



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS I

**APLICACIÓN DE UN MODELO
HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO A LA
CUENCA DEL RÍO SUCHIAPA
CON SERIES DE LLUVIAS Y
CAUDALES DE 24 HORAS.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
EN EL ÁREA DE HIDRÁULICA.**

P R E S E N T A:

ERIKA DEL CARMEN ESCOBAR MANDUJANO PS1860

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. MIGUEL ÁNGEL AGUILAR SUÁREZ

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS; MARZO 2022.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA C-I



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
23 de marzo de 2022
Oficio No. F.I.01.498/2022

C. ERIKA DEL CARMEN ESCOBAR MANDUJANO
ALUMNA DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CON FORMACIÓN EN HIDRÁULICA
P R E S E N T E:

Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

“APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO A LA CUENCA DEL RÍO SUCHIAPA CON SERIES DE LLUVIAS Y CAUDALES DE 24 HORAS”.

CERTIFICO el **VOTO APROBATORIO** emitido por este jurado, y autorizo la impresión de dicho trabajo para que sea sustentado en su Examen Profesional para obtener el grado de Maestra en Ingeniería con formación en Hidráulica.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”

DR. JOSÉ ALONSO FIGUEROA GALLEGOS
ENCARGADO DE DIRECCIÓN



C.c.p. Dra. Daisy Escobar Castillejos. Coordinadora de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería.
C.c.p. Archivo/minutario
JAFG/DEO/cpg*

Teléfonos: (961) 61 7 80 00 ext. 5363 (961) 61 5-03-22 ext. 101. www.ingenieria.unach.mx
Boulevard Belisario Domínguez, Km 1081, Sin Número | Terán, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. C.P. 29050 | www.unach.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
SECRETARÍA ACADÉMICA
COORDINACIÓN DE BIBLIOTECAS UNIVERSITARIAS



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Erika del Carmen Escobar Mandujano
Autor (a) de la tesis bajo el título de "APLICACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO
DISTRIBUIDO A LA CUENCA DEL RÍO SUCHIAPA CON SERIES DE LLUVIAS Y CAUDALES
DE 24 HORAS."
presentada y aprobada en el año 2022 como requisito para obtener el título o grado
de MAESTRA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE HIDRÁULICA, autorizo a la
Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que
realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que
contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se
produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 31 días del mes de Marzo del año 2022.

Erika del Carmen Escobar Mandujano
Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Agradecimientos

A Dios:

Estoy muy agradecido con Dios, por guiarme en mi camino,
Por la vida que me obsequió día a día, gracias por permitirme
Culminar mis estudios y cumplir mis metas.

A mis padres:

María del Carmen y Bulmaro, por apoyarme durante todas de mi vida,
por sacarme adelante y enseñarme lo importante de la vida.

A mis hermanas:

Rosario, Angélica, Michelle y Feli.
A ustedes por estar siempre conmigo en todos los momentos.
Por alentarme a seguir adelante y siempre cuidarme.

Daniel:

Agradezco tu apoyo incondicional, cuidarme, alentarme e impulsarme
a ser mejor persona día a día. Gracias por confiar en mí.

A mi familia; A mis abuelitos, tías, tíos, primos, Felix y Michigan por todos esos recuerdos
que me han hecho lo que soy.

Índice General

Capítulo 1

Introducción	11
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos	12

Capítulo 2

Localización y características de la cuenca de estudio	13
2.1 Uso de suelo y vegetación	14
2.2 Edafología	15
2.3 Clima	16
2.4 Fisiografía	17
2.5 Geología	18
2.6 Aguas superficiales	19
2.7 Estaciones utilizadas para el modelamiento de la subcuenca del Río Suchiapa.	20
2.8 Formatos para ser utilizados en los modelos ATHYS.	21
2.9 Datos requeridos	21
2.10 Procesamiento de datos	22

Capítulo 3

Modelos hidrológicos distribuidos	24
3.1 Tipos de modelos	24
3.2 Descripción del modelo Athys	28
3.2.1 Mercedes	29
3.2.2 Vishyr	31
3.2.3 Vicair	32
3.2.4 Funciones de producción	33
3.2.5 Variación de la precipitación neta en estanque	36
3.2.6 Modelo de transferencia o tránsito de un caudal	37
3.2.7 Impacto de la variabilidad espacial de los suelos	39

Capítulo 4

Metodología para la aplicación de los modelos Athys.	41
4.1 Modelo Athys	41

4.1.1 Calibración	43
Capítulo 5	
Resultados obtenidos	52
5.1 Episodios	52
5.2 Hidrogramas	59
Capítulo 6	
Relación de Humedad e Infiltración.	62
Capítulo 7	
Estimación de lluvias futuras.	66
7.1 Periodo de retorno	66
7.2 Calibración en Athys	71
7.3 Resultados	71
Capítulo 8	
Conclusión	73
Referencias	74

Índice de tablas

Tabla 1. Estaciones ubicadas dentro de la subcuenca del Río Suchiapa. Fuente: CLICOM. – CFE. Elaboración: Propia.	20
Tabla 2. Cartas topográficas. Fuente: INEGI. Elaboración: Propia.	22
Tabla 3. Programas que utilizan modelos hidrológicos distribuidos. Fuente: Varios. Elaboración: Propia.	25
Tabla 4. Altitudes en la cuenca del Río Suchiapa. Elaboración: Propia.	38
Tabla 5. Concordancia de suelos y altitudes. Elaboración: Propia.	39
Tabla 6. Funciones de producción y de transferencia. Fuente: Manual de ATHYS. Elaboración: Propia	46
Tabla 7. Fechas de episodios calibrados en el programa Athys. Elaboración: Propia	51
Tabla 8. Calibración correspondiente de 26/08/1983 – 12/10/1983. Elaboración: Propia	52
Tabla 9. Calibración correspondiente de 03/10/1991 – 09/11/1991. Elaboración: Propia	52
Tabla 10. Calibración correspondiente de 12/08/1993 – 06/11/1993. Elaboración: Propia	53
Tabla 11. Calibración correspondiente de 05/09/1998 - 26/09/1998. Elaboración: Propia	53
Tabla 12. Calibración correspondiente de 08/09/2000 – 10/10/2000. Elaboración: Propia	54
Tabla 13. Calibración correspondiente de 04/10/2003 – 11/11/2003. Elaboración: Propia	54
Tabla 14. Calibración correspondiente de 05/07/2006 – 18/08/2006. Elaboración: Propia	55
Tabla 15. Calibración correspondiente de 21/08/2007 – 10/10/2007. Elaboración: Propia	55
Tabla 16. Calibración correspondiente de 10/10/2007 – 29/11/2007. Elaboración: Propia	56
Tabla 17. Calibración correspondiente de 08/09/2010 – 15/10/2010. Elaboración: Propia	56
Tabla 18. Calibración correspondiente de 18/09/2011 – 30/10/2011. Elaboración: Propia	57
Tabla 19. Calibración correspondiente de 24/08/2013 – 06/10/2013. Elaboración: Propia	57
Tabla 20. Calibración correspondiente de 02/09/2014 – 22/11/2014. Elaboración: Propia	58
Tabla 21. Precipitación total 5 días antes de cada evento. Elaboración: Propia	61
Tabla 22. Escurrimiento e infiltración. Elaboración: Propia	62
Tabla 23. Episodios no calibrados, por el exceso de rango de valores. Elaboración: Propia.	62
Tabla 24. Episodios no calibrados, por el rango de valores. Elaboración: Propia.	63
Tabla 25. Episodios con su respectiva infiltración (porcentaje) 5 días antes de cada evento. Elaboración: Propia.	63
Tabla 26. Episodios con su respectiva infiltración (porcentaje) 5 días antes de cada evento, con la infiltración resultante del programa Athys. Elaboración: Propia.	63

Tabla 27. Resumen de información. Elaboración: Propia.	64
Tabla 28. Precipitaciones promedio. Elaboración: Propia.	65
Tabla 29. Factor de Regionalización Cuenca “Chicoasén”. Elaboración: Dominguez, 2018.	65
Tabla 30. Precipitaciones asociadas a un periodo de retorno. Elaboración: Propia.	66
Tabla 31. Distribuciones de lluvia NRCS (U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1986)	67

Capítulo 1

Introducción

Los modelos hidrológicos intentan ser representaciones de los sistemas hidrológicos reales, los cuales pueden representar las condiciones de algún evento y con ello poder prevenir inundaciones que puedan afectar a la población, una buena calibración de éstos y permite obtener buenos resultados para un mejor diseño.

El presente trabajo se enfoca al modelo hidrológico distribuido llamado Athys que es desarrollado por el Instituto de Hidrociencias de Montpellier en Francia, dicho programa fue aplicado en la subcuenca de Suchiapa ubicada en la región hidrológica No. 30 Grijalva – Usumacinta, y en particular para este estudio se utilizaron series de precipitaciones y caudales; con un intervalo de tiempo de 24 horas.

El trabajo consta de seis apartados, en el primer capítulo se dan a conocer los programas a utilizar.

En el segundo capítulo se presentarán las características de la subcuenca, uso de suelo y vegetación, edafología, clima, fisiografía y geología; también se presentan las estaciones con las que cuenta la subcuenca de Santo Domingo y las fechas con las que se analizaron los caudales y precipitaciones.

En el tercer capítulo, se observan los tipos de modelos hidrológicos y muestran los programas más reconocidos para la modelación, donde al mismo tiempo se puede visualizar las características de dos programas con los que se calibrará la cuenca de Santo Domingo.

El cuarto capítulo está enfocado a las metodologías para utilizar los programas ya mencionados con anterioridad, los datos requeridos y los procesos para obtenerlos, así como la manera de introducir datos y archivos.

En el quinto capítulo se observarán los datos, tanto de los parámetros como los hidrogramas obtenidos.

El sexto capítulo se realizará la relación de humedad e infiltración de los episodios calibrados en el capítulo cinco.

Por último, en el capítulo séptimo, se realizó un análisis de lluvias sintéticas con diferentes periodos de retorno, obteniendo un hidrograma de diseño.

1.1 Objetivo general

- Utilizar el modelo hidrológico distribuido ATHYS, para calibrar con datos de precipitaciones y escurrimientos con una duración de 24 horas, para la subcuenca

de Suchiapa de la región hidrológica Número 30, de la cuenca Grijalva- Tuxtla Gutiérrez.

1.2 Objetivos específicos

- Calibración de los modelos ATHYS, con episodios de precipitaciones y caudales de los años 1983 - 2014.
- Obtención de los parámetros de los modelos para cada uno de los episodios simulados.
- Comparación de los parámetros para cada uno de los episodios.
- Calibración de episodios utilizando las cartas de uso de suelo y vegetación considerando las altitudes.

Capítulo 2

Localización y características de la cuenca de estudio

La subcuenca del Río Suchiapa se encuentra ubicada dentro de la cuenca Rio Grijalva – Tuxtla Gutiérrez, y tiene un área de 2046.43 km² y perímetro igual a 330.94 km Fig. 1. Es una cuenca de tipo exorreica. (INEGI, 2017).

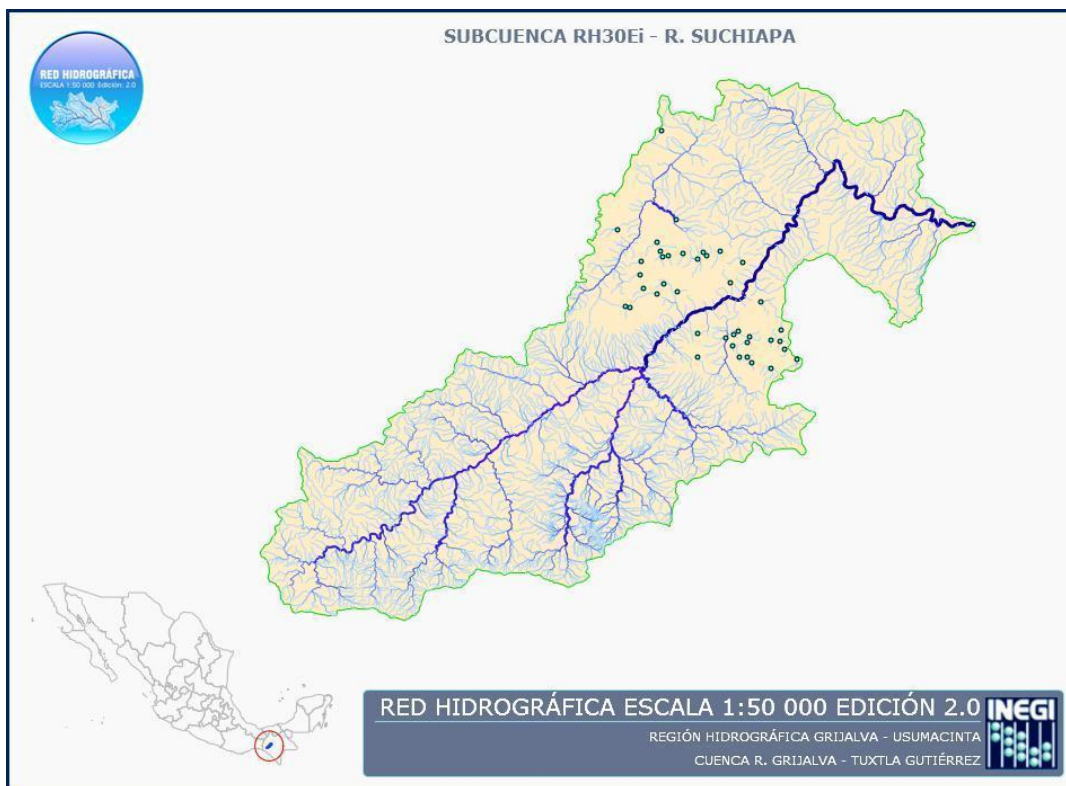


Fig. 1 Subcuenca del Río Suchiapa. Fuente: <https://www.inegi.org.mx/>

Colinda al norte con el municipio de Tuxtla Gutiérrez; al este con el municipio de Chiapa de Corzo; al sur con los municipios de Chiapa de Corzo y Villaflores; al oeste con los municipios de Villaflores y Ocozocoautla, como se aprecia en la Fig. 2.

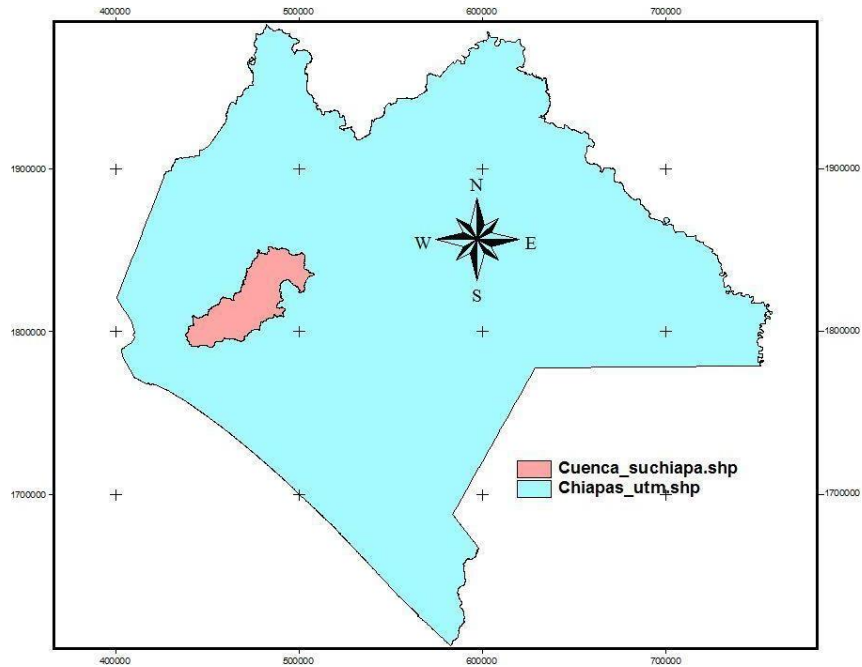


Fig. 2. Ubicación geográfica de la cuenca del río Suchiapa. (Serrano, 2017)

2.1 Uso de suelo y vegetación

La vegetación predominante en la zona son bosques de encino (12.84%), selva (caducifolia y subcaducifolia 36.41%) y pastizales (14.20). Principalmente el uso que se le da al suelo de la región es de cultivo, siendo la agricultura (34.42%) de temporal lluvioso la que predomina en la región, seguida por la de riego (INEGI, 2021), como se aprecia en la [Fig.3](#) y [Gráfica 1](#).

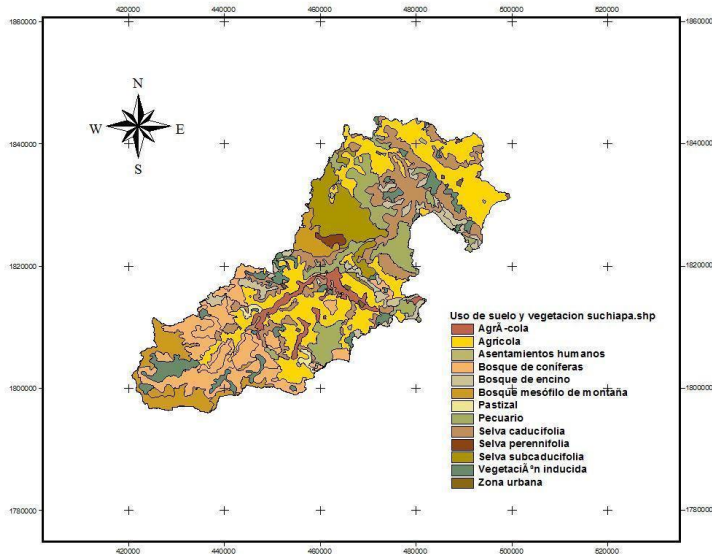
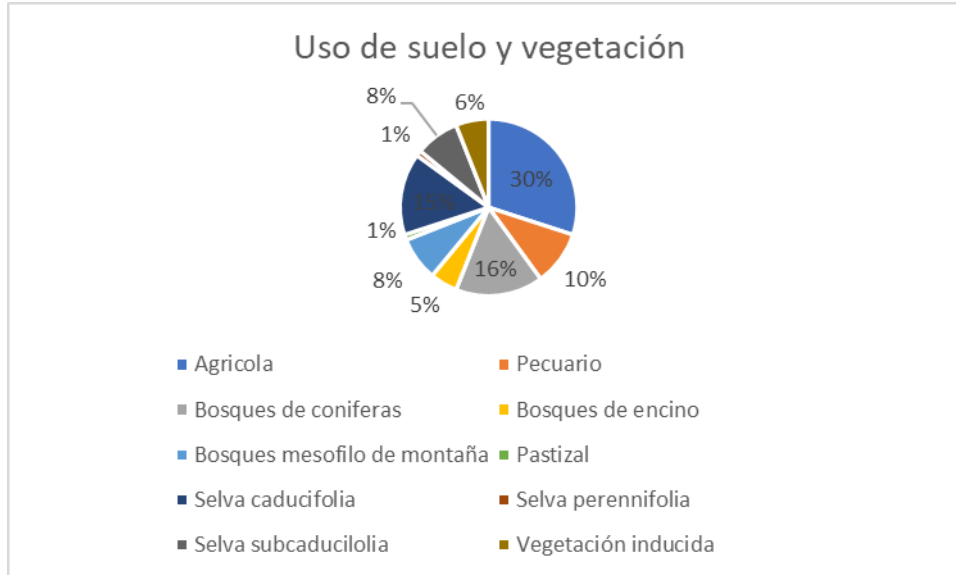


Fig. 3. Uso de suelo y vegetación del río Suchiapa. (Serrano, 2017)



Gráfica 1. Uso de suelo y vegetación del Río Suchiapa. Elaboración propia.

2.2 Edafología

El suelo en la región es ideal para las actividades como la agricultura y ganadería, siendo estas actividades las que predominan en la zona. Los tipos de suelos predominantes son Leptosol (66.52%), Vertisol (12.00%), Luvisol (7.54%), Phaeozem (7.01%), Regosol (6.32%) y Fluvisol (0.61%). (INEGI, 2021) como se aprecia en la Fig.4 y Gráfica 2.

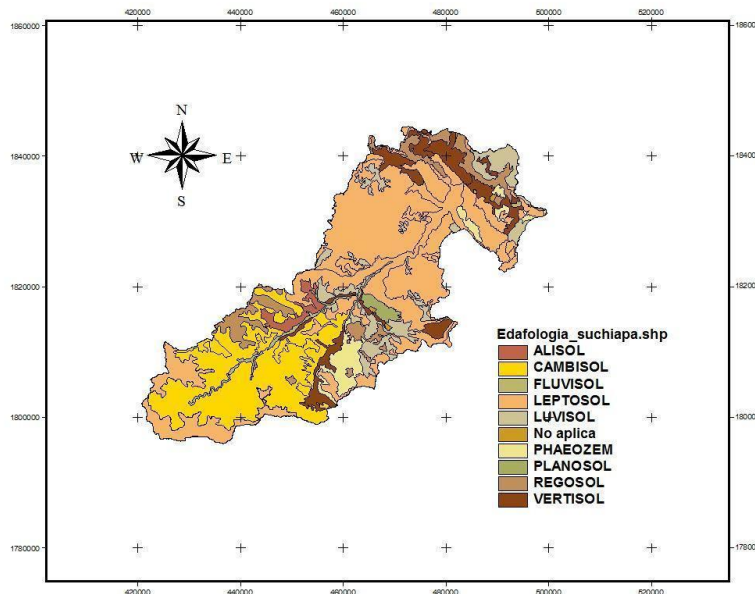
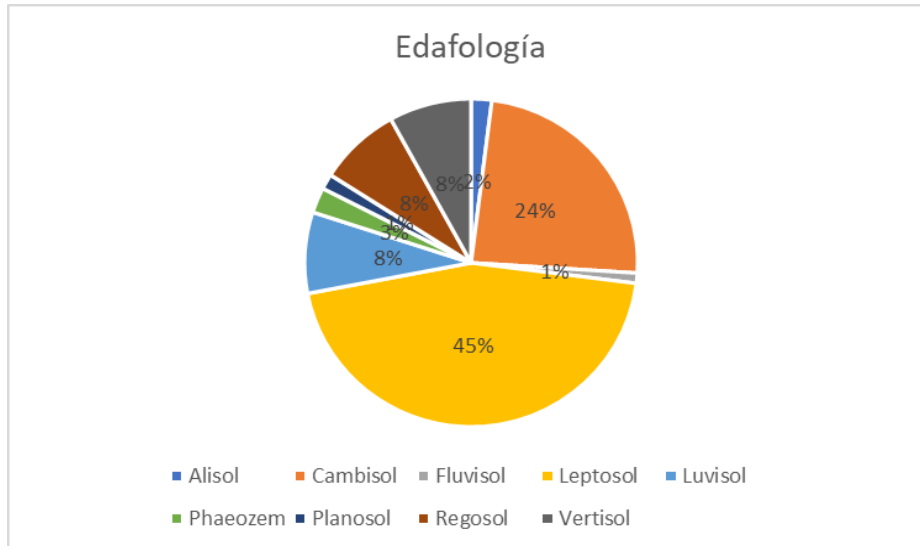


Fig. 4. Edafología del río Suchiapa. (Serrano, 2017)



Gráfica 2. Edafología del Río Suchiapa. Elaboración propia.

