



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación del
funcionamiento del producto
de reanálisis ERA5-LAND en
la cuenca Peñitas, México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Edgar de Dios Sevilla Rivera

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado EVALUACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL PRODUCTO DE REANALISIS ERA5-LAND EN LA CUENCA PEÑITAS, MEXICO, que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



EDGAR DE DIOS SEVILLA RIVERA
Número de cuenta: 313225866

Contenido

Resumen	7
Abstract	7
Introducción	9
Objetivos	13
Justificación	13
Hipótesis	13
1 Antecedentes	14
1.1 Precipitación	14
1.2 Hietogramas	14
1.3 Curva Masa	15
1.4 Polígonos Thiessen	16
1.5 Factor de Curva Masa Media	16
1.6 Software de Reanálisis	17
1.7 Global Mapper	18
2 Área de estudio	18
2.1 Características de la cuenca	18
2.2 Tiempo de Estudio	20
2.3 Obtención de la información	20
2.3.1 Estaciones Hidrometeorológicas CFE	21
2.3.2 Estaciones Climatologicas SIH	22
2.3.3 Malla de datos ERA5-Land	23
2.3.4 Visualización de Datos de ERA5- Land	30
2.3.5 Obtención de datos csv a través de un archivo NetCDF4	32
3 Metodología	34
3.1 Manejo de información de ERA5 Land	34
3.2 Manejo de Información de CFE	38
3.3 Mapas Comparativos	39
4 Resultados y discusión	51
5 Conclusiones	62
Referencias	63
Glosario de Terminos	67
Anexos	68

Ilustración 1 Hietograma, Ejemplo de Intensidad, elaboración propia.....	15
Ilustración 2 Hietograma, Ejemplo de Profundidad, elaboración propia	15
Ilustración 3 Ejemplo Curva Masa – Profundidad, elaboración propia	15
Ilustración 4 Ejemplo de polígonos de Thiessen, elaboración propia.	16
Ilustración 5 Precipitación Media (Mayo-Octubre), elaboración propia	18
Ilustración 6 Precipitación Media (Noviembre-Abril), elaboración propia.....	19
Ilustración 7 Zona de Estudio: Cuenca Peñitas. Fuente: Google Earth Pro	19
Ilustración 8 Pronósticos y trayectoria de la Depresión Tropical 25 publicada por la Conagua.	20
Ilustración 9 Diagrama de Recolección de Información CFE/SIH, elaboración propia	21
Ilustración 10 Mapa de estaciones hidrométricas de CFE en Peñitas, Elaboración propia mediante GM.....	22
Ilustración 11 Mapa de estaciones climatológicas SIH en Peñitas, elaboración propia mediante GM.....	23
Ilustración 12 Diagrama de recolección de Información ERA5-Land, Elaboración propia ...	24
Ilustración 13 Pantalla de Inicio Climate Data Store.....	24
Ilustración 14 Pantalla de Resultados de Búsqueda.....	25
Ilustración 15 Registro de datos a solicitar Parte 1	25
Ilustración 16 Registro de datos a solicitar Parte 2.....	26
Ilustración 17 Registro de datos a solicitar Parte 3	26
Ilustración 18 Registro de datos a solicitar Parte 4.....	27
Ilustración 19 Registro de datos a solicitar Parte 5.....	27
Ilustración 20 Registro de datos a solicitar Parte 6.....	28
Ilustración 21 Registro de datos a solicitar Parte 7.....	28
Ilustración 22 Registro de datos a solicitar Parte 8.....	29
Ilustración 23 Pantalla de descargas en proceso	29
Ilustración 24 Código de python ejecutado en Sublime Text3 para obtención de SIG	31
Ilustración 25 Precipitación Total con datos de ERA5-Land, elaboración propia.....	31
Ilustración 26 Código de python ejecutado en Sublime Text3 para obtención de archivo csv	33
Ilustración 27 Diagrama de cálculo de precipitación acumulada a las 8:00 CDMX, elaboración propia.....	37
Ilustración 28 Obtención de la precipitación acumulada con datos de CFE, elaboración propia.....	38
Ilustración 29 Mapa de Estaciones de CFE y SIH; y sitios de información de ERA5 Land, elaboración propia mediante GM.....	40
Ilustración 30 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 1 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	41

Ilustración 31 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 2 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	41
Ilustración 32 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 3 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	42
Ilustración 33 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 4 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	42
Ilustración 34 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 5 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	43
Ilustración 35 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 1 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	43
Ilustración 36 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 2 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	44
Ilustración 37 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 3 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	44
Ilustración 38 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 4 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	45
Ilustración 39 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 5 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	45
Ilustración 40 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 1 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	46
Ilustración 41 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 2 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	46
Ilustración 42 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 3 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	47
Ilustración 43 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 4 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	47
Ilustración 44 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 5 de oct 2020, elaboración propia mediante GM	48
Ilustración 45 Precipitación acumulada (mm) del 2 al 6 de octubre de 2020, por huracán Gamma, CONAGUA.....	49
Ilustración 46 Precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020, reelaboración de CONAGUA en GM	49
Ilustración 47 Precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020 con datos de ERA5-Land, elaboración propia en GM	50
Ilustración 48 Precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020 con datos de ERA5-Land, y estaciones de SIH y CFE, elaboración propia en GM.....	51
Ilustración 49 Precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020 con estaciones de SIH y CFE, reelaboración de CONAGUA en GM.....	51
Ilustración 50 Curvas Masa promedio, elaboración propia.....	53
Ilustración 51 Hietograma de precipitación acumulada cada 24 hrs de 26 sep a 5 de oct de 2020 con información de CFE, elaboración propia.....	54

Ilustración 52 Hietograma de precipitación acumulada cada 24 hrs de 26 sep a 5 de oct de 2020 con información de ERA5-Land, elaboración propia	55
Ilustración 53 Hietograma de la Estación 13, datos CFE, ERA5-Land, y corrección "FCMM", Elaboración propia.....	56
Ilustración 54 Curva Masa de la Estación 13, datos CFE, ERA5-Land, y corrección "FCMM", Elaboración propia.....	57
Ilustración 55 Hietograma de la Estación 17, datos CFE, ERA5-Land, y corrección "FCMM", Elaboración propia.....	58
Ilustración 56 Curva Masa de la Estación 17, datos CFE, ERA5-Land, y corrección "FCMM", Elaboración propia.....	59
Ilustración 57 Hietograma de la Estación 19, datos CFE, ERA5-Land, y corrección "FCMM", Elaboración propia.....	60
Ilustración 58 Curva Masa de la Estación 19, datos CFE, ERA5-Land, y corrección "FCMM", Elaboración propia.....	61

Ecuación 1 Porcentaje de influencia.....	16
Ecuación 2 Precipitación Media.....	17
Ecuación 3 Factor de Corrección para Curva Masa.....	17
Ecuación 4 Cálculo de Precipitación por hora 1.....	34
Ecuación 5 Cálculo de precipitación por hora 2.....	34
Ecuación 6 Cálculo de precipitación acumulada.....	36
Ecuación 7 Obtención de datos promedio en tierra	52
Ecuación 8 Obtención de datos promedio de ERA5-Land.....	52
Ecuación 9 Obtención de Factor de Corrección	52
Ecuación 10 Obtención de precipitación corregida	53
 Tabla 1 Datos obtenidos de	 34
Tabla 2 Precipitación por hora obtenida del acumulado	35
Tabla 3 Obtención de precipitación acumulada en el horario de la CDMX	36
Tabla 4 Formato de datos para elaboración de SIG	39
Tabla 5 Resultados de la obtención de precipitación media en (mm) en la cuenca Peñitas	50
Tabla 6 Resultados de la obtención de curvas masa	53

Resumen

En México existen zonas donde no existe información hidrológica necesaria para la realización de diversas obras o estudios, la finalidad de este trabajo es validar el sitio de re-análisis “ERA5-Land”, con énfasis en la cuenca de aportación a la presa Peñitas en México, evaluando entre varios puntos: la confirmación y seguimiento de eventos de tormenta, así como su aproximación a datos medidos en tierra y de ser necesario buscar factores de corrección que aproximen los datos obtenidos del reanálisis a los medidos en tierra.

Abstract

In Mexico there are areas where there is no hydrological information necessary for carrying out various works or studies, the purpose of this work is to validate the re-analysis site "ERA5-Land", with emphasis on the basin that feeds into the Peñitas dam in Mexico, evaluating several points: the confirmation and monitoring of storm events, as well as their approximation to data measured on land and, if necessary, searching for correction factors that approximate the data obtained from the reanalysis to those measured on land.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Investigación y Desarrollo de la Coordinación de la Investigación Científica, UNAM y al proyecto TUBs-UNAM Validation of precipitation reanalysis products for rainfall-runoff modelling in Mexico (VIP MEXICO) por el apoyo otorgado para realizar esta investigación.

Agradezco a la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez por el gran apoyo a lo largo de este trabajo así como la facilitación de programas que utilizare en mi carrera, al Dr. Faustino de Luna Cruz por sus enseñanzas durante mi carrera así como su apoyo para iniciar como becario en el Instituto de Ingeniería y al Dr. Sinuhé Alejandro Sánchez Martínez por su ayuda en mis principios de programación en código y mi acercamiento a bases de re análisis de datos. A mis sinodales por su disponibilidad, atención y tiempo en la revisión de este trabajo.

Y por sobre todo agradezco a mis padres y hermano quienes son mis pilares, por su ayuda a lo largo de toda mi vida, por su comprensión y apoyo cuando más son requeridos y más allá de eso.

Introducción

Las observaciones de muy buena calidad y alta resolución de las variables atmosféricas son de crucial importancia para las aplicaciones hidrológicas (Alexopoulos et al, 2023). La precipitación es una variable clave en la gestión de los recursos hídricos, la modelación hidrológica y los estudios climáticos (Beck et al., 2019). Sin embargo, en muchas regiones, la disponibilidad de observaciones terrestres de alta resolución es limitada debido a la escasez de estaciones meteorológicas o a problemas en la cobertura espacial y temporal de los datos (Sun et al. 2018).

En México, la red nacional de estaciones meteorológicas proporciona mediciones diarias de precipitación acumulada. El Sistema de Información Hidrológica (SIH) es un sistema que permite el manejo de datos climáticos e hidrológicos de la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Contiene datos recientes e históricos de estaciones climatológicas convencionales y automáticas además de estaciones hidrométricas de la red que es operada por la propia CONAGUA y de otras dependencias del Gobierno Federal. (CONAGUA, 2019). La base de datos del SIH contiene, además, información de poco más de 5,400 estaciones climatológicas convencionales, de las cuales aproximadamente 2,800 operan actualmente, mientras que el resto dejó de operar temporal o permanentemente, sin embargo, mantienen un considerable acervo de información. Las principales variables climatológicas que se pueden consultar son: Temperaturas extremas (máxima y mínima), precipitación acumulada en 24 horas, algunos fenómenos como la tormenta eléctrica, niebla, granizo, la cobertura del cielo, evaporación y las normales climatológicas (SMN, CONAGUA, 2019).

Para la recolección de información de datos climatológicos el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha utilizado tradicionalmente estaciones meteorológicas convencionales, pero en los últimos años el uso de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) ha venido en aumento (CONAGUA, 2019). Las estaciones automáticas (Ureña et al. 2011), contribuyen a mejorar la normalización de la información meteorológica, ya que con ellas se eliminan algunos problemas del sistema tradicional tales como la subjetividad del observador y los errores de digitación.

Los productos de reanálisis proporcionan datos atmosféricos continuos en el espacio y el tiempo mediante la asimilación de diversas observaciones en modelos de predicción numérica del tiempo (Hersbach et al. 2020). Estos conjuntos de datos se han utilizado ampliamente en estudios hidrológicos y climáticos para llenar vacíos en los registros observacionales y proporcionar información climática a largo plazo. No obstante, las estimaciones de precipitación de los productos de reanálisis pueden presentar sesgos e incertidumbres, especialmente en regiones con topografía compleja o con predominio de precipitaciones convectivas (Beck et al. 2019). Esto debido a que la mayoría de sitios de reanálisis trabajan con el tipo de nube que se presenta, por ejemplo muchos productos de reanálisis obtuvieron consistentemente mejores resultados en invierno que en verano. Esto se debe a que los sistemas estratiformes predecibles a gran escala predominan en invierno (Adler et al., 2001; Coiffier, 2011; Ebert et al., 2007), mientras que los casos de nubes

convectivas impredecibles a pequeña escala predominan en verano (Arakawa, 2004; Prein et al., 2015). Sucede algo similar con la topografía compleja que tiende a un comportamiento convectivo.

ERA5-Land proporciona información horaria sobre las variables de superficie. Los datos son una reproducción del componente terrestre del reanálisis climático ERA5 con una resolución espacial más precisa: espaciado de cuadrícula de ~9 km. (Muñoz J et al 2019). El reanálisis de ERA5 Land podría dar información de las variables climatológicas en sitios donde no se encuentran estaciones activas, ampliar la cobertura de tiempo del fenómeno a estudiar, y complementar los registros climatológicos de las estaciones existentes.

Sin embargo, la precisión con la que ERA5-LAND representa la precipitación diaria en las diferentes regiones climáticas de México aún no ha sido completamente caracterizada. Por lo tanto, es necesario validar las estimaciones de precipitación de ERA5-LAND frente a observaciones terrestres para evaluar su confiabilidad en aplicaciones hidrológicas en diversas regiones del mundo, especialmente en México.

Los recientes avances en los modelos numéricos de predicción meteorológica (NWP por sus siglas en inglés, Numerical Weather Prediction) globales y regionales (Srivastava et al. 2013), han llevado a un mayor uso de los métodos de reanálisis climático, ya que proporcionan un conjunto de datos completo y consistente capaz de superar las principales limitaciones de datos, es decir, disponibilidad espacial y temporal (Gleixner et al., 2020). Además, los datos de reanálisis se producen ejecutando los modelos NWP actuales que asimilan secuencialmente los datos observados en la atmósfera y la superficie, con el objetivo de recrear las variables climatológicas de la superficie de la Tierra, los océanos y la atmósfera (Pelosi et al., 2020). El ECMWF ha proporcionado distintos productos de reanálisis comenzando con el Primer Experimento Global del Programa de Investigación Atmosférica Global (FGGE; Bengtsson, 1982), seguido por ERA-15 (Gibson et al., 1997), ERA-40 (Uppala et al., 2005) y ERA-Interim (Dee et al., 2011). En 2016, se lanzó la quinta generación de reanálisis del ECMWF, es decir, ERA5 (Hersbach et al., 2020), seguida en 2019 por ERA5-LAND (Muñoz-Sabater et al., 2021). En comparación con los conjuntos de datos mencionados anteriormente, ERA5 y ERA5-LAND tienen varias ventajas, incluido el uso de tecnologías avanzadas de asimilación de datos y una mayor resolución espacial y temporal, donde ERA5-LAND cubre todo el planeta con una resolución de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ a cada hora.

Los modelos climáticos globales (GCMs, de sus siglas en inglés, General Circulation Models) son herramientas utilizadas para simular el comportamiento del clima a escala global. Sin embargo, los GCM no proporcionan una representación precisa de las condiciones climáticas en escalas más pequeñas, como regiones específicas o localidades (Fowler et al., 2007; Wilby y Wigley, 1997). Estas diferencias que se pueden registrar son debidas a las condiciones de la atmósfera a nivel del suelo, influenciadas por factores como la orografía, la geología, la cercanía al mar, el tipo de plantas, la generación de sombras o solanas, etcétera (Geiger, 1950; Brown & Gillespe, 1995).

Investigaciones anteriores con un enfoque regional sugieren que la precipitación diaria ERA5 funciona bien, aunque con sesgos, en Europa (Bandhauer et al., 2021) y América del Norte

(Beck et al ., 2019 ; Crossett et al ., 2020 ; Tarek et al ., 2020) y tiene una habilidad razonable en China (Jiang et al ., 2021). La validación de los productos de precipitación ERA5-LAND rara vez se ha realizado y los estudios relacionados generalmente tienen limitaciones. Por ejemplo, evaluaron los productos de precipitación GPM IMERG V05, TMPA 3B42 V7, ERA-Interim y ERA5 a escala diaria frente a estaciones de medición terrestres entre 2014 y 2018 en Turquía. Sin embargo, los conjuntos de datos IMERG V05 y TMPA ya se han eliminado gradualmente. Tang et al. (2020), compararon GPM IMERG con nueve conjuntos de datos de precipitación basados en satélites y modelos, incluido ERA5, sobre China continental, aunque la referencia horaria en el estudio se limitó al verano de 2013 a 2015. Jiang et al. (2021), validaron los productos de precipitación ERA5 a escala diaria sobre China continental de 2003 a 2015. Chen et al. (2021), mostraron una evaluación detallada de los conjuntos de datos de precipitación de ERA5-LAND.

La utilización de productos de reanálisis como ERA5 Land en México han sido implementadas en algunas variables, como estimaciones de concentraciones de NO₂ (Cedeño et al 2024) y en otro caso temperatura (Andrade et al 2023), sin embargo, aún es necesaria la validación y utilización de otro tipo de variables, en especial la precipitación. En algunas zonas diferentes a Europa (Lavers et al. 2022), se han llegado a presentar sesgos importantes pero se ha visto que independientemente del sitio ERA5 Land tiende a representar de forma adecuada donde y cuando se presentan lluvias pero tiende a subestimarlas o sobrestimarlas.

En estudios anteriores Ballari et al. (2024), validaron datos de irradiancia horizontal global (GHI) de ERA5-LAND, comparándolos con estaciones del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Ecuador) en tres escalas temporales: horaria, diaria y mensual, donde se tiende a subestimar los valores del GHI, sin embargo, las métricas mejoran aumentando la escala temporal.

Jiang et al. (2021), observaron que ERA5 tiene mayores sesgos relativos en las estimaciones de precipitación sobre China continental y tiende a sobreestimar y subestimar los eventos de precipitación ligera y los eventos de precipitación moderada y fuerte, respectivamente, ERA5 puede identificar la distribución y el centro de la precipitación, pero subestima la precipitación extrema.

Lavers et al. (2022), muestran que los errores aleatorios ERA5 más pequeños ocurren en las zonas extratropicales de invierno y los errores ERA5 más grandes están en los trópicos. ERA5 no puede modelar los totales de precipitación más altos observados, pero que, generalmente, puede capturar sus ubicaciones y patrones. En (Lavers et al. 2022) una evaluación de la precipitación mensual en Sarrebruck y Singapur corroboró que ERA5 es más hábil en las regiones extratropicales.

La evaluación de Gomis-Cebolla et al. (2023), reveló que ERA5-Land/ERA5 tendía a sobrestimar las categorías de precipitación ligera y moderada, mientras que subestimaba las categorías de precipitación fuerte y violenta. La precipitación moderada proporcionó la mejor capacidad de detección, como lo indica el análisis de intensidad de precipitación. ERA5-

LAND/ERA5 mostró una buena capacidad para reproducir los patrones espaciales y las tendencias temporales de las observaciones.

Espinosa et al. (2024), encontraron que la validación con el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH) y el Instituto Portugués del Mar y la Atmósfera (IPMA) garantiza la confiabilidad de los datos ERA5-LAND siguiendo la metodología (Recopilación de datos, creación de curvas empíricas de probabilidad de no excedencia de la precipitación diaria, umbrales para precipitaciones excepcionales, mapeo de los cambios espaciotemporales en precipitaciones excepcionales, prueba T para la significancia estadística de los cambios temporales). En general, existe una notable concordancia entre las curvas derivadas de los datos de reanálisis y los registros de lluvia. Sin embargo, en ciertas ubicaciones el conjunto de datos de ERA5-LAND sobreestima ligeramente la excepcionalidad de la lluvia. No obstante, se tuvo en cuenta la consistencia general de las curvas de no excedencia para afirmar la confiabilidad del conjunto de datos de ERA5-LAND para el análisis posterior de eventos excepcionales.

Tan et al. (2023), ERA5-LAND capturaron razonablemente los patrones climatológicos de precipitación, donde se tiene una mejor correlación con los pluviómetros sobre las regiones costeras que sobre las regiones montañosas, pero tiende a subestimar la precipitación ERA5-LAND ofrecen información climática valiosa para lugares sin medidores, pero se recomienda aplicar una corrección de sesgo antes de aplicarlos en cuencas tropicales.

Gallego et al. (2004), según la definición de evento lluvioso dada por la OMM (Organización Meteorológica Mundial), se tomara el registro de precipitación cuando el evento sea mayor que 0.1 mm/h.

- lluvia ligera: registros contenidos en el intervalo $0.1 \text{ mm/hr} < \text{cantidad de lluvia por evento} \leq 2.5 \text{ mm/h}$.
- lluvia moderada: incluirá todos los registros comprendidos en el intervalo $2.5 \text{ mm/hr} < \text{cantidad de lluvia por evento} \leq 7.5 \text{ mm/h}$.
- lluvia intensa: registro sea superior a 7.5 mm/h .
- lluvia muy intensa: registros mayores que 15 mm/h y superiores a un umbral cercano a la media de los valores de 90% percentil.

En el caso de México, una interrogante que se planteó en este estudio fue ¿Qué tan similares son los datos medidos por los estaciones en tierra respecto a los productos reportados por ERA5-LAND? ¿Cómo corregir los datos dudosos ya sean obtenidos por estaciones en tierra o por estaciones fuera de tierra?

Objetivos

- Objetivo general: Evaluar la precisión del producto ERA5-LAND en la estimación de la precipitación diaria en México mediante la comparación con datos observados.
- Objetivos específicos:
 1. Seleccionar estaciones climatológicas representativas en la cuenca Peñitas, México.
 2. Comparar la precipitación estimada por ERA5-LAND con las observaciones de estaciones.
 3. Aplicar métodos estadísticos para evaluar la calidad del producto de reanálisis.

Justificación

México cuenta con varios miles de estaciones climatológicas para la obtención de información climatológica e hidrológica, sin embargo, hay zonas que carecen de estaciones o las estaciones existentes no cuentan con un registro continuo. Por ello, la validación del producto de reanálisis ERA5 Land en México, para complementar la información existente ayudaría contar con datos confiables para estudios hidrológicos y climáticos en cualquier zona y periodo de tiempo en México.

Hipótesis

- ERA5-LAND subestima o sobrestima la precipitación diaria en comparación con los datos observados.
- La precisión varía según la ubicación y características climatológicas de la región.

1 Antecedentes

1.1 Precipitación

La precipitación es un componente crucial del ciclo del agua (Eltahir y Bras, 1996 ; Trenberth et al., 2003) y es la variable más importante y activa asociada con la circulación atmosférica en los estudios meteorológicos y climáticos (Kidd & Huffman, 2011).

