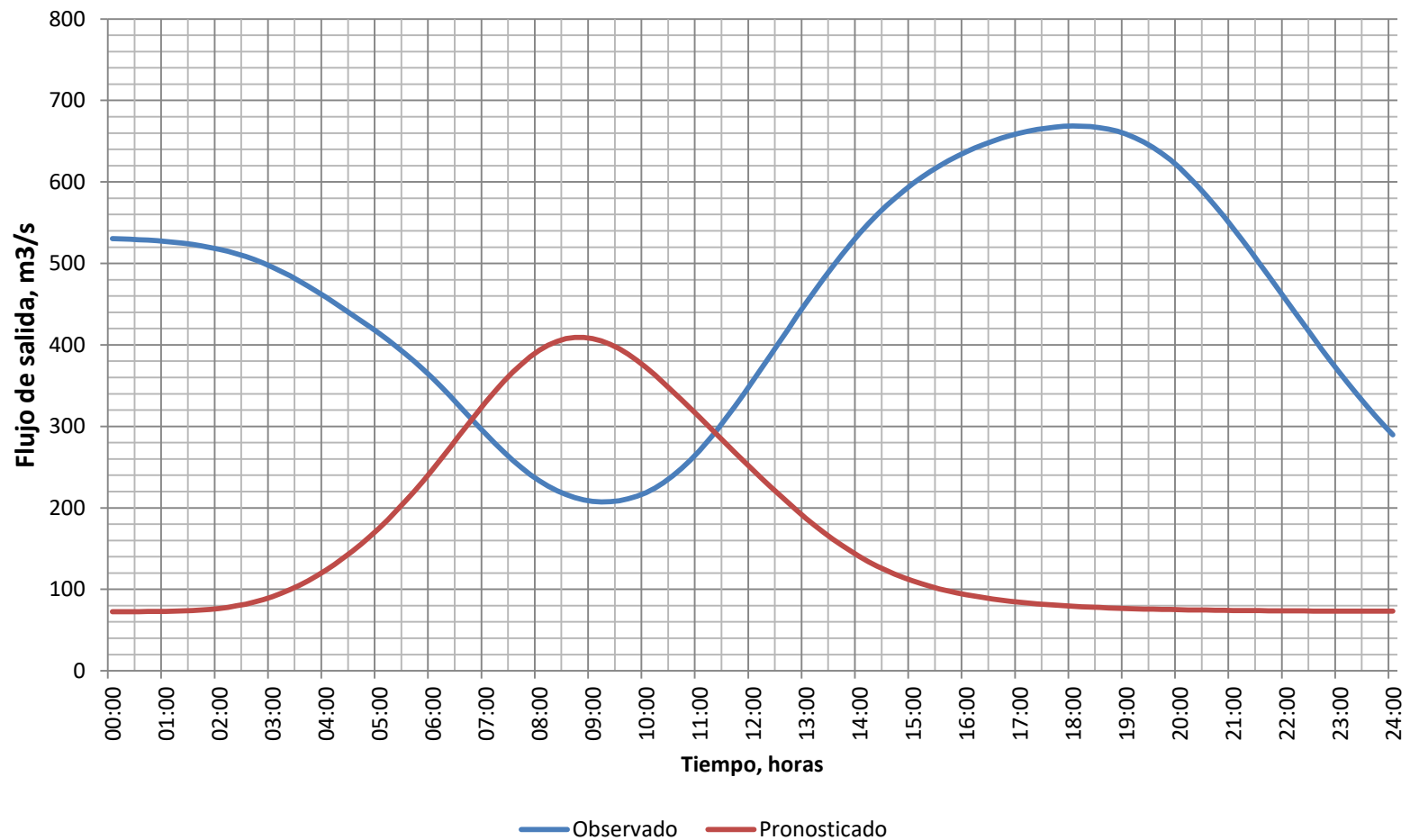


Figura 6. 26: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 14 de Octubre de 2011
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