2.3 Clima

El clima predominante en toda la zona de la subcuenca es el cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (54.67%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, menos húmedo (37.07%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano (8.26%) (INEGI, 2021), como se aprecia en la Fig.5 y Gráfica 3.

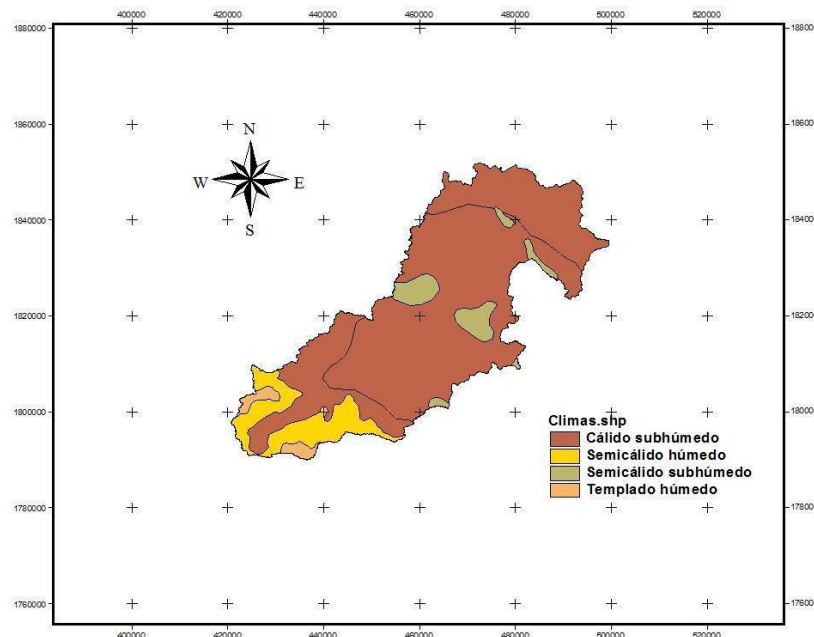
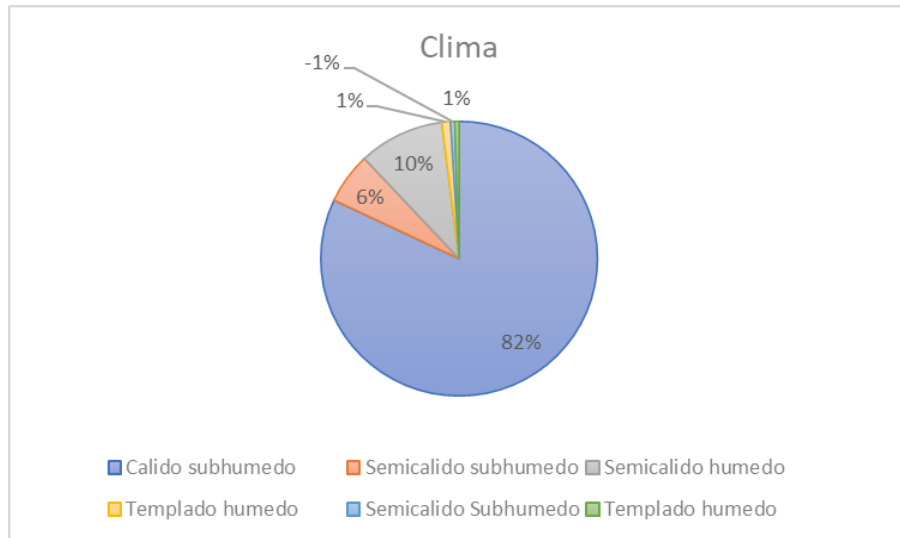


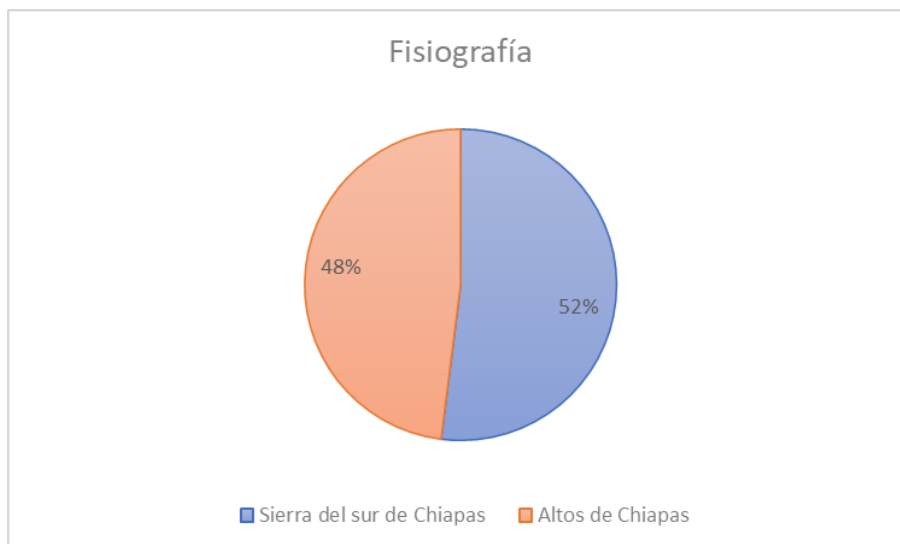
Fig. 5. Clima del río Suchiapa. Fuente: (Serrano, 2017).



Gráfica 3. Gráfica del tipo de clima del Río Suchiapa. Elaboración propia.

2.4 Fisiografía

El clima predominante en toda la zona de la subcuenca es el cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (54.67%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, menos húmedo (37.07%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano (8.26%). (INEGI, 2021), como se aprecia en la Fig.6 y Gráfica 4.



Gráfica 4. Gráfica de la Fisiografía del Río Suchiapa. Elaboración propia.

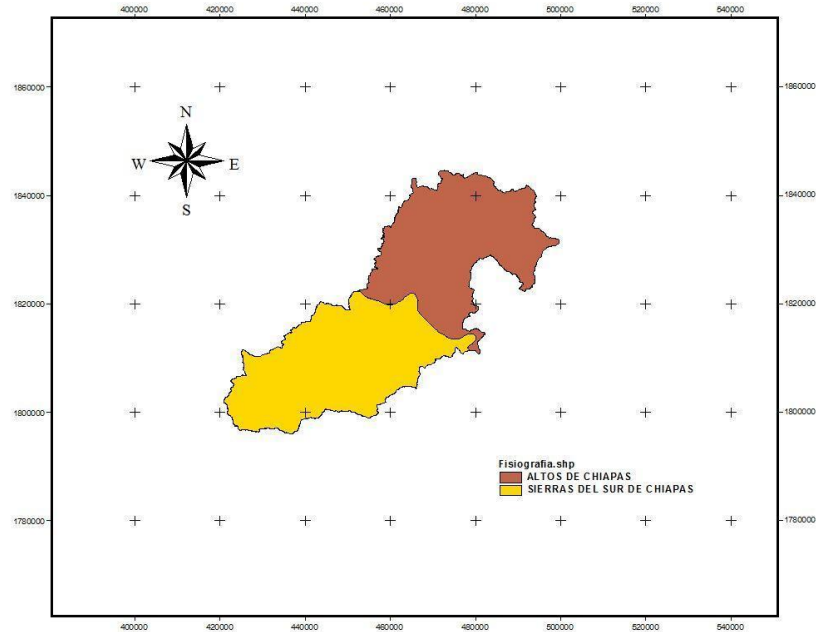


Fig. 6. Fisiografía del río Suchiapa. (Serrano, 2017).

La subcuenca de Suchiapa se encuentra ubicada entre dos de las tres provincias fisiográficas presentes en el estado de Chiapas, Sierra de Chiapas y Guatemala (100%). La subcuenca se encuentra entre las subprovincias, Altos de Chiapas (54.21%) y Depresión Central de Chiapas (45.79%). (INEGI, 2021)

2.5 Geología

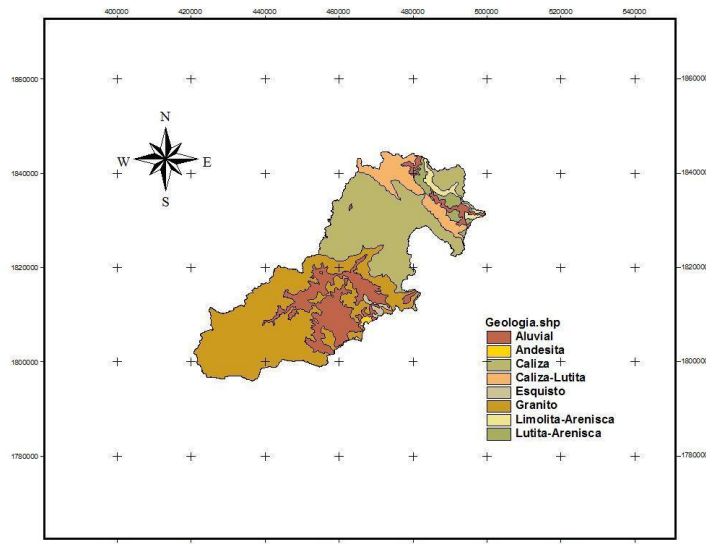
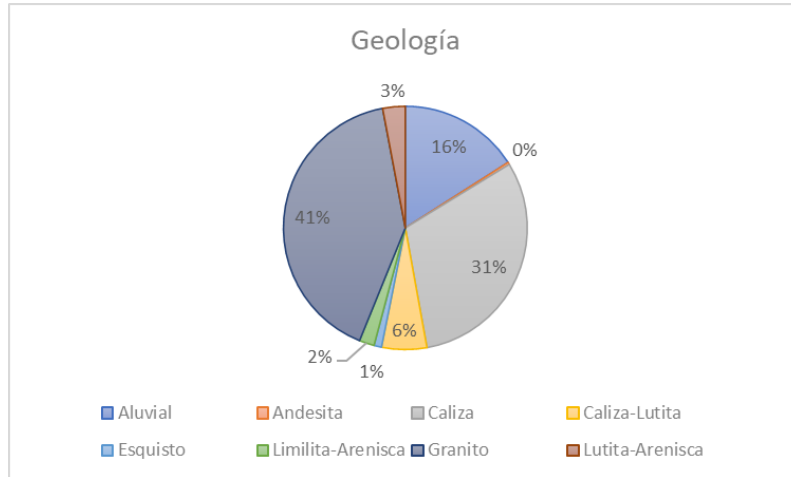


Fig. 7. Geología del Río Suchiapa. (Serrano, 2017).

La subcuenca del río Suchiapa, se encuentra en los periodos: Cretácico (73.49%), Paleógeno (18.97%) y Cuaternario (7.54%). Las rocas predominantes son: Sedimentaria:

Caliza (61.46%), caliza-lutita (15.52%), limolita-arenisca (4.62%) y lutita-arenisca (10.86%). Suelo: Aluvial (7.54%) (INEGI, 2021), , como se aprecia en la Fig.7 y Gráfica 5.



Gráfica 5. Gráfica de la Geología del Río Suchiapa. Elaboración propia.

2.6 Aguas superficiales

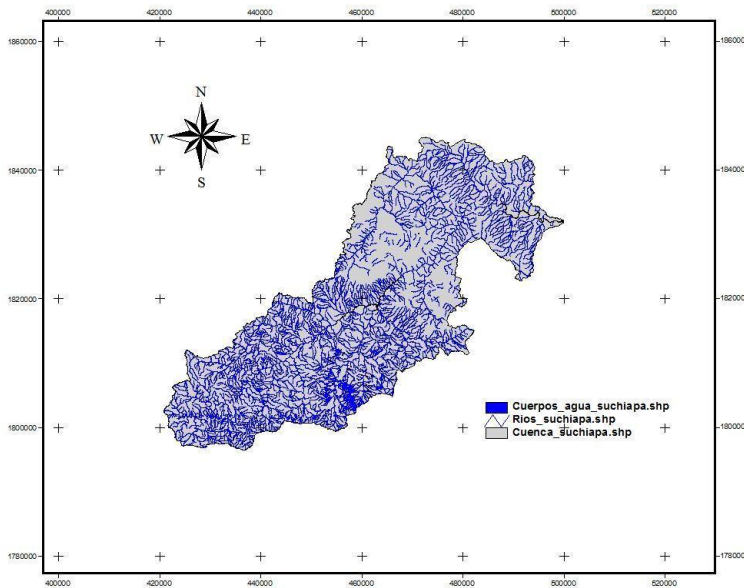


Fig. 8. Aguas Superficiales del río Suchiapa. (Serrano, 2017).

Tiene una superficie de aportación de 2033.767 kilómetros cuadrados (Fig.8) y se ubica en el Sureste del país, se origina cerca de la localidad Tierra y Libertad, Municipio de Villaflores, su principal afluente es el Río Suchiapa (Fig.9), desemboca en el Río Sabinal a la altura de la localidad Distrito Federal, Municipio de Chiapa de Corzo. (Diario oficial de la federación, 2009).

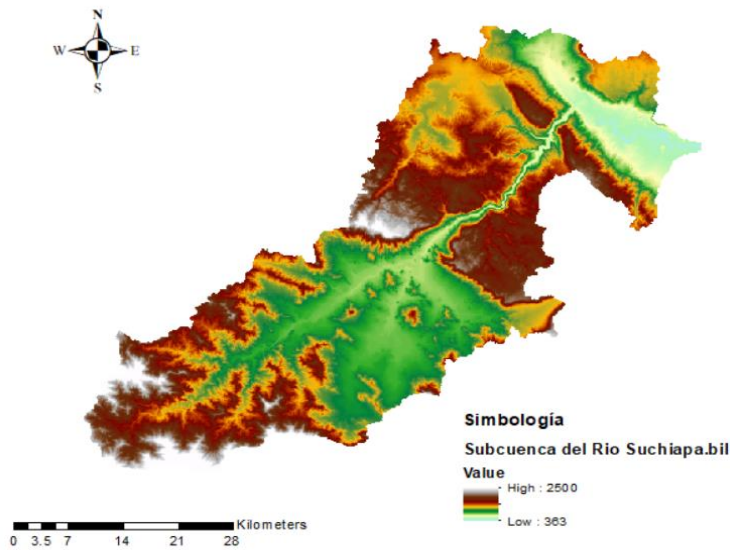


Fig. 9. Aguas Superficiales del río Suchiapa. (Serrano, 2017).

2.7 Estaciones utilizadas para el modelamiento de la subcuenca del Río Suchiapa.

Para la realización de este estudio se tuvo que utilizar información climatológica e hidrológica con un intervalo de tiempo de 24 horas. Para el estudio de la subcuenca del Río Suchiapa, fue necesario recabar información sobre precipitaciones e hidrometría de estaciones que se encontraban dentro y cerca de dicha cuenca; las que a continuación se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Estaciones ubicadas dentro de la subcuenca del Río Suchiapa. Fuente: CLICOM. – CFE. Elaboración: Propia.

Estación	Tipo de estación	Coordenadas UTM	
		X	Y
EL BOQUERÓN	Climatológica e Hidrométrica	483312.24	1839798.08
FINCA OCOTLÁN	Pluviométrica	449106.46	1809899.63
PORTACELI	Pluviométrica	486211.375	1819261.55
LAS LIMAS	Pluviométrica	461844.37	1833061.27
URSULO GALVAN	Pluviométrica	455322.77	1799834.76
CRISTÓBAL OBREGÓN	Pluviométrica	452688.33	1816519.59
GALEANA	Pluviométrica	461742.511	1833149.72

Estos datos se obtuvieron de la base de datos climatológica descargada de la Comisión nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2008).

2.8 Formatos para ser utilizados en los modelos ATHYS.

En la Fig.10 se presenta el formato con el que se ingresa en el programa ATHYS, en la primera columna vendrán las fechas y en las columnas subsecuentes las estaciones que se analizaron. Cabe señalar que las precipitaciones tendrán que multiplicarse por 10 para que el programa pueda reconocer los valores.

2.9 Datos requeridos

Para la aplicación del programa fue necesario el archivo con las características de la cuenca que estarán en los formatos alt y .dr1, dicho archivo se obtiene a partir de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), que se pueden descargar de la página del INEGI.

A partir de este archivo se obtendrá el archivo de drenaje, que se describe en el siguiente subcapítulo. De la misma forma se tuvieron que ingresar los datos de precipitaciones y caudales de las estaciones climatológicas e hidrométricas, con su respectiva coordenada.

Q-obs	P	P	P	P			
1000000000-1	1000000005	1000000006	1000000007	1000000008			
	Santo Domingo	Santo Domingo	Santuario	Monterrey	Sierra morena	Tres picos	
493981	493981	475319	458881	436803	438252		
1818990	1818990	1810277	1776440	1785864	1794157		
20/08/2007 00:00		8.12875	0	0	0	1	0
21/08/2007 00:00		7.487083333	0	0	0	95	0
22/08/2007 00:00		6.981666667	2	0	0	35	0
23/08/2007 00:00		7.270416667	686	714	78	73	0
24/08/2007 00:00		15.82	23	50	9	418	0
25/08/2007 00:00		12.24583333	0	0	12	182	0
26/08/2007 00:00		10.6675	470	49	13	64	0
27/08/2007 00:00		21.70416667	44	90	44	94	0
28/08/2007 00:00		19.075	71	20	66	8	0
29/08/2007 00:00		15.39583333	211	60	60	124	0
30/08/2007 00:00		25.28333333	19	49	17	225	0
31/08/2007 00:00		22.40434783	15	666	23	74	0
01/09/2007 00:00		41.62083333	62	69	15	13	0
02/09/2007 00:00		36.15833333	12	30	295	31	0
03/09/2007 00:00		29.38333333	97	119	319	271	0
04/09/2007 00:00		51.81666667	1	7	74	106	0
05/09/2007 00:00		38.05833333	0	40	2	4	0
06/09/2007 00:00		26.54583333	59	75	54	131	0
07/09/2007 00:00		21.62916667	58	73	0	39	0
08/09/2007 00:00		18.37083333	266	156	389	109	0
09/09/2007 00:00		31.35	323	188	27	31	0
10/09/2007 00:00		29.69166667	18	76	4	8	0
11/09/2007 00:00		25.1375	65	4	69	36	0
12/09/2007 00:00		21.63333333	29	390	446	198	0
13/09/2007 00:00		57.00833333	0	1	4	2	0
14/09/2007 00:00		35.6	13	123	428	174	0
15/09/2007 00:00		33.99583333	1	111	3	42	0
16/09/2007 00:00		28.00416667	0	1	0	0	0
17/09/2007 00:00		22.97391304	0	0	0	0	0
18/09/2007 00:00		18.72083333	0	0	0	0	0

Fig. 10. Archivo .txt con los datos de precipitaciones y gastos, para el programa Athys. Fuente: CLICOM - CFE.

Elaboración: Propia.

2.10 Procesamiento de datos

Los archivos utilizados para el programa L'Atelier Hydrologique Spatialisé, (ATHYS) fueron obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), como se muestra en la *Fig. 11*.

Se procede a ir en el apartado de **Geografía – Temas – Topografía – Cartas topográficas**. Las cartas descargadas abarcan la subcuenca de Suchiapa (**Tabla 2**). Dichos archivos se encuentran en formato Bil.

Tabla 2. Cartas topográficas. Fuente: INEGI. Elaboración: Propia.

Carta	Nombre
E15c87	Tonalá
E15c79	El Parral
E15c78	Cristóbal Obregón
E15c69	Tuxtla Gutiérrez
E15c88	Monterrey
E15c77	Tierra y Libertad
E15c68	Jiquipilas



Fig. 11. Descarga de datos del INEGI. Fuente: INEGI. Elaboración: Propia.

Se procedió a unir los archivos (*Fig. 12.*), mediante la opción de **Arctoolbox - Data management tools – Raster – Raster Dataset – Mosaic to New Raster**. Se procede a elegir todas las cartas, en la opción de **Pixel Type se selecciona 16 bits y en Number of bands igual a 1**. Es importante que las coordenadas del modelo digital de elevaciones están en UTM, en la región 15, con el Datum WGS84, para que el programa pueda reconocerlo.

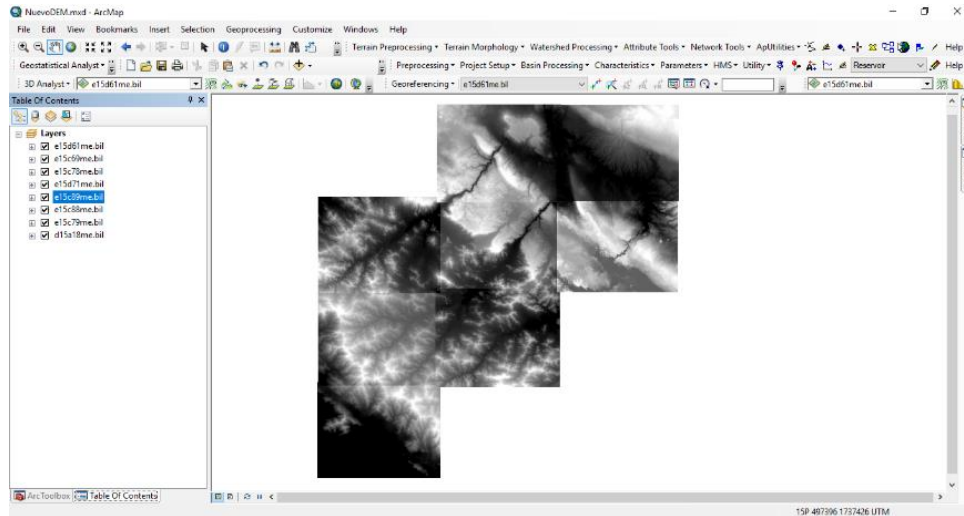


Fig. 12. Unión de las cartas de Elevación Digital. Fuente: INEGI - ARCMAP. Elaboración: Propia.