La información climatológica es de gran importancia para todos los sectores de la sociedad y una muestra de ello es la gran cantidad de solicitudes que a través de diversos medios se reciben en el Servicio Meteorológico Nacional, las cuales requieren por su variedad un tiempo considerable en el desarrollo de esquemas de búsqueda y elaboración de las respuestas correspondientes (CONAGUA, 2010).

Los registros de precipitación precisos y confiables son cruciales no solo para el estudio de las tendencias y la variabilidad climáticas, sino también para la gestión de los recursos hídricos y los pronósticos meteorológicos, climáticos e hidrológicos (Jiang, 2012; Larson & Peck, 1974; Liu, 2017; Yilmaz, 2005).

1.2 Hietogramas

Los hietogramas son la representación gráfica de la distribución temporal de la intensidad o de la profundidad de una precipitación a lo largo de la duración del evento definido.

Cuando se habla de intensidad se refiere a mm de precipitación por hora (Ilustración 1), y cuando se habla de volumen se refiere a cantidad de precipitado en mm en un área (Ilustración 2) dicho de otra manera una lámina de lluvia precipitada.

Al hablar de intensidad hay que hacer constar que se puede referir a la media, toda la precipitación recibida dividida por el tiempo del suceso, a la precipitación recibida en cierto periodo de tiempo dividida por ese periodo o a la máxima intensidad, máxima precipitación recibida en una hora (Muñoz, 2019)

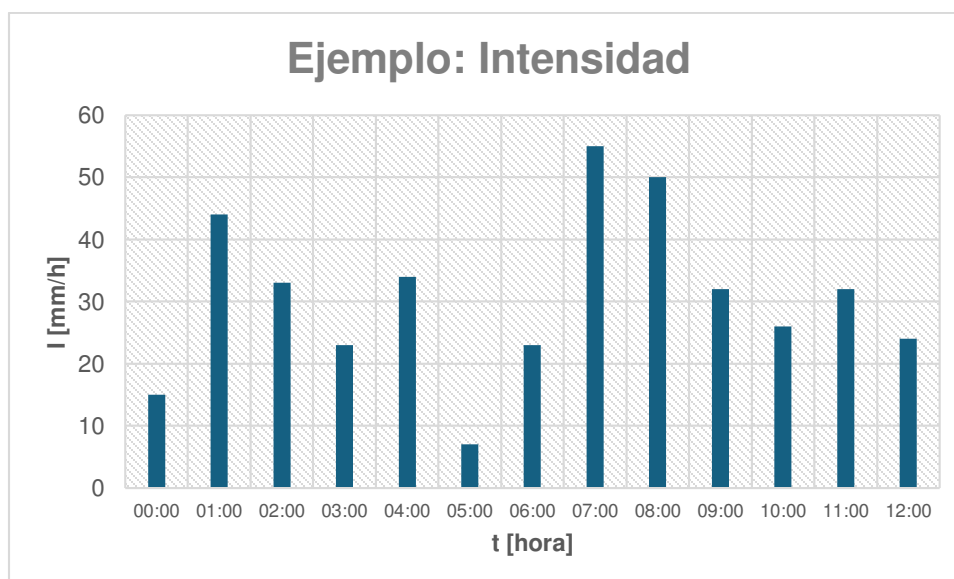


Ilustración 1 Hietograma, Ejemplo de Intensidad, elaboración propia.

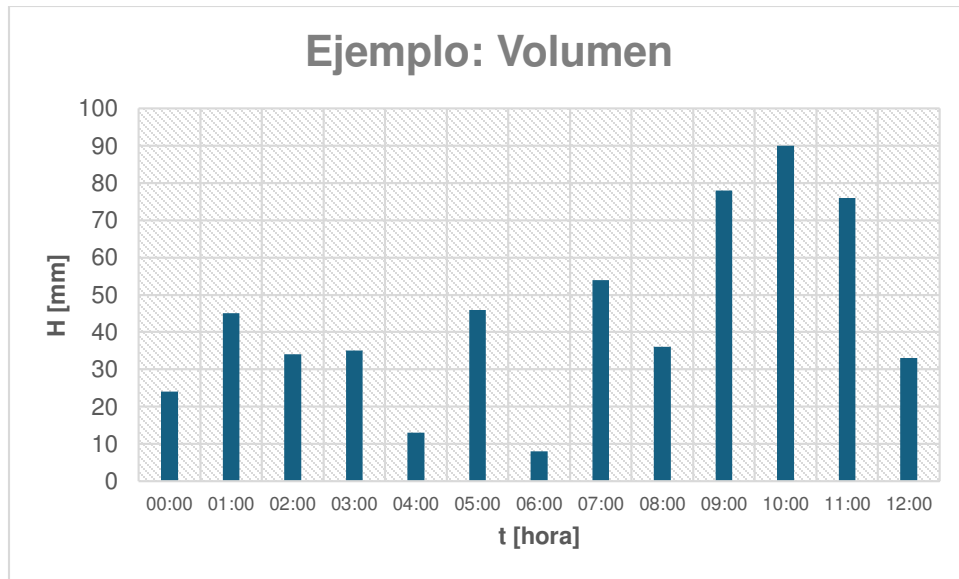


Ilustración 2 Hietograma, Ejemplo de Volumen, elaboración propia

1.3 Curva Masa

La curva masa es la representación gráfica de la precipitación acumulada a lo largo del evento. Muestra la precipitación (lluvia) total a lo largo del evento, por ejemplo del hietograma de volumen acumulando la precipitación en cada hora se obtiene un total con un inicio a las 00:00 y al final del evento 12:00. (Ilustración 3).

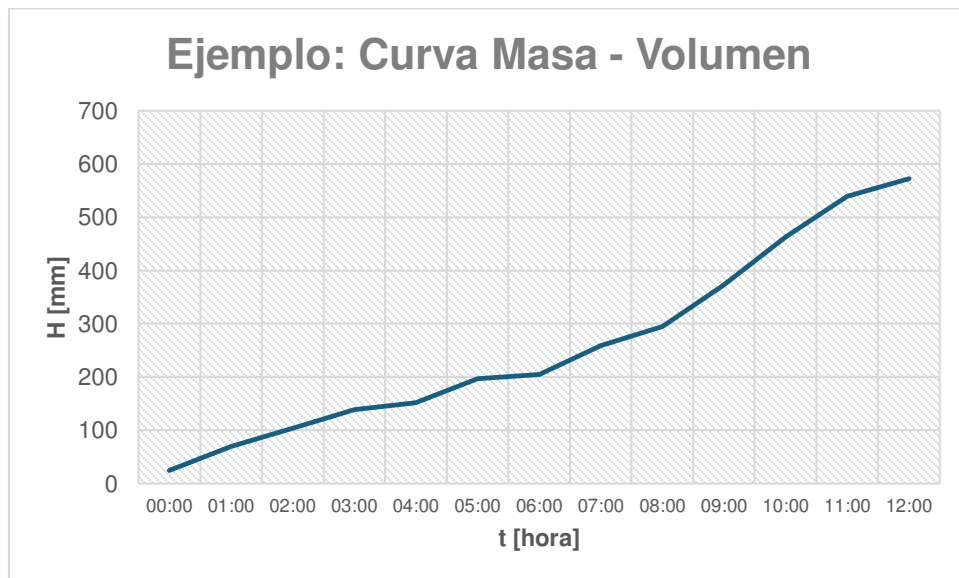


Ilustración 3 Ejemplo Curva Masa – Volumen, elaboración propia

1.4 Polígonos Thiessen

Polígonos generados a partir de un conjunto de puntos de muestra. Cada polígono de Thiessen define un área de influencia alrededor de su punto de muestra, para que cada ubicación dentro del polígono esté más cerca de ese punto que los otros puntos de muestra. (Ilustración 4) (Diccionario SIG, 2025)

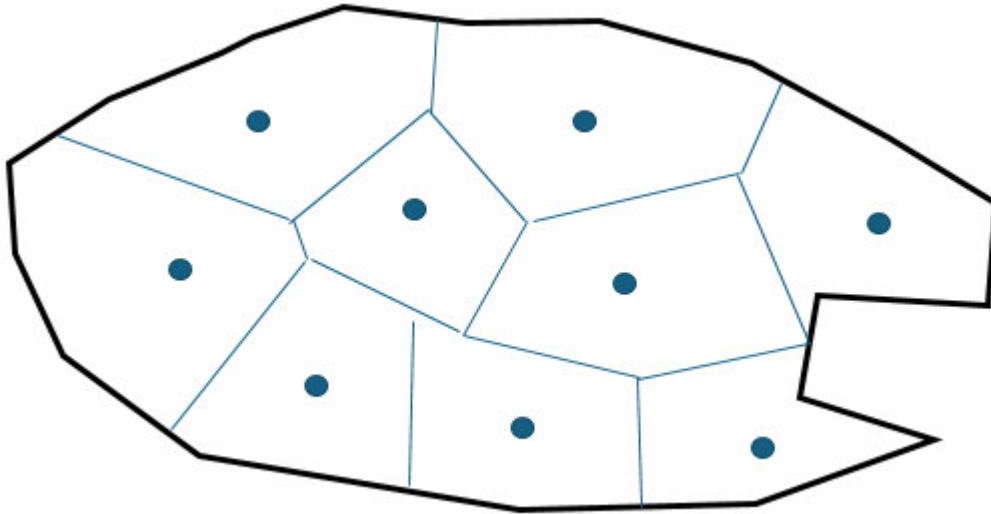


Ilustración 4 Ejemplo de croquis de polígonos de Thiessen, elaboración propia

La finalidad de los polígonos de Thiessen es tener un área de influencia para los puntos donde se tenga registros de precipitación.

1.5 Factor de Curva Masa Media

La obtención de la curva masa media se realiza por medio de los registros existentes aplicados a un área que se divide dependiendo de sus estaciones climatológicas y sus áreas de influencia (Springall, 1980). Así como su área total el porcentaje de influencia se puede obtener mediante la siguiente Ecuación 1:

$$PI = \frac{AI}{AT} * 100$$

Ecuación 1 Porcentaje de influencia

PI Porcentaje de Influencia, %

AI Área de Influencia, m² o km²

AT Área Total, m² o km²

La precipitación media se obtendrá de la suma del producto de la precipitación de la estación con su respectivo porcentaje de influencia, Ecuación 2.

$$P_{Med} = \sum_{i=1}^n [P_i * PI_i]$$

Ecuación 2 Precipitación Media

P_{Med} Precipitación Media, mm

P_i Precipitación de una estación o punto, mm

PI_i Porcentaje de influencia

Con la obtención de la precipitación media de la zona tanto teórica como real se obtiene la precipitación total, en ambos casos, mediante la curva masa, finalmente el factor de corrección será el cociente de lo real entre el valor teórico (Ecuación 3).

$$FC = \frac{P_{Tot_REAL}}{P_{Tot_TEO}}$$

Ecuación 3 Factor de Corrección para Curva Masa

FC Factor de Corrección

P_{Tot_REAL} Precipitación total real, mm

P_{Tot_TEO} Precipitación total teórica, mm

1.6 Software de Reanálisis

El software ERA5-Land se produce mediante una única simulación, sin acoplamiento al módulo atmosférico del Sistema Integrado de Pronóstico por sus siglas en ingles *Integrated Forecasting System* (IFS) del ECMWF y al modelo de olas oceánicas del IFS.(ECMWF, 2024)

ERA5-Land produce un total de 50 variables que describen los ciclos del agua y la energía sobre la tierra, globalmente, cada hora y con una resolución espacial de 9 km, coincidiendo con la cuadrícula operativa triangular-cúbica-octaédrica (TCO1279) del ECMWF (Malardel, 2016).

ERA5-Land no asimila las observaciones directamente. Las observaciones influyen en la evolución de la superficie terrestre a través del forzamiento atmosférico. La temperatura, la humedad y la presión del aire forzado se corrigen utilizando un gradiente térmico diario derivado de ERA5. Posteriormente, el modelo de superficie terrestre se integra en ciclos de 24 h que proporcionan la evolución del estado de la superficie terrestre y los flujos de agua y energía asociados. Además de los datos horarios, también se calculan las medias mensuales (Muñoz-Sabater, 2019).

1.7 Global Mapper

Global Mapper es un software de procesamiento de datos SIG (Sistema de Información Geográfica) que incluye todo tipo de información cartográfica y de mapas. Una aplicación SIG robusto y de bajo costo que combina una gama completa de herramientas de procesamiento de datos espaciales con acceso a una gran variedad de los formatos de datos. (Danysoft, 2025)

2 Área de estudio

2.1 Características de la cuenca

La zona de estudio se encuentra en la cuenca Peñitas, (Ilustración 7), la cual se ubica en una de las regiones más lluviosas de México, motivo por el cual el escurrimiento que se registra es considerable (CONAGUA, 2008). El agua de lluvia se desliza por las laderas hacia el Río Grijalva, dando lugar al aumento de los niveles del embalse, siendo necesario liberar, en reiteradas ocasiones, millones de metros cúbicos de agua por minuto que han dado lugar a inundaciones en la planicie del estado de Tabasco (SEMARNAT, 2008).

Debido a su ubicación y tipo de relieve se presentan dos grupos climáticos; los cálidos-húmedos y los templado-húmedos. Los climas cálidos que van de los 22°C a los 30°C, seguidos de los semicálidos que van de los 18°C a los 22°, y los templados que van de los 12°C a los 18°C de temperatura media anual (CEIEG, 2025).

CEIEG et al (2025) Estimaron que en los meses de mayo a octubre, la ocurrencia de la precipitación media es: de 1700 a 2000 mm (0.25%), de 2000 a 2300 mm (62.2%), de 2300 a 2600 mm (25.07%) y de 2600 a 3000 mm (12.48%).(Ilustración 6)

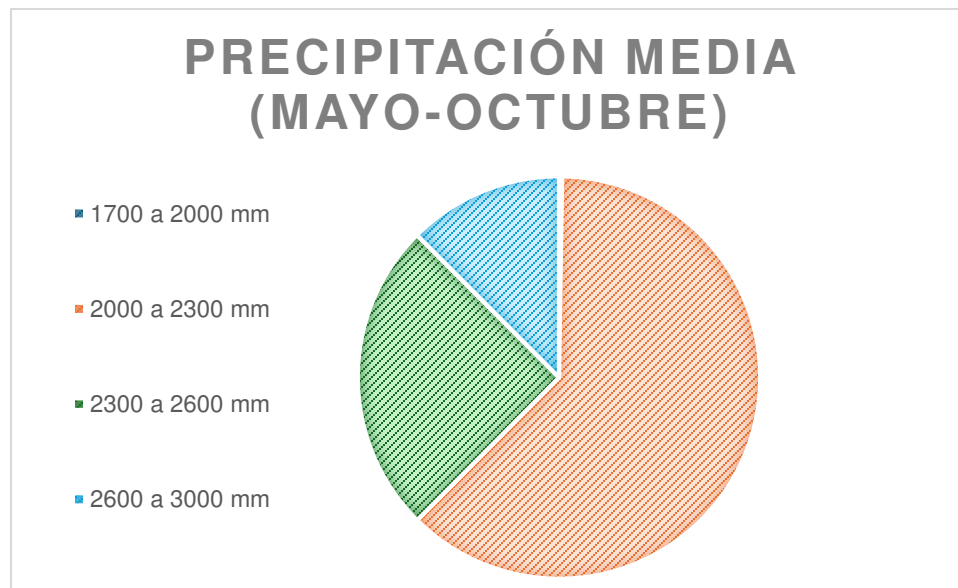


Ilustración 5 Precipitación Media (Mayo-Octubre), elaboración propia

CEIEG et al (2025) En los meses de noviembre a abril, la precipitación media es: de 800 a 1000 mm (33.24%), de 1000 a 1200 mm (22.38%), de 1200 a 1400 mm (16.15%), de 1400 a 1700 mm (9.57%) y de 1700 a 2000 mm (18.67%). (Ilustración 6)

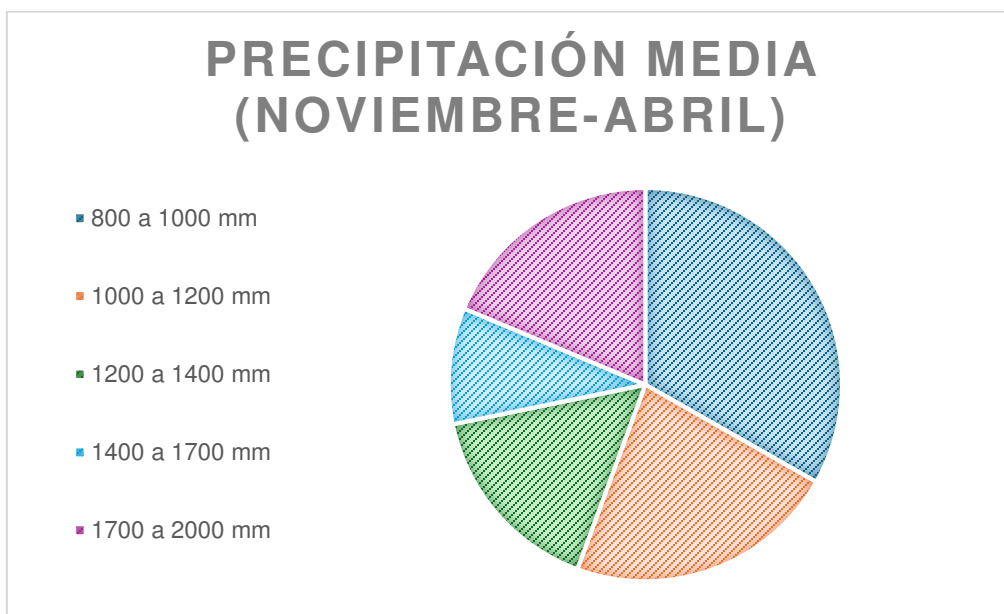


Ilustración 6 Precipitación Media (Noviembre-Abril), elaboración propia



Ilustración 7 Zona de Estudio: Cuenca Peñitas. Fuente: Google Earth Pro

2.2 Tiempo de Estudio

Respecto al tiempo de estudio será el evento de precipitación ocurrido del 2 al 6 de octubre del 2020, atribuido a la combinación de frentes fríos 4 y 5, así como remanentes de tormenta de la Depresión Tropical 25 cerca de Cozumel que escalo a Tormenta Tropical Gamma ya que esta causo severas inundaciones debajo de la presa peñitas.(Ilustración 8)

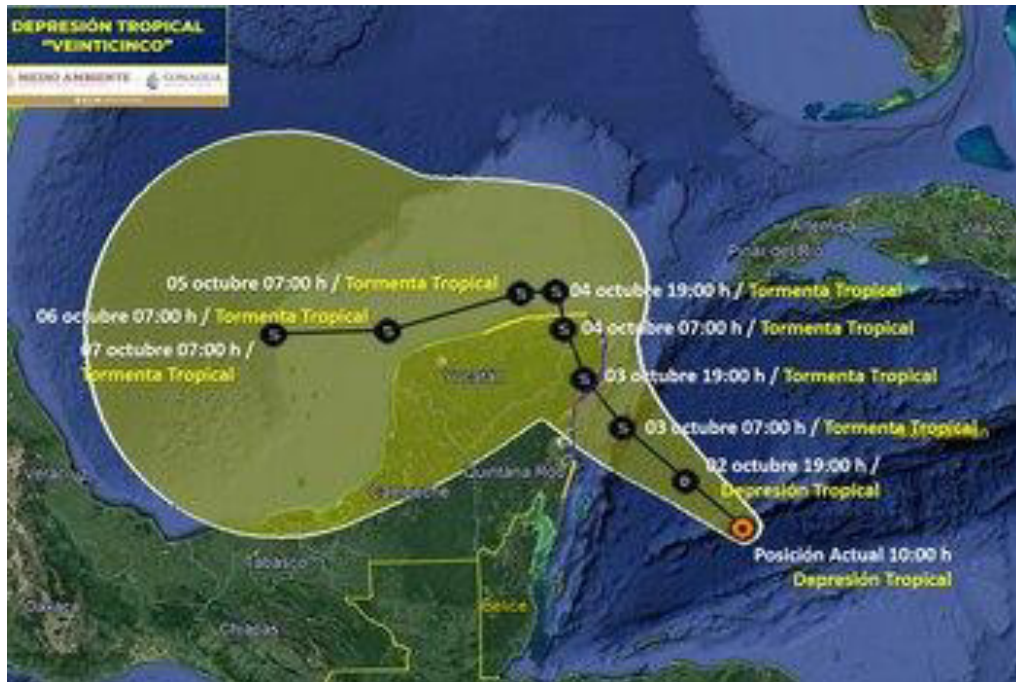


Ilustración 8 Pronósticos y trayectoria de la Depresión Tropical 25 publicada por la Conagua.

2.3 Obtención de la información

Para el trabajo a realizar se descargaron las ubicaciones de todas las estaciones donde, posteriormente, se filtraran dependiendo de su ubicación respecto a la cuenca de estudio. Donde se tienen como bases de información del SIH y CFE para la precipitación medida en el sitio, donde se seguirá un proceso mostrado en el diagrama (Ilustración 9).

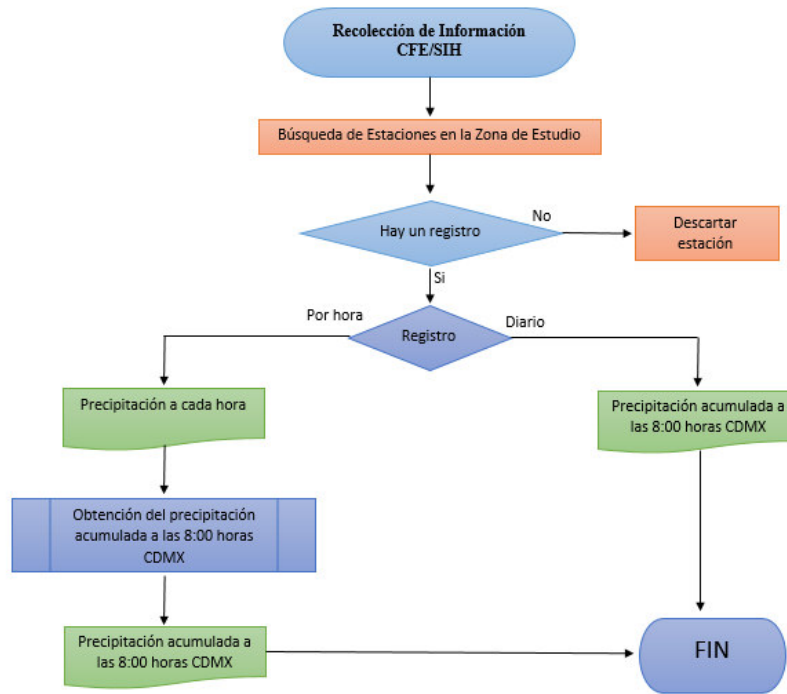


Ilustración 9 Diagrama de Recolección de Información CFE/SIH, elaboración propia

2.3.1 Estaciones Hidrometeorológicas CFE

Como parte de las actividades que realiza la Comisión Federal de Electricidad del Manejo de Presas del Río Grijalva CFE (2022), se monitorea el nivel de los embalses para evitar afectaciones a las comunidades aledañas a la cuenca y a través de 34 estaciones se conoce el comportamiento de fenómenos meteorológicos para salvaguardar a la población. El mapa de las estaciones CFE en la zona de estudio mostrado a continuación (Ilustración 10).