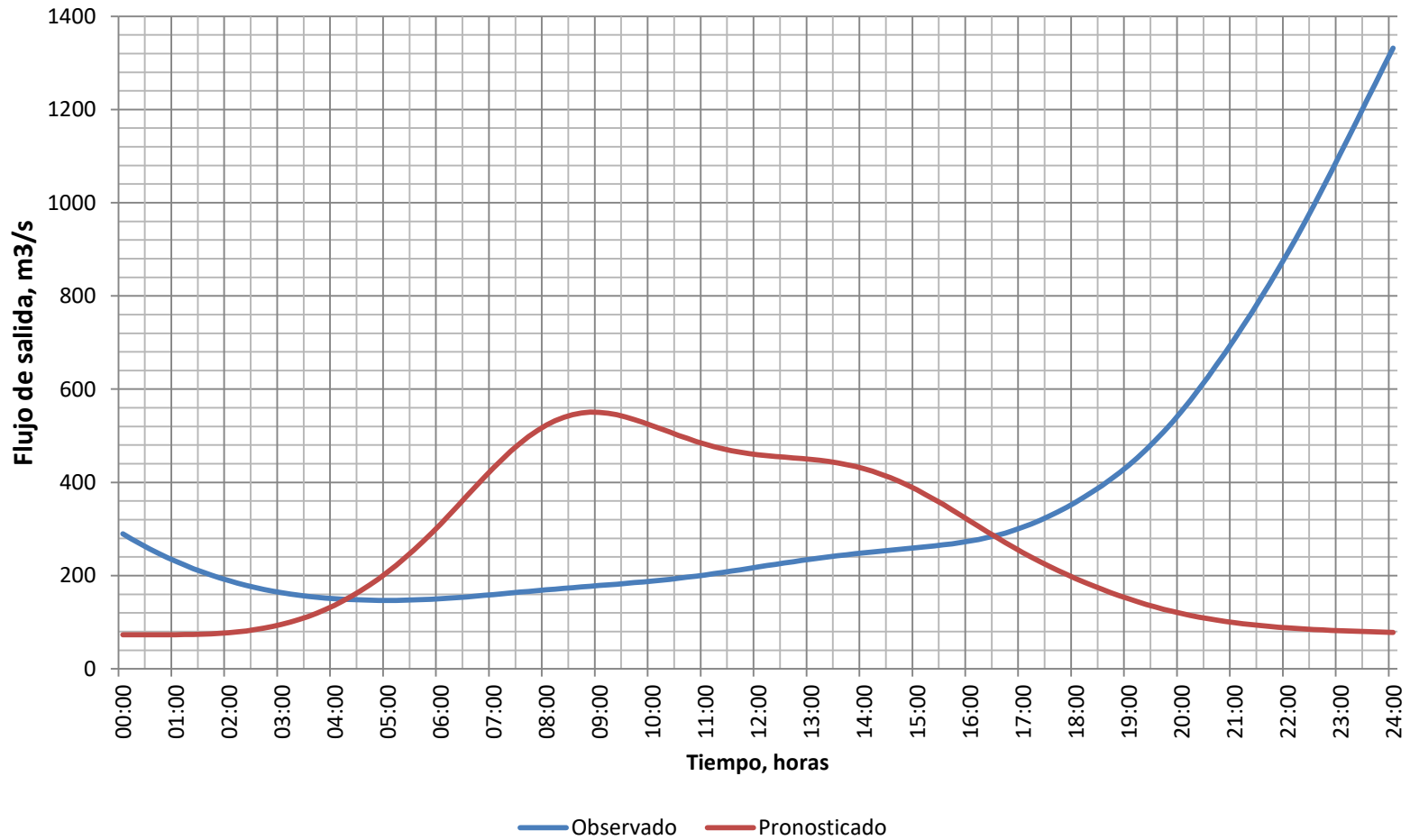


Figura 6. 27: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 15 de Octubre de 2011
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

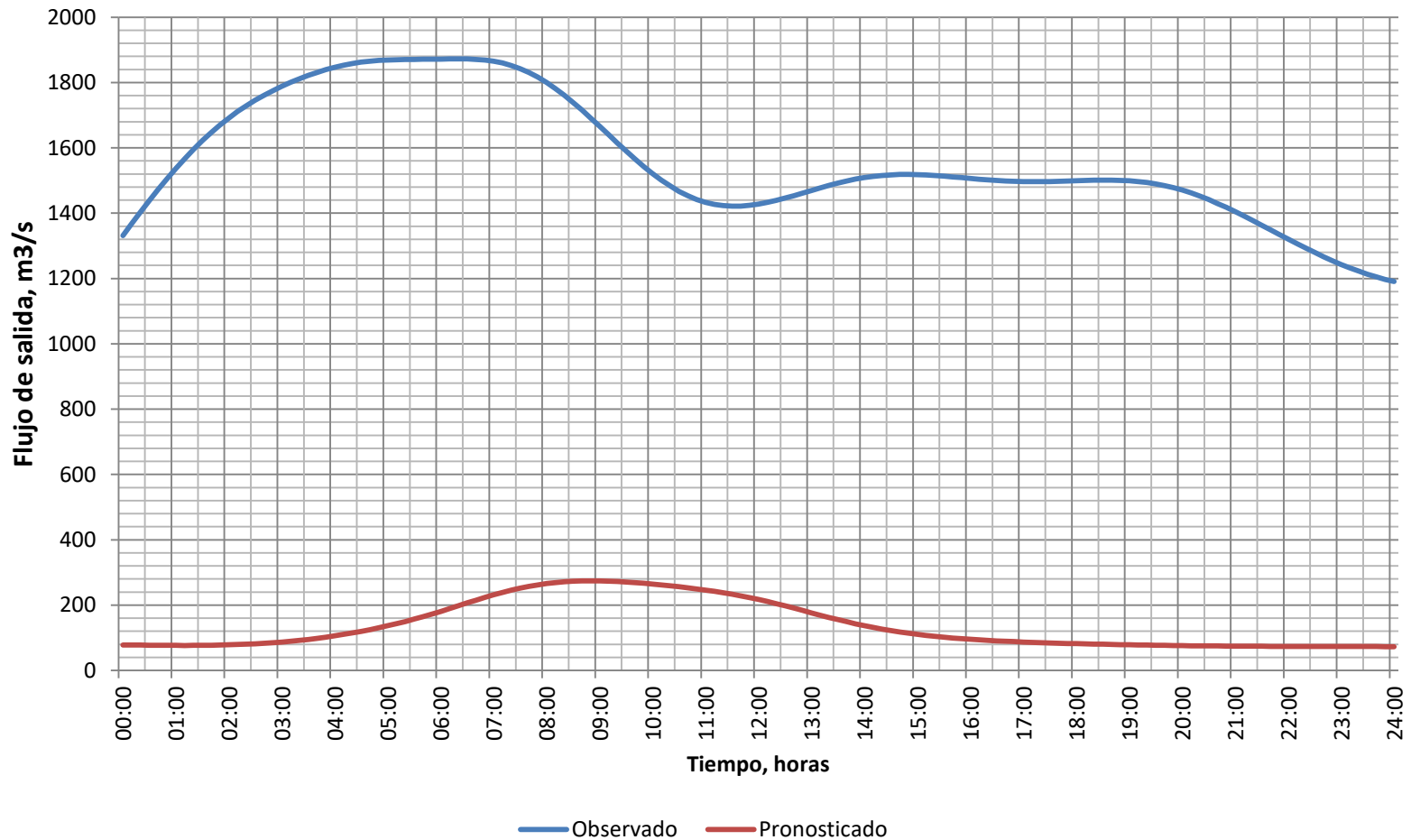


Figura 6. 28: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 16 de Octubre de 2011
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