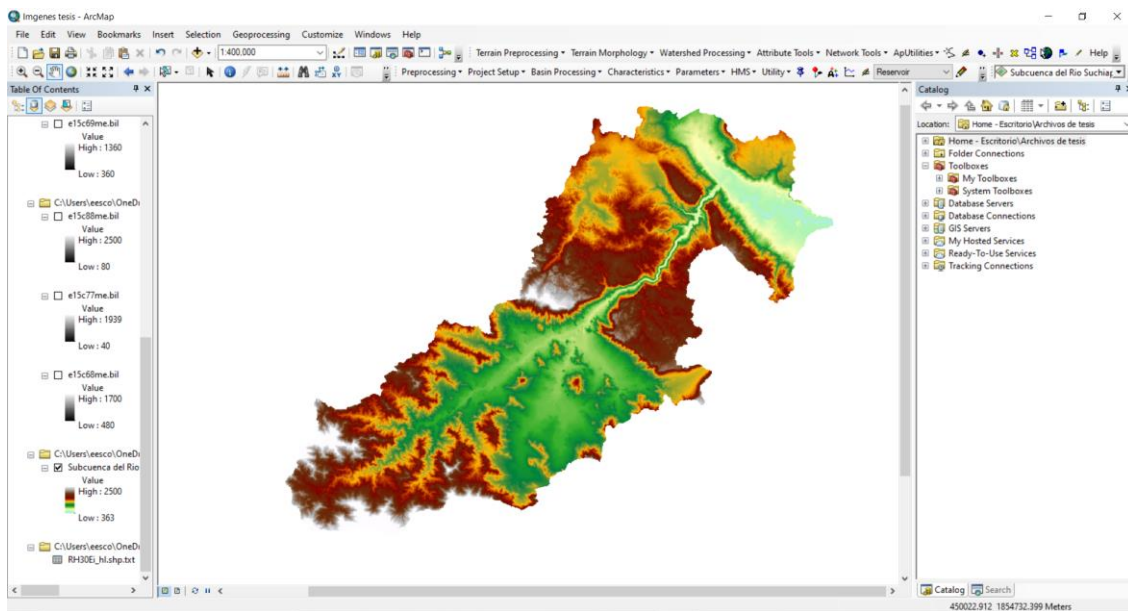


Fig. 13. Unión de las cartas de Elevación Digital. Fuente: INEGI - ARCMAP. Elaboración: Propia.

En la página del INEGI se descargaron, los archivos de la subcuenca del Río Suchiapa, para que el Raster sea del tamaño exacto a la de la cuenca y sea más rápido correr el programa de ATHYS. Se elige la opción de **Arctoolbox - Data management tools – Raster – Raster Processing – Clip**

Ya obtenido el Raster, se procede a generar el raster en formato ASCII, dicho archivos se importó en el Programa ATHYS (Fig. 13). Para ello se va a la opción de **Arctoolbox – Conversion Tools – From Raster – Raster to ASCII**. El archivo Ascii se generará en formato .txt. Para este proyecto el archivo se nombró re2502.

Capítulo 3

Modelos hidrológicos distribuidos

3.1 Tipos de modelos

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. (Garzón, 2018).

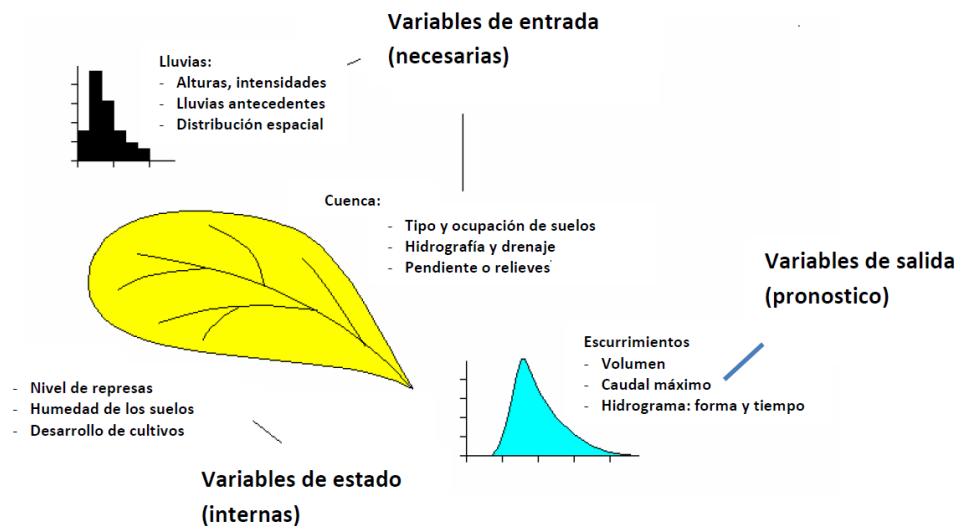


Fig. 14. Modelo lluvia escurrimiento. Fuente: athys-soft.org. Elaboración: Manual de ATHYS.

Para Domínguez et al. (2008)

Modelar la relación entre precipitación y escurrimiento es un problema básico de hidrología. Un modelo adecuado permite hacer una buena estimación de los escurrimientos en una cuenca y puede ser utilizado en el diseño de obras para controlar inundaciones o para pronosticarlas oportunamente. Con base en él se pueden operar, además, obras ya construidas o emitir alarmas para movilizar a la población de una zona en riesgo, cuando sea necesario. Para modelar el proceso de transformación de la lluvia en escurrimiento, se acostumbra dividirlo en dos partes:

- a) Con los modelos de producción se estima que parte de la lluvia no se transforma en escurrimiento, es decir las pérdidas y, por diferencias, qué parte se transforma en escurrimiento.
- b) Con los modelos de transferencia se estima cómo el escurrimiento se desplaza a través de las distintas partes de la cuenca hasta llegar al sitio de interés.

Por muchos años, estos procesos se estudiaron mediante modelos de parámetros concentrados, que son alimentados con valores medios y tratan a las características de la cuenca y de la precipitación como si fueran las mismas en toda su área, por lo que no pueden considerar las variaciones espaciales en el interior de la cuenca, de tipo y uso del suelo ni de precipitación. Para el modelo de producción se desarrollaron métodos como el del coeficiente de escurrimiento, el del índice de infiltración, el del número de escurrimiento, etc. Para la transferencia del escurrimiento se desarrolló fundamentalmente el método del hidrograma unitario.

El advenimiento de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite ahora dividir la cuenca en partes pequeñas (generalmente celdas cuadradas o píxeles) cada una con sus características específicas y, con los modelos numéricos del terreno (MNT), seguir las trayectorias del escurrimiento directo hasta que llega al sitio o a los sitios de estudio. En cuanto a la distribución espacial y temporal de la lluvia, en nuestro país todavía existen limitaciones derivadas de la poca densidad de las redes de medición y de la escasez de equipos de medición continua.

No obstante, se han logrado ciertos avances en las técnicas de interpolación, se cuenta con algunas cuencas experimentales con redes más densas de medición continua y, con el tiempo, se ha ido integrando la tecnología de radares meteorológicos para estimar mejor la distribución espacial de la lluvia. Estas nuevas condiciones están llevando cada vez más al uso de los llamados modelos distribuidos, en los que la producción del escurrimiento se estima para cada una de las celdas o píxeles y el escurrimiento generado en cada una de ellas se hace transitar por la cuenca siguiendo trayectorias individualizadas hasta los sitios de interés. (pp. ix-x)

A continuación, en la **Tabla 3**, se enlistan algunos de los programas más conocidos por todo el mundo.

Tabla 3. Programas que utilizan modelos hidrológicos distribuidos. Fuente: Varios. Elaboración: Propia.

Programa Método WMS	Características
Hec-1 (Hec-Hms)	El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centers Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica por eventos, lineal y semi-distribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas 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 esorrentía directa. (US Army Corps of Engineers, 2021, como se citó en Angulo y Saavedra, 2018).)
TR-20	El programa TR-20 proporciona un análisis hidrológico de una cuenca en las condiciones actuales (salida consta de picos y / o hidrogramas de crecida) hidrogramas superficie se desarrollan a partir precipitaciones tormenta de usar la unidad adimensional hidrograma, áreas de drenaje, los tiempos de concentración, y números de la curva del SCS. (USDA Servicio de Conservación de Suelos, 2015).
Modrat	MODRAT es un programa informático que utiliza el método racional modificado desarrollado por el Departamento de Obras Públicas (LACDPW) del condado de Los Ángeles para calcular las tasas de escurrimiento bajo una variedad de condiciones comunes a la zona de Los Ángeles, California. MODRAT se puede utilizar para encontrar las velocidades de flujo para cualquier cuenca con cualquier combinación de canales y drenajes existentes o propuestos. El modelo calcula tasas de escurrimiento para periodos de retorno de 50, 25 o 10 años de tormentas de diseño. Dado cualquier combinación de las variables anteriores, MODRAT calculará un hidrograma para cada subárea y la línea principal punto de recogida en la cuenca. (Aquaveo, 2016).
Caumax	El principal objetivo de la aplicación de caudales máximos (CauMax) es ofrecer una herramienta que ayude a: Consulta de los mapas de caudales máximos para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años. Cálculo del caudal máximo de cualquier otro periodo de retorno entre 2 y 500 años por interpolación de los valores de los mapas ya definidos previamente. (Cuencas menores de 50 km ²). (Servigis, 2017)

GSSHA	El propósito principal del modelo GSSHA es identificar correctamente y de manera realista simular los procesos hidrológicos en cuencas importantes. El modelo está destinado a simular diferentes tipos de producción de escorrentía y determinar los procesos físicos que controlan en las cuencas hidrográficas, es decir, el exceso de infiltración, las zonas de origen saturados, y la descarga de las aguas subterráneas. (Scientific Software Group, 1998)
Otros métodos	Características
Zemokost	Es un programa para la estimación de los caudales de avenida; un método de tiempo de tránsito modificado. La precipitación suministrada generada para conductos de paso de drenaje subcuenca definidos basados en sus tiempos de flujo (tiempos de ciclo) se puede calcular en la superficie y en el canal. La salida resultados precipitación efectiva a partir del producto de la escorrentía y precipitación total. (Kohl, B.; Stepanek, L., 2005)
Topmodel	TOPMODEL es un modelo de la cuenca de base física, distribuido que simula flujos hidrológicos de agua (flujo superficial infiltración-exceso, saturación de flujo superficial, la infiltración, exfiltración, flujo subsuperficial, evapotranspiración, y el enrutamiento de canal) a través de una cuenca. El modelo simula interacciones explícitas aguas subterráneas de agua / superficie mediante la predicción de movimiento de la tabla de agua, que determina donde las áreas de la superficie terrestre saturados se desarrollan y tienen el potencial para producir el flujo superficial de saturación. (CSDMS, 1997)
Brook Hydrologic - Models	BROOK90 simula el movimiento del agua del suelo vertical y evapotranspiración diaria para todas las superficies de tierra en todo momento del año utilizando un enfoque orientado al proceso con parámetros físicamente significativos. Sólo se incluyen suficientes vías de generación de caudales para permitir la comparación con el caudal medido donde esté disponible. (The BROOK90 Hydrologic Model, 2015)
Catflow	El modelo se basa en la idea de subdividir el 3D-paisaje en parches de 2D laderas de anchura variable (suponiendo que el agua que fluye normal a los contornos topográficos) conectado a una red de drenaje detallado (en parte efímera). Aunque ha habido desarrollos basados en este producto o similares ideas en el pasado se ha emprendido un nuevo esfuerzo para mejorar el concepto y la estructura de este tipo de modelo. (EhEJ Plate, 1998).

WaSiM-ETH	Es un modelo de captación hidrológico espacialmente distribuido determinista para simular el ciclo del agua encima y por debajo de la superficie de la tierra. El modelo puede ser utilizado en diversas escalas espaciales y temporales. Es capaz de modelar procesos hidrológicos de cuencas con tamaños de <math><1 \text{ km}^2</math> hasta más de 100.000 km^2 . (The hydrological model system WaSiM-ETH, 2016)
UBCWm	UBCWm es un modelo hidrológico diseñado para predecir el escurrimiento de cuencas montañosas. El modelo divide las cuencas hidrográficas en bandas de elevación (hasta ocho), y Los parámetros del modelo se pueden ajustar dentro de cada banda. Los insumos climáticos de UBCWm incluyen temperaturas mínimas diarias del aire y precipitación diaria. Los resultados incluyen la descarga diaria total y descarga de la lluvia-esorrentía, derretimiento glaciar y nieve de fusión. Infiltración y escurrimiento son simulación empírica. (KSM UBC WATERSHED MODELLING, 2012)
Athys	El ATHYS proporciona un soporte homogéneo y amigable para utilizar estos modelos, y ayuda al uso de modelos distribuidos. (Hydrosciences Montpellier L'ATelier Hydrologique Spatialisé, 2017).
Mpe	El programa de Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE) se desarrolló con el objeto de pronosticar los escurrimientos de una cuenca mediante un modelo de parámetros distribuidos. El programa funciona con la información de la red de estaciones pluviográficas instaladas en la cuenca y con el archivo que contiene los parámetros hidrológicos de la cuenca, en forma de malla. (Domínguez, 2008).

3.2 Descripción del modelo Athys

El programa ATHYS propone un entorno homogéneo y amigable, con el fin de facilitar el uso de los modelos distribuidos, de comparar sus rendimientos o sus adecuaciones a las aplicaciones consideradas – recursos, riesgo o estudio de impacto ambiental – sobre cuencas diversas. (Hydrosciences Montpellier L'ATelier Hydrologique Spatialisé, 2020).

ATHYS consta de cuatro módulos (*Fig. 15*):

- MERCEDES: plataforma de modelado espacial
- VISHYR: tratamiento de datos hidro-climatológicos
- VICAIR: geoprocésamiento espacial

- SPATIAL: Plataforma la interpolación espacial



Fig. 15. Componentes principales del programa Athys. Fuente: athys-soft.org. Elaboración: Manual de ATHYS.

ATHYS propone un conjunto de modelos en su mayoría distribuidos y por evento. Sin embargo, es posible utilizar también estos modelos en forma global (1 sola malla), y/o de manera continua. Es un software gratuito que se puede descargar e instalar en Windows o Linux. Para la gestión y el mantenimiento del software eficiente, se requiere que cada usuario se registre en el sitio en caso de transferencia (nombre, institución, dirección de correo electrónico).

3.2.1 Mercedes

Mercedes (malla cuadrada regular Primaria para el Estudio de Flujo Superficial) es una plataforma para el estudio de modelación espacial del procesamiento de lluvia. Mercedes ofrece una gran cantidad de funciones de producción y transferencia, aplicable en un entorno accesible. (Fig. 16).

Mercedes se basa en la discretización espacial de la cuenca en mallas cuadradas regulares, que puede fácilmente tomar en cuenta la variabilidad espacial de los principales factores que determinan los flujos. Los datos requeridos son variables hidroclimáticas (lluvia, los caudales, temperaturas, evaporación, evapotranspiración, humedad del suelo, etc.) y geográficos (suelos, topografía, geología). (Hydrosciences Montpellier L'ATelier Hydrologique Spatialisé, 2017).

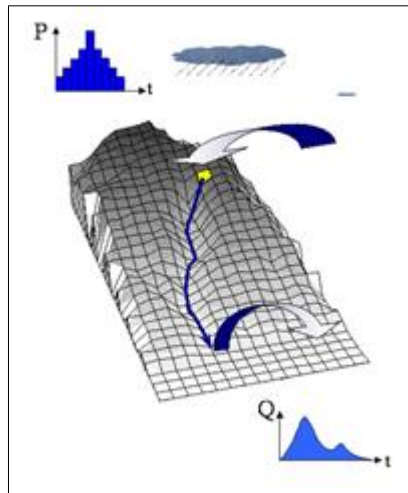


Fig. 16. Modelación de una cuenca en el programa Athys. Fuente: athys-soft.org. Elaboración: Manual de ATHYS.

Mercedes está diseñado para el análisis y la predicción de los flujos cuyo componente predominante es de superficie. MERCEDES hasta la fecha ha sido aplicado a una variedad de cuencas: cuencas urbanas de pocas hectáreas a unas pocas decenas de kilómetros cuadrados; pequeñas cuencas de montaña de decenas a cientos de kilómetros cuadrados; cuencas medianas y grandes, desde pocos a cientos de kilómetros cuadrados. La aplicación de Mercedes desarrolla el pronóstico de inundaciones, la gestión de los recursos hídricos, los estudios de impacto relacionados con los cambios geográficos o inducidos por el hombre. (Hydrosciences Montpellier L'Atelier Hydrologique Spatialisé, 2017).

El módulo MERCEDES está compuesto por 6 menús, los cuales permiten implementar una sesión de cálculo, como se puede observar en la [Fig. 17](#).

- **Cuenca vertedora:** descripción de la cuenca vertedora a tratar
- **Lluvias y Caudales:** características hidro-pluviométricas de los eventos que se van a simular
- **Parámetros de los modelos:** definición de los modelos que se van a utilizar
- **Optimización:** cálculo automático de los parámetros de los modelos desde observaciones lluvia/caudal
- **Análisis de sensibilidad:** variabilidad/sensibilidad de los errores de los modelos
- **Archivos de salida:** declaración de los archivos de resultados

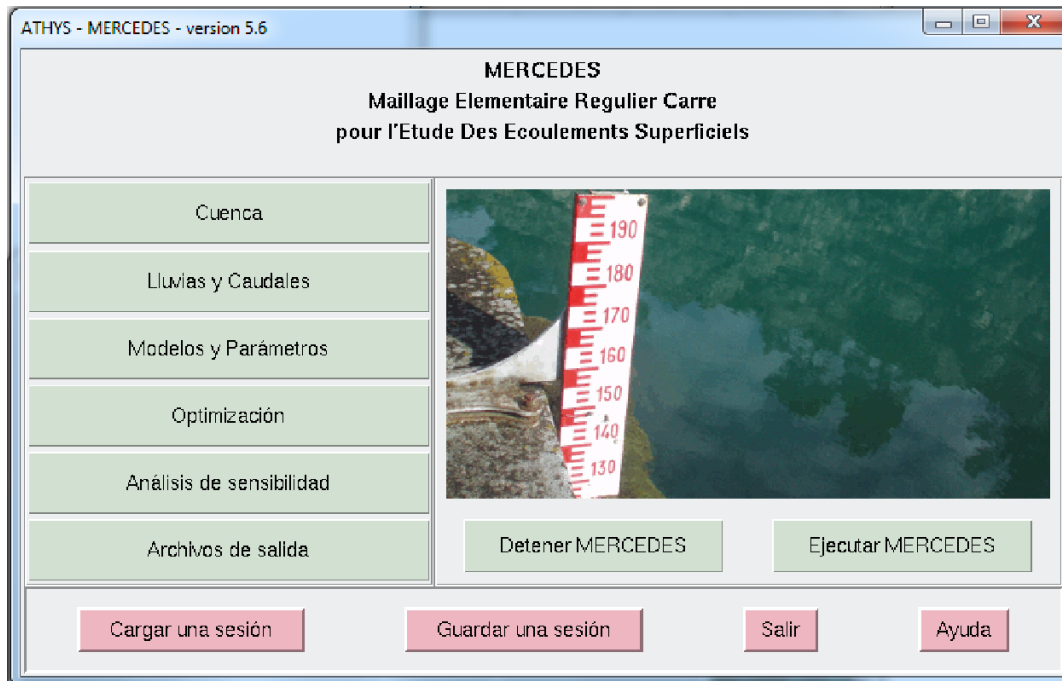


Fig. 17. Mercedes. Fuente: athys-soft.org. Elaboración: Manual de ATHYS.


Por otra parte, se puede cargar o guardar una sesión. Una sesión es el registro de toda la información que permite alimentar los diferentes menús y corresponde a un modelo dado para una cuenca dada (o un grupo de cuencas).

3.2.2 Vishyr

Vishyr ofrece diversas operaciones de corrección, cálculo, gestión y visualización de datos hidroclimáticos puntuales.

Estos datos deben ser almacenados previamente en un formato de archivo. Tres maneras de formar estos archivos:

- Importación de archivos tipo ASCII como CSV, que contienen los datos a utilizar.
- Importación de archivos ASCII exportados desde PLUVIOM
- Entrada directa de datos

El primer paso es abrir los datos hidro-precipitaciones archivo,  después de la apertura, las estaciones y episodios contenidos en el archivo aparecen en las listas correspondientes. (Fig. 18). Después de cargar el archivo, varios tipos de operaciones están disponibles:

- Ver el episodio
- Corregir las lluvias o flujos (operaciones algebraicas)
- Calcular las características del episodio
- Administrar listas de estaciones y episodios

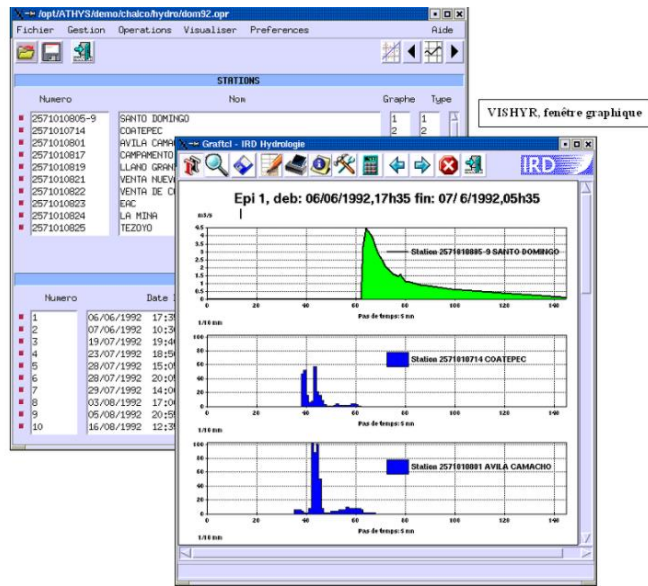


Fig. 18. Cuadros de diálogos del menú Vishyr del programa Athys. Fuente: athys-soft.org. Elaboración: Manual de ATHYS.