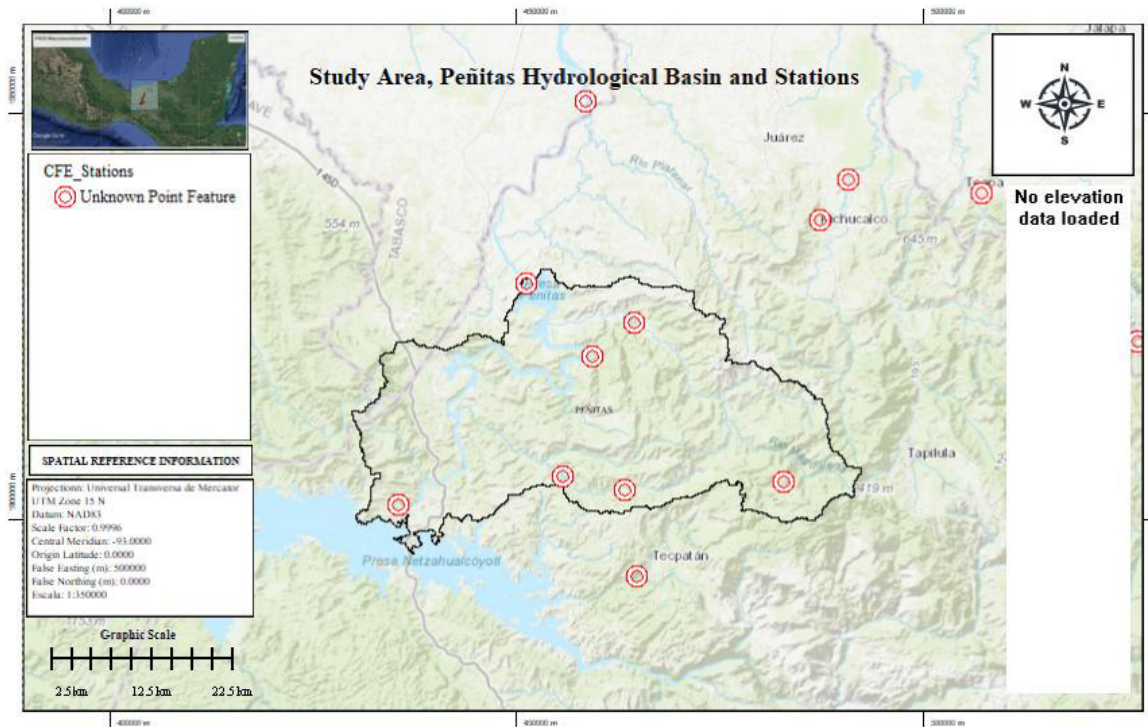


Ilustración 10 Mapa de estaciones hidrométricas de CFE en Peñitas, Elaboración propia mediante GM

2.3.2 Estaciones Climatológicas SIH

El Sistema de Información Hidrológica (SIH) es un sistema que permite el manejo de datos climáticos e hidrológicos de la Subdirección General Técnica, contiene datos recientes e históricos de estaciones convencionales y automáticas climatológicas e hidrométricas de la red de CONAGUA y de otras dependencias del Gobierno Federal. De la base de datos se maneja la precipitación acumulada diaria con hora de corte a las 8:00 h CDMX (CONAGUA, 2019). El mapa de estaciones climatológicas SIH en la zona de estudio mostrado a continuación (Ilustración 11).

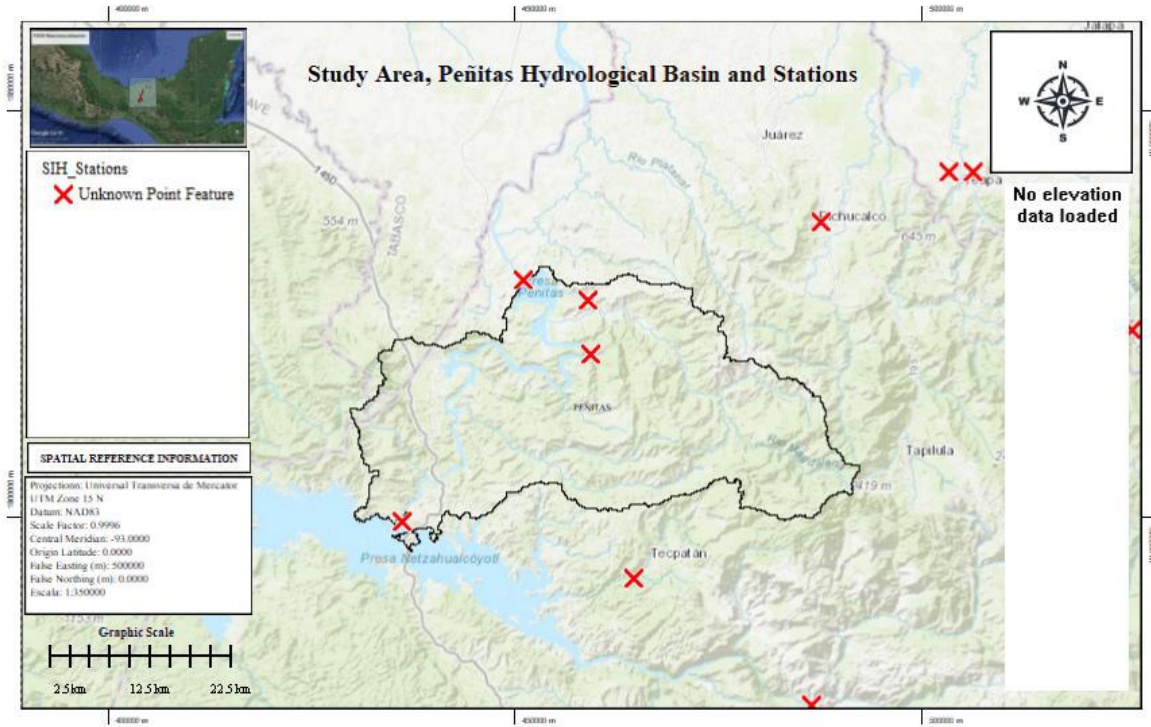


Ilustración 11 Mapa de estaciones climatológicas SIH en Peñitas, elaboración propia mediante GM

2.3.3 Malla de datos ERA5-Land

ERA5-Land es un conjunto de datos de reanálisis que ofrece una visión consistente de la evolución de las variables terrestres a lo largo de varias décadas, con una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ y una resolución temporal de una lectura cada hora ECMWF et al (2024),.

El conjunto de datos ERA5-Land, como cualquier otra simulación, proporciona estimaciones con cierto grado de incertidumbre. Los modelos numéricos solo pueden proporcionar una representación más o menos precisa de los procesos físicos reales que rigen los diferentes componentes del sistema terrestre. Para el manejo de los datos de ERA5-Land se puede resumir en el diagrama (Ilustración 12).

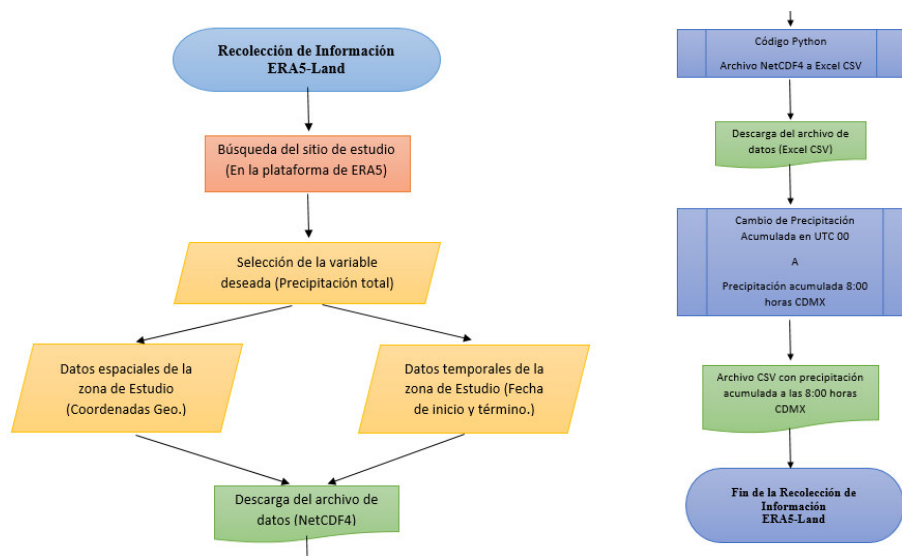


Ilustración 12 Diagrama de recolección de Información ERA5-Land, Elaboración propia

Para la obtención de datos de ERA5-LAND se busca en su base de datos mediante el enlace, <https://cds.climate.copernicus.eu/> donde nos mostrara la siguiente pantalla (Ilustración 13).

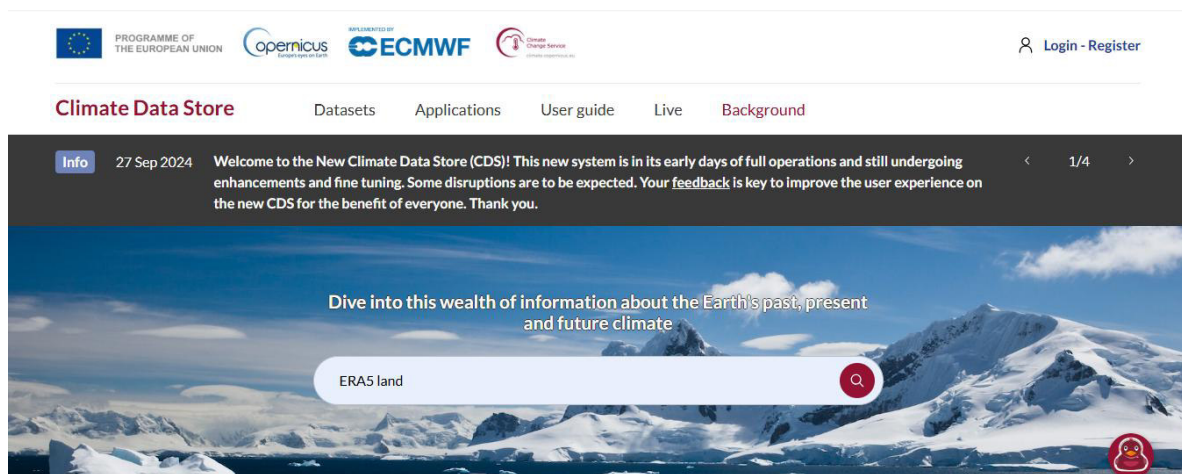


Ilustración 13 Pantalla de Inicio Climate Data Store

En el menú de búsqueda introduciremos ERA5-LAND y de los resultados de búsqueda entraremos en *ERA5-LAND hourly data from 1950 to present* (Ilustración 14)

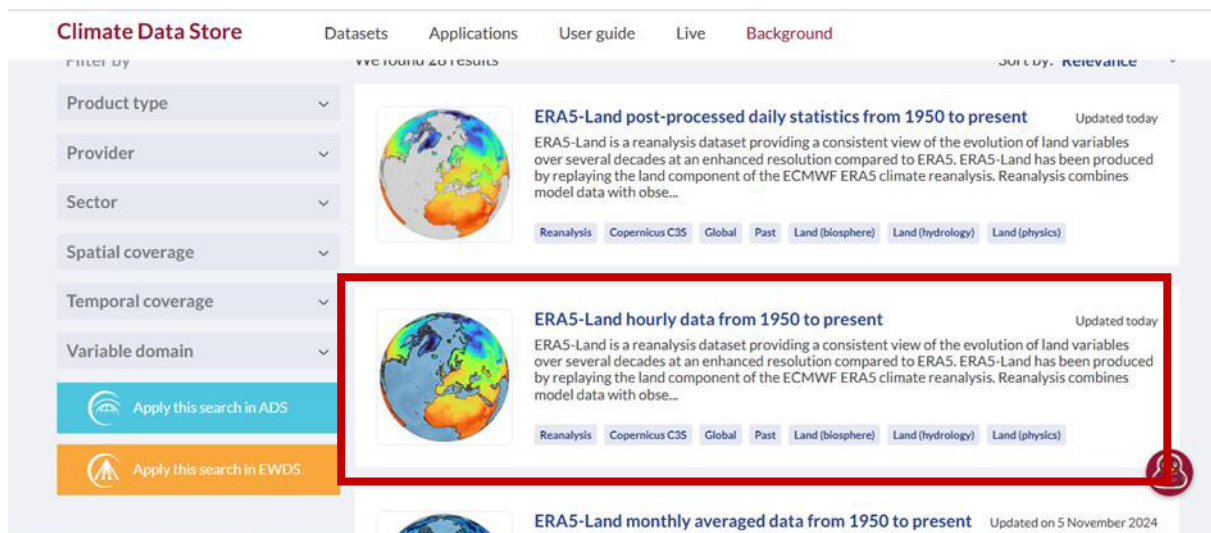


Ilustración 14 Pantalla de Resultados de Búsqueda

Después de ingresar a *ERA5-LAND hourly data from 1950 to present* selecciona la opción “Download” (Ilustración 15)

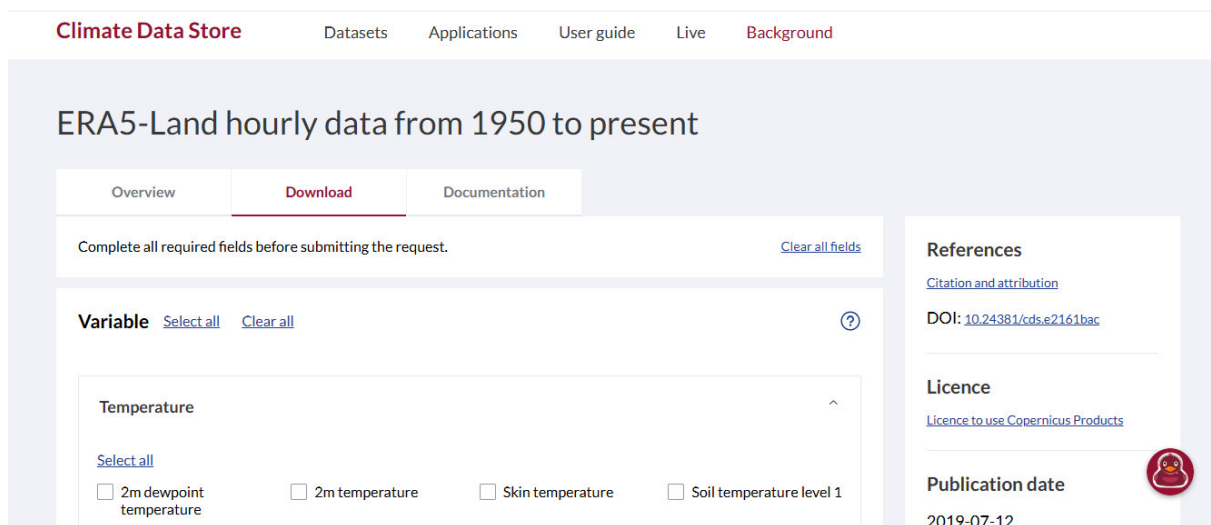


Ilustración 15 Registro de datos a solicitar Parte 1

Y en esa misma pestaña se eligen las variables requeridas, en este caso **la precipitación total**. (Ilustración 16).

Climate Data Store
Datasets
Applications
User guide
Live
Background

☐ Potential evaporation
☐ Runoff
☐ Snow evaporation
☐ Sub-surface runoff

☐ Surface runoff
☐ Total evaporation

Wind, Pressure and Precipitation
^

[Select all](#)
[Clear all](#)

☐ 10m u-component of wind
☐ 10m v-component of wind
☐ Surface pressure
☒ Total precipitation

Vegetation
^

[Select all](#)

☐ Leaf area index, high vegetation
☐ Leaf area index, low vegetation

Request validation

Request size

Variable ✓

Year ⚠

Month ⚠

Day ⚠

Time ⚠

Geographical area

[Whole available region](#)
[Sub-region extraction](#)

Ilustración 16 Registro de datos a solicitar Parte 2

Se considera el intervalo de tiempo en el orden de Año-Mes-Día-Hora con la posibilidad de seleccionar más de uno. (Ilustración 17, 18, y 19)

Climate Data Store
Datasets
Applications
User guide
Live
Background

Year

At least one selection must be made

☐ 1950
☐ 1951
☐ 1952
☐ 1953
☐ 1954
☐ 1955
☐ 1956
☐ 1957

☐ 1958
☐ 1959
☐ 1960
☐ 1961
☐ 1962
☐ 1963
☐ 1964
☐ 1965

☐ 1966
☐ 1967
☐ 1968
☐ 1969
☐ 1970
☐ 1971
☐ 1972
☐ 1973

☐ 1974
☐ 1975
☐ 1976
☐ 1977
☐ 1978
☐ 1979
☐ 1980
☐ 1981

☐ 1982
☐ 1983
☐ 1984
☐ 1985
☐ 1986
☐ 1987
☐ 1988
☐ 1989

☐ 1990
☐ 1991
☐ 1992
☐ 1993
☐ 1994
☐ 1995
☐ 1996
☐ 1997

☐ 1998
☐ 1999
☐ 2000
☐ 2001
☐ 2002
☐ 2003
☐ 2004
☐ 2005

☐ 2006
☐ 2007
☐ 2008
☐ 2009
☐ 2010
☐ 2011
☐ 2012
☐ 2013

☐ 2014
☐ 2015
☐ 2016
☐ 2017
☐ 2018
☐ 2019
☐ 2020
☐ 2021

☐ 2022
☐ 2023
☐ 2024

Request validation

Request size

Variable ✓

Year ⚠

Month ⚠

Day ⚠

Time ⚠

Geographical area

[Whole available region](#)
[Sub-region extraction](#)

Ilustración 17 Registro de datos a solicitar Parte 3

Climate Data Store
Datasets
Applications
User guide
Live
Background

Month
At least one selection must be made

☐ January
☐ February
☐ March
☐ April
☐ May
☐ June
☐ July
☐ August
☐ September
☐ October
☐ November
☐ December

Day
Select all
At least one selection must be made

☐ 01
☐ 02
☐ 03
☐ 04
☐ 05
☐ 06
☐ 07
☐ 08
☐ 09
☐ 10
☐ 11
☐ 12
☐ 13
☐ 14
☐ 15
☐ 16
☐ 17
☐ 18
☐ 19
☐ 20
☐ 21
☐ 22
☐ 23
☐ 24
☐ 25
☐ 26
☐ 27
☐ 28
☐ 29
☐ 30
☐ 31

Request validation

Request size

Variable ✓

Year ✓

Month ⚠

Day ⚠

Time ⚠

Geographical area

Whole available region

Sub-region extraction

Ilustración 18 Registro de datos a solicitar Parte 4

Climate Data Store
Datasets
Applications
User guide
Live
Background

Time
Select all
At least one selection must be made

☐ 00:00
☐ 01:00
☐ 02:00
☐ 03:00
☐ 04:00
☐ 05:00
☐ 06:00
☐ 07:00
☐ 08:00
☐ 09:00
☐ 10:00
☐ 11:00
☐ 12:00
☐ 13:00
☐ 14:00
☐ 15:00
☐ 16:00
☐ 17:00
☐ 18:00
☐ 19:00
☐ 20:00
☐ 21:00
☐ 22:00
☐ 23:00

Geographical area

☒ Whole available region
With this option selected the entire available area will be provided
☐ Sub-region extraction

Request validation

Request size

Variable ✓

Year ✓

Month ✓

Day ✓

Time ⚠

Geographical area

Whole available region

Sub-region extraction

Ilustración 19 Registro de datos a solicitar Parte 5

Finalmente, se selecciona la zona de influencia previamente delimitada (zona de estudio), introduciendo las coordenadas norte, sur, este y oeste. En este caso debido a la resolución de 0.1° serían 18.7°, 16.9°, para latitud y -94.2° y -92.5° para longitud. (Ilustración 20)

Climate Data Store Datasets Applications User guide Live Background

With this option selected the entire available area will be provided

☒ Sub-region extraction ?

North: 18.7

West: -94.2 East: -92.5

South: 16.9

Request validation

Request size:

Variable: ✓

Year: ✓

Month: ✓

Day: ✓

Time: ⚠

Geographical area: ?

[Whole available region](#)

[Sub-region extraction](#) ✓

Ilustración 20 Registro de datos a solicitar Parte 6

Se selecciona el tipo de formato que se desea para los datos para el caso “NetCDF4” (Ilustración 21) y se aceptan los términos de uso, para enviar el formulario. (Ilustración 22)

Climate Data Store Datasets Applications User guide Live Background

Data format [Clear all](#) ?

☐ GRIB ☒ NetCDF4 (Experimental)

Download format [Clear all](#) ?

☒ Unarchived (not zipped if single file) ☐ Zip

Terms of use

[Licence to use Copernicus Products](#)

You must accept the terms before submitting this request.

Login/register to accept licences

Request validation

Request size:

Variable: ✓

Year: ✓

Month: ✓

Day: ✓

Time: ✓

Geographical area: ?

[Whole available region](#)

[Sub-region extraction](#) ✓

Ilustración 21 Registro de datos a solicitar Parte 7

Ilustración 22 Registro de datos a solicitar Parte 8

Una vez hecho esto el programa lleva al sitio de descarga con los datos solicitados, en este mismo sitio aparecerán descargas hechas anteriormente. (Ilustración 23).

Info
27 Sep 2024

Welcome to the New Climate Data Store (CDS)! This new system is in its early days of full operations and still undergoing enhancements and fine tuning. Some disruptions are to be expected. Your [feedback](#) is key to improve the user experience on the new CDS for the benefit of everyone. Thank you.