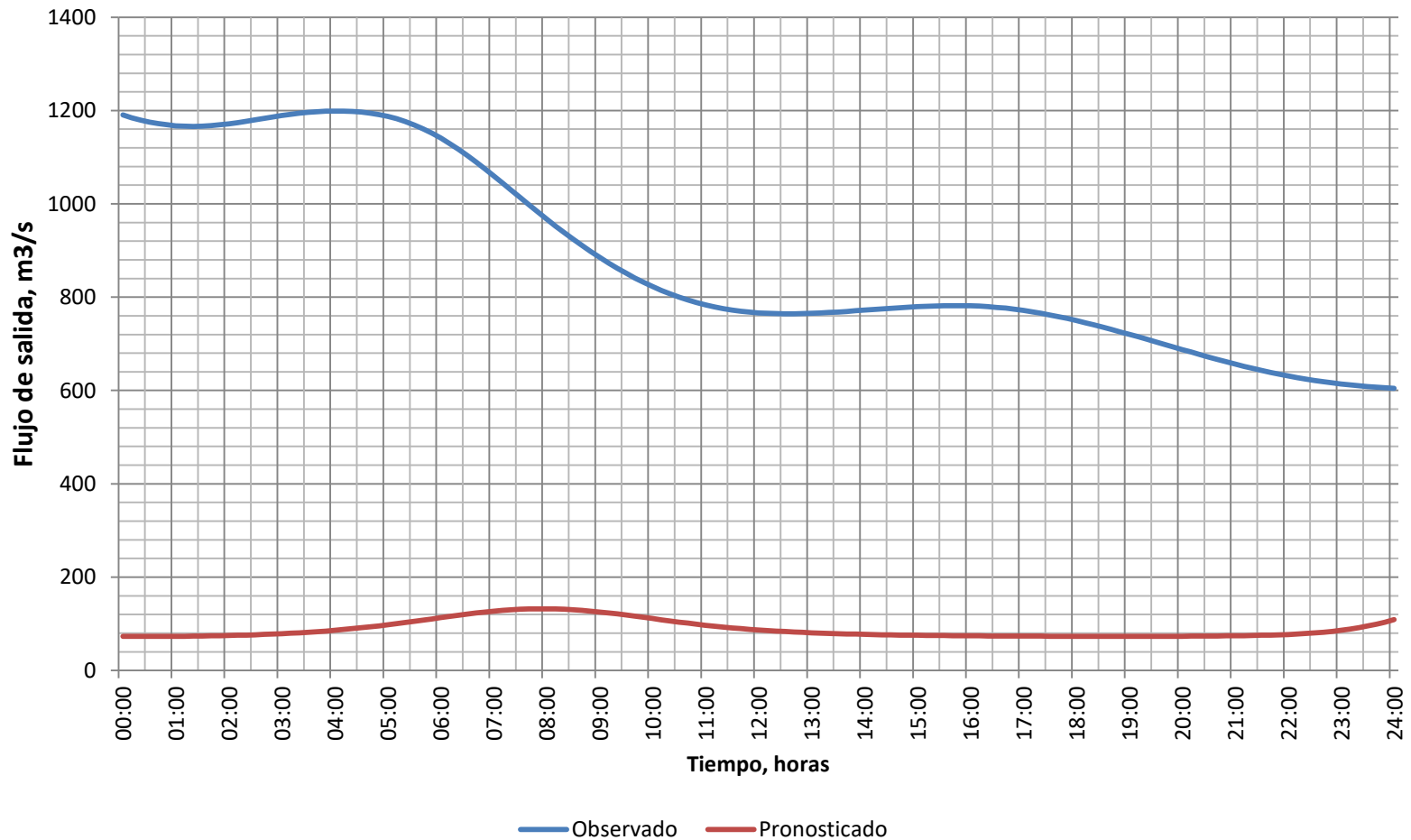


Figura 6. 29: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 17 de Octubre de 2011