3.2.3 Vicair

Es un módulo para visualizar datos geográficos espaciales. Vicair consiste en:

- Una ventana gráfica para la visualización de imágenes.
- Un gestor de capas de información que define la lista de imágenes.
- Un administrador de la propiedad de capas de información que definen los atributos claves asociados con sus capas: referencias geográficas, clasificación de códigos geográficos, paleta de colores, líneas y símbolos.
- Un administrador de corrección de imágenes tarjetas o direcciones de drenaje.
- Un módulo de procesamiento del Modelo Digital del Terreno (MDT).
- Diferentes ventanas de enlace para la importación en VICAIR de diferentes formatos.
- Un módulo de procesamiento de imágenes, que reúne un conjunto de operaciones numéricas o morfológicas. (Hydrosiences Montpellier L'ATelier Hydrologique Spatialisé, 2020). (Ver Fig. 19 y Fig. 20).

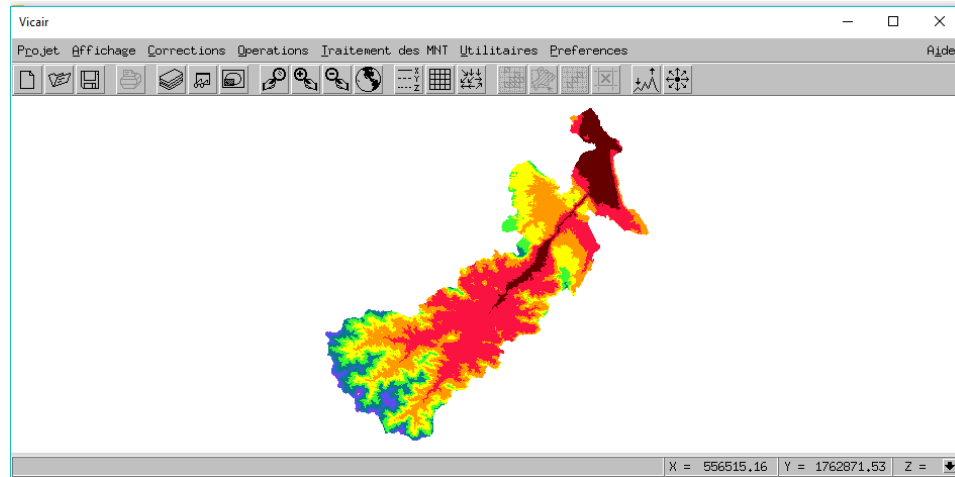


Fig. 19. Conversión de archivos de drenaje del menú Vicair del programa Athys. Fuente: INEGI. Elaboración: Propia.

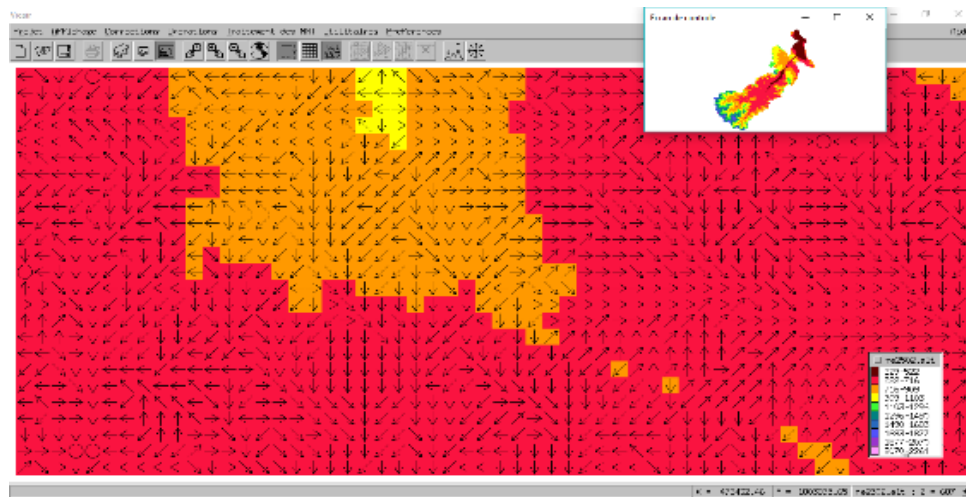


Fig. 20. Corrección de archivos de drenaje del menú Vicair del programa Athys. Fuente: INEGI. Elaboración: Propia.

3.2.4 Funciones de producción

La plataforma modelación MERCEDES genera una cuadrícula de celdas regulares, donde los datos de precipitaciones y caudales son de tiempo fijo, es decir pueden ir desde segundos hasta de 24 horas, los métodos de cálculo de infiltración (función de producción) que utiliza son el del SCS, Horton, TopModel, Green y Ampt, almacenamiento, Girard y Smith-Parlange. Mientras que el de tránsito de avenidas (función de transferencia) son: Lag y Route simple y geomorfológico, la ecuación de onda cinemática. Todo vinculado con VISHYR (procesador de datos hidrometeorológicos) y VICAIR (procesador de datos geográficos espaciales).

Para realizar la calibración se utilizan los métodos Simplex de Nelder y Mead, error medio cuadrático, error medio aritmético, el criterio de Nash y el llamado CREC.

Las funciones de producción determinan la proporción de lluvia neta o en exceso que llegará a la salida de la cuenca, llamada escurrimiento directo. Las funciones de producción propuesta MERCEDES corresponden a diferentes tipos de procesos físicos y cubre un amplio espectro del funcionamiento de la hidrología clásica. (Hydrosciences Montpellier L'Atelier Hydrologique Spatialisé, 2020).

Los esquemas describen el proceso tipo Hortoniano o tipo de áreas contributivas, o asociados con diferentes conceptos, basados en el almacenamiento. Las principales funciones disponibles en ATHYS son:

- Green y Ampt
- Horton
- TopModel
- Reservoirs
- SCS
- Althair

Cada una de estas funciones tiene sus propios parámetros. El modelo que se utilizó para hacer el cálculo de la infiltración fue el del SCS. El modelo fue desarrollado por el Servicio de conservación de Suelos de los EU, el cual relaciona la precipitación efectiva P_e con lluvia neta o bruta P_b , (*ecuación 1*).

$$P_e = \frac{(P_b - I_a)^2}{(P_b - I_a) + S} \quad (1)$$

Donde

- **Ia** representa las pérdidas que ocurren al inicio de cada precipitación
- **S** es la capacidad de retención de agua en el suelo (infiltración acumulada).

El modelo expresa el cambio de coeficiente de escurrimiento, de 0 cuando el acumulado de las lluvias bruta o neta es inferior a I_a y 1, cuando la lluvia bruta acumulada tiende a infinito. Los parámetros de ajuste de modelo I_a y S , en general se aceptan están relacionados (*ecuación 2*).

$$I_a = 0.2 S \quad (2)$$

S , es expresada en mm, también puede ser relacionada al número de curva del SCS (*ecuación 3*)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{3}$$

Mercedes, utiliza el coeficiente de escurrimiento instantáneo (*ecuación 4*)

$$C(t) = \frac{\partial Pb}{\partial Pe} = \left(\frac{Pb - 0.2 S}{Pb + 0.8 S} \right) \left(2 - \frac{Pb - 0.2 S}{Pb + 0.8 S} \right) \tag{4}$$

Este patrón también se completó en Mercedes, un tanque de tierra cuyo nivel describe la evolución de la acción del agua de forma continua. El tanque se alimenta por el agua que se infiltra y se drena por la evaporación, la percolación hacia la capa profunda, la acción del flujo por gravedad. El drenaje se calcula generalmente utilizando el modelo lineal del depósito, como se observa en la *Fig. 21*. (Hydrosciences Montpellier L'Atelier Hydrologique Spatialisé, 2020).

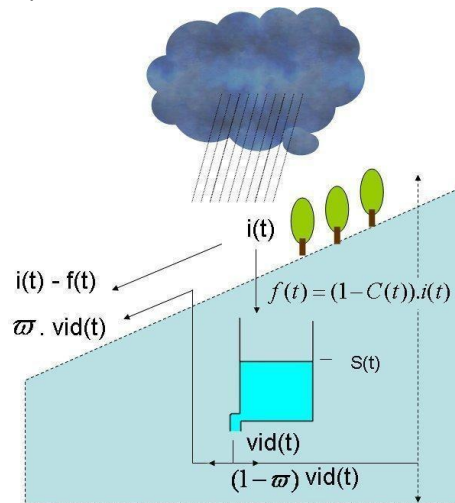


Fig. 21. Proceso lluvia escurrimiento del modelo del SCS. Fuente: Manual de ATHYS. Elaboración: Manual de ATHYS.

Las ecuaciones del esquema son las siguientes (*ecuaciones 5 y 6*):
 De escurrimiento

$$R(t) = C(t) \cdot i(t) \tag{5}$$

Con:

$$C(t) = \left(\frac{P(t) - 0.2 S}{P(t) + 0.8 S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0.2 S}{P(t) + 0.8 S} \right) \tag{6}$$

Donde P (t) corresponde a la suma de la lluvia neta en el tiempo t en el comienzo del episodio, C (t) para el coeficiente de escurrimiento en función del tiempo (t), i(t) la intensidad de lluvia en función del tiempo (t), esto es igual dP(t)/dt y R(t) es el escurrimiento en el tiempo (t). La función que representa lo que ocurre en un estanque o depósito o celda. (*ecuación 7*).

$$f(t) = (1 - C(t)) \cdot i(t) \quad (7)$$

Por lo que $f(t)$ corresponde a la infiltración en el tiempo t . El drenaje superficial está dado por la [ecuación 8](#).

$$Vid(t) = ds \cdot S(t) \quad (8)$$

Donde $S(t)$ denota el nivel del estanque en el tiempo t , $Vid(t)$ la intensidad de la infiltración en el tiempo t y ds el coeficiente de proporcionalidad entre el nivel del estanque y la intensidad de la infiltración. Por lo tanto, el nivel del estanque se calcula combinando la ecuación anterior (X) con la ecuación de continuidad ([ecuación 9](#))

$$\frac{dS(t)}{dt} = f(t) - Vid(t) \quad (9)$$

A partir de la versión 5.2.1, la evapotranspiración se introdujo en el cálculo del vaciado del estanque. Los valores de evapotranspiración deben ser leídos desde el archivo de datos hidroclimatológicos y ser almacenados en un archivo con el tipo debe ser declarado como "EV" (tipo 5). La variación de ésta es calculada por la [ecuación 10](#).

$$\frac{dS(t)}{dt} = f(t) - Vid(t) - Ev(t) \quad (10)$$

Donde

Ev (t) representa la intensidad de la evapotranspiración con respecto al tiempo.

3.2.5 Variación de la precipitación neta en estanque

Para que el esquema sea consistente, el estanque de drenaje aplicado al subsuelo se debe introducir a la precipitación acumulada, de manera que el coeficiente de escurrimiento $C(t)$ es 0 cuando el estanque del subsuelo está vacío.

La precipitación neta acumulada $P(t)$ debe ser reducida en relación con la infiltración del estanque del subsuelo. Esto se logra mediante la introducción de un drenaje Vi_2 , aplicado a la lluvia acumulada ([ecuaciones 11 y 12](#)).

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - Vid_2(t) \quad (11)$$

Por último, se considera que la cantidad infiltrada, $Exf(t)$, ([ecuación 13](#)) que corresponde a una fracción del volumen drenado, se pierde por el flujo producido por la gravedad.

$$Exf(t) = \omega \cdot Vid(t) \quad (13)$$

El escurrimiento total $R_{tot}(t)$ producido por un estanque o pixel en el tiempo t está dado por la [ecuación 14](#).

$$R_{tot}(t) = i(t) - f(t) + Exf(t) \quad (14)$$

Las ecuaciones diferenciales anteriormente descritas se solucionan mediante esquemas explícitos en cada paso de tiempo de t_0 , $t_0 + DT$. (Hydrosciences Montpellier L'ATelier Hydrologique Spatialisé, 2020).

Los parámetros y unidades de este modelo son cuatro S , la/S , w y ds ,

- **S (mm)** es la capacidad máxima de infiltración del suelo. Esta capacidad depende de muchas características del suelo: profundidad, heterogeneidad, porosidad, conductividad hidráulica, etc.
- **la/S** (adimensional) es la proporción de pérdidas iniciales con respecto a la capacidad máxima del suelo. Esta proporción generalmente se estima como 0.20.
- **w** (adimensional) es la fracción del drenaje que se infiltra. Este parámetro refleja el flujo retardado que viene desde la superficie del suelo, y debe ajustarse a las de acuerdo a la infiltración observada.
- **ds** , es el coeficiente de la descarga exponencial de la lámina de infiltrada, simulando el vaciado del suelo del tanque (evaporación, la percolación, la escorrentía, etc.). Un valor 1 conduce a una tasa diaria de 63% de vaciado ($= 1 - \exp(-1)$), y en un drenaje por hora corresponde a una tasa de 4% ($= 1 - \exp(-1/24)$). Los valores ds van teóricamente desde 0 (sin fuga) hasta ∞ (vaciado completo del depósito en cada momento del cálculo). En la práctica, ds se puede comparar con la pendiente de la disminución representada en coordenadas logarítmicas.

3.2.6 Modelo de transferencia o tránsito de un caudal

La transferencia se hace a través de un mallado o pixelado de modo independiente, cada píxel produce un hidrograma elemental en la salida. La adición de todos los hidrogramas iniciales generados para todos los pixelados o todo el mallado cuya variación es en el tiempo, completan un hidrograma total de crecida a la salida de la cuenca. (Hydrosciences Montpellier L'ATelier Hydrologique Spatialisé, 2020).

Donde T_m , son los tiempos de propagación en la salida de la contribución producida por la célula o malla, calculada la función de longitudes L_k y la velocidad V_k relativas a cada una de los k -mallas de la trayectoria ([ecuación 15](#))

$$T_m = \sum \frac{l_k}{V_k} \frac{60}{dt} \tag{15}$$

Donde K_m , es el tiempo de amortiguamiento, indicando las variaciones de la velocidad en el tiempo. El amortiguamiento se simula mediante un tanque lineal cuya capacidad es K_m . La ecuación del primer hidrograma asociada con la contribución de la malla o píxel entre t_0 y $t_0 + DT$ por lo tanto, está escrita en términos de tasa de flujo específica (ecuación 16 y 17). (Fig. 22).

$$q(t) = 0 \quad \text{si} \quad t < t_0 + T_m \tag{16}$$

$$q(t) = \frac{p(\Delta t)}{K_m} \cdot \text{si} \quad t < t_0 + T_m \tag{17}$$

A es el área de la malla o pixel

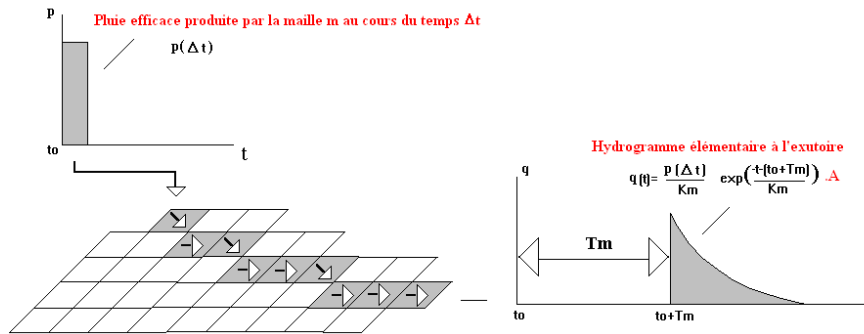


Fig. 22. Modelo Lag and Route Fuente: Manual de ATHYS. Elaboración: Manual de ATHYS.

MERCEDES tiene varias relaciones para la fijación de T_m y K_m . El análisis de tanque de diferentes características revela dos reglas simples:

Regla de uniformidad: utiliza dos parámetros V_0 y K_0

La organización espacial de velocidades de transferencia puede ser descritos por un vector de traslación constante en todas las mallas o pixeles: $V_m = V_0 = \text{constante}$, asociada con una ley de amortiguación en el que el tiempo de amortiguación es proporcional al tiempo de propagación: $K_m = K_0 T_m$.

El término V_0 constante se puede estimar como la velocidad máxima a la salida durante el evento. Mientras la experiencia muestra que la constante de proporcionalidad se puede ajustar empíricamente a $K_0 = 0.7$.

Regla geomorfológica: utiliza cuatro parámetros V_0, α, β, K_0

La organización espacial de las velocidades de transferencia pueden ser descritas por un vector de traslación proporcional al gradiente y el área de drenaje aguas arriba de cada pixel o malla, si $V_m = V_0 \alpha \cdot S \beta = \text{cte}$, asociada con una ley de amortiguamiento es proporcional a los tiempos de propagación: $K_m = K_0 \cdot T_m$.

La constante V_0 puede estimarse como la relación de la velocidad máxima en la salida durante el evento, basado en la pendiente del área de drenaje hasta la salida de la cuenca. La constante de proporcionalidad se puede ajustar empíricamente a $K_0 = 0.5$. Los parámetros alfa y beta se pueden ajustar empíricamente a $\alpha = 0.5$ y $\beta = 0.2$. (Hydrosciences Montpellier L'Atelier HYdrologique Spatialisé, 2017).

3.2.7 Impacto de la variabilidad espacial de los suelos

En la tesis se realizó una clasificación de suelos dependiendo la altitud, existe una correspondencia muy significativa. Durante el procesamiento se obtuvieron diferentes rangos de altitud (msnm), como lo presenta en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Altitudes en la cuenca del Río Suchiapa. Elaboración: Propia.

Altitudes (msnm)	
Límite inferior	Límite superior
363	400
400	800
800	1200
1200	1600
1600	2000
2000	2400
2400	2800

En la **Fig. 23** se puede observar la clasificación de altitudes en msnm, expresando el límite superior de cada parámetro.

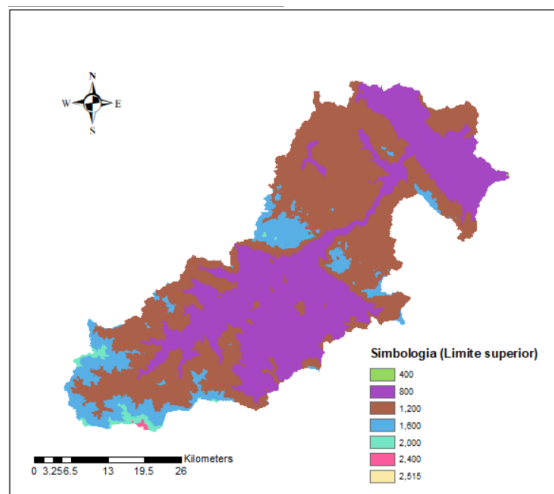


Fig. 23. Clasificación de altitudes en msnm. Elaboración: Propia.

De igual forma se notó una concordancia visual en cada rango de altitudes vistos en la **Tabla 4** con el mapa de Uso de suelos y vegetación, así como el de Edafología, la cual se presenta en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Concordancia de suelos y altitudes. Elaboración: Propia.

Altitudes (msnm)		Carta de Uso de suelo y vegetación	Carta Edafológica
Límite inferior	Límite superior	Suelo predominante	Composición de suelo predominante
363	400	Agua	Vertisol / Leptosol
400	800	Tierras agrícolas	Vertisol / Cambisol
800	1200	Bosque de coníferas: de pino y táscate	Cambisol / Leptosol
1200	1600	Bosque mesófilo y selva baja perennifolia	Cambisol / Leptosol
1600	2000	Bosque mesófilo y selva baja perennifolia	Leptosol
2000	2400	Bosque mesófilo y selva baja perennifolia	Leptosol
2400	2800	Bosque mesófilo y selva baja perennifolia	Leptosol

Por lo que más adelante procederá a introducir datos con la correlación encontrada.

Capítulo 4

Metodología para la aplicación de los modelos Athys.

4.1 Modelo Athys

En este capítulo abordaremos el programa Athys en la *Fig. 25* se puede observar la ventana principal. Para ello se va a la opción de **Arctoolbox – Conversion Tools – From Raster – Raster to ASCII**. El archivo Ascii se generará en formato .txt. Para este proyecto el archivo se nombró “Suchiapa 250”.

```

Console ATHYS
===== /ATHYS =====
/usr/local/lib/nc18.4
/usr/local/lib/nc8.4
/usr/local/bin/wish
ATHYS/athys
===== /ATHYS =====
/usr/local/lib/nc18.4
/usr/local/lib/nc8.4
/usr/local/bin/wish
/home/Casa/esp/.vicsrc
z

```



Fig. 24. Ventana principal del programa Athys. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia

Una vez obtenido el ASCII se procedió a generar los demás archivos, en la opción de **Vicair** en el menú principal (*Fig. 25*). El archivo “Suchiapa 250” se colocó en el directorio de trabajo del ATHYS creando una carpeta nueva para la lista de archivos para ese proyecto (c:/AthysE/home/casa/suchiapa/suchiapa).

Se eligió la opción de crear nuevo proyecto y se seleccionó el archivo ASCII; una vez visualizado el MDT en Vycair se eligió el menú de **Tratamiento de MNT – Ficheros derivados de MNT**. Se generaron dos archivos uno de formato .alt y otro .dra.

Cuando se crea el archivo en los píxeles se generan las direcciones de flujo, en muchas ocasiones esas direcciones aparecen en sentido contrario al flujo, por lo que hay que corregirlo como se muestra a continuación.