1/4

Your requests

All	Queued	In progress	Failed	Complete
5 of 5 total requests ? Delete selected				
Product	Submission	End	Status	Actions
ERA5-Land hourly data from 1950 to present Details	2024-11-22 11:43:48am	2024-11-22 11:43:54am	Complete 00:00:05	Download 3.03 MB

Ilustración 23 Pantalla de descargas en proceso

2.3.4 Visualización de Datos de ERA5- Land

Con una programación en Python a través de Sublime Text3 los datos descargados de ERA5 LAND se pueden apreciar mediante el siguiente código (Ilustración 24):

```
import xarray as xr
import matplotlib.pyplot as plt

# Abrir el archivo NetCDF
archivo = '2024Ago21_12L.nc'
ds = xr.open_dataset(archivo, engine='netcdf4')

print(type(ds))
print(ds)
print(ds.dims)

print(ds['tp'].attrs)

## Acceder a la variable 'tp'
tp = ds['tp']

## Crear la gráfica
plt.figure(figsize=(8,6))
tp.plot(cmap='viridis') # Utilizamos el mapa de colores 'viridis'

## Añadir título y etiquetas
plt.title('Precipitación Total (tp)')
plt.xlabel('Longitud')
plt.ylabel('Latitud')

# Mostrar la gráfica
plt.show()
```

```

File Edit Selection Find View Goto Tools Project Preferences Help
*REPL* [python] x datos.py x
1 import xarray as xr
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Abrir el archivo NetCDF
5 archivo = '2020Nov01_12.nc'
6 ds = xr.open_dataset(archivo, engine='netcdf4')
7
8 print(type(ds))
9 print(ds)
10 print(ds.dims)
11
12 print(ds['tp'].attrs)
13
14
15 # # Acceder a la variable 'tp'
16 tp = ds['tp']
17
18 # # Crear la gráfica
19 plt.figure(figsize=(8,6))
20 tp.plot(cmap='viridis') # Utilizamos el mapa de colores 'viridis'
21
22 # # Añadir título y etiquetas
23 plt.title('Precipitación Total (tp)')
24 plt.xlabel('Longitud')
25 plt.ylabel('Latitud')
26
27 # Mostrar la gráfica
28 plt.show()
29

```

Ilustración 24 Código de python ejecutado en Sublime Text3 para obtención de SIG.

Del código se obtiene un primer SIG (Ilustración 25), donde las zonas en blanco son datos que el reanálisis no muestra ya que estas se encuentran en mar y por lo tanto no entra en su rango, mostrado a continuación.

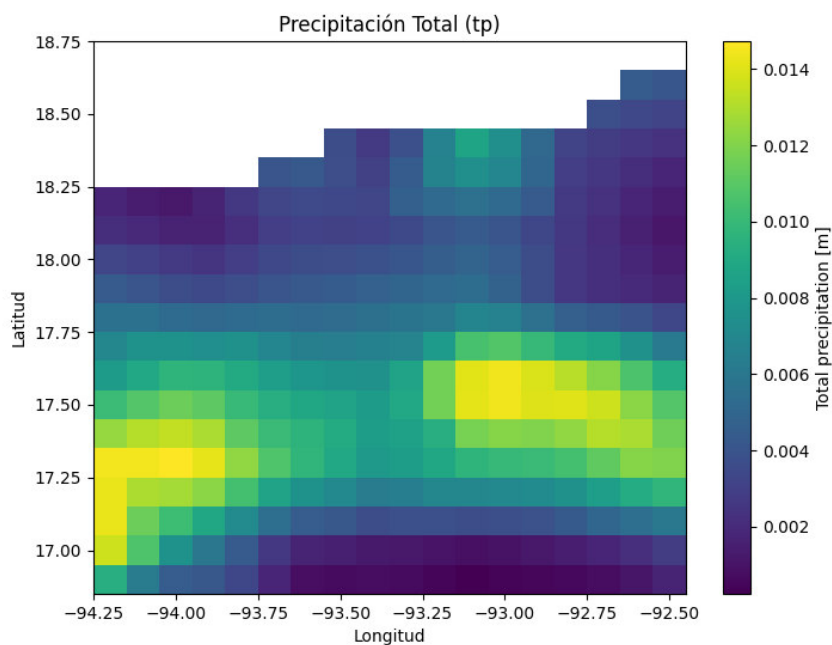


Ilustración 25 Precipitación Total con datos de ERA5-Land, elaboración propia

2.3.5 Obtención de datos csv a través de un archivo NetCDF4

Para un posterior análisis y de ser necesario una corrección por sesgo en los datos es necesario poder trabajar los datos en otro formato como .csv para tal caso mediante el código de python mostrado a continuación se podrán exportar dichos datos del archivo NetCDF4 (Ilustración 26).

```
import xarray as xr

import matplotlib.pyplot as plt

import pandas as pd

# Abrir los archivos NetCDF
files = ['01_a_15_nov_2024.nc']

# Abrir múltiples archivos NetCDF a la vez
ds = xr.open_mfdataset(files, autoclose=True)

# Seleccionar las coordenadas de la celda que deseas inspeccionar
lat = 17.178333 # Latitud específica
lon = -92.909444 # Longitud específica

# Seleccionar los datos de la celda a lo largo del tiempo
celda_tiempo = ds['tp'].sel(latitude=lat, longitude=lon, method='nearest')

# Convertir los valores de precipitación de metros a milímetros
precipitacion_mm = celda_tiempo.values * 1000 # Multiplicamos por 1000

# Convertir las fechas a formato datetime
fechas = pd.to_datetime(celda_tiempo['valid_time'].values)

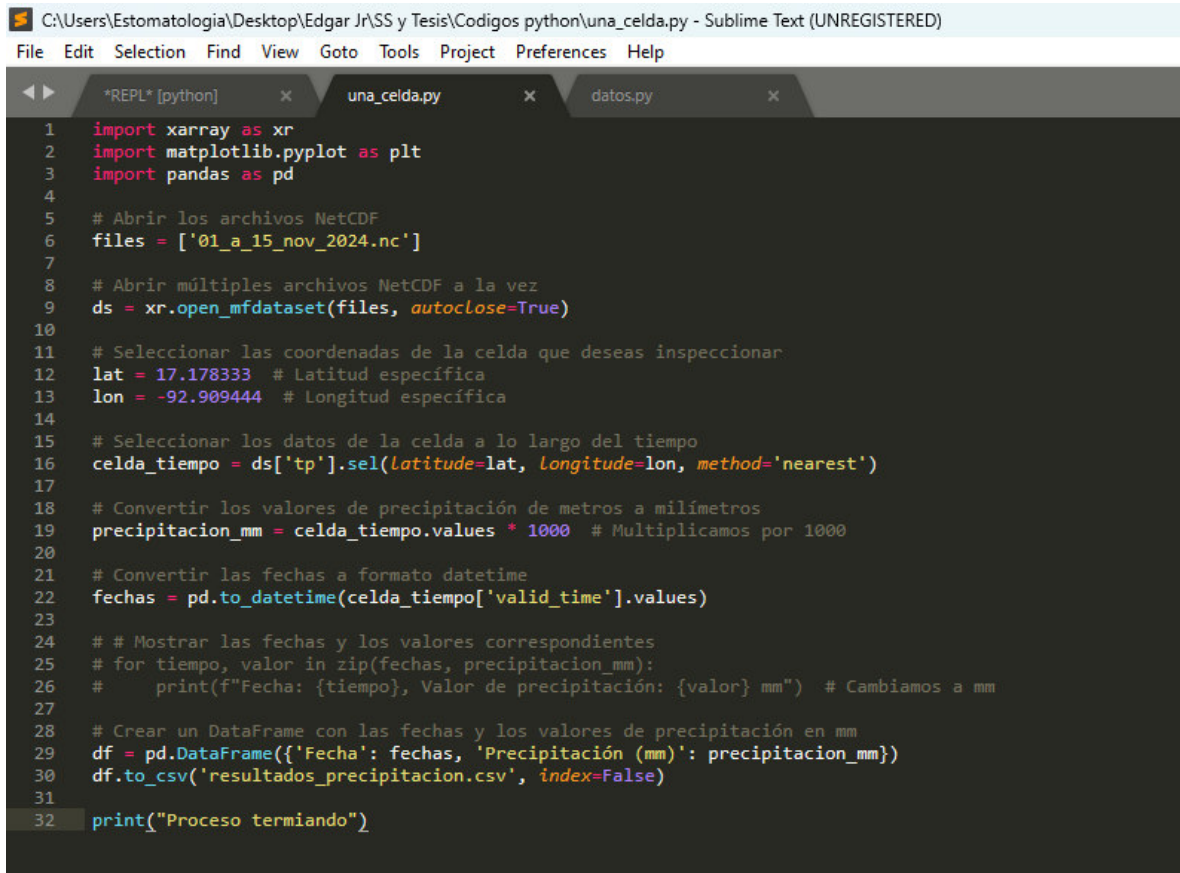
## Mostrar las fechas y los valores correspondientes
# for tiempo, valor in zip(fechas, precipitacion_mm):
#     print(f"Fecha: {tiempo}, Valor de precipitación: {valor} mm") # Cambiamos a mm

# Crear un DataFrame con las fechas y los valores de precipitación en mm
```

```
df = pd.DataFrame({'Fecha': fechas, 'Precipitación (mm)': precipitacion_mm})

df.to_csv('resultados_precipitacion.csv', index=False)
```

```
print("Proceso termiando")
```



```
C:\Users\Estomatologia\Desktop\Edgar Jr\SS y Tesis\Codigos python\una_celda.py - Sublime Text (UNREGISTERED)
File Edit Selection Find View Goto Tools Project Preferences Help

*REPL* [python] x una_celda.py x datos.py x

1 import xarray as xr
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import pandas as pd
4
5 # Abrir los archivos NetCDF
6 files = ['01_a_15_nov_2024.nc']
7
8 # Abrir múltiples archivos NetCDF a la vez
9 ds = xr.open_mfdataset(files, autoclose=True)
10
11 # Seleccionar las coordenadas de la celda que deseas inspeccionar
12 lat = 17.178333 # Latitud específica
13 lon = -92.909444 # Longitud específica
14
15 # Seleccionar los datos de la celda a lo largo del tiempo
16 celda_tiempo = ds['tp'].sel(latitude=lat, longitude=lon, method='nearest')
17
18 # Convertir los valores de precipitación de metros a milímetros
19 precipitacion_mm = celda_tiempo.values * 1000 # Multiplicamos por 1000
20
21 # Convertir las fechas a formato datetime
22 fechas = pd.to_datetime(celda_tiempo['valid_time'].values)
23
24 # # Mostrar las fechas y los valores correspondientes
25 # for tiempo, valor in zip(fechas, precipitacion_mm):
26 #     print(f"Fecha: {tiempo}, Valor de precipitación: {valor} mm") # Cambiamos a mm
27
28 # Crear un DataFrame con las fechas y los valores de precipitación en mm
29 df = pd.DataFrame({'Fecha': fechas, 'Precipitación (mm)': precipitacion_mm})
30 df.to_csv('resultados_precipitacion.csv', index=False)
31
32 print("Proceso termiando")
```

Ilustración 26 Código de python ejecutado en Sublime Text3 para obtención de archivo csv

3 Metodología

Teniendo la información principal, ya sea de CFE, SIH, o ERA5-Land, se debe manejar un mismo rango espacial y temporal para posteriormente comparar los datos de sus respectivas bases. Debido a que el SIH maneja una precipitación acumulada diaria con corte a las 8:00 hrs CDMX la opción es adaptar las otras bases de datos disponibles a ésta.

3.1 Manejo de información de ERA5 Land

Para el manejo de estos datos se cuenta con la siguiente información por cada punto de la malla de ERA5-Land (Tabla 1).

Fecha	Precipitación
25/09/2020 01:00	1.3380386
25/09/2020 02:00	5.3293257
25/09/2020 03:00	6.8487263
25/09/2020 04:00	7.7721553
25/09/2020 05:00	9.014346
25/09/2020 06:00	10.43997
25/09/2020 07:00	13.147227
25/09/2020 08:00	15.496627
25/09/2020 09:00	16.718895
25/09/2020 10:00	16.859129
25/09/2020 11:00	16.895012
25/09/2020 12:00	16.89889
25/09/2020 13:00	16.90102
25/09/2020 14:00	16.902376
25/09/2020 15:00	16.903717
25/09/2020 16:00	16.908129
25/09/2020 17:00	16.951178
25/09/2020 18:00	17.023224
25/09/2020 19:00	17.094452
25/09/2020 20:00	17.208803
25/09/2020 21:00	18.584927
25/09/2020 22:00	18.81175
25/09/2020 23:00	19.326885
26/09/2020 00:00	19.90475

En la primera columna de la Tabla 1 tenemos la fecha y hora con la que va cambiando la lectura. Mientras que en la segunda columna tenemos la precipitación acumulada registrada en el momento. Una consideración es que la fecha y hora están sincronizados con la UTC:00.

Lo primero es obtener la precipitación a cada hora mediante la siguiente ecuación (Ecuación 4):

$$P_{i\text{ hrs}} = P_{acum_{i\text{ hrs}}} - P_{acum_{(i-1)\text{ hrs}}}$$

Ecuación 4 Cálculo de Precipitación por hora 1

Donde:

$P_{i\text{ hrs}}$ es la precipitación en una hora, en mm

$P_{acum_{i\text{ hrs}}}$ es la precipitación acumulada a tal hora, en mm

$P_{acum_{(i-1)\text{ hrs}}}$ es la precipitación acumulada en la hora inmediata anterior, en mm

Cuando no hay un $P_{acum_{(i-1)\text{ hrs}}}$ se considerará que (Ecuación 5):

$$P_{i\text{ hrs}} = P_{acum_{i\text{ hrs}}}$$

Ecuación 5 Cálculo de precipitación por hora 2

Esto es aplicable en ciclos de 24 horas donde se inicia a la 01:00 de un día y termina a las 00:00 del día posterior.

Tabla 1 Datos obtenidos de

ERA5-Land

Con los pasos anteriores se obtienen los siguientes resultados (Tabla 2)

Fecha	Precipitación ³	Precip (mm)	Fecha	Precipitación ³	Precip (mm)
25/09/2020 01:00	1.3380386	1.3380386	25/09/2020 13:00	16.90102	0.00213
25/09/2020 02:00	5.3293257	3.9912871	25/09/2020 14:00	16.902376	0.001356
25/09/2020 03:00	6.8487263	1.5194006	25/09/2020 15:00	16.903717	0.001341
25/09/2020 04:00	7.7721553	0.923429	25/09/2020 16:00	16.908129	0.004412
25/09/2020 05:00	9.014346	1.2421907	25/09/2020 17:00	16.951178	0.043049
25/09/2020 06:00	10.43997	1.425624	25/09/2020 18:00	17.023224	0.072046
25/09/2020 07:00	13.147227	2.707257	25/09/2020 19:00	17.094452	0.071228
25/09/2020 08:00	15.496627	2.3494	25/09/2020 20:00	17.208803	0.114351
25/09/2020 09:00	16.718895	1.222268	25/09/2020 21:00	18.584927	1.376124
25/09/2020 10:00	16.859129	0.140234	25/09/2020 22:00	18.81175	0.226823
25/09/2020 11:00	16.895012	0.035883	25/09/2020 23:00	19.326885	0.515135
25/09/2020 12:00	16.89889	0.003878	26/09/2020 00:00	19.90475	0.577865

Tabla 2 Precipitación por hora obtenida del acumulado

Donde la tercera columna es la precipitación horaria. Posteriormente se necesita considerar el mismo sistema horario, en este caso el horario de la CDMX, y con ello obtener su acumulado a las 8:00 hrs de la CDMX como se observa en la Tabla 3.

Fecha	Precipitación (mm)	Precip (mm)	CDMX [8:00] (mm acum)	
25/09/2020 01:00	1.3380386	1.3380386	25/09/2020 09:00	0.001341
25/09/2020 02:00	5.3293257	3.9912871	25/09/2020 10:00	0.005753
25/09/2020 03:00	6.8487263	1.5194006	25/09/2020 11:00	0.048802
25/09/2020 04:00	7.7721553	0.923429	25/09/2020 12:00	0.120848
25/09/2020 05:00	9.014346	1.2421907	25/09/2020 13:00	0.192076
25/09/2020 06:00	10.43997	1.425624	25/09/2020 14:00	0.306427
25/09/2020 07:00	13.147227	2.707257	25/09/2020 15:00	1.682551
25/09/2020 08:00	15.496627	2.3494	25/09/2020 16:00	1.909374
25/09/2020 09:00	16.718895	1.222268	25/09/2020 17:00	2.424509
25/09/2020 10:00	16.859129	0.140234	25/09/2020 18:00	3.002374
25/09/2020 11:00	16.895012	0.035883	25/09/2020 19:00	3.09990583
25/09/2020 12:00	16.89889	0.003878	25/09/2020 20:00	3.1409846
25/09/2020 13:00	16.90102	0.00213	25/09/2020 21:00	3.33937866
25/09/2020 14:00	16.902376	0.001356	25/09/2020 22:00	3.83190674
25/09/2020 15:00	16.903717	0.001341	25/09/2020 23:00	4.4437931
25/09/2020 16:00	16.908129	0.004412	26/09/2020 00:00	4.9685226
25/09/2020 17:00	16.951178	0.043049	26/09/2020 01:00	8.237614
25/09/2020 18:00	17.023224	0.072046	26/09/2020 02:00	10.8540343
25/09/2020 19:00	17.094452	0.071228	26/09/2020 03:00	13.007326
25/09/2020 20:00	17.208803	0.114351	26/09/2020 04:00	14.866202
25/09/2020 21:00	18.584927	1.376124	26/09/2020 05:00	16.124605
25/09/2020 22:00	18.81175	0.226823	26/09/2020 06:00	16.699551
25/09/2020 23:00	19.326885	0.515135	26/09/2020 07:00	17.15818
26/09/2020 00:00	19.90475	0.577865	26/09/2020 08:00	17.317502

Tabla 3 Obtención de precipitación acumulada en el horario de la CDMX

En este caso el desfase horario de UTC 00:00 y CDMX es de menos 6 horas, donde se cumplirá que: [UTC] 14:00 → 08:00[CDMX] .

Posteriormente para obtener el acumulado con corte a las 8:00 hrs CDMX solo se sumará a partir de las 9 hrs CDMX del día anterior hasta las 8 hrs CDMX del día de la lectura, lo anterior está expresado por la ecuación (Ecuación 6).

$$P_{acum_i hrs} = P_{i hrs} + P_{acum_{(i-1)hrs}}$$

Ecuación 6 Cálculo de precipitación acumulada

A continuación se presenta un resumen de los pasos antes descritos actividades en el diagrama (Ilustración 27).

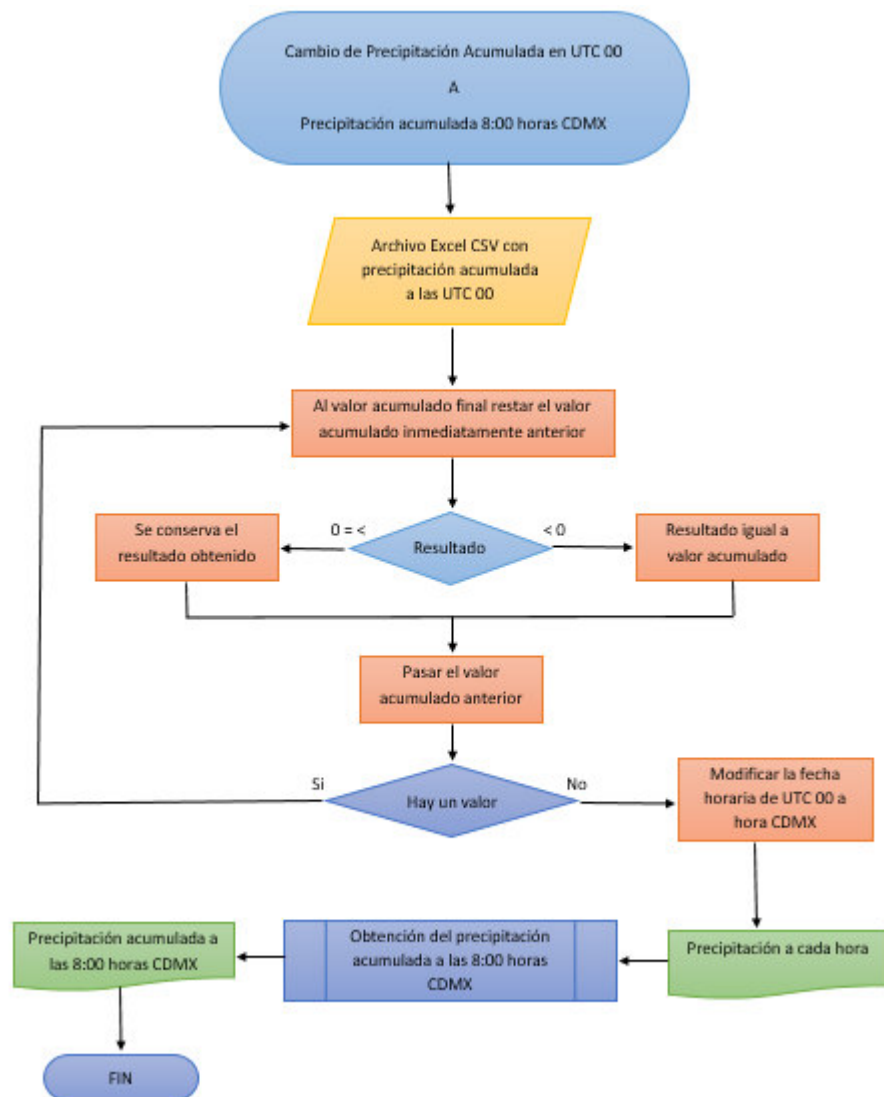


Ilustración 27 Diagrama de cálculo de precipitación acumulada a las 8:00 CDMX, elaboración propia

3.2 Manejo de Información de CFE

En el caso de CFE ya se cuenta con una lectura de precipitación a cada hora por lo que sólo es requerido obtener un acumulado con corte a las 8 hrs CDMX cumpliendo el diagrama indicado en la Ilustración 28.

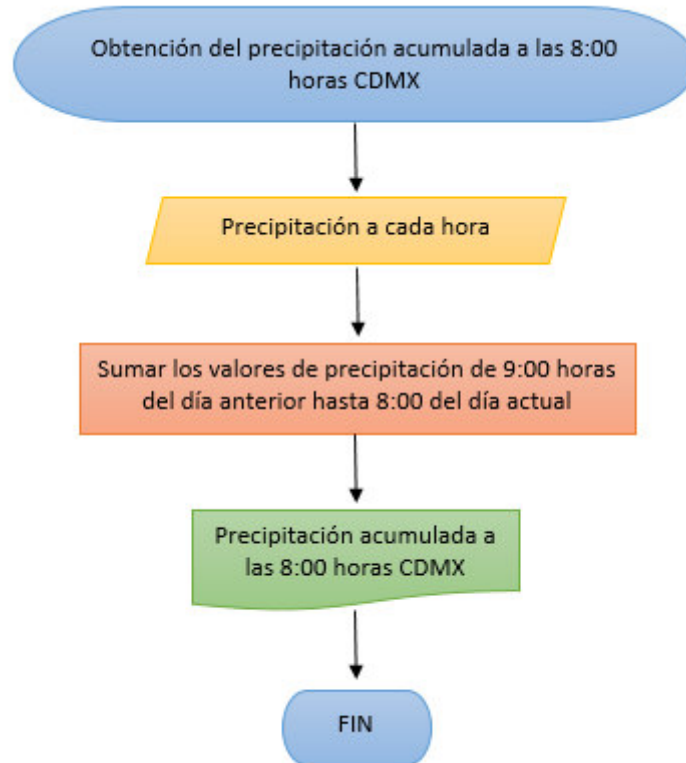


Ilustración 28 Obtención de la precipitación acumulada con datos de CFE, elaboración propia

3.3 Mapas Comparativos

Para introducir los datos para un mapa estos deben tener un orden mostrado a continuación (Tabla 4).