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

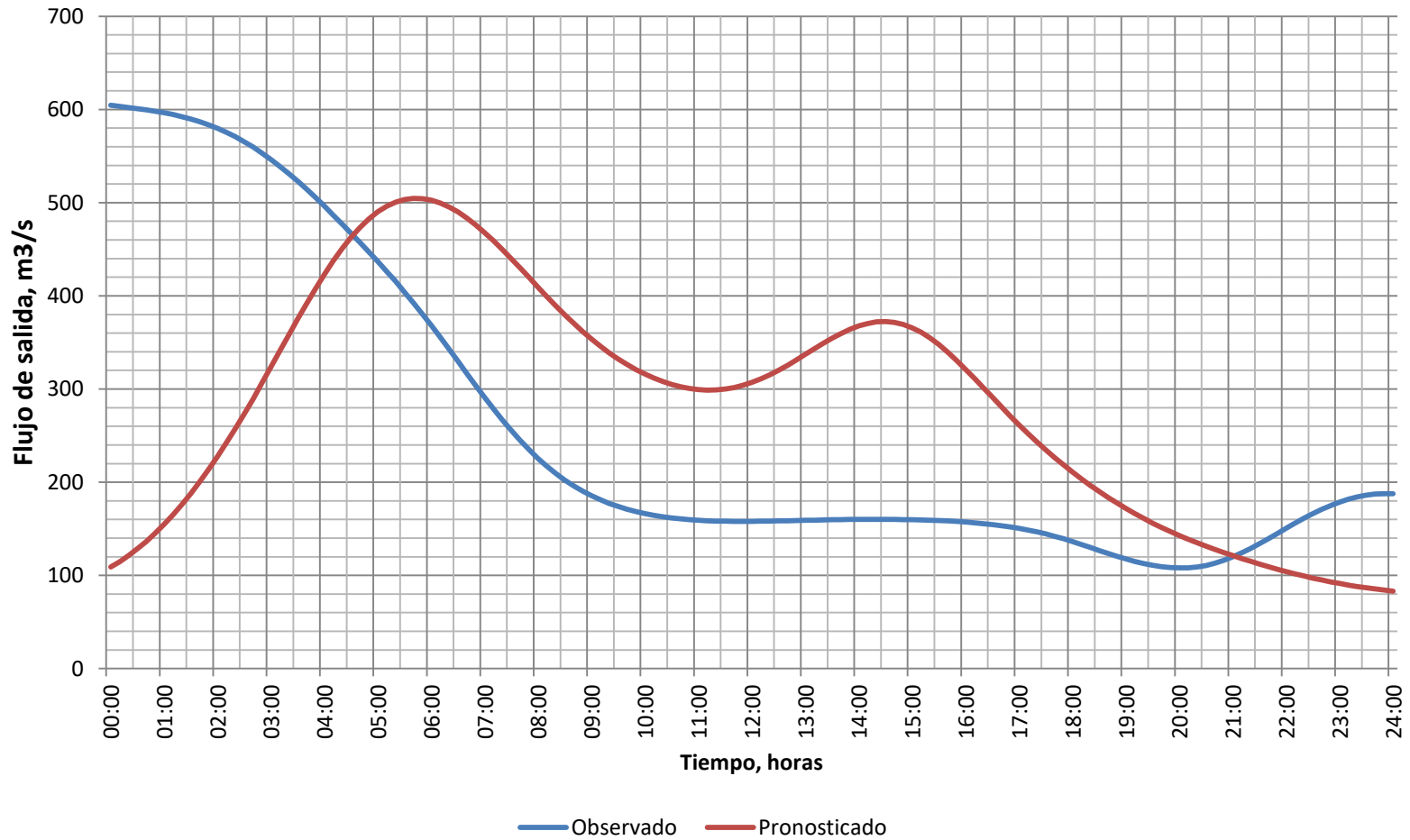


Figura 6. 30: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 18 de Octubre de 2011
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

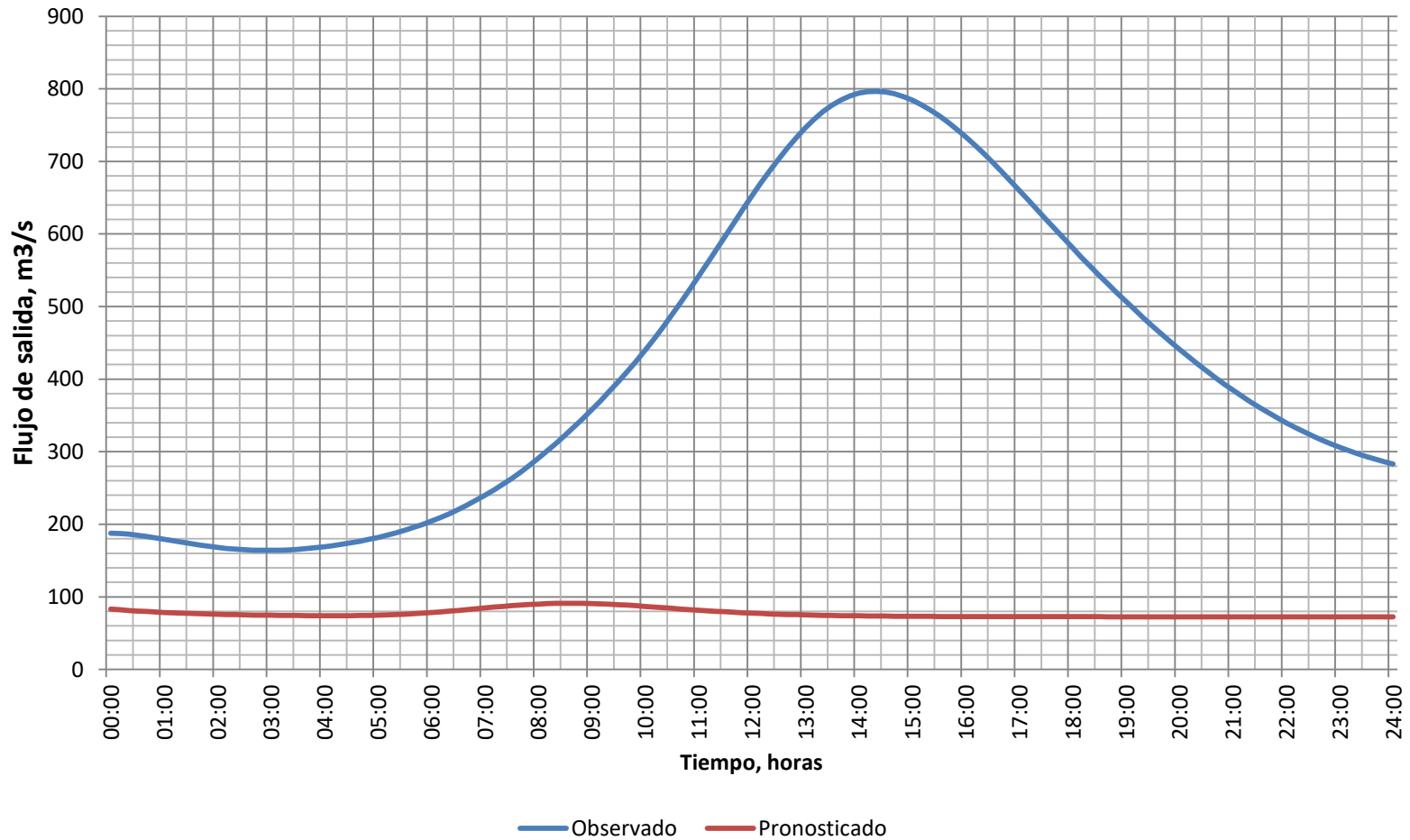


Figura 6. 31: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 19 de Octubre de 2011