Se corrigen las depresiones que contiene el archivo, **Tratamiento de MNT – Corrección de Modelo de Drenaje – Detección/Corrección de Depresiones (Fig. 26).**

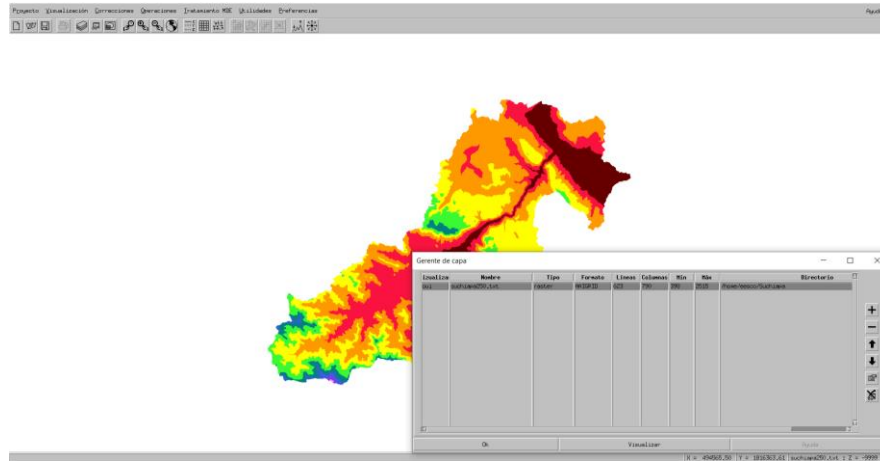


Fig. 25. Visualización de la cuenca en el menú de Vicair. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia

Se introdujo el archivo en formato .dra y se generaron dos archivos .dr1 y .tra. (Fig. 27)

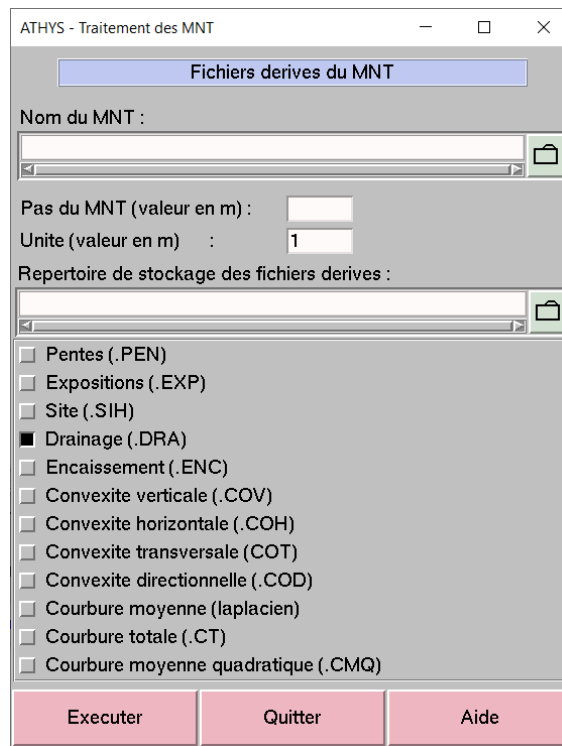


Fig. 26. Obtención del formato .dra en el menú de Vicair. Fuente: INEGI - ATHYS. Elaboración: Propia

Hasta este punto ya se encuentran generados los archivos con los cuales se trabajarán (Fig. 28). Por lo tanto, se abrió la pestaña de **Mercedes** ubicada en la pantalla de inicio.

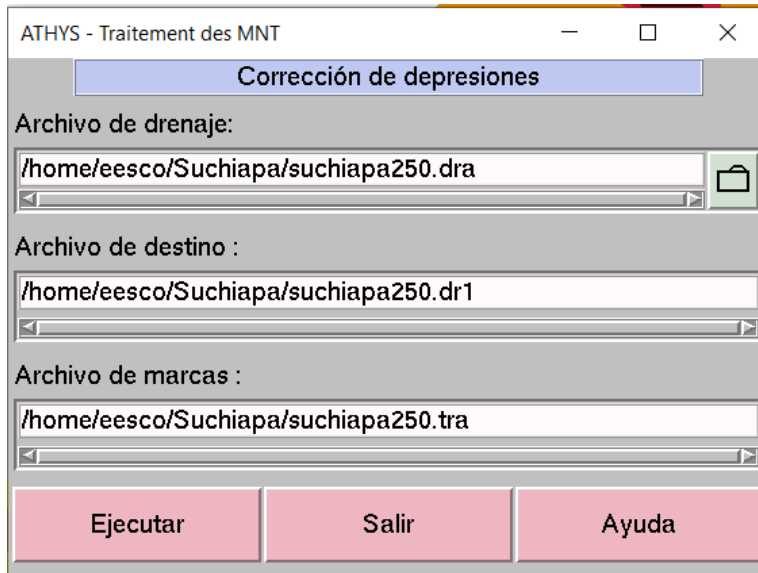


Fig. 27. Corrección de depresiones en el menú de Vicair. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

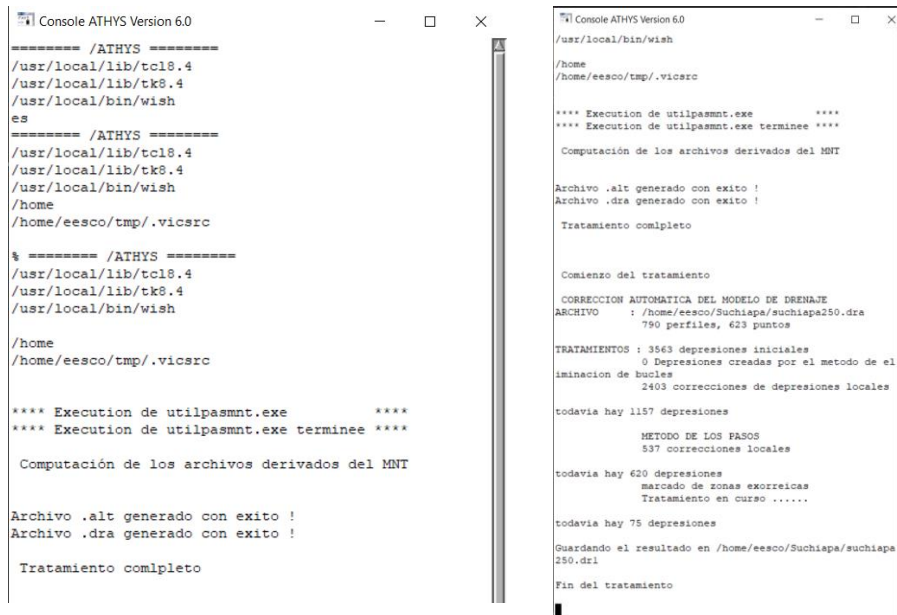


Fig. 28. Visualización del fin de los procesos. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

4.1.1 Calibración

En este subcapítulo se describen los pasos necesarios para ingresar los datos obtenidos anteriormente, así como el procedimiento de calibración.

En el menú de **Mercedes** (Fig. 29) se eligió la opción de **Basin Versant** (Fig. 30).

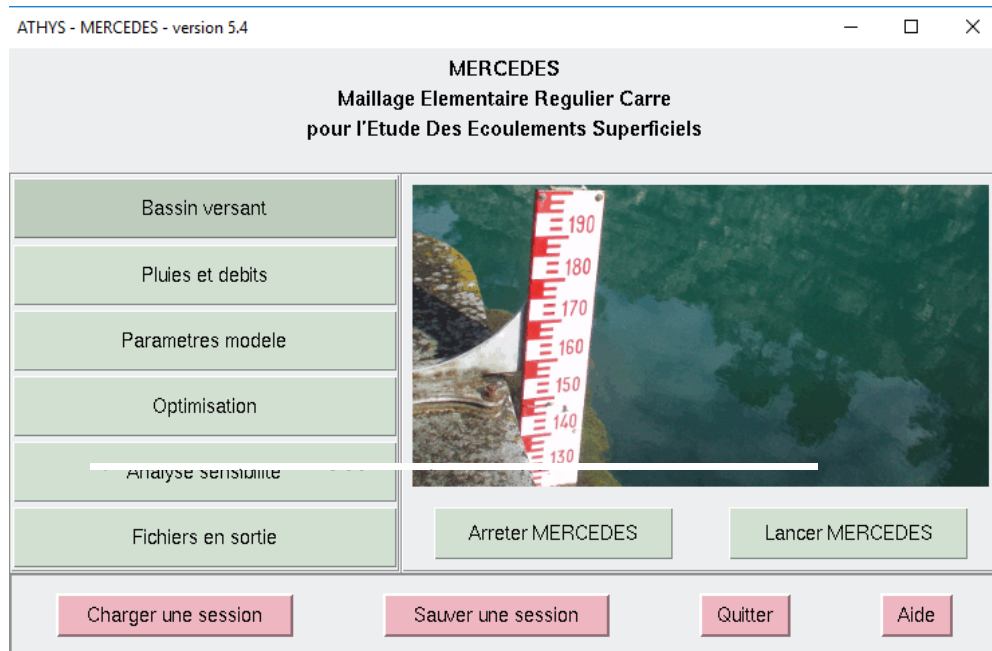


Fig. 29. Menú principal de Mercedes. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

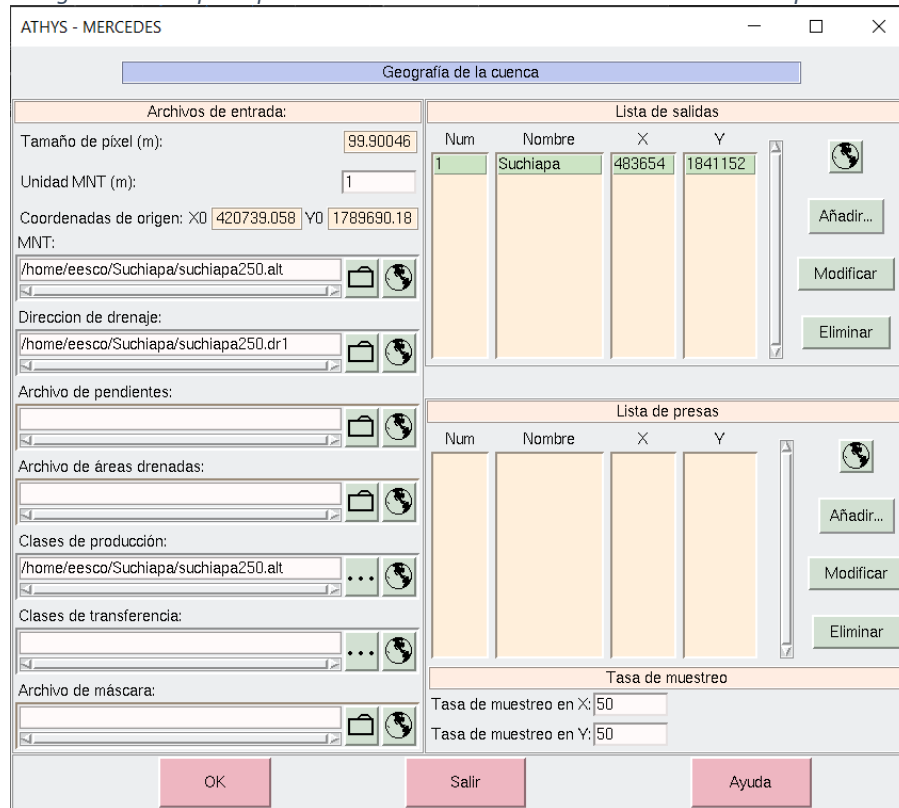


Fig. 30. Menú de Bassin Versant. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

Se seleccionó el archivo de MNT en formato .alt y la dirección de drenaje el archivo .dr1 (Fig. 31)

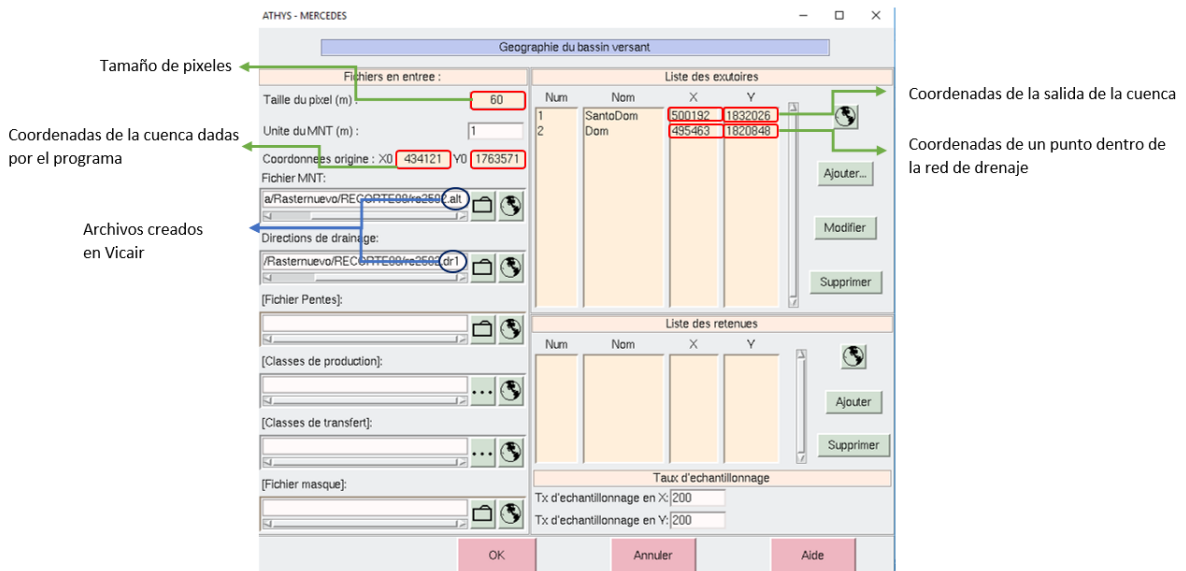


Fig. 31. Menú de Bassin Versant, con información. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

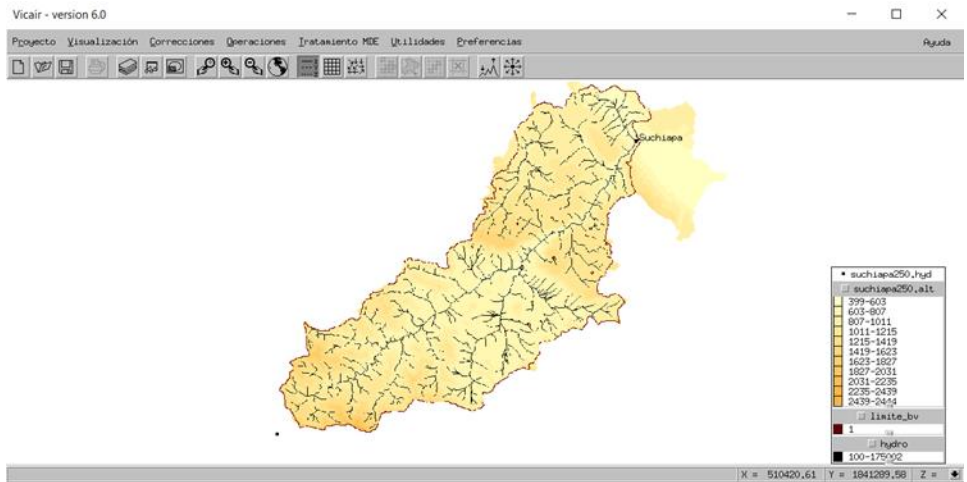


Fig. 32. Malla de drenaje de la subcuenca del Río Suchiapa. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia

Las coordenadas que se introdujeron para indicar la salida de la cuenca o donde se localiza la estación hidrométrica, no necesariamente fueron las coordenadas de la estación de Santo Domingo, ya que estas al ser tomadas con geoposicionadores convencionales tienen errores de $\pm 5m$, esto hace difícil de ubicar su posición exacta en Vicair, por lo tanto a prueba y error se localiza la salida, ya sea algunos metros aguas abajo o aguas arriba de la posición exacta de la estación hidrométrica, y sobre el cauce principal de la cuenca, cuando se introduzcan las coordenadas correctas se dibuja la malla de drenaje.

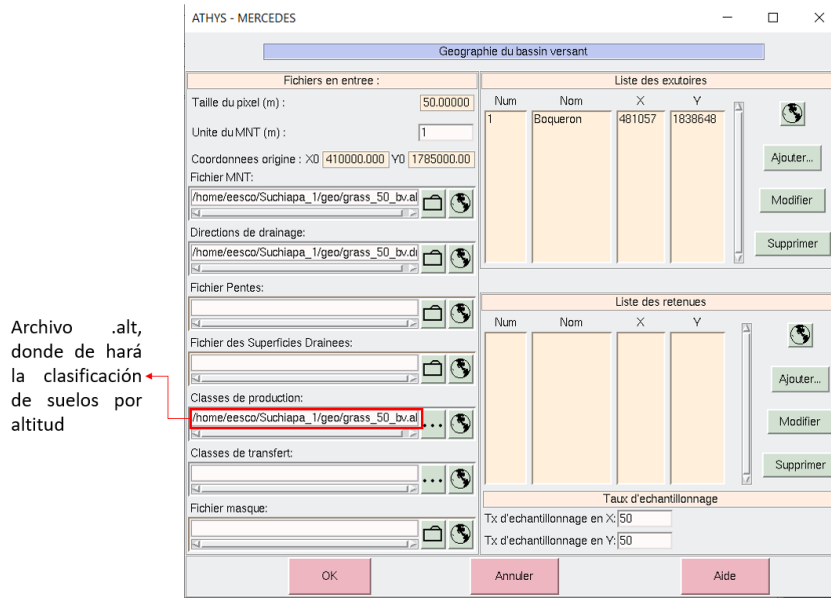


Fig. 33. Entrada de datos “Clasificación de suelos por altitud en el programa Athys”.

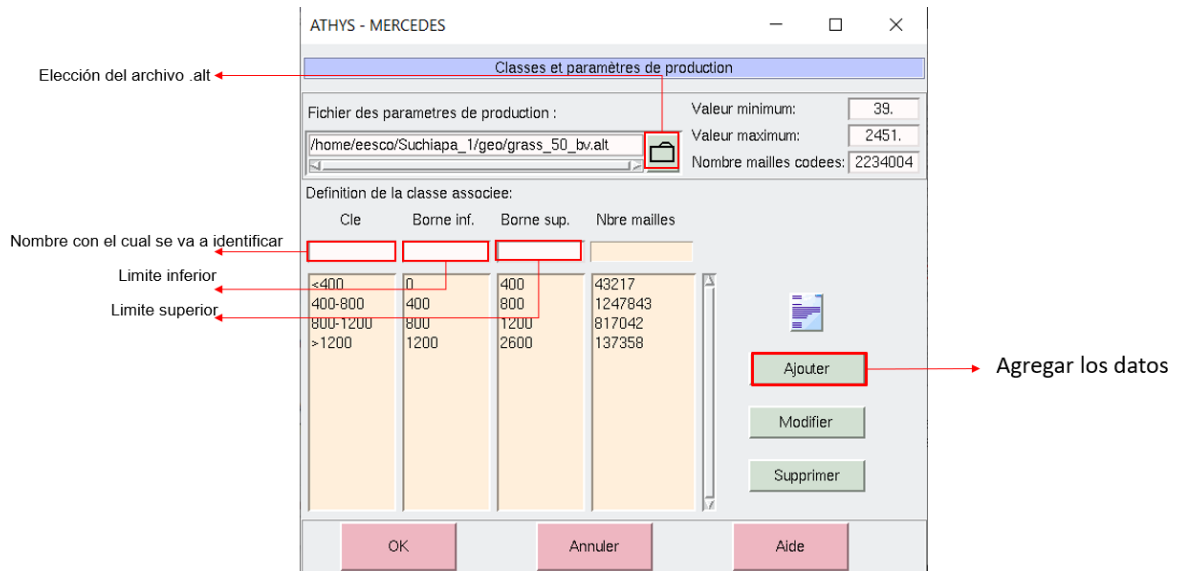


Fig. 34. Identificación “Clasificación de suelos por altitud en el programa Athys”

Una vez visto esta concordancia notoria, se puede determinar que cada tipo de suelo tiene una S (mm) diferente. Para realizar este procedimiento en Athys, dentro del apartado de **Mercedes – Basin versant**.

Posterior a esto se da click en los 3 puntos en donde se puede elegir el archivo .alt, así como los rangos a utilizar. Como tanto el Uso de suelo y vegetación son similares a partir de la altitud 1200 a 2515 msnm, se agrupa en 4 grupos, la primera es menores de 400, la

segunda entre 400 y 800 msnm, la tercera 800 y 1200 msnm y por último mayores de 1200 msnm. *Fig. 34.*

Se seleccionó en el menú principal **Pluies et debits** el episodio el cual se desea modelar y su archivo se encuentra en la carpeta raíz de ATHYS (*Fig. 35*).