X	Y	mm
570034.54	1856041.79	0.8
573736.69	1882141.42	0.5
483572.16	2037029.54	15
464741	1924106	15.3
455967.04	1905192.23	0.3
463613	1903579.28	2.5
441884.54	2026718.2	0
459448	1990012.24	0
493370.02	2009781.06	0
537341.86	2035171.86	0
477391.92	2034009.46	7.4
492249.09	1976816.66	0.6
451387	1928866	5.69
458688.53	1963145	0
458663.82	1951196.43	0
465072.03	1892974.68	4.16
459481.06	1919905.25	1.95
483018	1904475.99	3.46
435696	1901742.09	1.36
542314.7	1849443.88	2

En la Tabla 4 las coordenadas estarán en UTM donde latitud es Y y longitud X. La tercera columna es la precipitación acumulada de un día, de un evento o lo que corresponda. Obteniendo un primer mapa con los sitios de los cuales tenemos información, (Ilustración 29)

La elaboración de estos mapas cuenta en este estudio con las estaciones de CFE, CONAGUA SIH, y la malla de ERA5-Land, esta última con una lectura a cada 0.1° tanto para longitud como latitud.

Tabla 4 Formato de datos para elaboración de SIG

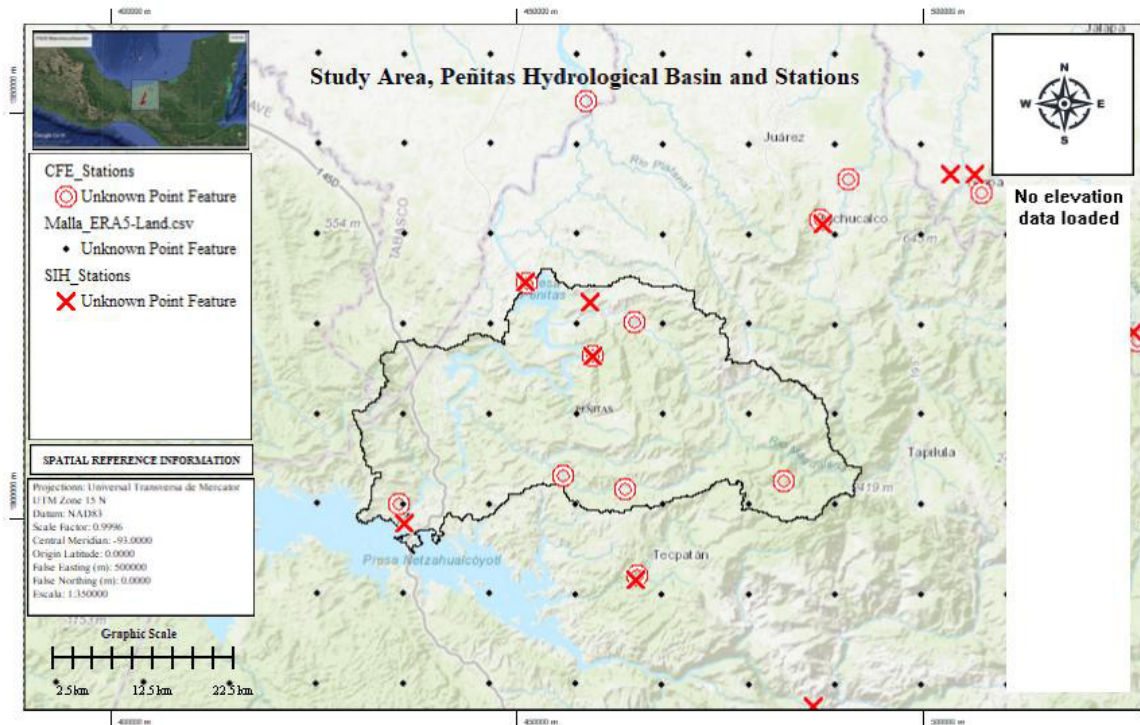


Ilustración 29 Mapa de Estaciones de CFE y SIH; y sitios de información de ERA5 Land, elaboración propia mediante GM

Por medio de los datos registrados se pueden generar mapas representativos de la precipitación en la brecha de tiempo que deseemos analizar. Con el propósito de ver el movimiento de la lluvia en Peñitas se obtuvieron los mapas de lluvia acumulada cada 24 horas mediante la base de datos del SIH (Ilustración 30 a 34), CFE (Ilustración 35 a 39), y ERA5-Land (Ilustración 40 a 44), comprendido del 1 al 5 de octubre del 2020.

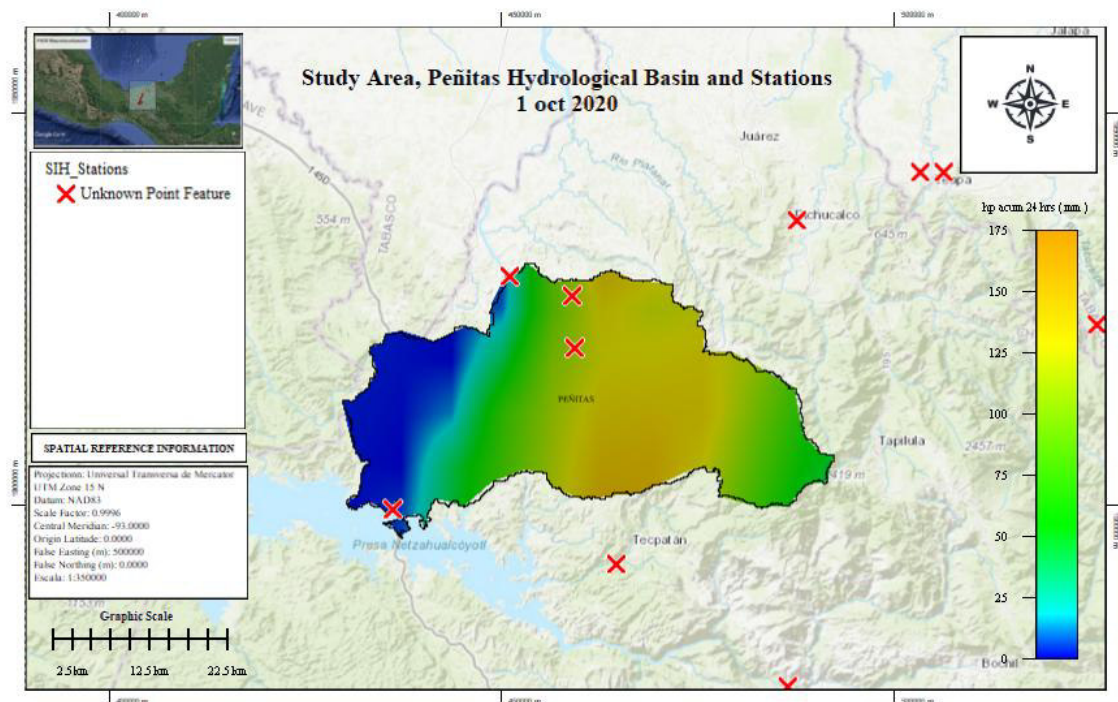


Ilustración 30 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 1 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

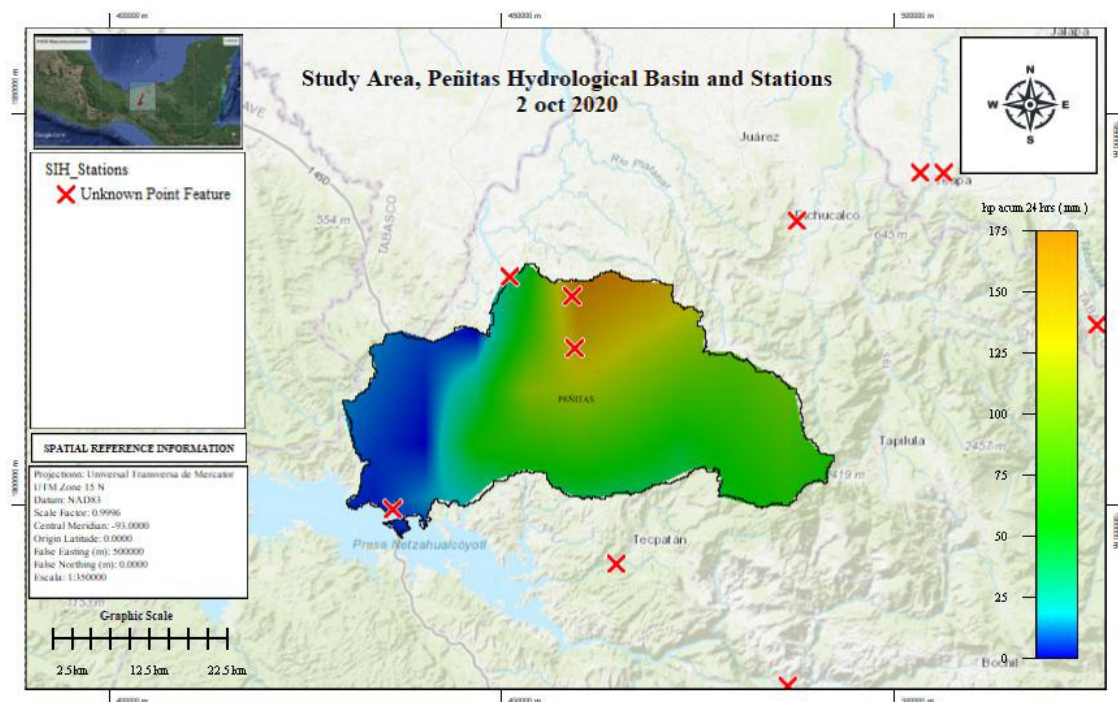


Ilustración 31 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 2 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

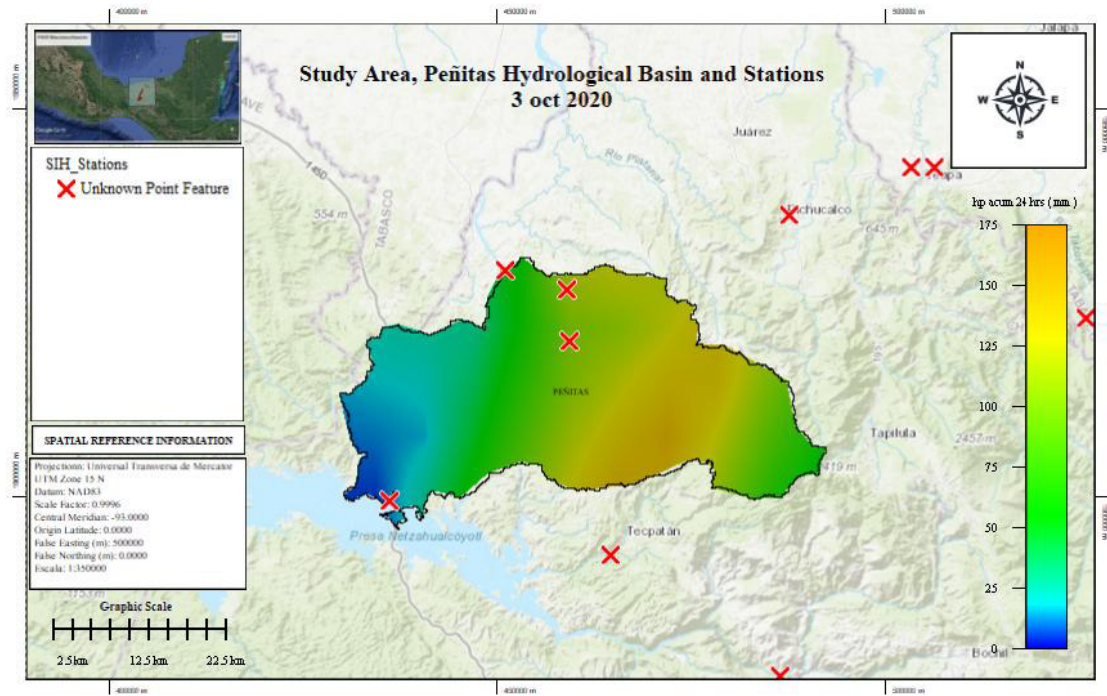


Ilustración 32 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 3 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

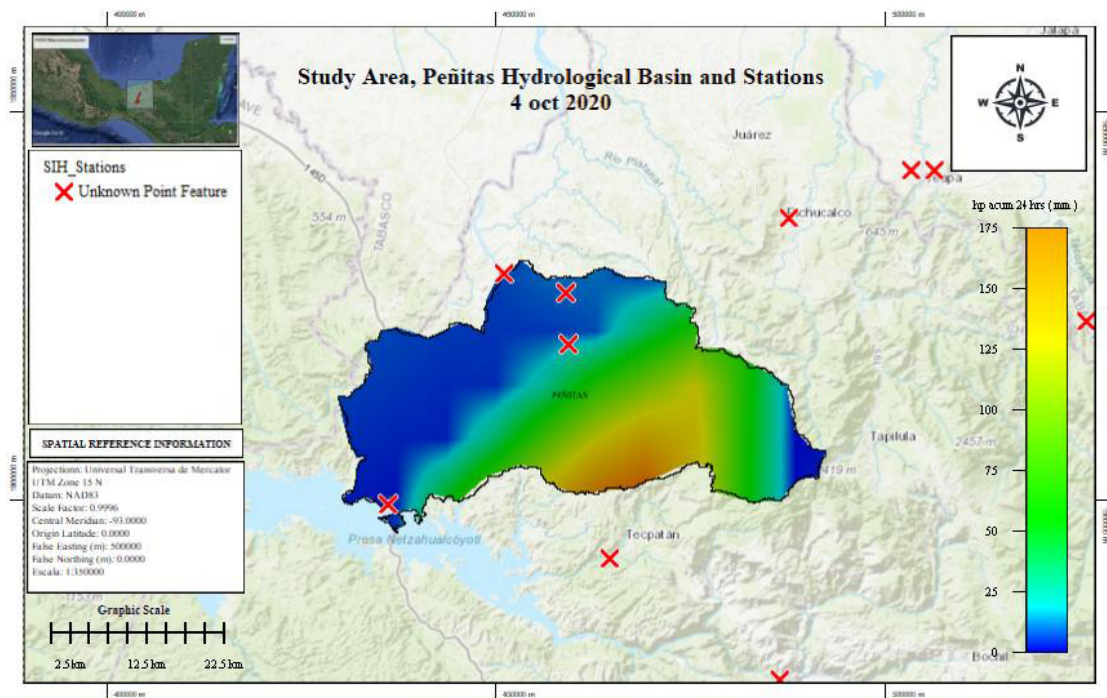


Ilustración 33 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 4 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

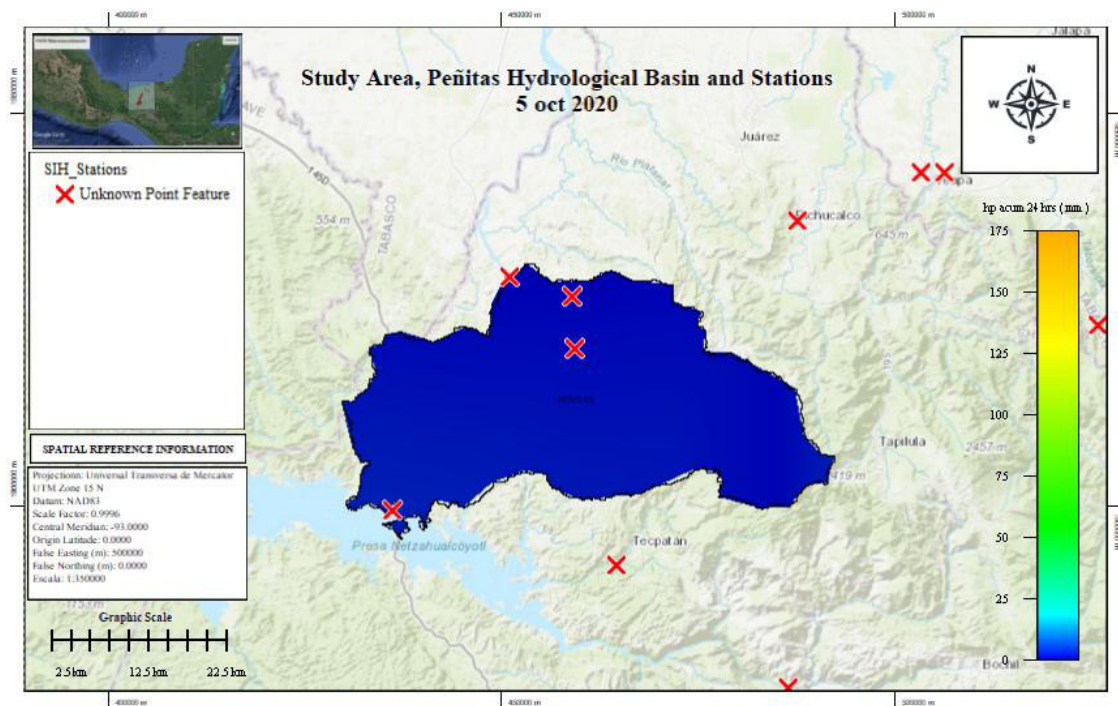


Ilustración 34 SIG de Estaciones de SIH; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 5 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

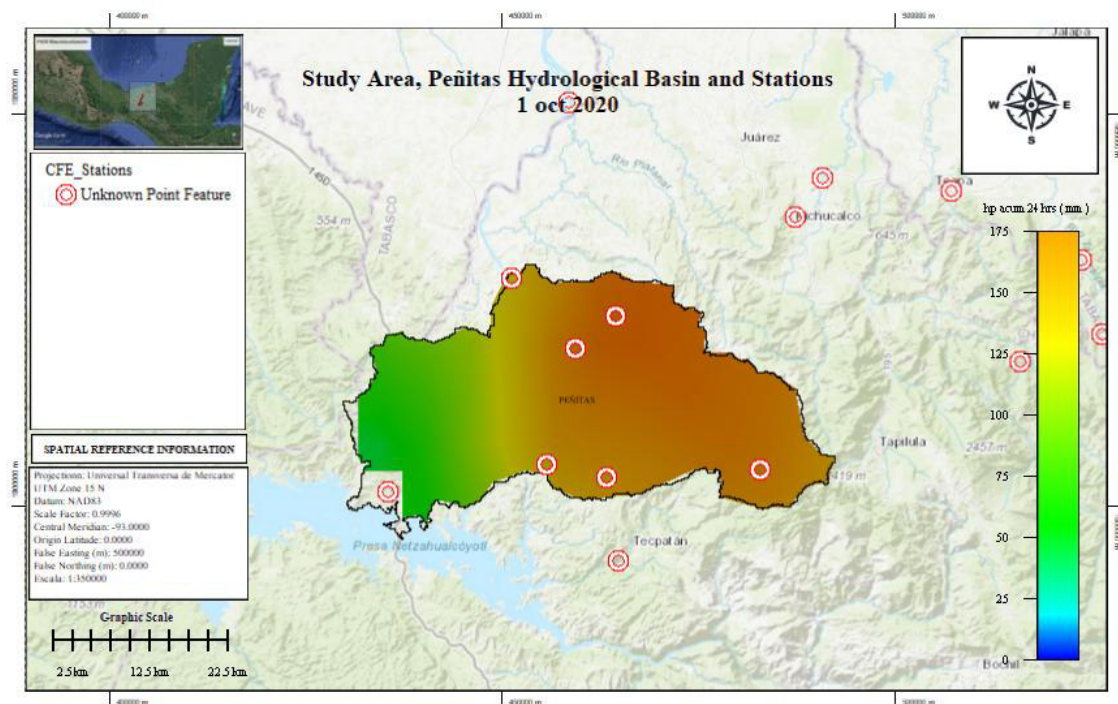


Ilustración 35 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 1 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

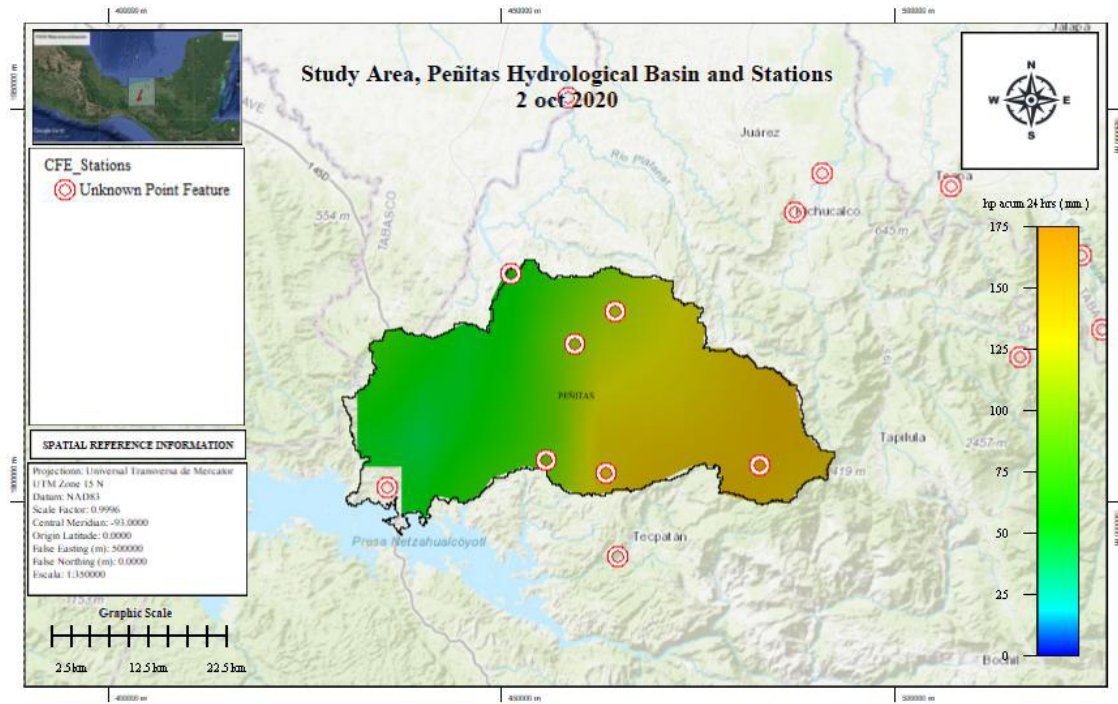


Ilustración 36 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 2 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