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

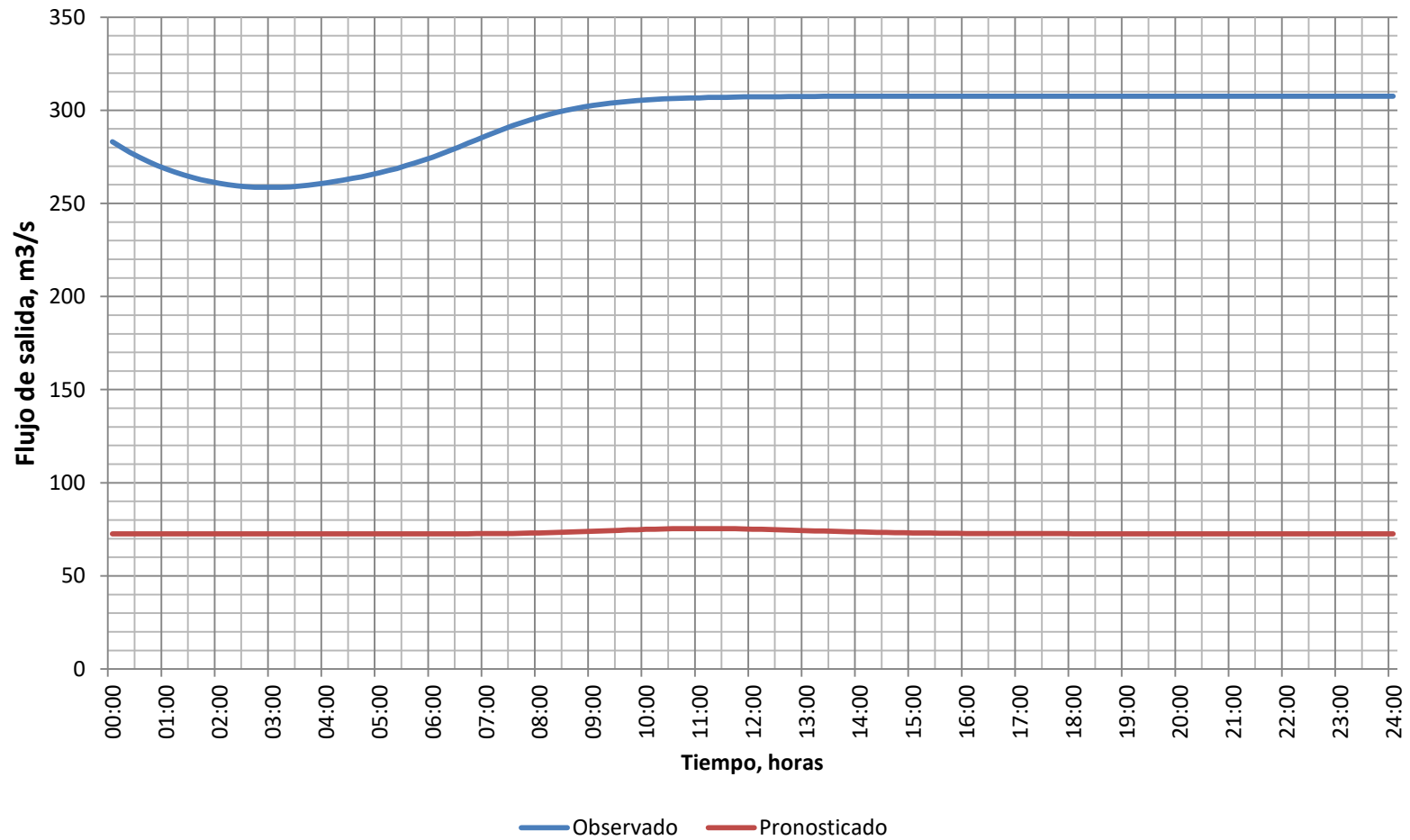


Figura 6. 32: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 20 de Octubre de 2011
Fuente: Elaborado por grupo de tesis

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

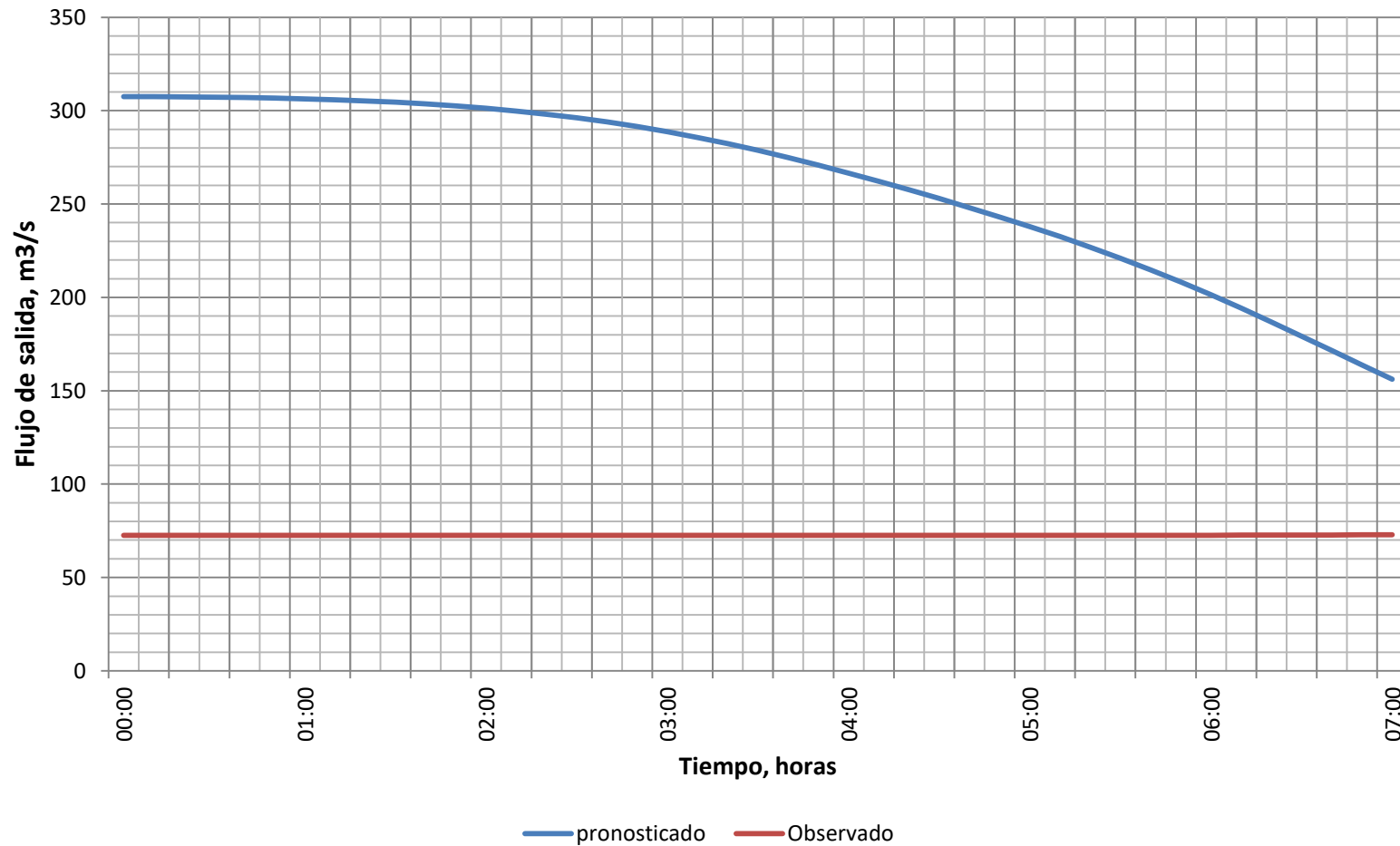


Figura 6. 33: Comparación del resultado grafico de la simulación del evento DT-12E Pronosticado y Observado para el día 21 de Octubre de 2011