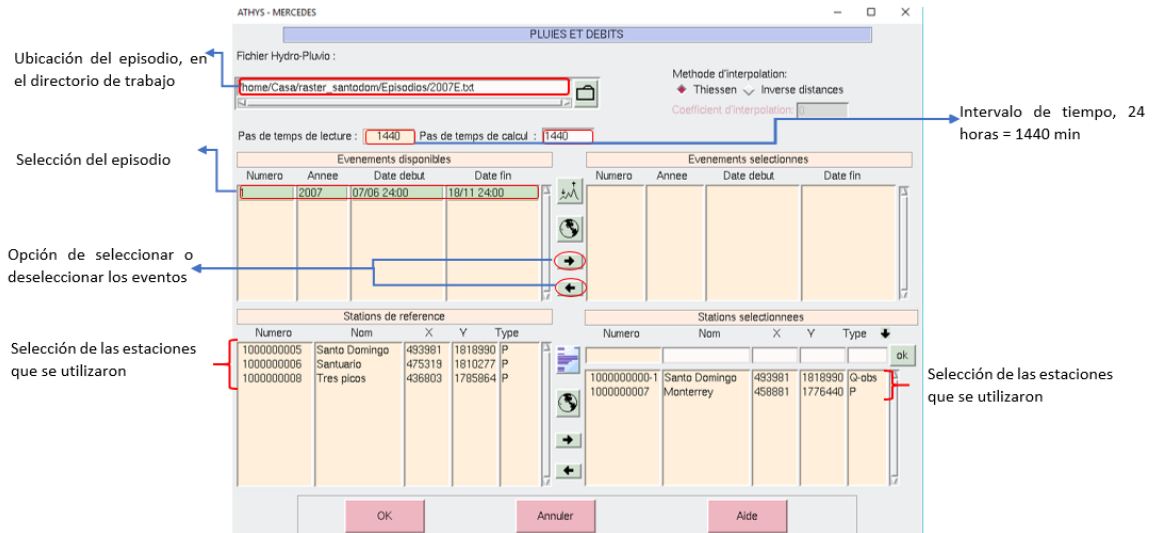


Fig. 35. Selección del episodio a calibrar. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

Realizado el paso anterior se seleccionó el menú de **Parametres Modele** y se modificaron los parámetros, siguiendo la metodología descrita a continuación. Dentro de este menú, se observaron que existen dos tipos de funciones, la función de producción y la función de transferencia, cada uno de ellos contiene diversas funciones como lo muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. *Funciones de producción y de transferencia. Fuente: Manual de ATHYS. Elaboración: Propia*

Función de producción	Función de transferencia
Reservoir – 1	Lag y Route – Simple
Reservoir – 2	Lag y Route – Geomorpho
Girard	Oc – rectang + Darcy
Green – Ampt	Oc – triang + Darcy
Stmith – Parlarge	Oc – geomorph + Dacry
Top - model	Otras
Scs	
Otras	

En nuestro caso se seleccionó para la función de producción se eligió la opción de “Otras”, con un valor de 19, de la siguiente forma “Otras_19”, por lo que los parámetros son los siguientes:

- S retención máxima (mm)
- Sa capacidad al campo (%)
- ds₁ coeficiente descarga lateral (día⁻¹)
- ds₂ coeficiente descarga vertical (día⁻¹)
- S₀ nivel inicial (mm)

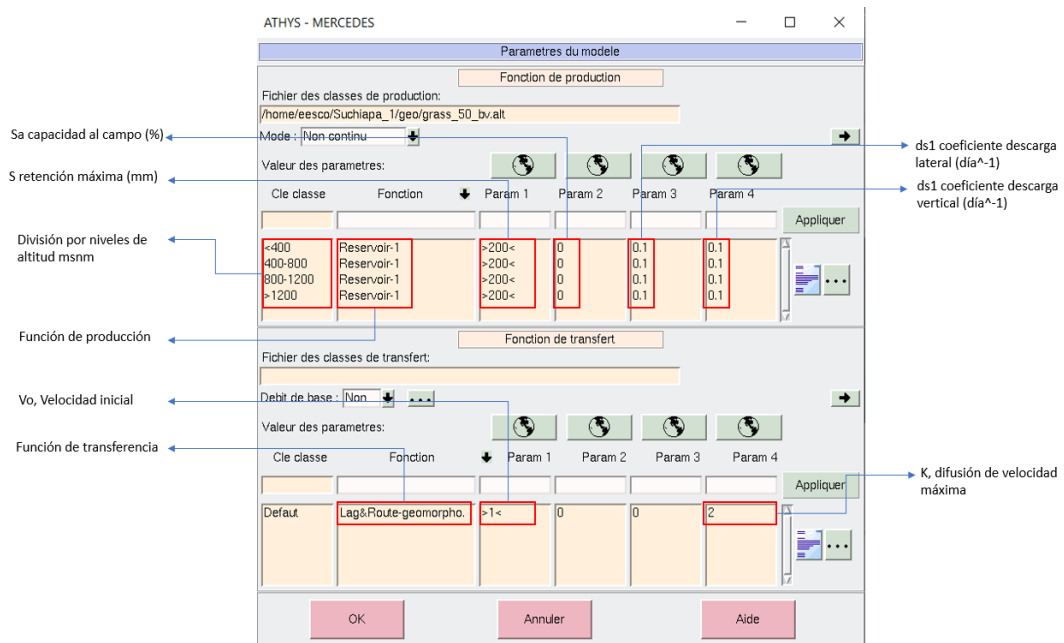


Fig. 36. Optimización de parámetros seleccionados. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

S en mm = la capacidad máxima del suelo del tanque. Esta capacidad depende de muchas características del suelo: profundidad, heterogeneidad, porosidad, conductividad hidráulica, inmersión sótano. Se trabajó primeramente para modificar los parámetros uno por uno: S = 100, 300, 500 mm

Sa, adimensionales = la proporción de pérdidas iniciales con respecto a la capacidad máxima del suelo del tanque. Esta proporción es generalmente estimada en 0.20.

ds₁, adimensional = fracción de vaciado de participar en la segunda vuelta, como infiltración. Este parámetro refleja el flujo retardado que viene desde el desagüe del perfil superior del suelo, y debe ajustarse a las inundaciones observadas. Se procuraron usar valores menores a 1.

ds_2 , en $j - 1$ = coeficiente de la descarga exponencial de la placa de infiltrado, simulando el vaciado del suelo del tanque (evaporación, la percolación, la escorrentía hipodérmica). Un valor 1 conduce a una tasa diaria de 63% de vaciado (= $1 - \exp(-1)$). Por lo que se tomó un valor inferior a 1. (Hydrosciences Montpellier L'Atelier Hydrologique Spatialisé, 2020).

S_0 nivel inicial (mm), se consideró de 100 mm como valor inicial.

Mientras que en la función de transferencia se eligió la función de “Lag y Route – Geomorfo”

- V_0 , Velocidad inicial, se asignó valores comprendidos de 1 a 1.5 m/s
- K , difusión de velocidad máxima, se asignó como valor inicial igual a 5. (Fig. 36).

Se comienza la calibración con datos de S en un rango de 100 a 400 (dependiendo la cuenca de estudio y sus características principales, cuando se hace el proceso de optimización el programa irá iterando con el fin de encontrar una S , mejor ajustada para cada valor de altitud. El otro parámetro a calibrar es V , la cual se sugiere colocarla en un rango de 1 a 3 m/s.

En el menú de optimización, se seleccionarán los parámetros 3 y 4 haciendo doble click, hasta que aparezcan “> <”. (Fig. 36). Posterior a eso se correrá el programa en **Lancer MERCEDES**. (Fig. 37).

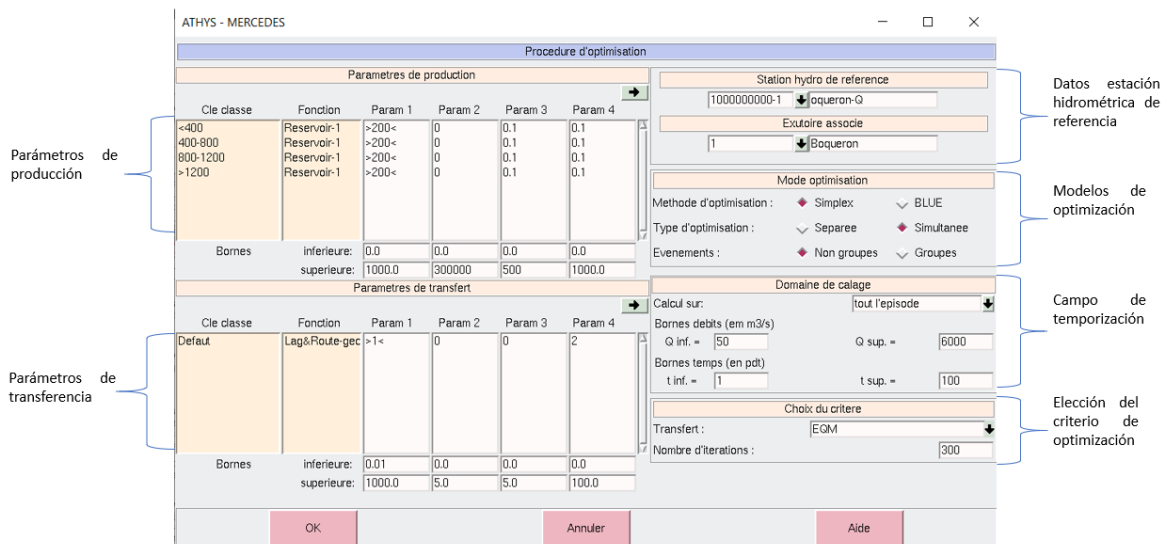


Fig. 37. Calibración de parámetros. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

Se modificaron los parámetros con el procedimiento anteriormente descrito, hasta que se observaba que la modificación entre ellos tuvo un ajuste regular, para luego al correr el programa y optimizar con la función de Fp_{19} , el valor de Nash se acercara a +1. (Fig. 40)



Fig. 38. Lancer Mercedes. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

Console ATHYS

Evenement no : 1 Date : 21- 8-2007

PRODUCTION										
Classe	Cle	FP	Param1	Param2	Param3	Param4	Param5	Param6	Param7	Param8
1	Homogène	7	500,00	0,20	0,15	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00

TRANSFERT										
Classe	Cle	FT	Param1	Param2	Param3	Param4	Param5	Param6	Param7	Param8
1	Homogene	2	1,50	0,00	0,00	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau recapitulatif des resultats Bassin SantoDom
 Coordonnees exutoire X= 500192 Y= 1832026

No evenement 1

VALEURS OBSERVEES

Volume ecole (Km3)	164975,24
Volume ruissele (Km3)	*****
Debit max (m3/s)	128,89
Duree ecoulement (hrs)	2112,00

VALEURS CALCULEES

Volume ecole (Km3)	144696,71
Volume ruissele (Km3)	144696,71
Debit max (m3/s)	131,70
Duree ecoulement (hrs)	2136,00

VALEURS des CRITERES VOLUMES / Evenement

Nash (n.d.)	*****
Crec (n.d.)	*****
EQM (n.d.)	1,00
EAM (n.d.)	1,00

VALEURS des CRITERES DEBITIS / Evenement

Nash (n.d.)	0,86
Crec (n.d.)	0,18
EQM (n.d.)	0,34
EAM (n.d.)	0,24

Tableau recapitulatif des resultats Bassin Dom
 Coordonnees exutoire X= 495463 Y= 1820848

No evenement 1

VALEURS CALCULEES

Volume ecole (Km3)	132567,36
Volume ruissele (Km3)	132567,36
Debit max (m3/s)	144,31
Duree ecoulement (hrs)	2136,00

Fig. 39. Resultados. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

Finalmente se observaron los resultados mediante el menú de **Fichier en sortier** tal como aparece en la Fig. 40.

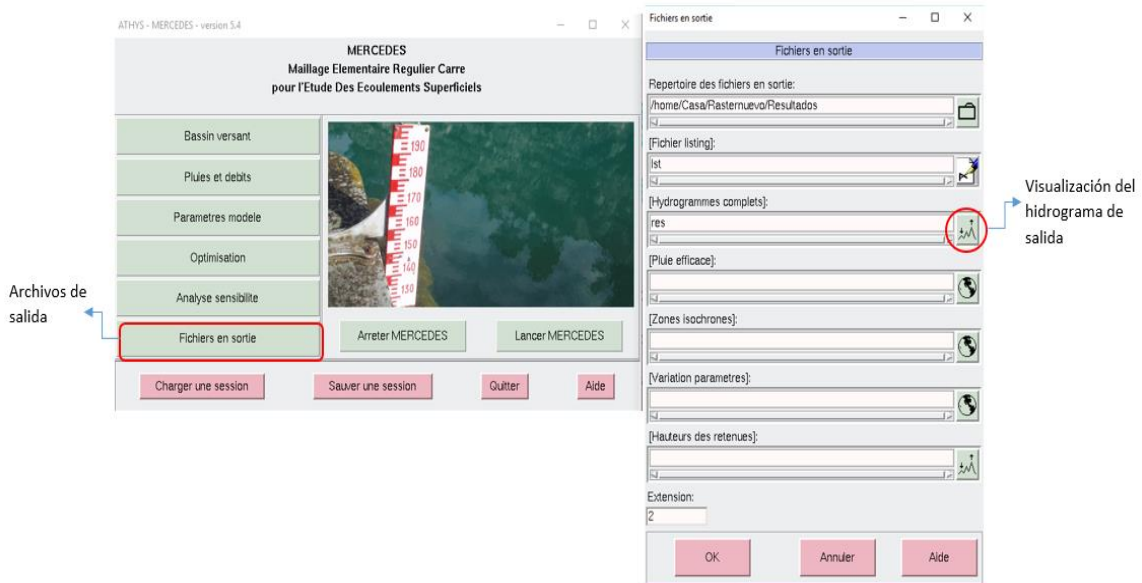


Fig. 40 Visualización de hidrograma. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

En donde la línea color azul es el hidrograma original, y el de color verde es el hidrograma calibrado. (Fig. 41).

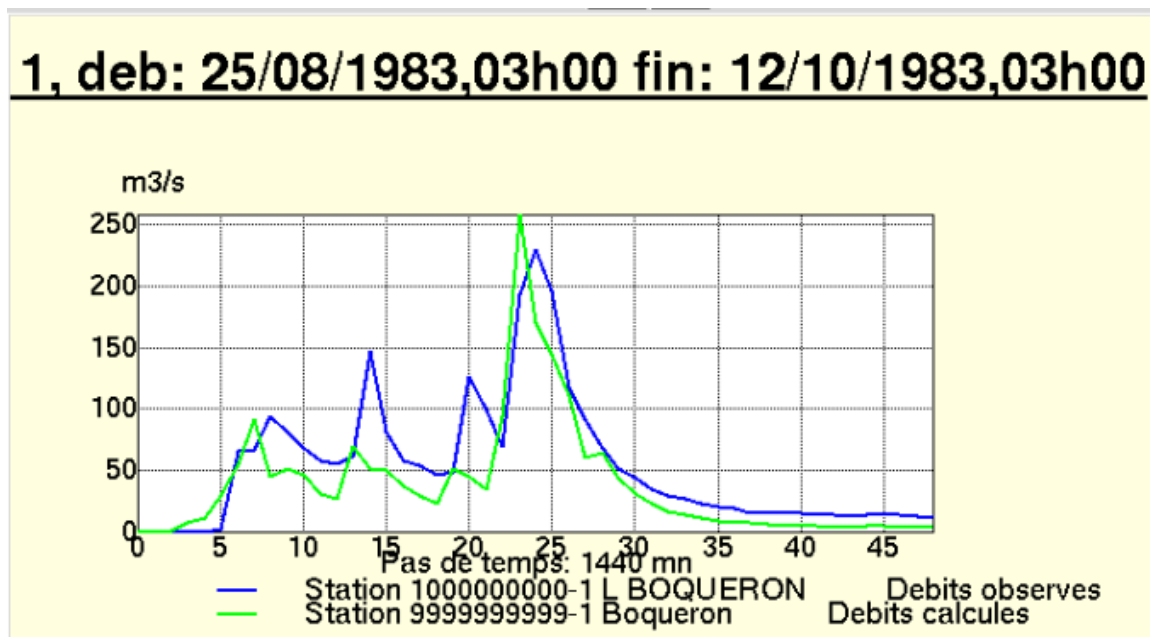


Fig. 41. Hidrograma resultante. Fuente: ATHYS. Elaboración: Propia.

Capítulo 5

Resultados obtenidos

5.1 Episodios

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en el programa Athys para episodios comprendidos de 24 horas las cuales se pueden observar en la **Tabla 7**. observan las fechas, mientras que de la **Tabla 8 a la Tabla 20**, se ilustran las calibraciones correspondientes a cada episodio.

Tabla 7. Fechas de episodios calibrados en el programa Athys. Elaboración: Propia

Episodios	
Inicio	Fin
25/08/1983	12/10/1983
02/10/1991	09/11/0991
11/08/1993	06/11/1993
05/09/1998	26/09/1998
08/09/2000	10/10/2000
04/10/2003	11/11/2003
05/07/2006	18/08/2006
21/08/2007	10/10/2007
10/10/2007	29/11/2007
18/09/2010	15/10/2010
18/09/2011	30/10/2011
24/08/2013	06/10/2013
02/09/2014	22/11/2014

Tabla 8. Calibración correspondiente de 26/08/1983 – 12/10/1983. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
25/8/1983	12/10/1983	0.64

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	23.46
Gasto final (m ³ /s)	14.56
Gasto máximo (m ³ /s)	229.4342

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	23.46
Gasto final (m ³ /s)	6.61
Gasto máximo (m ³ /s)	258.763

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	646.74	0	0.1	0.1
2	400-800	201.51	0	0.1	0.1
3	800-1200	94.15	0	0.1	0.1
4	1200>	0	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	1	0	0	2

Tabla 9. Calibración correspondiente de 03/10/1991 – 09/11/1991. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
02/10/1991	9/11/1991	0.79

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	9.11
Gasto final (m ³ /s)	0
Gasto máximo (m ³ /s)	87.98

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	9.27
Gasto final (m ³ /s)	11.13
Gasto máximo (m ³ /s)	86.02

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	121.31	0	0.1	0.1
2	400-800	188.37	0	0.1	0.1
3	800-1200	71.11	0	0.1	0.1
4	1200>	201.66	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.77	0	0	2

Tabla 10. Calibración correspondiente de 12/08/1993 – 06/11/1993. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coficiente de Nash
11/8/1993	6/11/1993	0.82

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	22.03
Gasto final (m ³ /s)	14.61
Gasto máximo (m ³ /s)	210.57

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	22.21
Gasto final (m ³ /s)	18.6
Gasto máximo (m ³ /s)	153.2

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	52.36	0	0.1	0.1
2	400-800	232.37	0	0.1	0.1
3	800-1200	98.27	0	0.1	0.1
4	1200>	151.71	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.63	0	0	2

Tabla 11. Calibración correspondiente de 05/09/1998 - 26/09/1998. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coficiente de Nash
05/09/1998	26/9/1998	0.79

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	19.34
Gasto final (m ³ /s)	0
Gasto máximo (m ³ /s)	552.91

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	20.53
Gasto final (m ³ /s)	145.79
Gasto máximo (m ³ /s)	350.98

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	199.99	0	0.1	0.1
2	400-800	100.12	0	0.1	0.1
3	800-1200	50.01	0	0.1	0.1
4	1200>	200.13	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	1.46	0	0	2

Tabla 12. Calibración correspondiente de 08/09/2000 – 10/10/2000. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
08/09/2000	10/10/2000	0.64

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	26.18
Gasto final (m ³ /s)	20.26
Gasto máximo (m ³ /s)	181.66

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	26.18
Gasto final (m ³ /s)	38.86
Gasto máximo (m ³ /s)	101.37

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	48.97	0	0.1	0.1
2	400-800	202.42	0	0.1	0.1
3	800-1200	213.17	0	0.1	0.1
4	1200>	409.16	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	1.43	0	0	2

Tabla 13. Calibración correspondiente de 04/10/2003 – 11/11/2003. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
04/10/2003	11/11/2003	0.86

Volúmenes observados (m ³)	
Gasto inicial (m ³ /s)	25
Gasto final (m ³ /s)	16.3
Gasto máximo (m ³ /s)	336

Volúmenes calculados (m ³)	
Gasto inicial (m ³ /s)	185.56
Gasto final (m ³ /s)	22.83
Gasto máximo (m ³ /s)	234.98

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	36.94	0	0.1	0.1
2	400-800	202.08	0	0.1	0.1
3	800-1200	0	0	0.1	0.1
4	1200>	433.97	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.83	0	0	2

Tabla 14. Calibración correspondiente de 05/07/2006 – 18/08/2006. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
05/07/2006	18/08/2006	0.65

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	19.1
Gasto final (m ³ /s)	20.7
Gasto máximo (m ³ /s)	118.9

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	19.1
Gasto final (m ³ /s)	24.03
Gasto máximo (m ³ /s)	91.48

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	39.25	0	0.1	0.1
2	400-800	224.43	0	0.1	0.1
3	800-1200	0	0	0.1	0.1
4	1200>	126.35	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.33	0	0	2

Tabla 15. Calibración correspondiente de 21/08/2007 – 10/10/2007. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
21/08/2007	10/10/2007	0.44

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	9.63
Gasto final (m ³ /s)	10.3
Gasto máximo (m ³ /s)	100.37

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	9.63
Gasto final (m ³ /s)	20.27
Gasto máximo (m ³ /s)	100.37

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	181.96	0	0.1	0.1
2	400-800	203.13	0	0.1	0.1
3	800-1200	61.65	0	0.1	0.1
4	1200>	250.49	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.17	0	0	2

Tabla 16. Calibración correspondiente de 10/10/2007 – 29/11/2007. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
10/10/2007	29/11/2007	0.76

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	10.8
Gasto final (m ³ /s)	0
Gasto máximo (m ³ /s)	99.2

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	10.93
Gasto final (m ³ /s)	12.3
Gasto máximo (m ³ /s)	80.38

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	145.73	0	0.1	0.1
2	400-800	268.91	0	0.1	0.1
3	800-1200	29.33	0	0.1	0.1
4	1200>	205.5	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.38	0	0	2

Tabla 17. Calibración correspondiente de 08/09/2010 – 15/10/2010. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
18/09/2010	15/10/2010	0.35

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	34.3
Gasto final (m ³ /s)	32.8
Gasto máximo (m ³ /s)	567.7

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	41.25
Gasto final (m ³ /s)	33.85
Gasto máximo (m ³ /s)	170.51

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	0	0	0.1	0.1
2	400-800	0	0	0.1	0.1
3	800-1200	66.19	0	0.1	0.1
4	1200>	427.66	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.54	0	0	2

Tabla 18. Calibración correspondiente de 18/09/2011 – 30/10/2011. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coficiente de Nash
18/9/2011	30/10/2011	0.4

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	19
Gasto final (m ³ /s)	50
Gasto máximo (m ³ /s)	441

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	19
Gasto final (m ³ /s)	51.53
Gasto máximo (m ³ /s)	85.36

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	199.93	0	0.1	0.1
2	400-800	199.93	0	0.1	0.1
3	800-1200	50.18	0	0.1	0.1
4	1200>	399.91	0	0.1	0.1

Transferencia		Vo (m/s)			K
		0.34	0	0	2

Tabla 19. Calibración correspondiente de 24/08/2013 – 06/10/2013. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coficiente de Nash
24/08/2013	06/10/2013	0.16

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	36.8
Gasto final (m ³ /s)	33
Gasto máximo (m ³ /s)	402.2

Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	38.21
Gasto final (m ³ /s)	34.04
Gasto máximo (m ³ /s)	140.46

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	0	0	0.1	0.1
2	400-800	0	0	0.1	0.1
3	800-1200	0	0	0.1	0.1
4	1200>	429.67	0	0.1	0.1

Transferencia		Vo (m/s)			K
		0.53	0	0	2

Tabla 20. Calibración correspondiente de 02/09/2014 – 22/11/2014. Elaboración: Propia

Inicio	Fin	Coefficiente de Nash
02/09/2014	22/11/2014	0.26

Volúmenes observados	
Gasto inicial (m ³ /s)	12.9
Gasto final (m ³ /s)	12.2
Gasto máximo (m ³ /s)	242.38

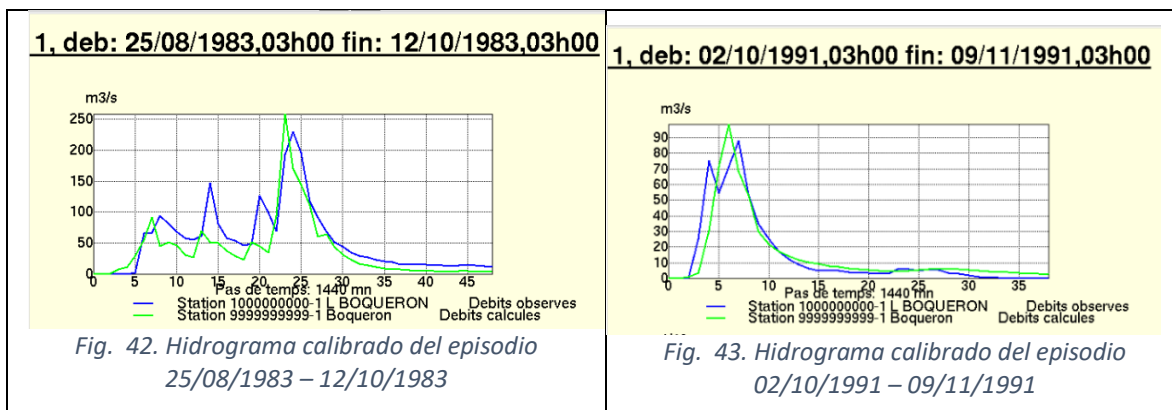
Volúmenes calculados	
Gasto inicial (m ³ /s)	12.9
Gasto final (m ³ /s)	2.6
Gasto máximo (m ³ /s)	98.25

Producción	Clase	S (mm)	Inf (mm/hr)	w	ds (1/hora)
1	<400	109.51	0	0.1	0.1
2	400-800	199.55	0	0.1	0.1
3	800-1200	39.73	0	0.1	0.1
4	1200>	202.66	0	0.1	0.1

Transferencia	Vo (m/s)			K
	0.14	0	0	2

5.2 Hidrogramas

De la *Fig. 42* a *Fig. 55* se observan los hidrogramas resultantes, en los cuales se observa en la línea azul al hidrograma real y en el verde al calculado con la metodología descrita.