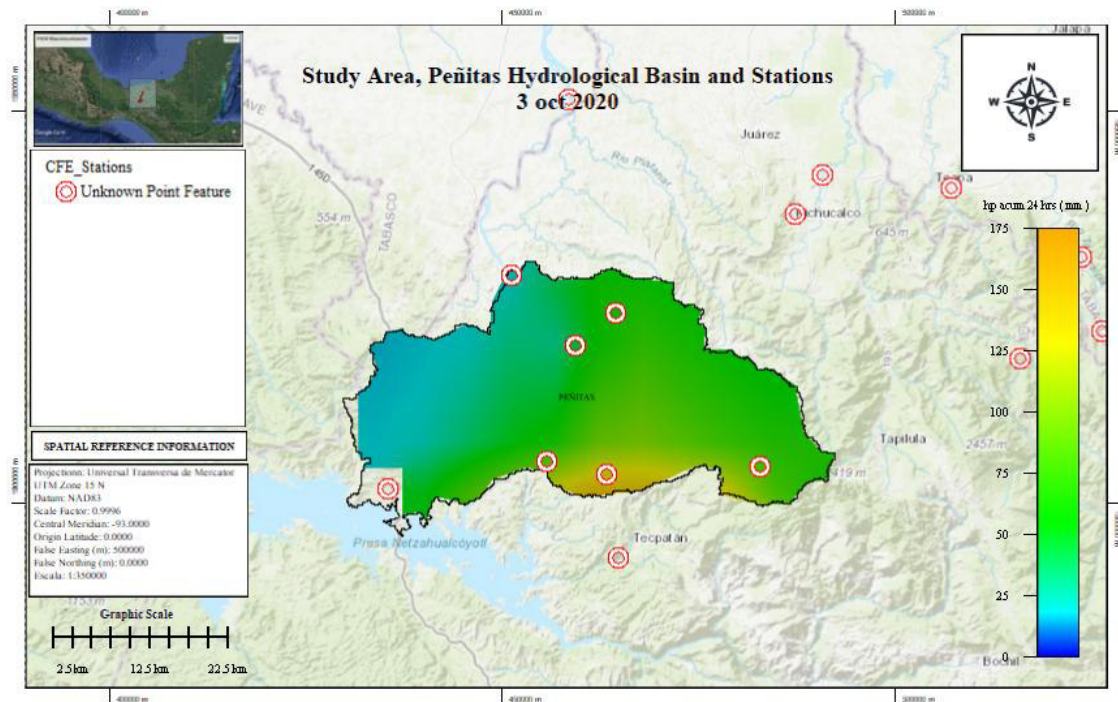


Ilustración 37 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 3 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

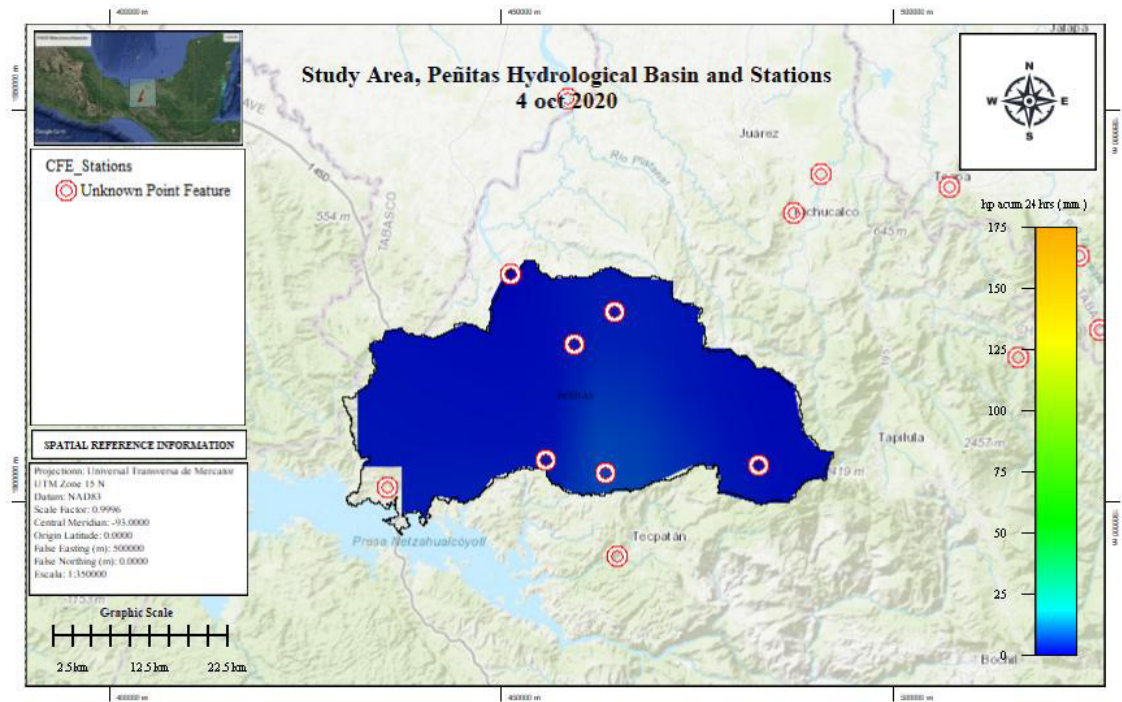


Ilustración 38 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 4 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

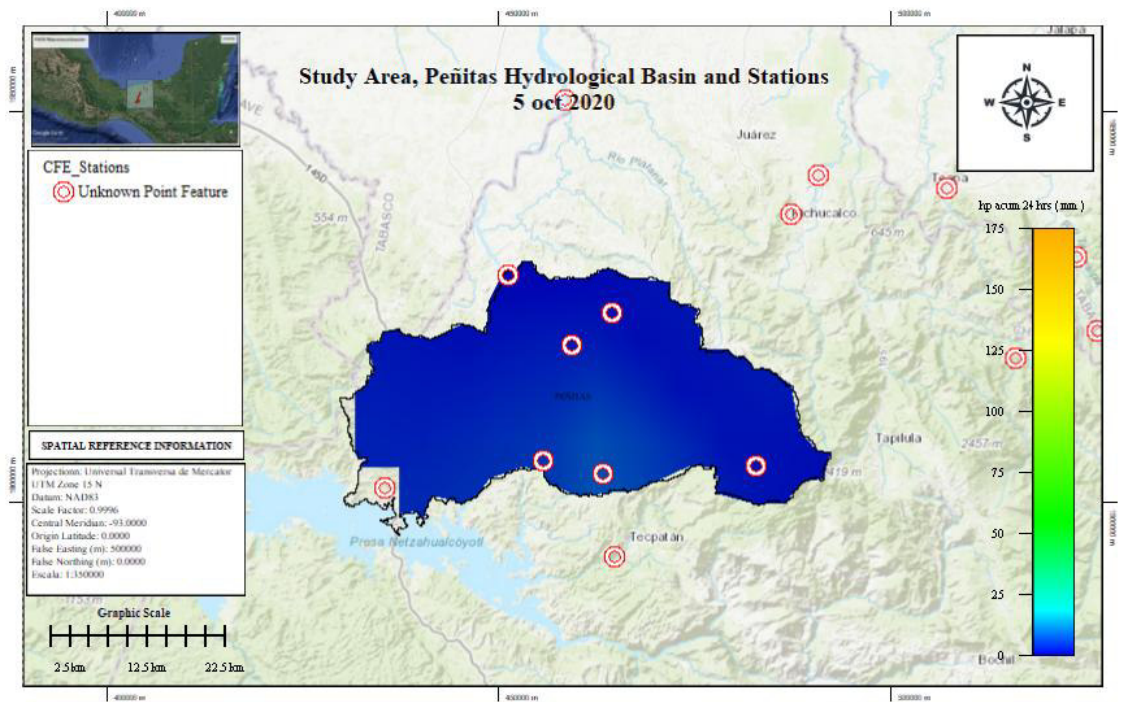


Ilustración 39 SIG de Estaciones de CFE; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 5 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

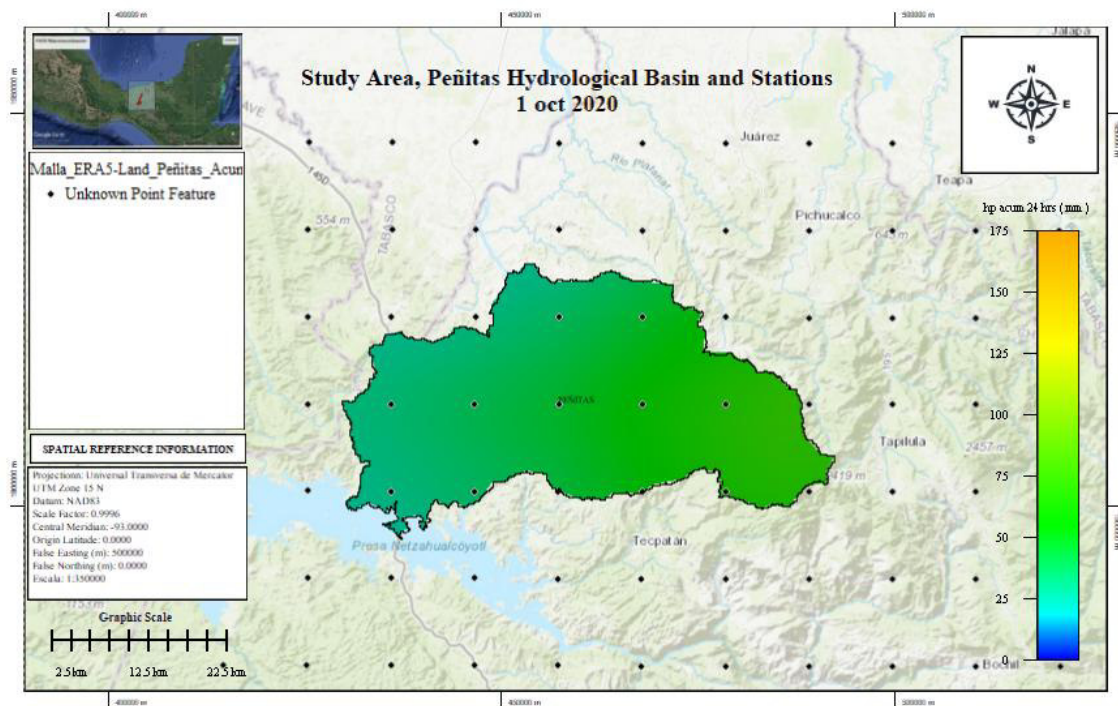


Ilustración 40 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 1 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

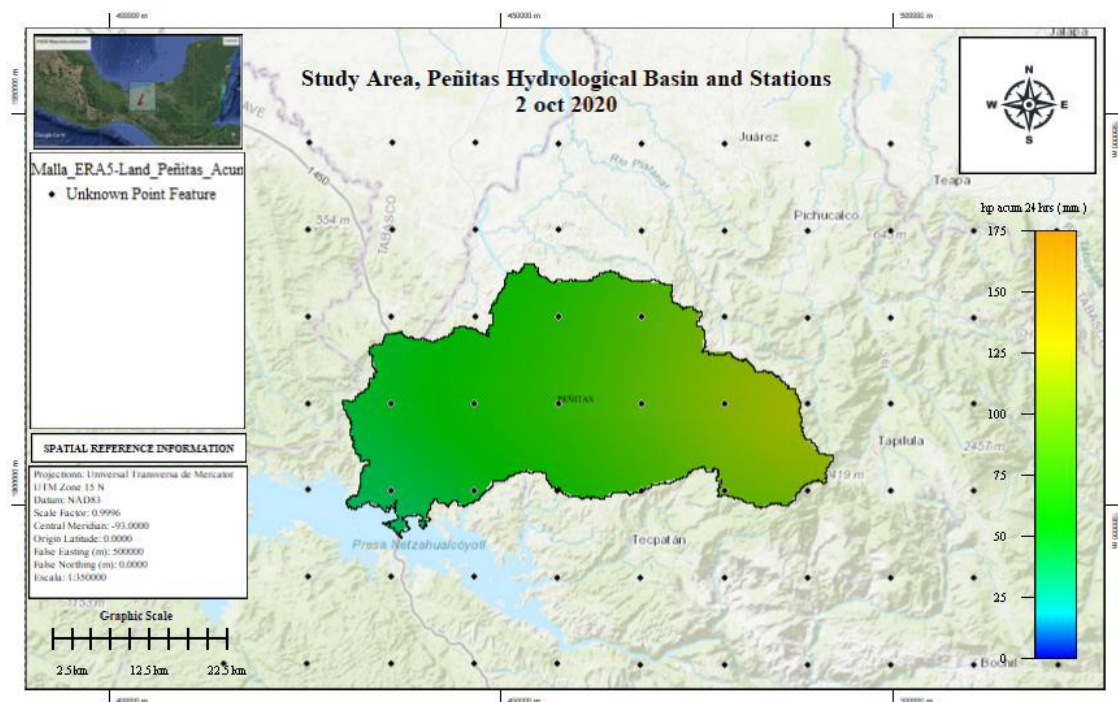


Ilustración 41 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 2 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

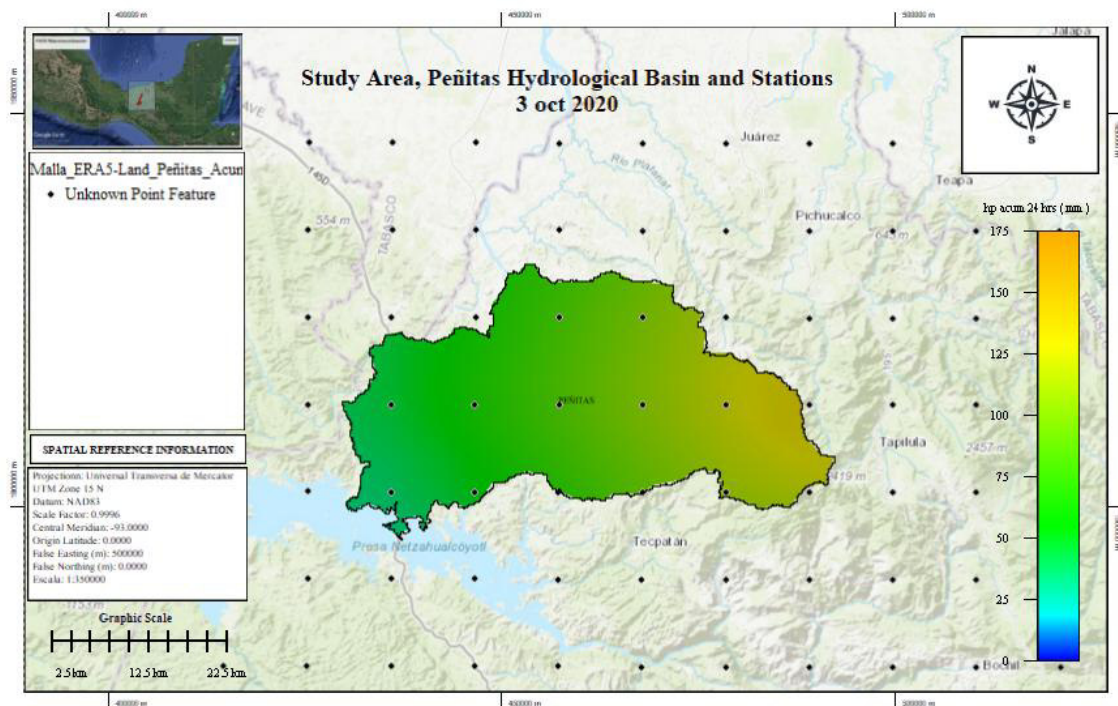


Ilustración 42 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 3 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

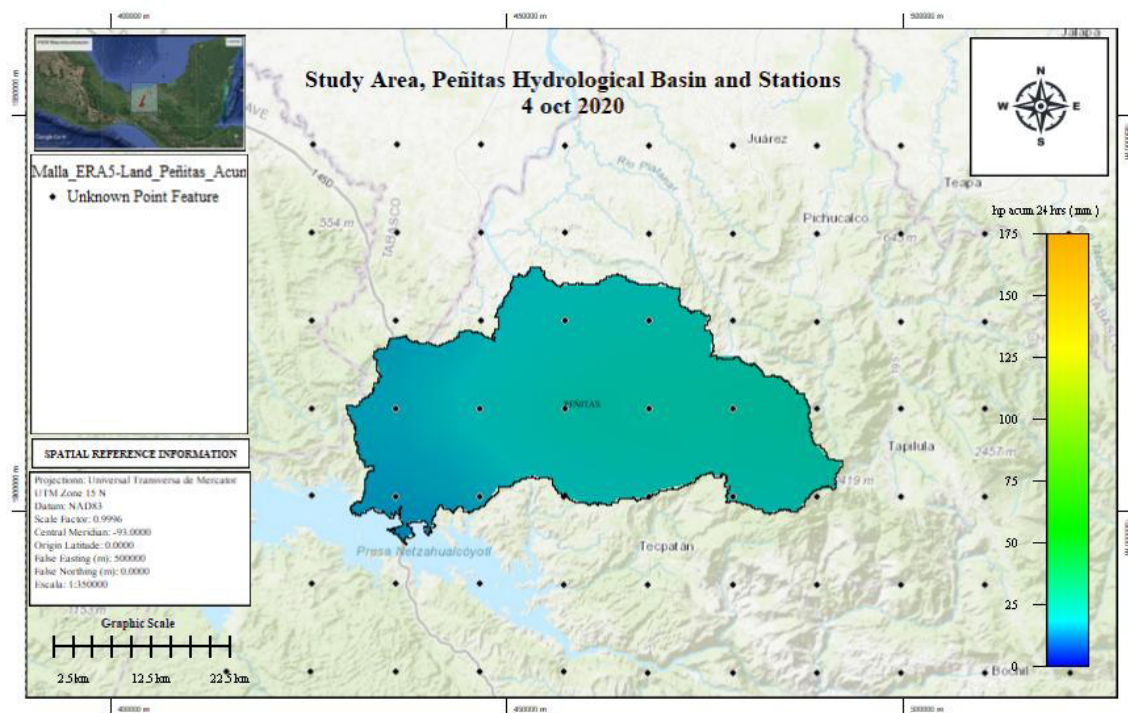


Ilustración 43 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 4 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

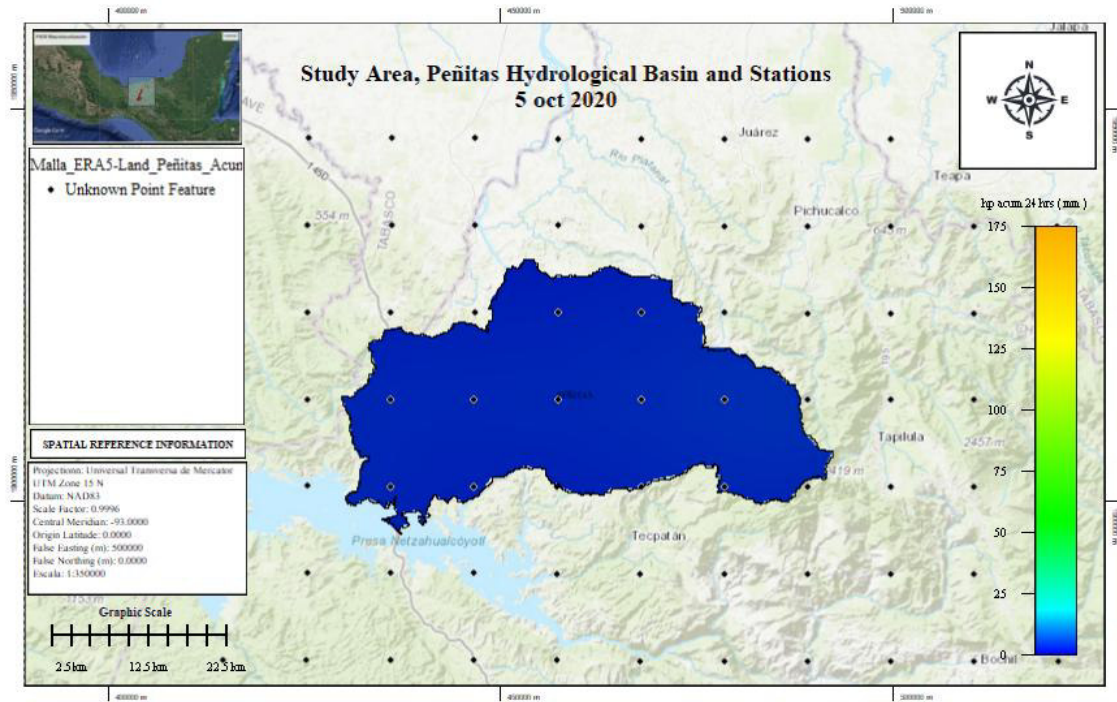


Ilustración 44 SIG de Malla de ERA5-Land; y precipitación acumulada cada 24 hrs, 5 de oct 2020, elaboración propia mediante GM

En una última comparación de forma visual por medio de mapas y SIG se comparó un mapa realizado por CONAGUA que indica la precipitación total ocurrida del 2 al 6 de octubre de 2020 (Ilustración 45) y un SIG realizado con datos de ERA5-Land (Ilustración 47) para poder comparar adecuadamente dichos mapas se ajustó la escala de color a la de CONAGUA para dicho evento (Ilustración 46).