Fuente: Elaborado por grupo de tesis

COMPARACION DE RESULTADOS DEL EVENTO DT-12E

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

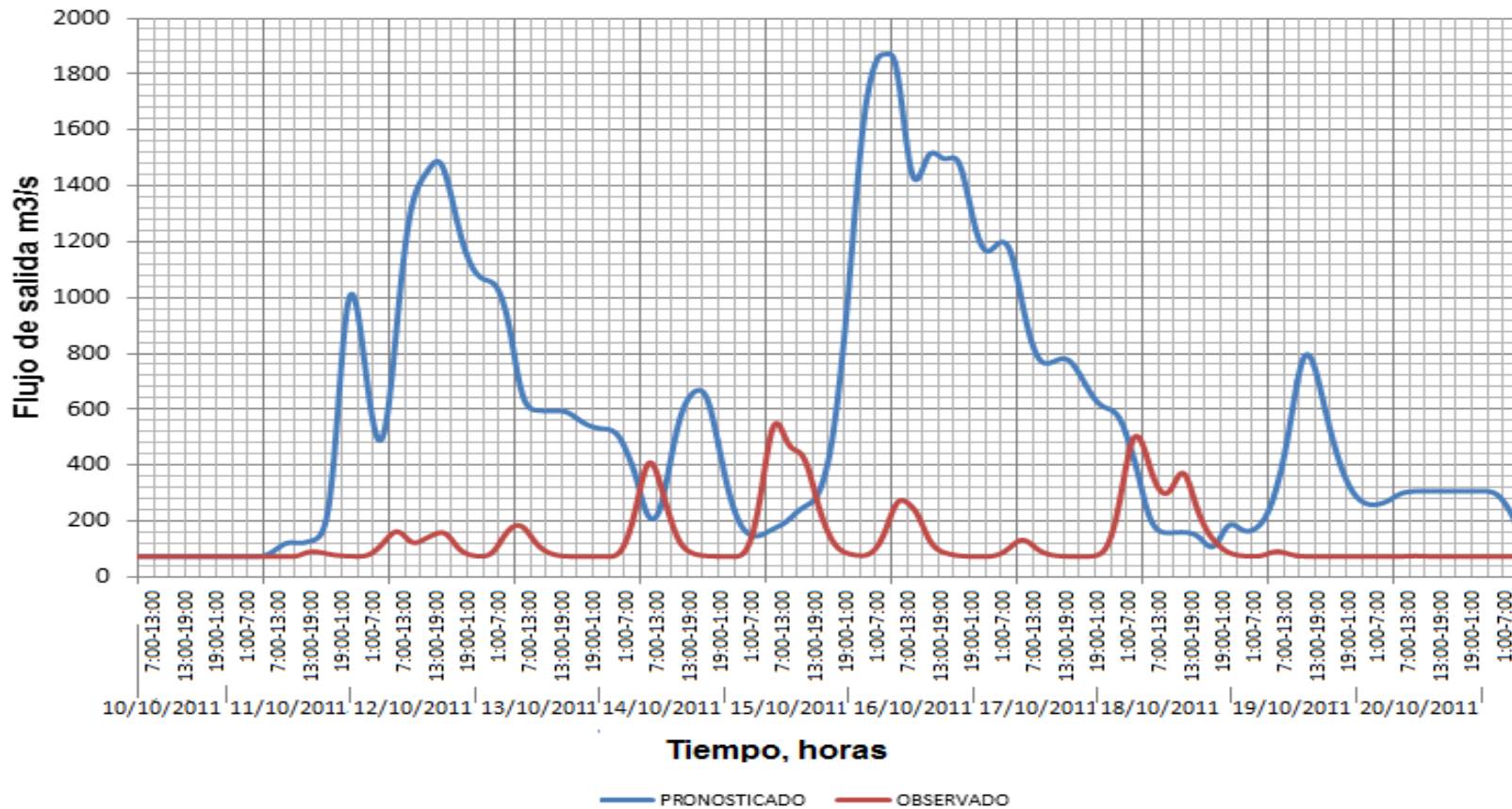


Figura 6. 34: Comparacion del resultado grafico de la simulacion del evento DT 12E pronosticado y observado