1, deb: 11/08/1993,03h00 fin: 06/11/1993,03h00

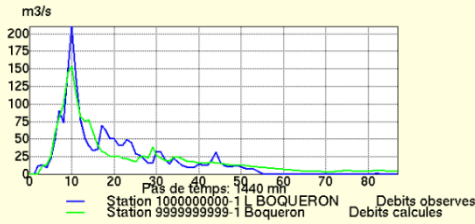


Fig. 44. Hidrograma calibrado del episodio 11/08/1993 – 06/11/1993

1, deb: 05/09/1998,03h00 fin: 26/09/1998,03h00

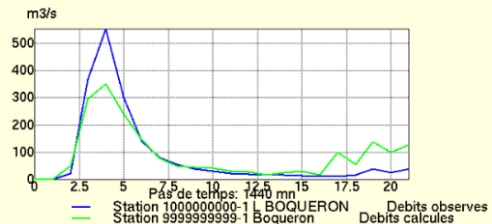


Fig. 45. Hidrograma calibrado del episodio 05/09/1998 – 26/09/1998

1, deb: 08/09/2000,03h00 fin: 10/10/2000,03h00

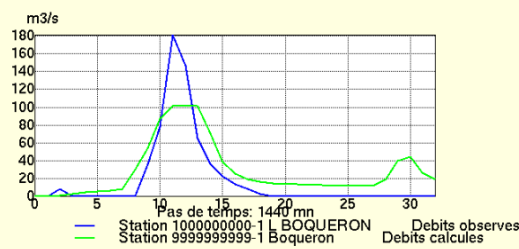


Fig. 46. Hidrograma calibrado del episodio 08/09/2000- 10/10/2000

1, deb: 04/10/2003,03h00 fin: 11/11/2003,03h00

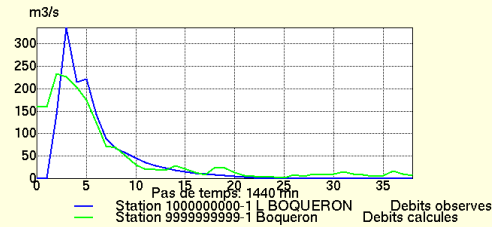


Fig. 47. Hidrograma calibrado del episodio 04/10/2003 – 11/11/2003

1, deb: 05/07/2006,03h00 fin: 18/08/2006,03h00

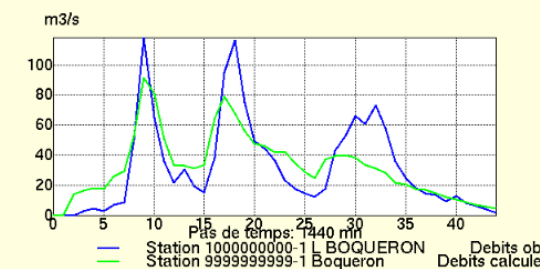


Fig. 48. Hidrograma calibrado del episodio 05/07/2006 – 18/08/2006

1, deb: 21/08/2007,03h00 fin: 10/10/2007,03h00

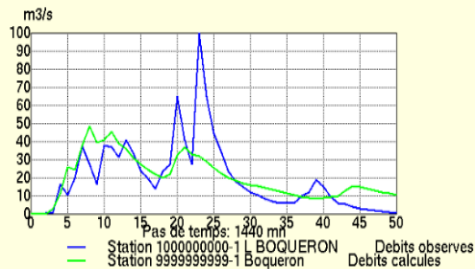


Fig. 49. Hidrograma calibrado del episodio 21/08/2007 – 10/10/2007

1, deb: 10/10/2007,03h00 fin: 29/11/2007,03h00

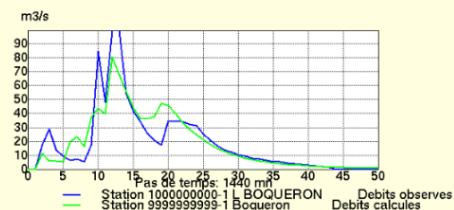


Fig. 50. Hidrograma calibrado del episodio 10/10/2007 – 29/11/2007

1, deb: 18/09/2010,03h00 fin: 15/10/2010,03h00

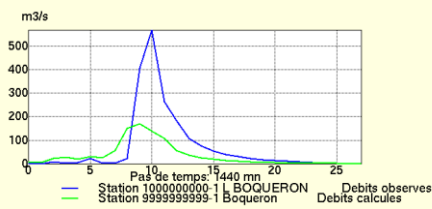


Fig. 51. Hidrograma calibrado del episodio 18/09/2010 – 15/10/2010

1, deb: 18/09/2011,03h00 fin: 30/10/2011,03h00

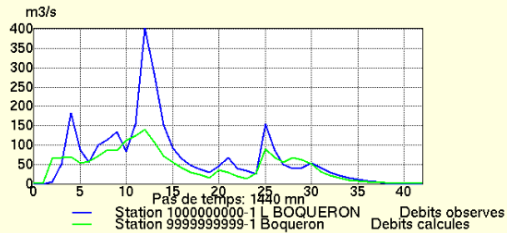


Fig. 52. Hidrograma calibrado del episodio 18/09/2011 – 30/10/2011

1, deb: 24/08/2013,03h00 fin: 06/10/2013,03h00

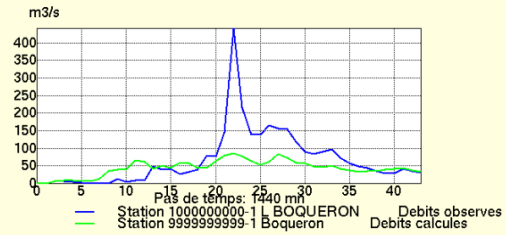


Fig. 53. Hidrograma calibrado del episodio 24/08/2013 – 06/10/2013

1, deb: 02/09/2014,03h00 fin: 22/11/2014,03h00

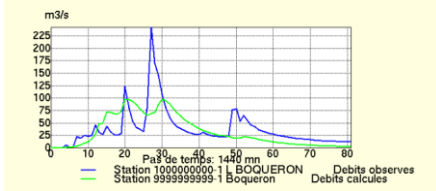


Fig. 54. Hidrograma calibrado del episodio 02/09/2014 – 22/11/2014

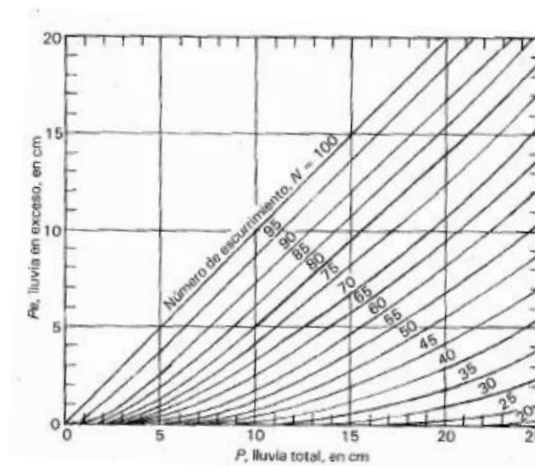
Capítulo 6

Relación de Humedad e Infiltración.

La siguiente metodología, consiste en observar el estado del suelo cinco días antes de cada evento que fue calibrado, es decir, conocer con qué humedad inicial con la que llegan los eventos. Por lo que en la **Tabla 21**, se concentran la precipitación total (Pt) 5 días antes de cada evento (en cm), siguiendo la metodología de los números de escurrimiento con respecto a la lluvia sobre el terreno.

Tabla 21. Precipitación total 5 días antes de cada evento. Elaboración: Propia

Episodios		Pt (cm)
Inicio	Fin	
25/08/1983	12/10/1983	8.10
02/10/1991	09/11/1991	1.53
11/08/1993	06/11/1993	5.16
05/09/1998	26/09/1998	48.08
08/09/2000	10/10/2000	44.17
04/10/2003	11/11/2003	10.35
05/07/2006	18/08/2006	0.00
21/08/2007	10/10/2007	1.03
10/10/2007	29/11/2007	3.00
18/09/2010	15/10/2010	2.94
18/09/2011	30/10/2011	14.30
24/08/2013	06/10/2013	5.72
02/09/2014	22/11/2014	32.65



Gráfica 6. Número de escurrimiento vs lluvia total. Elaboración: Aparicio, 1992.

Por lo consiguiente se utilizó el método de los números de escurrimiento, descrito en el libro de Fundamentos de Hidrología (Aparicio, 1992). Dentro de dicho apartado, se tiene que seleccionar el valor de N, el cual es el número de escurrimiento, cuyo valor depende del tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y precipitación antecedentes, entre otros factores. (Aparicio, 1992). Descrito lo anterior y conociendo los valores de la Tabla 5 (página 41), se puede concluir que la mayor parte de la cuenca es de Bosque mesófilo y selva baja perennifolia. Por lo que se le otorgará un valor de N= 78.

Lo que falta conocer es el valor de la precipitación en exceso (Pe), en Aparicio 1992, se observa en la parte inferior de la figura la Pe en cm; La **Gráfica 6**, tiene limitantes y es que solo considera como valores máximos de Pt (por arriba del 25 cm). Mientras que eventos menores al 25% se toman como valores irreales.

Conociendo ya Pt y Pe, se puede obtener la cantidad que se escurre y no se infiltra al suelo (*ecuación 18*). Para conocer el valor de infiltración únicamente es cuestión de realizar la siguiente fórmula (*ecuación 19*). En la **Tabla 22**, se observa un resumen de todo lo descrito anteriormente.

$$\text{Escurrimiento} = \frac{P_e}{P_t} \quad (18)$$

$$\text{Infiltración} = 1 - \frac{P_e}{P_t} \quad (19)$$

Tabla 22. Escurrimiento e infiltración. Elaboración: Propia

Episodios		Pt (cm)	N	Pe (cm)	Escurrimiento (Adimensional)	Infiltración (Adimensional)
Inicio	Fin					
02/10/1991	09/11/1991	1.53	0.78	1	0.65	0.35
11/08/1993	06/11/1993	5.16	0.78	2	0.39	0.61
21/08/2007	10/10/2007	1.03	0.78	0.6	0.58	0.42
10/10/2007	29/11/2007	3.00	0.78	1	0.33	0.67
18/09/2010	15/10/2010	2.94	0.78	1.2	0.41	0.59
18/09/2011	30/10/2011	14.30	0.78	13.8	0.97	0.03
24/08/2013	06/10/2013	5.72	0.78	4.5	0.79	0.21

Los siguientes valores son irreales, debido a la cantidad de Pt, se pudieron analizar (Recordar que el gráfico presentado por el Dr. Aparicio solo acepta hasta 25 cm). Ver **Tablas 23 y 24**.

Tabla 23. Episodios no calibrados, por el exceso de rango de valores. Elaboración: Propia.

Episodios		Pt (cm)	N
Inicio	Fin		
05/09/1998	26/09/1998	48.08	0.78

08/09/2000	10/10/2000	44.17	0.78
05/07/2006	18/08/2006	0.00	0.78

Tabla 24. Episodios no calibrados, por el rango de valores. Elaboración: Propia.

Episodios		Pt (cm)	N	Pe (cm)	Esguerrimiento (Adimensional)	Infiltración (Adimensional)
Inicio	Fin					
25/08/1983	12/10/1983	8.10	0.78	14.1	1.741	-0.741
04/10/2003	11/11/2003	10.35	0.78	12.5	1.208	-0.208
02/09/2014	22/11/2014	32.65	0.78	60	1.838	-0.838

En este punto es posible realizar una correlación entre el valor de Infiltración (S), obtenida en el programa Athys, como los valores de infiltración obtenidos en esta parte convertidos en porcentajes. Se recuerda que el valor de S, fue seleccionado según la altitud, por lo que se procederá a realizar un promedio de las infiltraciones. En la Tabla 24 presentada únicamente se considerarán los valores con los que sí fue posible considerar el volumen de infiltración cinco días antes presentado el evento (Procedimiento descrito por Aparicio, 1992). Ver **Tablas 25 y 26**.

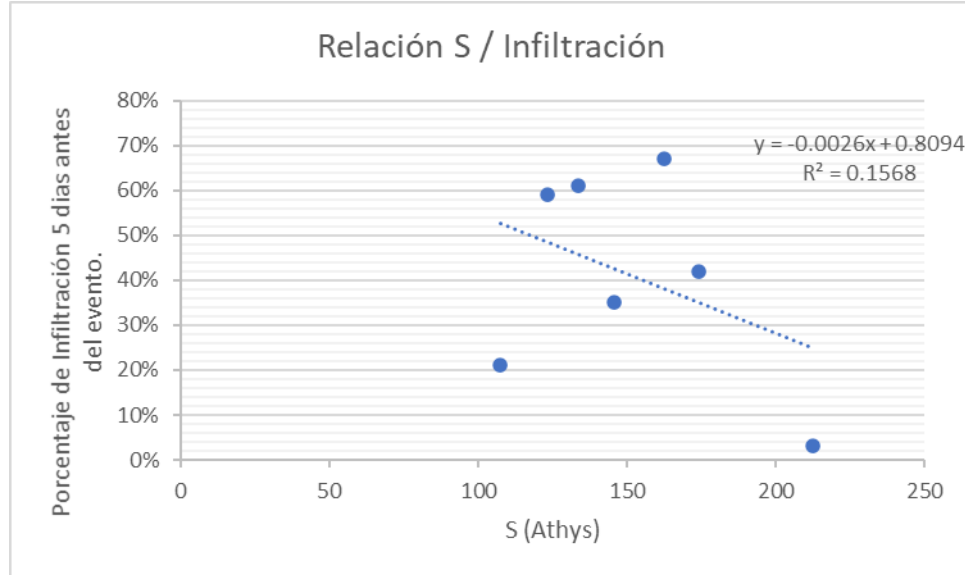
Tabla 25. Episodios con su respectiva infiltración (porcentaje) 5 días antes de cada evento. Elaboración: Propia.

Episodios		Infiltración %
Inicio	Fin	
02/10/1991	09/11/1991	35
11/08/1993	06/11/1993	61
21/08/2007	10/10/2007	42
10/10/2007	29/11/2007	67
18/09/2010	15/10/2010	59
18/09/2011	30/10/2011	03
24/08/2013	06/10/2013	21

Tabla 26. Episodios con su respectiva infiltración (porcentaje) 5 días antes de cada evento, con la infiltración resultante del programa Athys. Elaboración: Propia.

Nombre del Episodio	Episodios		Infiltración %	S (mm)
	Inicio	Fin		
E1	02/10/1991	09/11/1991	35	145.6125
E2	11/08/1993	06/11/1993	61	133.6775
E3	21/08/2007	10/10/2007	42	174.3075
E4	10/10/2007	29/11/2007	67	162.3675

E5	18/09/2010	15/10/2010	59	123.4625
E6	18/09/2011	30/10/2011	3	212.4875
E7	24/08/2013	06/10/2013	21	107.4175



Gráfica 7. Relación S/ Infiltración. Elaboración: Propia.

En la **Tabla 27**, se observa un concentrado de los valores obtenidos tanto en el programa Athys, como los obtenidos en la metodología del Dr. Aparicio.

Tabla 27. Resumen de información. Elaboración: Propia.

Episodios		S	w (ad)	ds (1/hora)	Vo (m/s)	K (ad)	Nash	Infiltración %
Inicio	Fin							
02/10/1991	09/11/1991	145.612	0.1	0.1	0.77	2	0.79	35.00
11/08/1993	06/11/1993	133.677	0.1	0.1	0.63	2	0.82	61.00
21/08/2007	10/10/2007	174.307	0.1	0.1	0.17	2	0.44	42.00
10/10/2007	29/11/2007	162.367	0.1	0.1	0.38	2	0.76	67.00
18/09/2010	15/10/2010	123.462	0.1	0.1	0.54	2	0.35	59.00
18/09/2011	30/10/2011	212.487	0.1	0.1	0.34	2	0.4	3.00
24/08/2013	06/10/2013	107.417	0.1	0.1	0.53	2	0.16	21.00

Capítulo 7

Estimación de lluvias futuras.

7.1 Periodo de retorno

En este capítulo se estiman lluvias sintéticas con diferentes periodos de retorno, los cuales son: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 1000. Para este análisis se utilizaron las siguientes estaciones:

- Galeana
- Finca Ocotlán
- Boquerón
- Úrsulo Galván
- El Progreso

Fue necesario analizar los años en que las estaciones han estado en funcionamiento y obtener la precipitación máxima en el año. Obtenidas las precipitaciones máximas de cada estación se procede a obtener un promedio, el cual aparece en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Precipitaciones promedio. Elaboración: Propia.

Estación	Precipitación promedio (mm)
Galeana	53.7
Finca Ocotlán	59.6
Boquerón	72.0
Úrsulo Galván	75.61
El Progreso	87.4

Para realizar este factor se recurrió al trabajo realizado para la cuenca Chicoasén, los cuales se observan en la **Tabla 29**.

Tabla 29. Factor de Regionalización Cuenca "Chicoasén". Elaboración: Domínguez, 2018.

Tr (años)	Factor de regionalización
2	0.93
5	1.21
10	1.44
20	1.68
50	1.99
100	2.22
200	2.46
500	2.76
1000	2.99

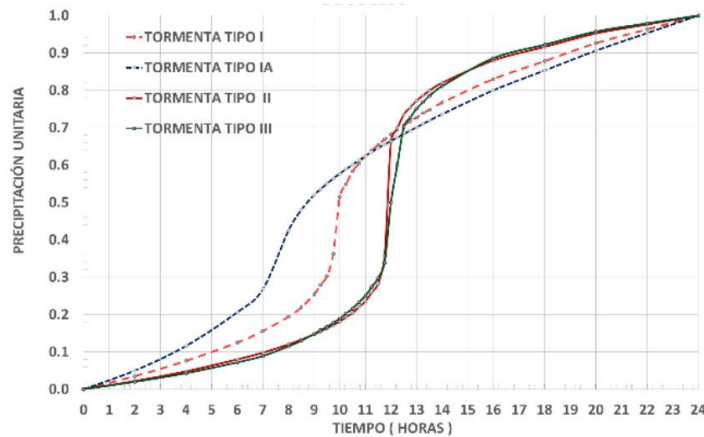
2000	3.23
5000	3.53
10000	3.76

Se realizó la multiplicación de precipitación media, por cada factor de regionalización, para cada periodo de retorno, como se observa en la **Tabla 30**.

Tabla 30. Precipitaciones asociadas a un periodo de retorno. Elaboración: Propia.

Tr (años)	Factor de regionalización	Boquerón	Galeana	Finca Ocotlán	Ursulo Galvan	El progreso
		72.0	53.66	59.57	75.61	87.3
2	0.93	66.96	49.90	55.40	70.32	81.2
5	1.21	87.12	64.92	72.08	91.49	105.7
10	1.44	103.68	77.26	85.78	108.88	125.8
20	1.68	120.96	90.14	100.07	127.02	146.8
50	1.99	143.28	106.77	118.54	150.46	173.9
100	2.22	159.84	119.11	132.24	167.85	194.0
200	2.46	177.12	131.99	146.54	186.00	214.9
500	2.76	198.72	148.09	164.41	208.68	241.2
1000	2.99	215.28	160.43	178.11	226.07	261.3
2000	3.23	232.56	173.31	192.41	244.22	282.2
5000	3.53	254.16	189.40	210.28	266.90	308.4
10000	3.76	270.72	201.74	223.98	284.29	328.5

La región comprendida de la Cuenca de Chicoasén (En donde se ubica la subcuenca del Río Suchiapa) tiene características para un tipo de tormenta III (ver **Gráfica 8**). Por lo que a continuación se procedió a multiplicar cada valor de la tabla anterior por los valores de la tormenta tipo III, **Tabla 31**. De acuerdo al método del Soil Conservation Service (NRCS).



Gráfica 8. Tipo de tormentas de diseño del NRCS según su intensidad. Fuente: Aguilar, 2017.