De los datos de CONAGUA del evento de 2 al 6 de octubre del 2020 se obtuvo:

**Precipitación acumulada (mm) del 2 al 6 de octubre de 2020
por el huracán Gamma**

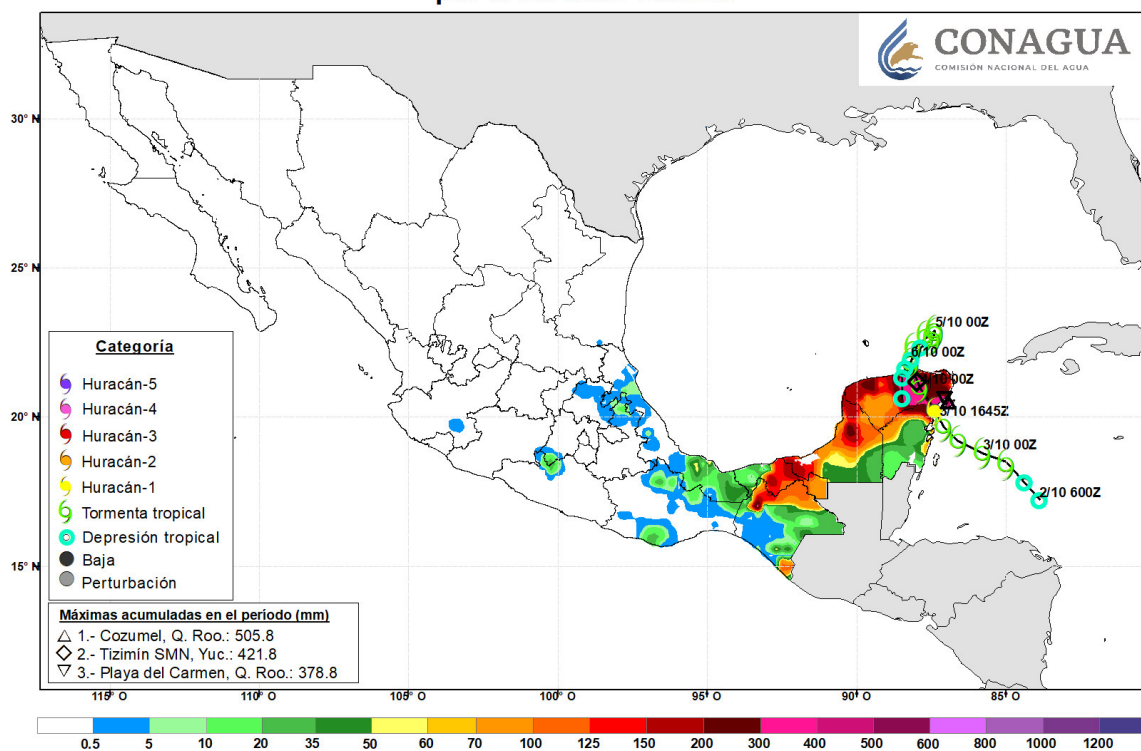


Ilustración 45 Precipitación acumulada (mm) del 2 al 6 de octubre de 2020, por huracán Gamma, CONAGUA

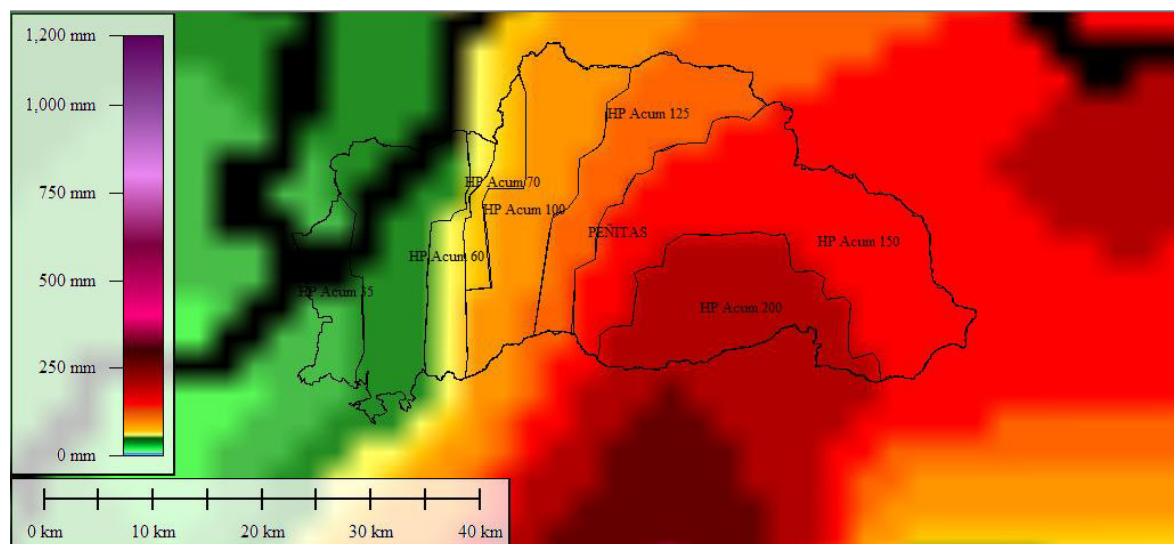


Ilustración 46 Detalle de la precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020, reelaboración de CONAGUA en GM

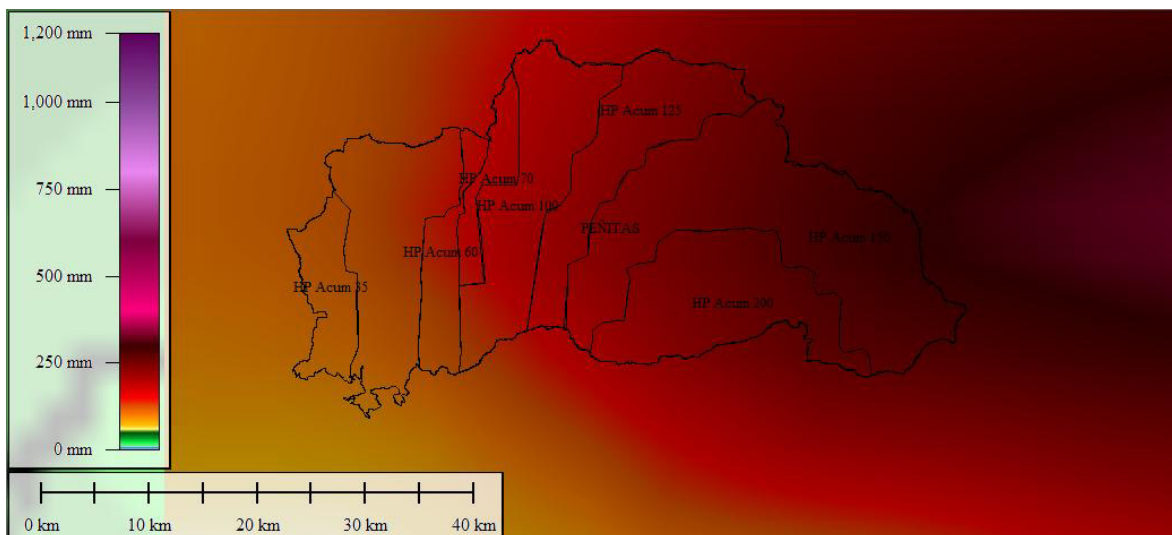


Ilustración 47 Detalle de la precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020 con datos de ERA5-Land, elaboración propia en GM

Obteniendo las áreas de influencia de cada zona (de la Ilustración 47) entre el área total de la zona Peñitas se obtuvieron los porcentajes de cuanto influye la tormenta en la cuenca (Ecuación 1). Para posteriormente obtener una precipitación media (Ecuación 2). Obteniendo los siguientes resultados.

Total		250	175	137.5	112.5	85	65	55	42.5
Area m2	1287074900	196722501	391558909	160367808	181623777	42783376.8	62077410.3	183250408	68690711.2
		15.28%	30.42%	12.46%	14.11%	3.32%	4.82%	14.24%	5.34%

P.Total	140.52
---------	--------

Tabla 5 Resultados de la obtención de precipitación media en (mm) en la cuenca Peñitas

4 Resultados y discusión

De la comparación obtenida entre mapas de ERA5 Land (Ilustración 48) y CONAGUA (ilustración 49) se seleccionaron puntos donde se tenía no sólo la información visual de CONAGUA sino también información proporcionada tanto por CFE(Círculos) y SIH(Cruces) seleccionando así 3 puntos de principal interés, para su posterior análisis de datos de las estaciones en tierra contra los datos obtenidos mediante ERA5-Land dando como resultado una búsqueda de factores de corrección que aproximarán nuestros datos teóricos (ERA5-Land) a los reales (estaciones en tierra) y que dichos factores fueran aplicables a la zona de estudio (cuenca Peñitas).

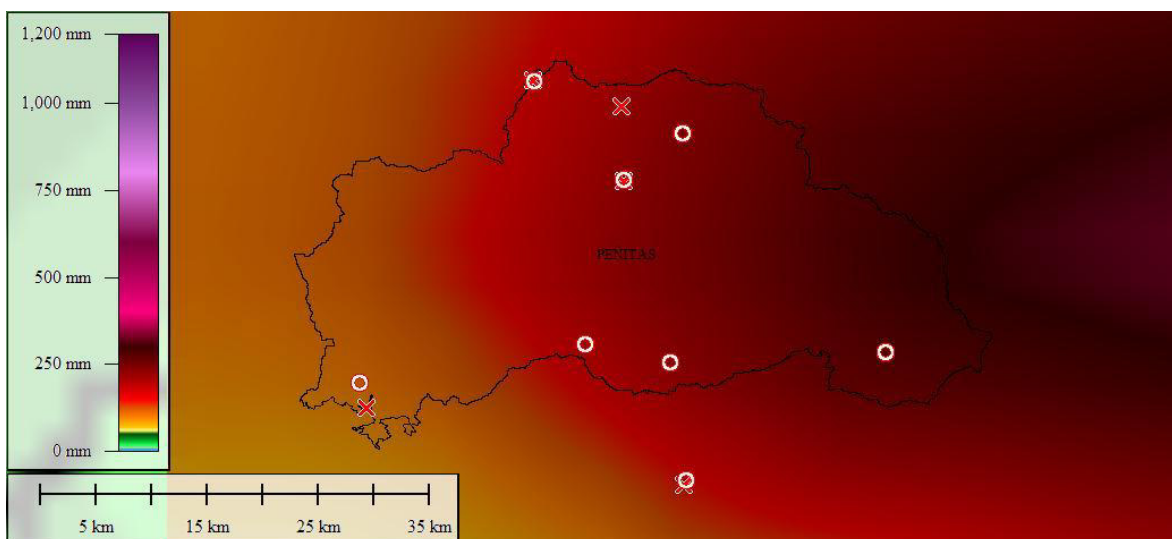


Ilustración 48 Precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020 con datos de ERA5-Land, y estaciones de SIH y CFE, elaboración propia en GM

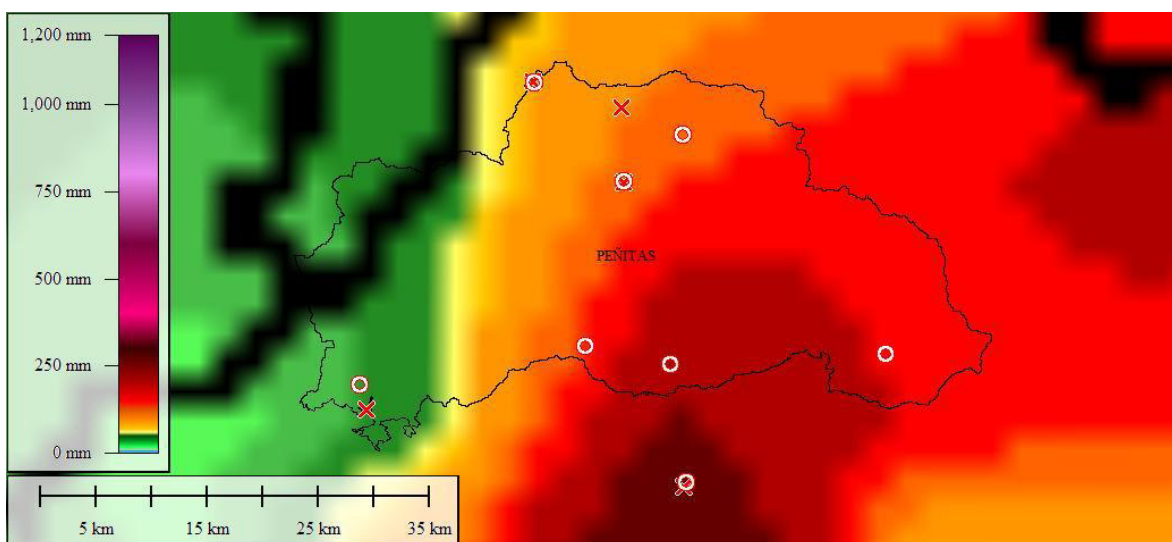


Ilustración 49 Precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020 con estaciones de SIH y CFE, reelaboración de CONAGUA en GM

De los datos obtenidos se obtuvieron los promedios de estaciones en tierra (Ecuación 7) y promedio de los datos de ERA5-Land (Ecuación 8), de estos promedios obtenidos se realizaron curvas masa obteniendo así la precipitación total en la cuenca peñitas según estaciones en tierra y ERA5-Land. Considerando como datos verídicos a las estaciones en tierra se buscó un factor que corrigiera los datos de ERA5-Land, esto obtenido mediante el cociente de datos en tierra y ERA5-Land (Ecuación 9). Posteriormente se obtuvo una nueva curva masa obtenida del producto de los datos de ERA5-Land por el factor de corrección (Ecuación 10) dando así los resultados mostrados en las curvas masa (Ilustración 50) con base en los datos (Tabla 6).

$$Prom_T = \frac{\sum P_{Tierra}}{N_T}$$

Ecuación 7 Obtención de datos promedio en tierra

$Prom_T$ Precipitación promedio en tierra, mm

P_{Tierra} Precipitación en tierra en una estación, mm

N_T Numero de datos en tierra

$$Prom_{E5L} = \frac{\sum P_{E5L}}{N_{E5L}}$$

Ecuación 8 Obtención de datos promedio de ERA5-Land

$Prom_{E5L}$ Precipitación promedio de ERA5-Land, mm

P_{Tierra} Precipitación de ERA5-Land cercana a su respectiva estación, mm

N_{E5L} Numero de datos considerados de ERA5-Land

$$FC = \frac{PT_T}{PT_{E5L}}$$

Ecuación 9 Obtención de Factor de Corrección

FC Factor de corrección

PT_T Precipitación total en tierra, en mm

PT_{E5L} Precipitación total de ERA5-Land, en mm

$$P_{Cor} = FC * P_{E5L}$$

Ecuación 10 Obtención de precipitación corregida

P_{Cor} Precipitación Corregida, en mm

P_{E5L} Precipitación de ERA5-Land, en mm

Prom Cuenca Tierra [mm]		Prom cuenca ERA5 [mm]		FCMM [mm]	
6.60	6.60	11.16	11.16	16.09	16.09
7.73	14.33	5.68	16.84	8.19	24.27
11.00	25.33	6.91	23.75	9.95	34.23
27.00	52.33	6.00	29.74	8.64	42.87
27.68	80.01	27.66	57.41	39.87	82.73
80.99	161.00	31.59	89.00	45.53	128.27
89.99	250.99	56.06	145.06	80.79	209.05
56.70	307.69	59.49	204.54	85.73	294.78
15.86	323.55	17.46	222.01	25.17	319.95
1.33	324.88	3.42	225.43	4.93	324.88
FC		1.44			

Tabla 6 Resultados de la obtención de curvas masa

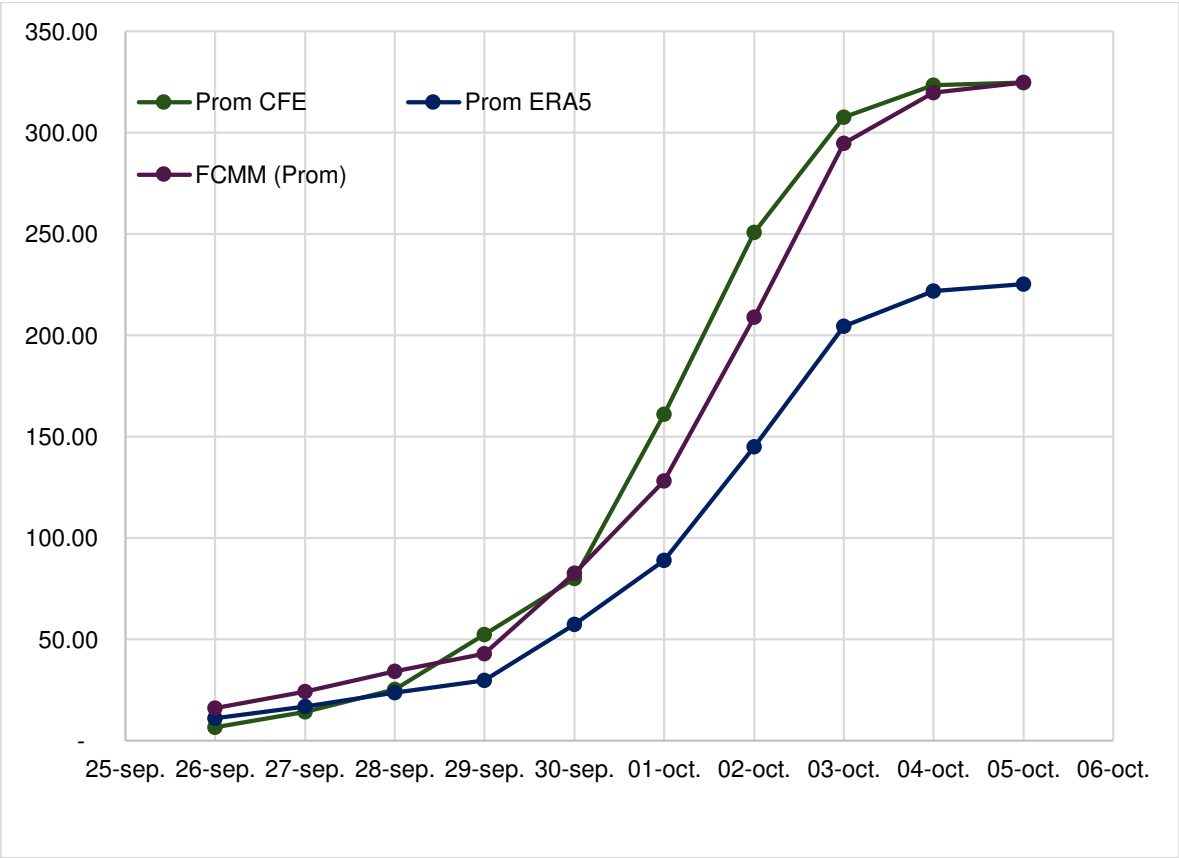


Ilustración 50 Curvas Masa promedio, elaboración propia.

De la información recabada de CFE (Ilustración 51) y ERA5-Land (Ilustración 52) se observa que dependiendo de la zona esta tendrá una mayor o menor concentración de precipitación, donde la estación 19 se encuentra en una zona con menor precipitación y la estación 17 es la mayor, estos datos se confirman al compararlos con mapas y SIG mostrados anteriormente.

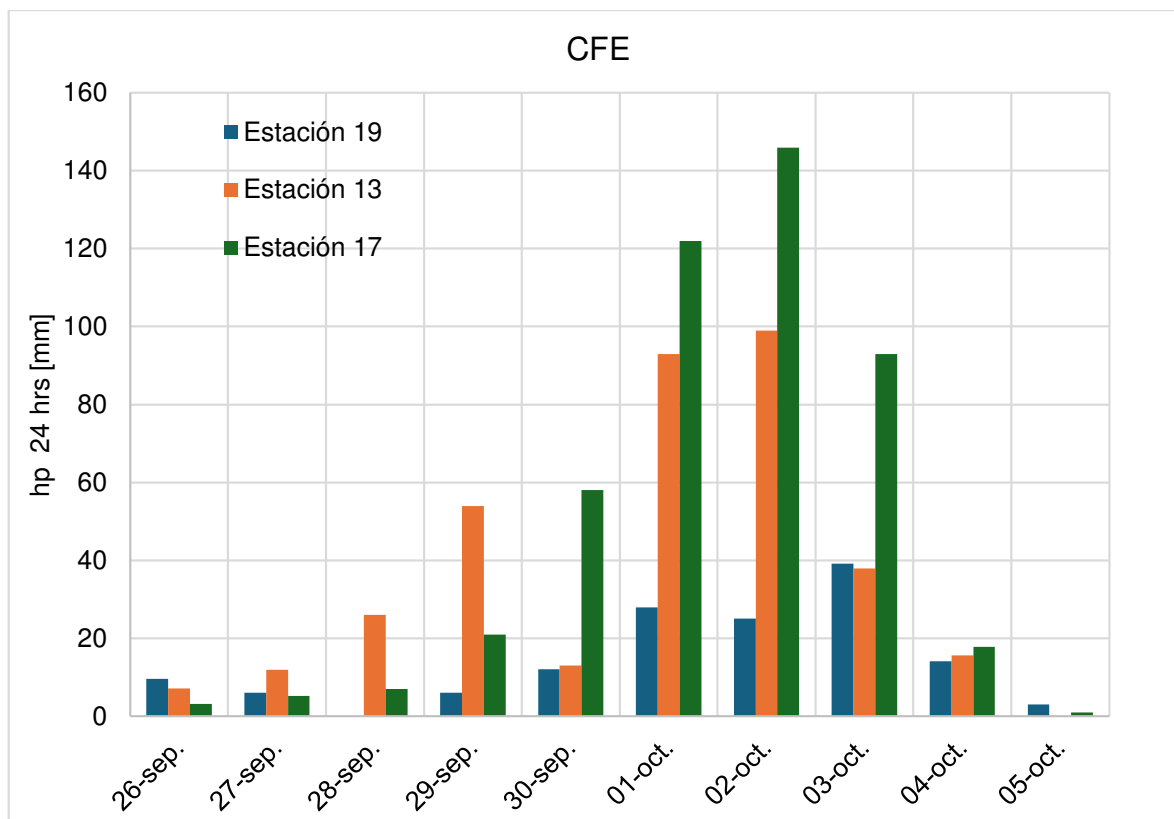


Ilustración 51 Hietograma de precipitación acumulada cada 24 hrs de 26 sep a 5 de oct de 2020 con información de CFE, elaboración propia

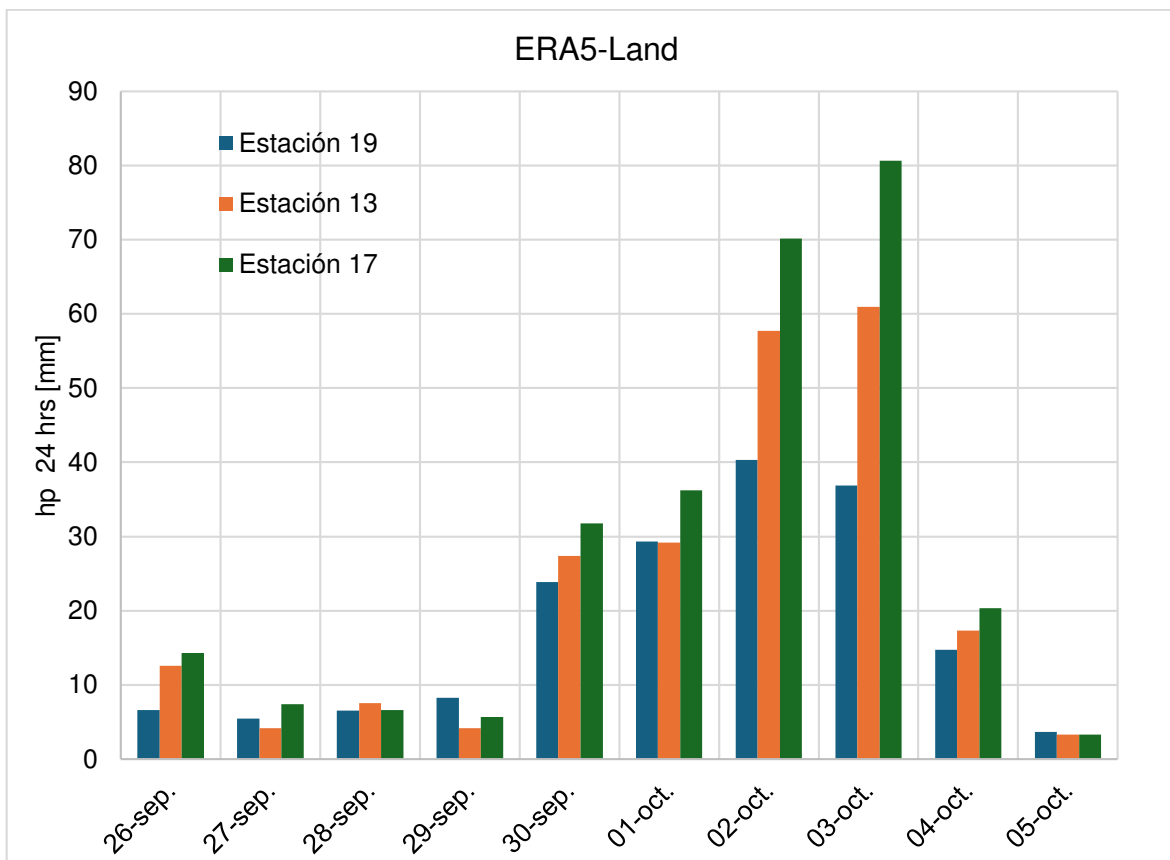


Ilustración 52 Hietograma de precipitación acumulada cada 24 hrs de 26 sep a 5 de oct de 2020 con información de ERA5-Land, elaboración propia

La ecuación 10 se puede utilizar para la corrección de datos de ERA5-Land para estaciones particulares dentro de la zona de Peñitas, obteniendo así hietogramas (Ilustración 53, 55 y 57), y curvas masa (Ilustración 54, 56 y 58), para dichas estaciones.