Fuente: Elaborado por Grupo de Tesis

COMPARACION DE RESULTADOS DEL EVENTO CONVECTIVO DEL 17 DE OCTUBRE DE 2015

FLUJO DE SALIDA DE LA CUENCA DEL RIO SUCIO

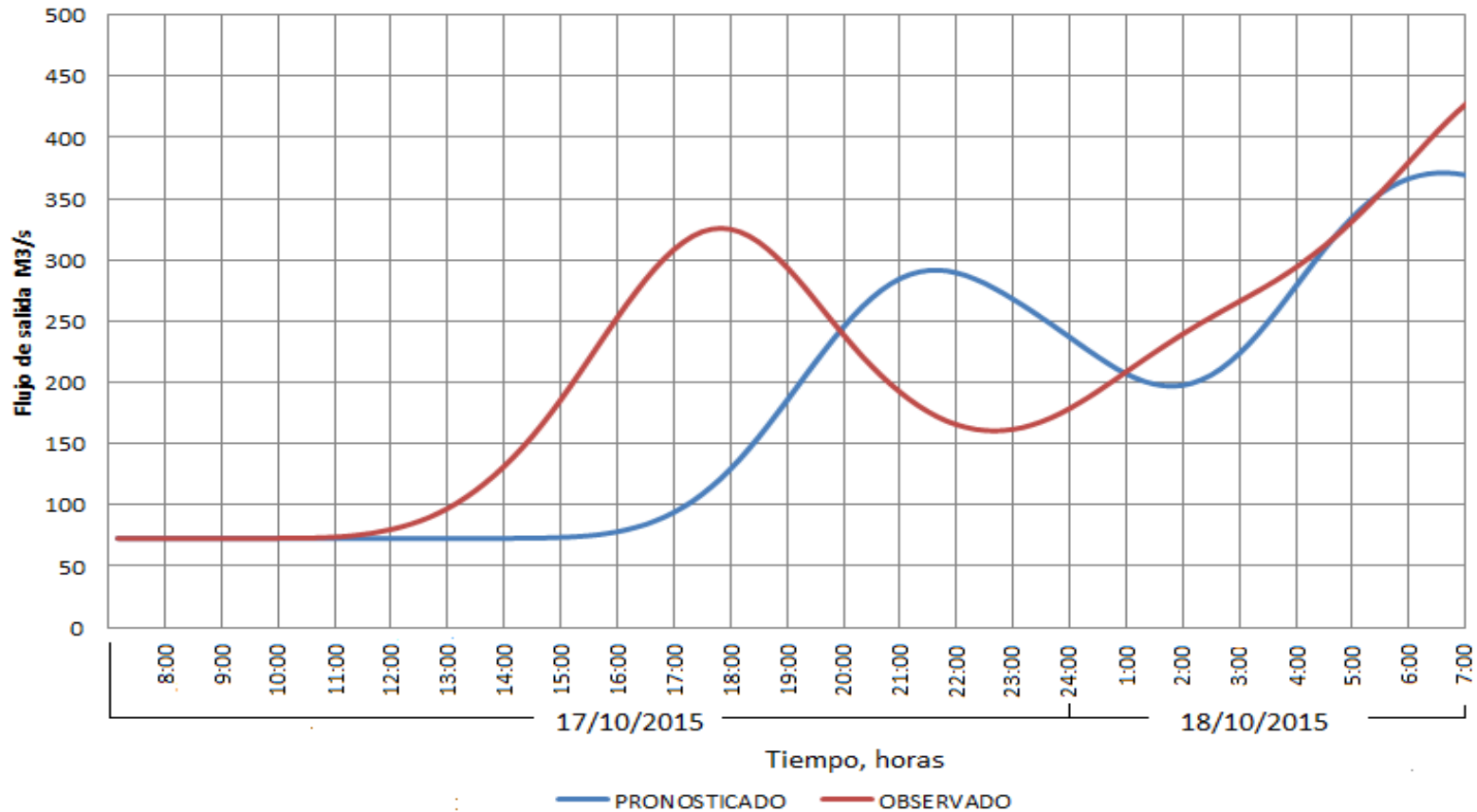


Figura 6. 35: Comparacion del resultado grafico de la simulacion del evento 17 de octubre de 2015 (Observado y Pronosticado)

Fuente: Elaborado por el Grupo de Tesis

CAPITULO VII:
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Con la evaluación realizada de dos eventos diferentes se considera una validación parcial, lo cual resulta en una primera aproximación útil como herramienta que puede ser utilizada en un Sistema de Alerta Temprana (SAT). Esta validación es importante ya que ensamblar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) requiere de una importante inversión monetaria, a nivel computacional, de recursos instrumentales y de recurso humano.

Considerando que las parametrizaciones físicas para hacer la modelación en WRF se consideraron las mismas para los dos casos, el primero que se analizó fue el del día 17 de octubre del 2015 el cual fue una tormenta convectiva (intensa, focalizada y de corta duración) con una duración de un solo día y el segundo caso fue el evento Depresión Tropical 12E el cual registró una duración de 11 días con unos días de lluvias más intensas que otros.

Para la precipitación del día 17 de octubre del 2015, al comparar los hietogramas de la lluvia media se observa que a lo largo del día en los intervalos de 3 horas analizados la tormenta pronosticada con el modelo WRF en un 62.5% subestima los valores de precipitación observada en las estaciones. En cuanto a los valores de precipitación media acumulada las estaciones pluviométricas presentan valores de 48.271 mm y WRF registró 39.869 mm de lluvia dando así una variación del 17.41%.

En el segundo caso la precipitación del evento DT 12-E, al comparar los hietogramas de la lluvia media se observa que a lo largo de los 11 días analizados, entre las

18 y 24 horas para la lluvia pronosticada se presentan cambios más bruscos de precipitación en cambio la lluvia observada en todos los intervalos de horas analizados no tiene demasiados cambios bruscos, el día que menos variación hubo entre lo simulado y lo observado es el día 17 de octubre del 2011 con un 38.71%.

Para la Depresión Tropical 12-E, el modelo subestima la lluvia en un 82.95% respecto a lo que las estaciones registraron. También se observa que la lluvia pronosticada tiene una duración de 8 días comenzando el día 11 de octubre hasta el día 18 de octubre, en cambio la lluvia observada comienza el día 11 de octubre hasta el 20 de octubre teniendo una duración de 11 días. En cuanto a los valores de precipitación media acumulada las estaciones pluviométricas presentan valores de 624.913 mm y WRF registró 100.832 mm de lluvia total para los 11 días, dando así una variación del 83.86%.

Por lo que se puede decir que el evento convectivo tuvo mejores resultados en cuanto a pronóstico en comparación de la Depresión Tropical 12-E.

El hecho que la variación entre lo observado y lo pronosticado del evento del día 17 octubre del 2015, sea mucho menor que la variación entre lo observado y lo pronosticado del evento DT 12-E, puede atribuirse a que las estaciones utilizadas para el modelado de lluvia observada, en el primer caso, las estaciones están en su mayoría dentro de la cuenca, en cambio para el evento DT 12-E, en su mayoría las estaciones utilizadas se encuentran a los alrededores de la cuenca, contando únicamente con una estación interna, esto se debe a que para el año 2011 no se contaban con las

estaciones dentro de la cuenca del río Sucio y para el 2015 ya se contaba con más estaciones dentro de la cuenca.

La variación que se presenta, también se puede atribuir a que, para la lluvia modelada en WRF para el primer caso se consideró un dominio más pequeño limitado para El Salvador en cambio para el caso de la DT 12-E el dominio fue para Centro América y El Caribe, lo que puede dispersar un poco la información del pronóstico.