Tabla 31. Distribuciones de lluvia NRCS (U.S. Department of Agriculture, 1986)

<i>t (hrs.)</i>	<i>TIPO I</i>	<i>TIPO IA</i>	<i>TIPO II</i>	<i>TIPO III</i>
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
2.00	0.035	0.050	0.022	0.020
4.00	0.076	0.116	0.048	0.043
6.00	0.125	0.206	0.080	0.072
7.00	0.156	0.268	0.098	0.089
8.00	0.194	0.425	0.120	0.115
8.50	0.219	0.480	0.133	0.130
9.00	0.254	0.520	0.147	0.148
9.25	0.279	0.535	0.155	0.158
9.50	0.303	0.550	0.163	0.167
9.75	0.362	0.564	0.172	0.178
10.00	0.515	0.577	0.181	0.189
10.25	0.549	0.589	0.193	0.203
10.50	0.583	0.601	0.204	0.216
10.75	0.604	0.613	0.220	0.233
11.00	0.624	0.624	0.235	0.250
11.25	0.639	0.635	0.259	0.274
11.50	0.654	0.645	0.283	0.298
11.75	0.669	0.655	0.357	0.339
12.00	0.682	0.664	0.663	0.500
12.25	0.694	0.674	0.699	0.601
12.50	0.706	0.683	0.735	0.702
12.75	0.717	0.692	0.754	0.727
13.00	0.727	0.701	0.772	0.751
13.25	0.738	0.710	0.786	0.768
13.50	0.748	0.719	0.799	0.785
14.00	0.767	0.736	0.820	0.811
16.00	0.830	0.800	0.880	0.886
18.00	0.878	0.853	0.916	0.922
20.00	0.926	0.906	0.952	0.957
22.00	0.963	0.953	0.976	0.979

24.00	1.000	1.000	1.000	1.000
-------	-------	-------	-------	-------

Posterior a este cálculo, los datos que se obtuvieron tendrán que multiplicarse por dos factores:

- Reducción por Área
- Convectividad

El factor por reducción por área se utilizó la fórmula propuesta por Guichard y Domínguez, 1998.

$$FRA = -a Ln A + b$$

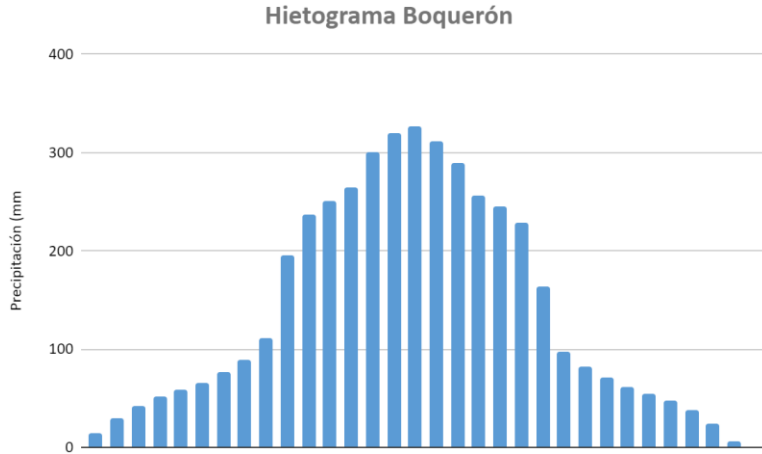
Después que se realiza el procedimiento anterior, se agruparon por cada periodo de retorno tal como aparece en la **Tabla 31**, en donde tienen las siguientes características:

- En la primera fila se encuentran ubicadas las letras “P”, las cuales son un indicativo de precipitaciones.
- En la segunda fila se encuentra una numerología para que el programa pueda reconocer las estaciones.
- Tercera fila es el nombre de las estaciones.
- En la tercera y cuarta fila se encuentran las coordenadas UTM.
- Mientras que las primeras columnas son las precipitaciones encontradas en los pasos descritos con anterioridad.

Los datos obtenidos por cada estación son clasificados por bloques alternos. Para que el histograma quede de la forma de la **Gráfica 8**.

P	P	P	P	P
1000000001	1000000002	1000000003	1000000004	1000000005
EL BOQUERON	GALEANA	FINCA OCOTLAN	URSULO GALVAN	EL PROGRESO
480625	461743	449106	455323	456907
1838075	1833150	1809900	1799835	1847417
14.01777468	4.858695848	5.394164757	6.846795501	7.913673723
29.01353364	17.49130505	19.41899312	24.6484638	28.4892254
42.3793188	27.93750113	31.01644735	39.36907413	45.5036239
51.50717208	35.95434928	39.9168192	50.66628671	58.56118555
58.02706728	40.57011033	45.04127572	57.17074243	66.07917558
66.17693628	45.91467577	50.97485695	64.70221748	74.78421668
75.95677908	52.47391516	58.25697937	73.94539141	85.4676762
89.32256424	60.7336981	67.42705946	85.58494376	98.92092153
110.5122236	72.39456814	80.37305488	102.017253	117.9137385
195.9228508	121.4673962	134.8541189	171.1698875	197.8418431
236.9981905	170.5402243	189.335183	240.3225221	277.7699477
250.3639757	182.4440291	202.5508866	257.0971711	297.1584483
264.3817504	190.703812	211.7209667	268.7367234	310.6116936
300.5671687	215.2402261	238.9614987	303.3130407	350.5757459
319.14887	232.4885963	258.1107836	327.6191647	378.6692876
325.99476	242.9347924	269.7082378	342.3397751	395.6836861
311.9769853	237.8331618	264.0443648	335.1506398	387.3743287
288.8313574	223.9858786	248.6709953	315.6372726	364.8203586
255.9058866	197.0201166	218.7333809	277.6375576	320.8994694
244.8220648	186.5739206	207.1359267	262.9169472	303.8850709
228.8483215	176.6135941	196.0778889	248.8810165	287.6620398
162.99738	146.0038102	162.0946509	205.7462048	237.8058954

Fig. 55. Lluvias sintéticas. Elaboración: Propia.



Gráfica 9. Ejemplo de hietograma. Elaboración: Propia.

Se procede a unir en un solo archivo considerando 744 horas, este cálculo fue realizado, considerando un mes para la conformación de hietogramas, pero en las cuales a la mitad de las mismas se colocará los hietogramas con los valores obtenidos. El archivo que el programa Athys requiere, debe de estar formado de gastos y precipitaciones. Los gastos se obtendrán de un episodio real, mientras que las precipitaciones serán las calculadas. Tal como aparece en la Fig. 56. Cabe recalcar que este procedimiento se realizó por cada uno de los periodos de retorno.

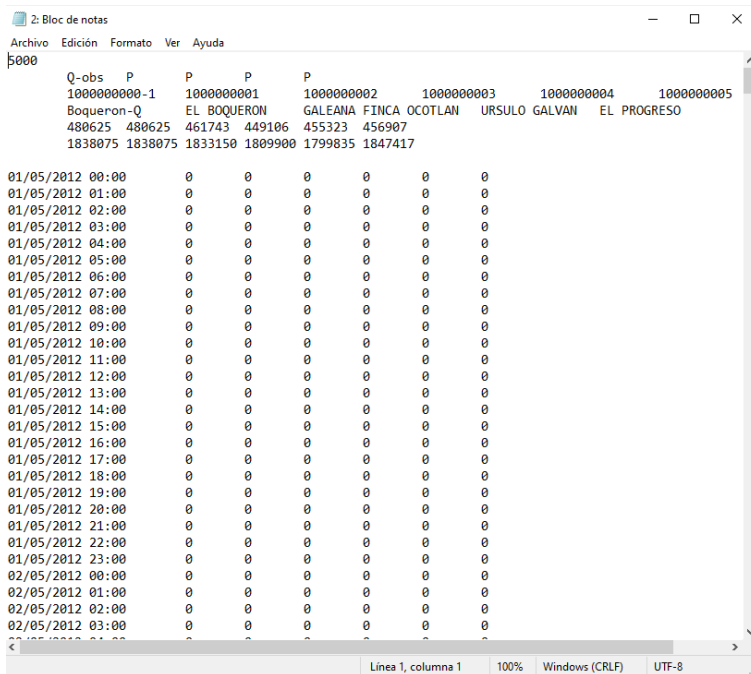


Fig. 56. Lluvia sintética Txt. Elaboración: Propia.

7.2 Calibración en Athys

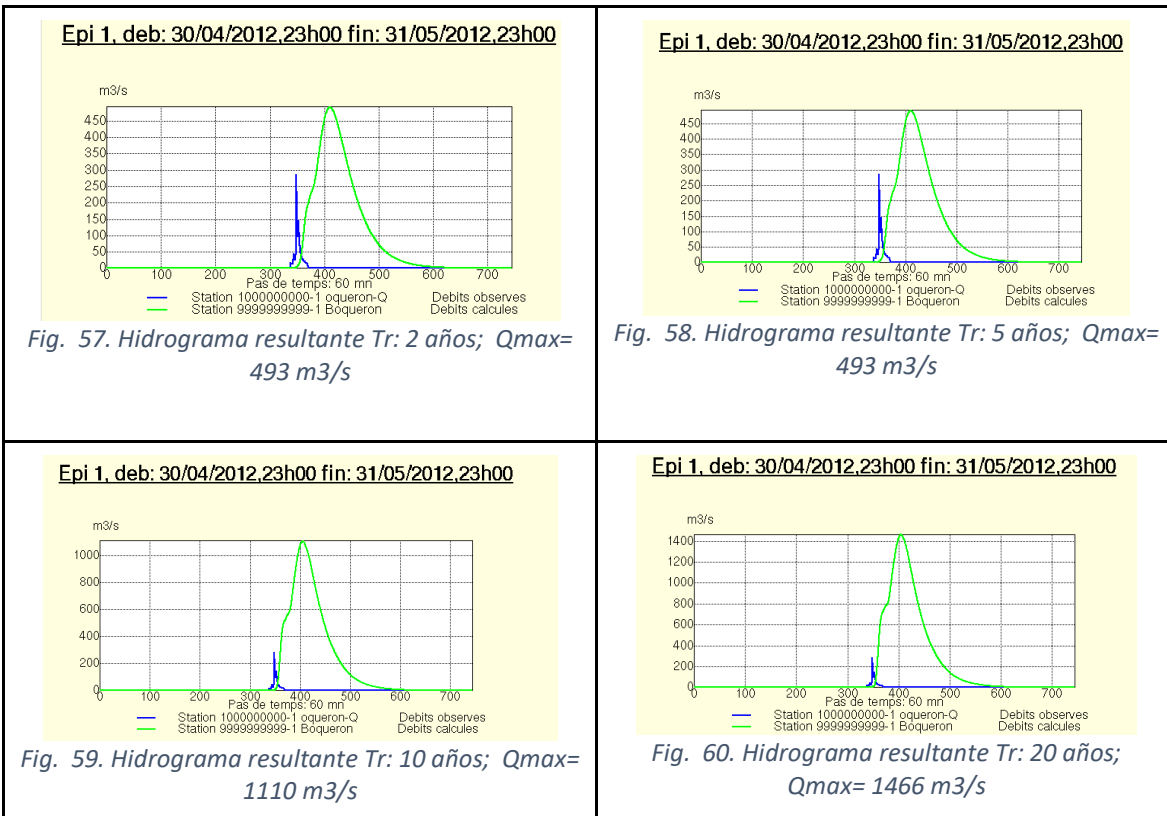
Se procede a calibrar en Athys los episodios con los periodos de retorno, considerando un promedio de los valores reales obtenidos.

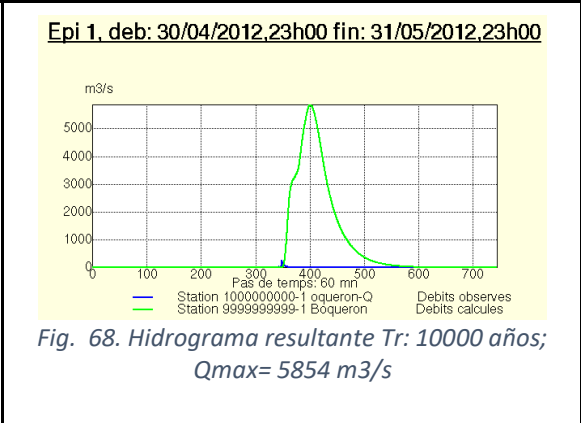
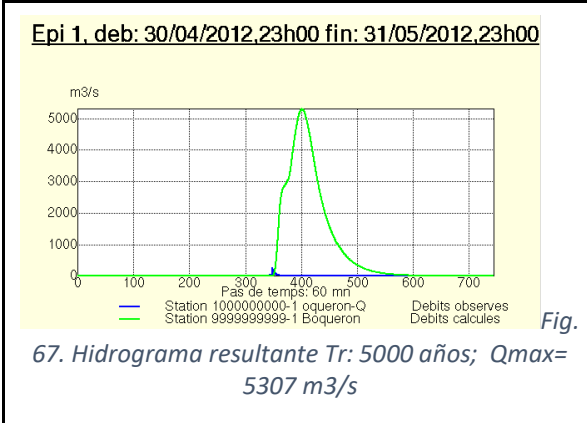
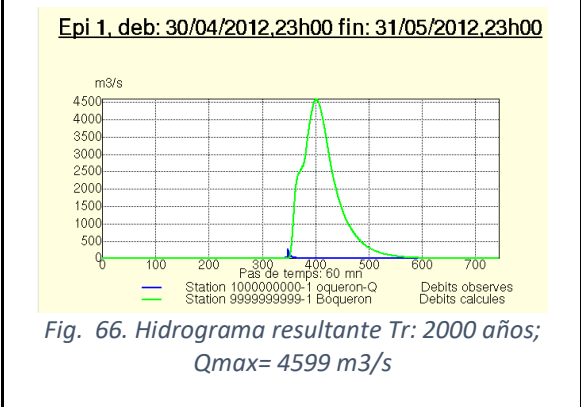
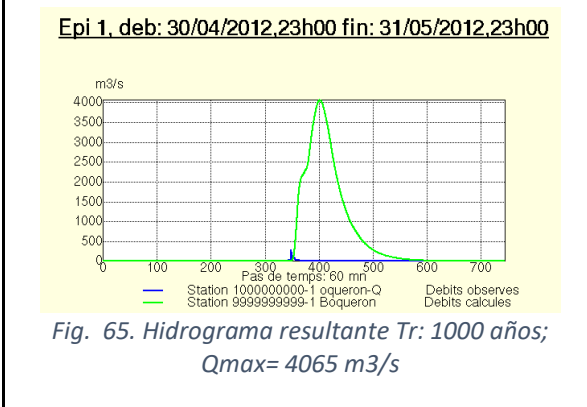
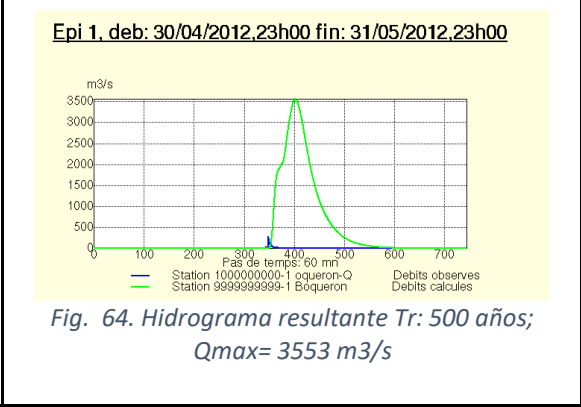
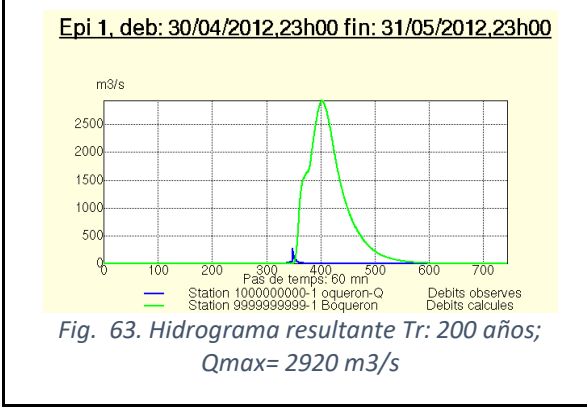
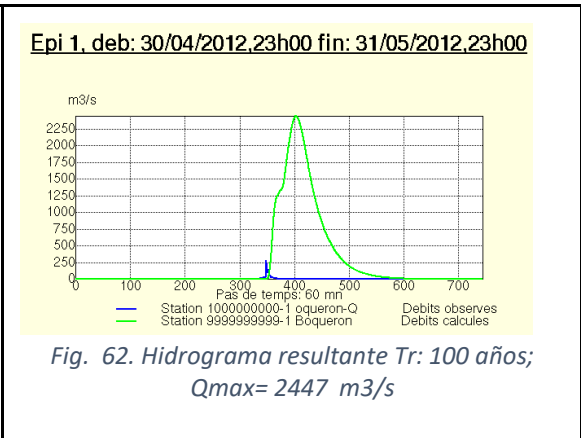
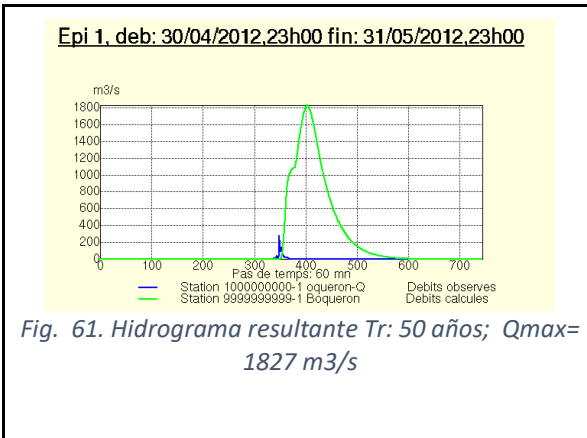
- $w(ad) = 0.1$
- $ds \left(\frac{1}{hora}\right) = 0.1$
- $Vo \left(\frac{m}{s}\right) = 0.48$
- $K(ad) = 2$

Por lo que se realizó el procedimiento descrito en el capítulo 4 para obtener los hidrogramas de diseño.

7.3 Resultados

En las Figuras 57 a 71, se observan los hidrogramas de diseño, obtenidos en el programa Athys, para cada uno de los periodos de retorno.





Capítulo 8

Conclusión

La calibración con el Modelo Hidrológico ATHYS, fue desarrollada satisfactoriamente, debido a que se contó con la información que solicita el modelo en tiempo y formato. Así, el resultado para los diferentes episodios utilizados, que el grado de correlación existente entre los hidrogramas reales de entrada y los hidrogramas ajustados, según el criterio de ajuste de Nash, cuatro episodios con una correlación de 0.16 y 0.44, tres episodios con una correlación de 0.76 a 0.86 para diferentes periodos de tiempo. Los distintos valores del criterio Nash que se obtuvieron, dependen en gran medida de los periodos de retorno. Cabe mencionar que el intervalo de tiempo utilizado fue de 24 horas. Esto por supuesto incrementó la incertidumbre de realizar ajustes cercanos a 1. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que se pueden realizar calibraciones con este programa con intervalos de 24 horas.

Se analizó la influencia de la variabilidad espacial de suelos, utilizando las cartas de uso de suelo y vegetación, con los episodios mencionados, encontrando 4 episodios en donde la infiltración tuvo menos del 50%, mientras que los 3 episodios restantes tuvieron, 59%, 61% y 67% de infiltración, en los cuales dos de los tres episodios cuya infiltración fue mayor al 50%, coincidieron con un Nash arriba de 0.5, lo cual indica que se ajustó correctamente y que los parámetros encontrados fueron los idóneos.

En el último capítulo se realizaron calibraciones con los parámetros encontrados con el gráfico 6 (página 67). Para diferentes periodos de retorno, los cuales fueron: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 1000 años. Las calibraciones que se obtuvieron fueron desde 493 m³/s para 2 años, hasta 5854 m³/s para un periodo de retorno de 1000 años.

Se contó con suficientes datos con los cuales realizar las calibraciones y elegir episodios idóneos para realizarlas, lamentablemente no sucedió lo mismo con los episodios horarios, ya que en muchos casos no se contó con suficiente información, al mismo tiempo al ser episodios horarios estos cuentan con más datos por lo que a comparación de los episodios diarios, estos son 24 veces más grandes, por lo que se necesitaba un equipo de cómputo especializado para procesar la cantidad de datos.

ATHYS tiene un módulo de optimización la calibración de los datos de campo con los parámetros requeridos, porque es una herramienta útil para ahorrar tiempo en las iteraciones.

Referencias

- Aguilar, M. 2017. Comparación de tormentas del servicio de conservación de suelos (NRCS), con tormentas registradas en la red climatológica de cfe en el río Grijalva. AMH.
- Angulo, M., Saavedra, O. (2018). MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA MAYLANCO UTILIZANDO HEC-HMS. Revista Investigación & Desarrollo, 18(1). Recuperado a partir de <https://www.upb.edu/revista-investigacion-desarrollo/index.php/id/article/view/169>
- Aparicio, M. 1992. Fundamentos de Hidrología de superficie. Ed. Limusa, México.
- Domínguez. M. R., Esquivel G. G., Baldemar M. A., Mendoza R. A., Arganis J. M. L. (2008). “Manual del Modelo Pronóstico de Esguerrimiento”, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Bouvier C. et al. 2020. Hydrosiences Montpellier L'ATelier Hydrologique Spatialisé. Pluie-débit modélisation distribué avec les ATHYS logiciels - Version 2020. 101 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2017). Recursos naturales. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/fisiografia/carta_fisiografica.aspx
- US Army Corps of Engineers/Hydrologic Engineering Center, «HEC-HMS,» (2021). Available: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecl-hms/>.
- USDA Servicio de Conservación de Suelos (SCS) Ahora Natural Resources Conservation Service (NRCS) (2015) TR-20: Formulación de Proyectos – Hidrología. Recuperado de: <https://www.hydrocad.net/tr-20.htm>
- Aquaveo (2016). Modeling Single Storm Events in Small Urban Areas. Recuperado de: <http://www.aquaveo.com/software/wms-modrat>
- Servigis (2017), Manual de usuario Caumax. Recuperado de: <https://servigis.gitbooks.io/caumax/content/introduccion/index.html>
- Kohl, B.; Stepanek, L. (2005): ZEMOKOST - nuevo programa para el cálculo de la descarga de la inundación. 22 - Información 8/2005, de 21 de BFW-práctica. Recuperado de: http://www.waldwissen.net/technik/naturgefahren/hochwasser/bfw_zemokost/index
- Community Surface Dynamics Modeling System (CSDMS) (1997), TOPMODEL. Recuperado de: <http://csdms.colorado.edu/wiki/Model:TOPMODEL>

- EhJ Plate (1998), ATFLOW un nuevo modelo de base física. Recuperado de: <http://ecobas.org/www-server/rem/mdb/catflow.html>
- The hydrological model system WaSiM-ETH (2016). Recuperado de: <http://www.wasim.ch/en/index.html>
- The BROOK90 Hydrologic Model (2015), For Evaporation, Soil Water, and Streamflow Recuperado de: <http://www.ecoshift.net/brook/brook90.htm>
- KSM UBC WATERSHED MODELLING (2012), APPENDIX 13-B. Recuperado de: https://www.ceaa.gc.ca/050/documents_staticpost/49262/89282/Chapter_13_Appendices/Appendix_13-B_KSM_UBC_Watershed_Modelling.pdf
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release no. 55. Second ed. Washington,DC: USDA.
- Guichard, D. Domínguez, R. 1998. Regionalización de lluvias en la cuenca del río Grijalva. Quehacer científico en Chiapas.
- Diario Oficial de la Federación. 2009. Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de las subregiones hidrológicas Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva de la Región Hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta. http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5141106
- Serrano, O. 2007. Calibración de los Modelos Hidrológicos Distribuidos MPE y Athys para la Cuenca del Río Suchiapa. UNACH.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) 2021. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (CONABIO). 2008.
- Garzón M., González J., Mafla R. (2018). Estado del arte de modelos hidrológicos. Boletín Informativo CEI, 5(2).