A pesar de que los valores correspondientes a la lluvia no fueron tan cercanos entre sí, entre lo observado y pronosticado, la distribución espacial de la lluvia, considerando que la comparación no se realizó con un tamaño igual de pixeles, muestra las zonas donde el modelo pronostica lluvia, y efectivamente en esas zonas se registró lluvia, aunque no con la misma intensidad.

En la distribución de los caudales obtenidos en HEC-HMS, para la precipitación observada y pronosticada, se puede apreciar que en los primeros días del evento prolongado DT-12E los caudales son muy similares, y se puede observar que en el día 16 de octubre de 2011 es en el cual se da la mayor diferencia de caudales, en el evento aislado del día 17 de octubre del 2015 la mayor diferencia de caudales se da en el rango de tiempo de 17:00-17:10.

Basándose en los resultados y el análisis que se obtuvo en este trabajo de graduación, se considera que el modelo meteorológico WRF requiere de más evaluaciones, con más casos de estudio, para ser puesto en funcionamiento como una herramienta de

pronóstico en un Sistema de Alerta Temprana (SAT) de la cuenca del río Sucio, ya que la variación que se presenta entre lo pronosticado y lo observado es demasiada en el caso del evento DT 12-E aunque en el evento aislado del día 17 de octubre del 2015 se presente menor variación, el modelo no mostro consistencia en sus resultados como para poder ser utilizados en un SAT; aunque el modelo WRF también cuenta con dos ventajas importantes para que un SAT sea completamente eficaz, una de las ventajas es que es un software libre y la segunda que está en constante desarrollo lo cual permite seguir investigando y mejorando el funcionamiento del software para lograr regionalizar de mejor manera los resultados de pronóstico.

7.2 RECOMENDACIONES

Para poder obtener resultados satisfactorios de un caudal pronosticado que pueda ser utilizado en un SAT para una cuenca de respuesta rápida, se debería de contar con un mayor número de estaciones pluviométricas, distribuidas dentro de las cuencas, para poder disminuir la incertidumbre de análisis.

Realizar análisis considerando eventos más recientes para análisis, debido a que la distribución de las estaciones pluviométricas que se puedan considerar, tienen mayor cobertura en la actualidad, y debido a que se mantienen monitoreo constante se cuenta con más información, lo que genera una respuesta de simulación hidrológica y pronosticado más precisa.

Tener un estudio sobre los métodos de interpolación, el cual indique que método de interpolación es apropiado para la cuenca en estudio y para qué tipo de evento se obtiene mejores resultados, esto con el fin de evaluar el evento con el método de interpolación adecuado para mejores resultados.

Al momento de descargar los datos de lluvia provenientes del modelo global GFS, se recomienda descargar los datos con una reducción del tamaño de pixeles, acorde al dominio que se requiere analizar, ya que, cuando el dominio es pequeño como el caso de El Salvador, los pixeles deben ser pequeños acorde a la dimensión, ya que se obtiene una mejor dinámica de las nubes y procesos microfísicos, es decir una mejor parametrización.

Para validar el modelo, se recomienda hacer una simulación por un periodo de al menos de un año, ya que analizar periodos cortos como en este caso 12 días simulados, únicamente proporciona una idea de cuan razonables son los valores de las variables predichas por el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

TESIS

- Ing. Jose María Eterovie (2008): "APLICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS CON FINES DE PREVENCIÓN DE DESASTRES EN CUENCAS DE VENEZUELA" (Tesis de Postgrado); Universidad de Los Andes Merida, Venezuela
- Carrillo Carrillo, C. y Mejía Granados, N. (2016): "UTILIZACIÓN DEL MODELO "HEC-HMS" EN SISTEMAS DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS Y VERIFICACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL MODELO CMPORH, EN LA CUENCA DEL RIO SUCIO" (Tesis de Grado), Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, El Salvador.

LIBROS

- Chow, V. (1994). "Hidrología aplicada". (1° edición). Mc Graw Hill. Mexico.

OTRAS FUENTES

- Guerrero Higuera, Á. M., García Ortega, E., Matellán Olivera, V., & Sánchez Gómez, J. L. "Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL".
- ARW Version 3 Modeling System User's Guide, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale & Microscale Meteorology Division, (Julio 2016)
- DOCUMENTOS PROPORCIONADOS POR LA DGOA DEL MARN

- Ing. Juan José Amides Figueroa Urbano. “El Weather Research Forecast Model WRF para El Salvador”, para la DGOA/ MARN.

PUBLICACIONES DE INTERNET

- https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_num%C3%A9rico_de_predicci%C3%B3n_meteorol%C3%B3gica
- http://redibericamm5.uib.es/documentacion/grupo_33/LibroINMComprimido.pdf
- <http://www.tethys.cat/antics/num02/articles/art0205esp.htm>
- <http://www.meteogroup.com/es/es/investigacion/modelo-mesoescalar.html>
- <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/San-Jose/pdf/Panama%20MANUAL%20INFORMATIVO.pdf>
- http://www.lamolina.edu.pe/eventos/agricola/2016/DRH/modelacion_hidrologica/
- http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/pdf/tutorial_netcdf.pdf
- <http://www.met.igp.gob.pe/users/kobi/NETCDF/>
- https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250336/2012/40_ManualHMS.pdf
- <http://www.snet.gob.sv/Publicaciones/SATEISalvador.PDF>
- <http://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/Fulltext/ADOA0000805/C2.pdf>
- <http://www.uca.edu.sv/investigacion/fiaes/sucio.html>
- <http://www.hidrojing.com/problemas-al-introducir-hietogramas-en-hec-hms/>
- http://www.ugr.es/~lnania/_private/ManualBasico_HEC-HMS300_HEC-GeoHMS11_Espanol.pdf

- <http://es.slideshare.net/amfeli/elaboracin-de-mapas-para-publicaciones-cientificas-y-documentos-de-divulgacin>
- http://download.osgeo.org/qgis/doc/workshops/qgis1.6_tutorial_spanish.pdf
- <http://www.hidrojing.com/problemas-al-introducir-hietogramas-en-hech-hms/>
- <http://www.wrf-model.org/index.php>