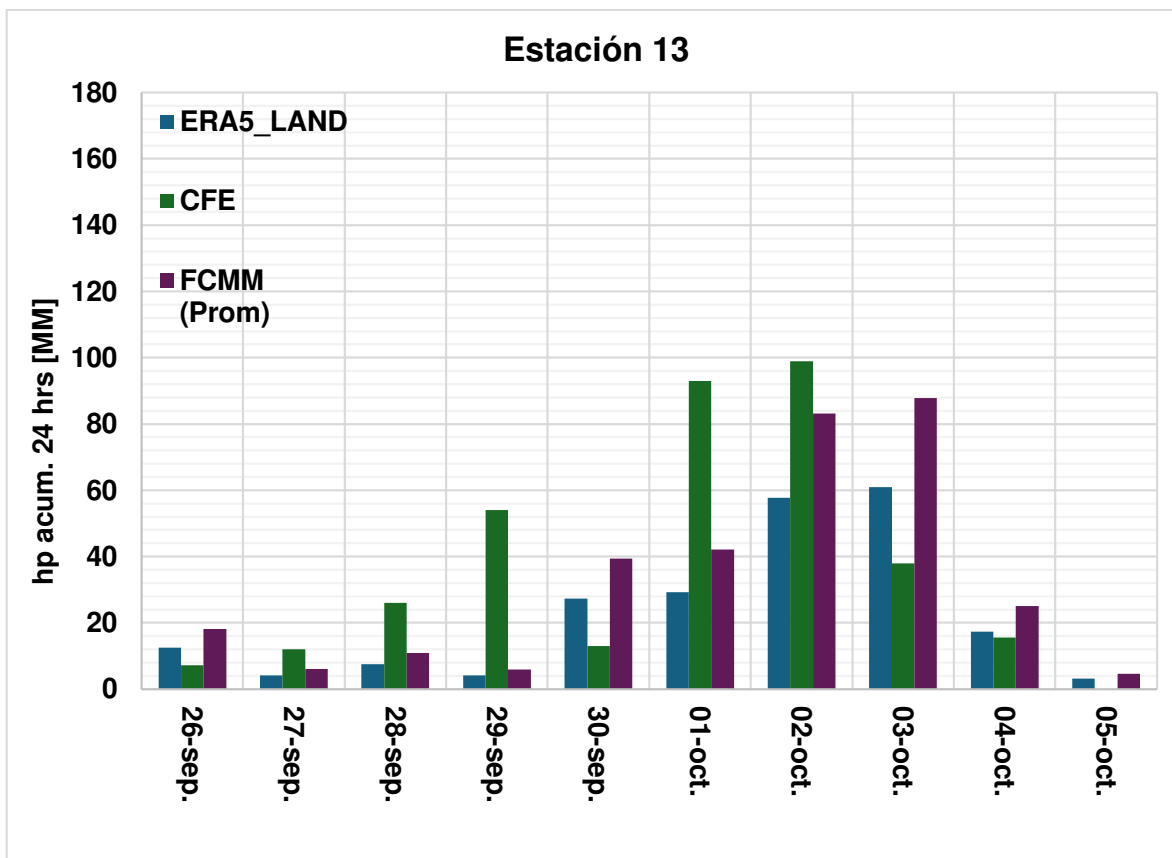


Ilustración 53 Hietograma de la Estación 13, datos CFE, ERA5-Land, y corrección "FCMM", Elaboración propia.

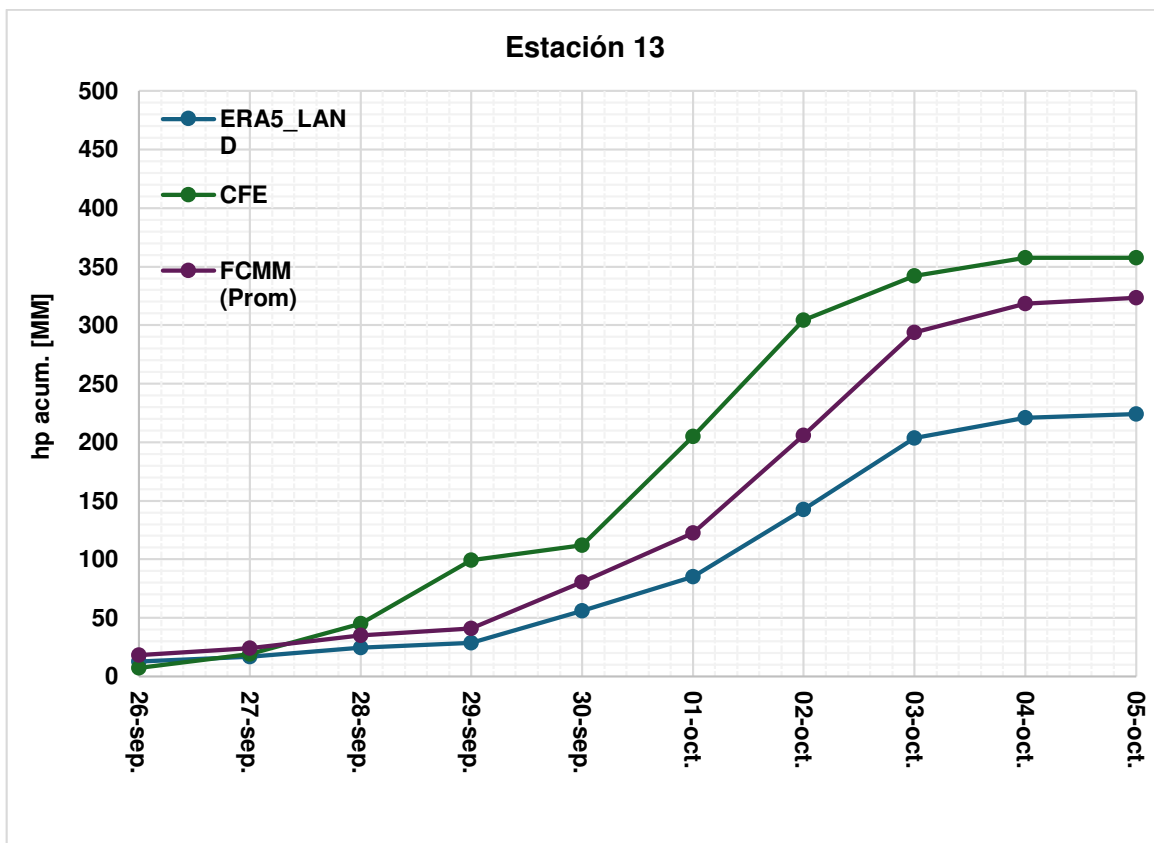


Ilustración 54 Curva Masa de la Estación 13, datos CFE, ERA5-Land, y corrección “FCMM”, Elaboración propia.

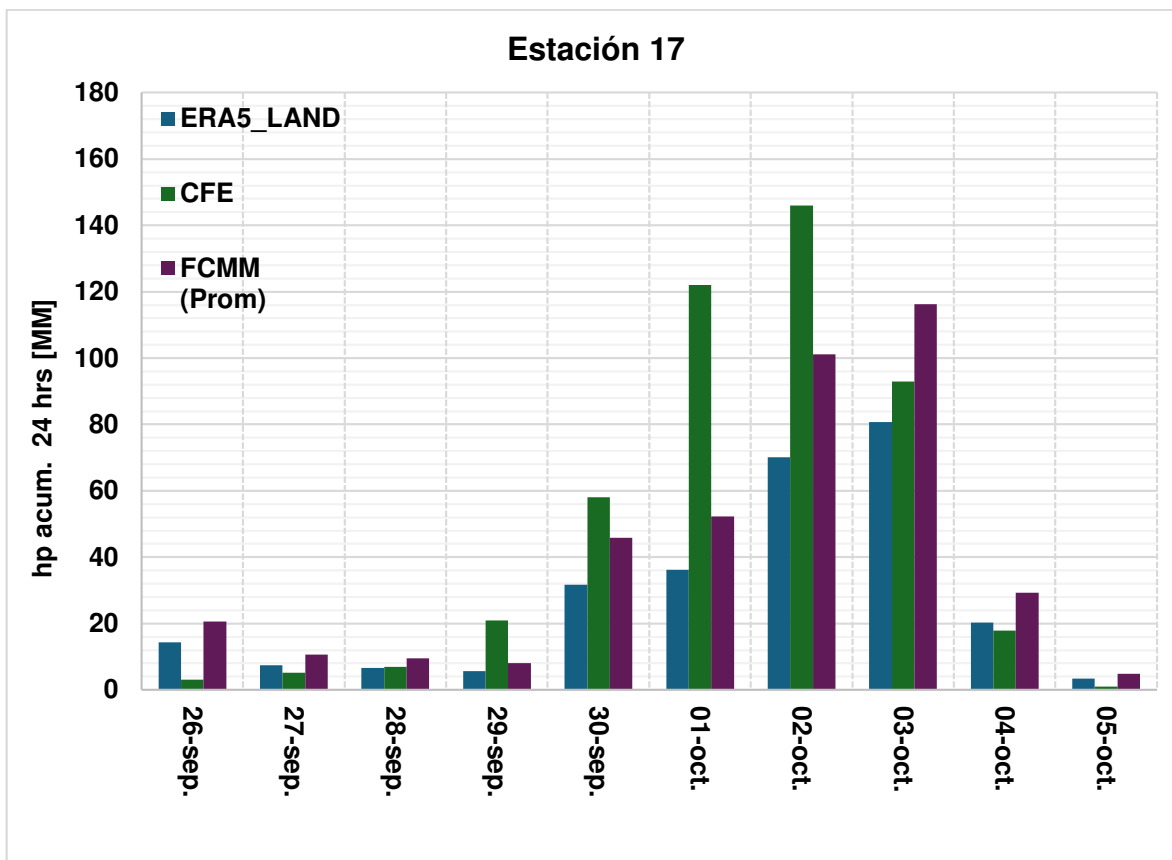


Ilustración 55 Hietograma de la Estación 17, datos CFE, ERA5-Land, y corrección “FCMM”, Elaboración propia.

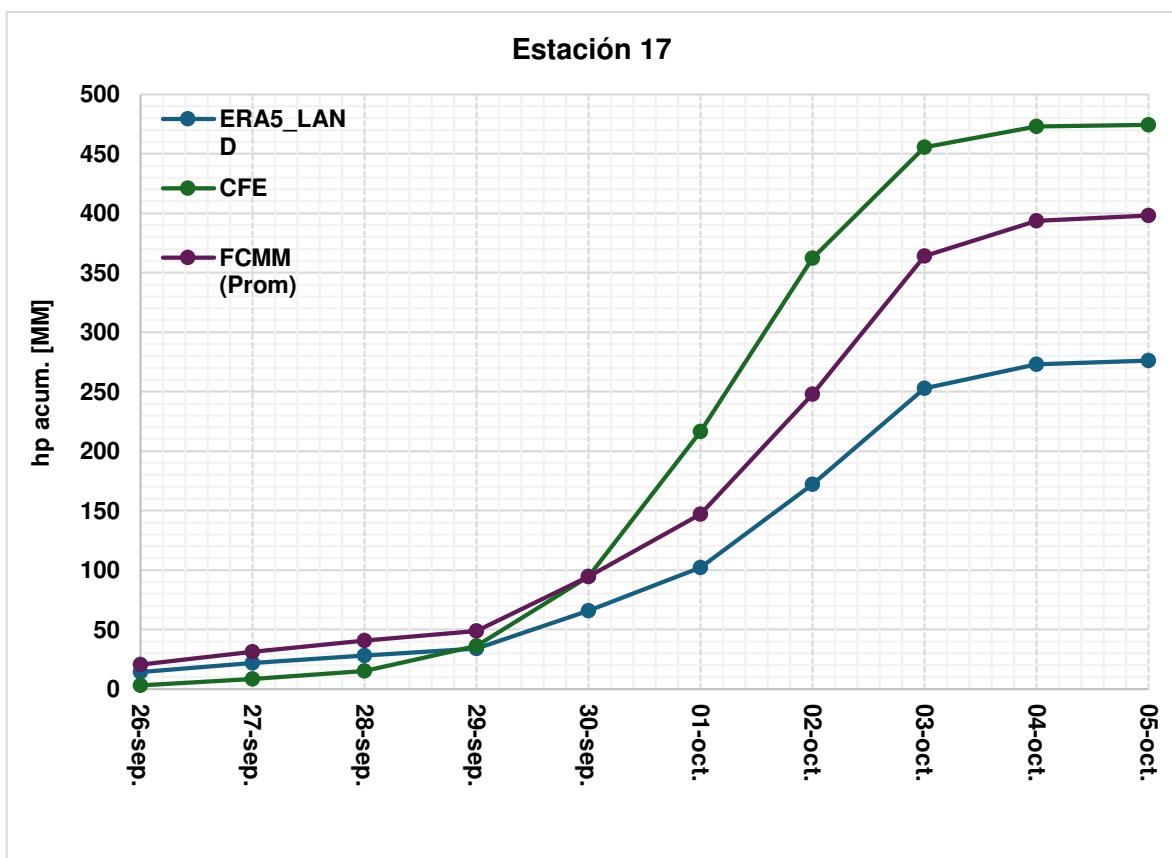


Ilustración 56 Curva Masa de la Estación 17, datos CFE, ERA5-Land, y corrección “FCMM”, Elaboración propia.

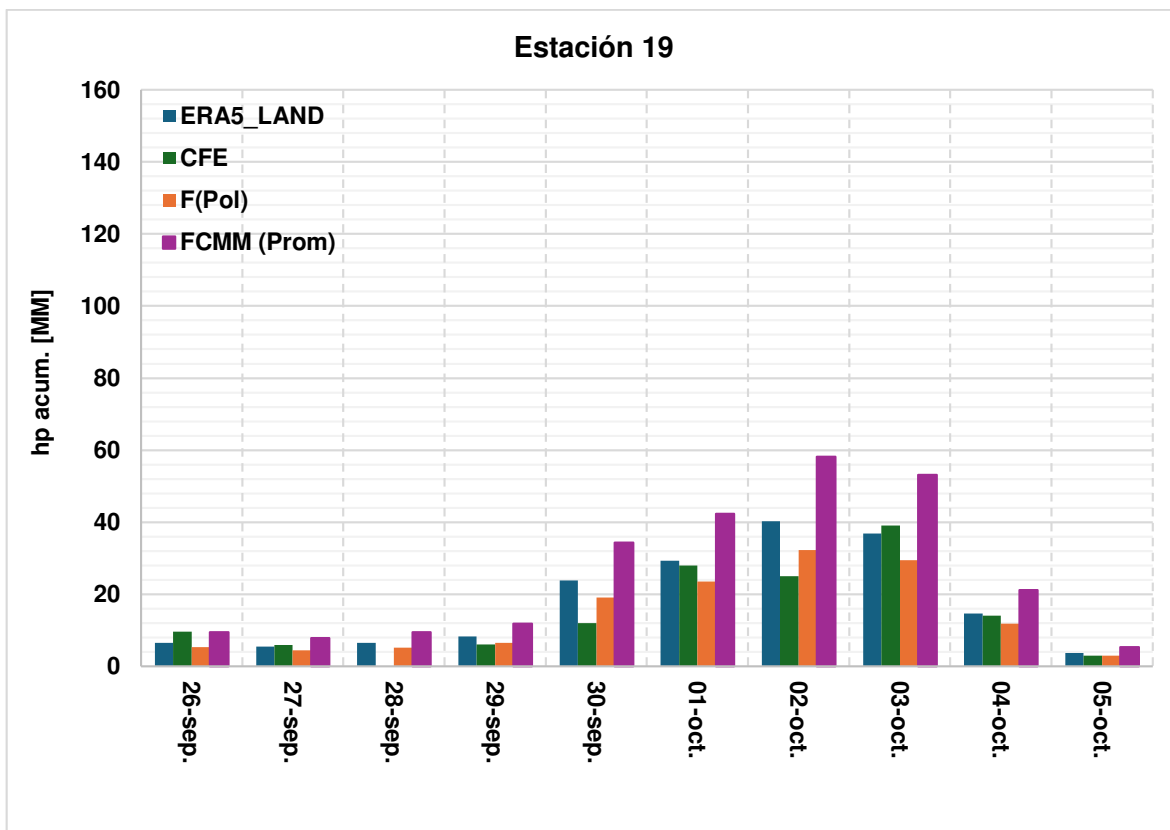


Ilustración 57 Hietograma de la Estación 19, datos CFE, ERA5-Land, y corrección “FCMM”, Elaboración propia.

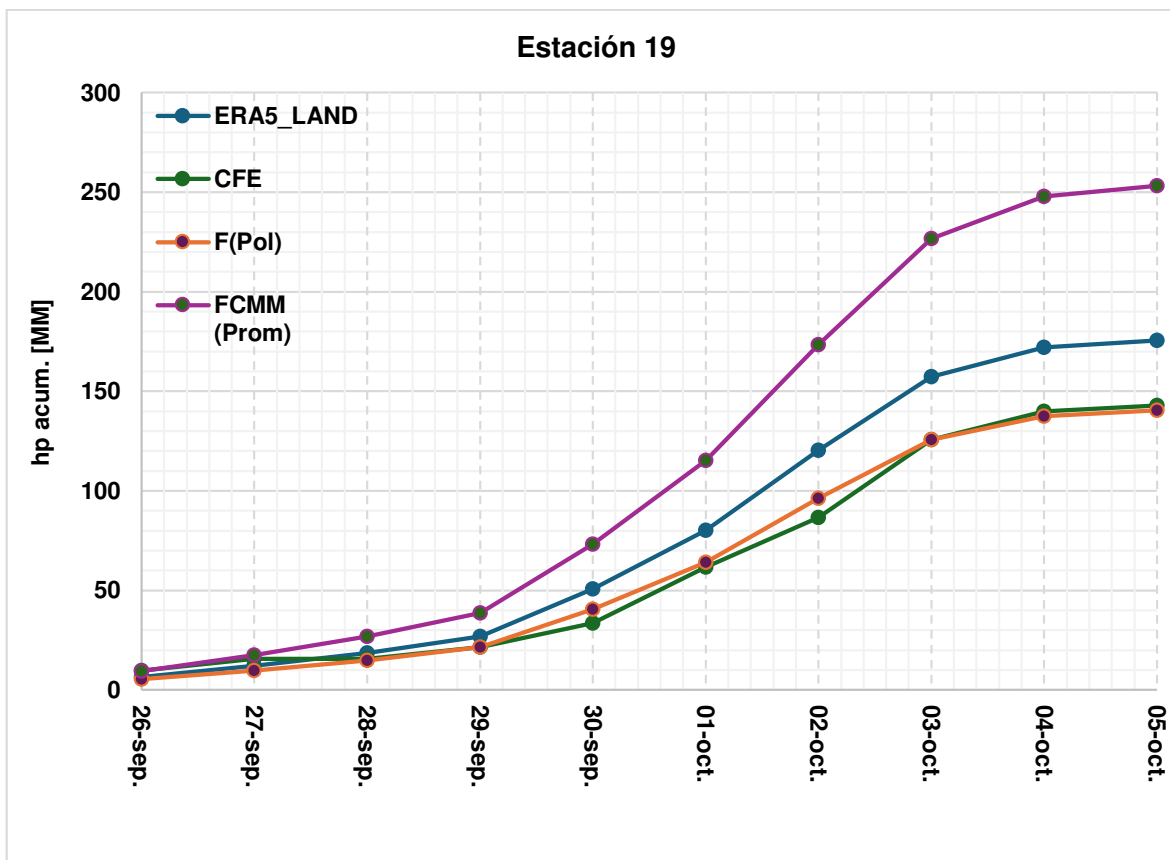


Ilustración 58 Curva Masa de la Estación 19, datos CFE, ERA5-Land, y corrección “FCMM”, Elaboración propia.

5 Conclusiones

Los productos del reanálisis de precipitación, provenientes de bases de datos internacionales tienen una potencial utilidad para el análisis de cuencas con escasa información hidroclimática.

De los resultados obtenidos en este estudio se identificó que el software de reanálisis ERA5-Land puede detectar la lluvia en la zona predeterminada donde se presentó, este resultado obtenido de la comparación con estaciones en tierra medidos por CONAGUA, SIH y CFE, sin embargo dicha precipitación tiene margen de mejora en su magnitud. Para mejorar la predicción de los datos obtenidos se buscó una serie de factores que mejoraran los datos de ERA5-Land-mediante la comparación con los datos en tierra.

El factor obtenido mediante polígonos de Thiessen para la obtención de la precipitación en la cuenca a estudiar dio resultados discordantes, dependiendo de la zona de la cuenca, ya que se obtuvo una aproximación muy cercana en la zona suroeste pero en la zona noreste la diferencia entre resultados se amplió.

El segundo factor de corrección propuesto, obtenido con el promedio de los datos de reanálisis, así como de las estaciones en tierra, tuvo una mejor aproximación en la zona general de toda la cuenca de estudio, aunque su aproximación fue menor en comparación con los polígonos de Thiessen en los casos de la zona suroeste,

Tomando en cuenta el análisis realizado se puede concluir que los factores de corrección propuestos son aplicables para la cuenca Peñitas, también cumpliendo así la necesidad de tener información hidrológica donde no haya estaciones en tierra que proporcionen dicha información. La metodología propuesta es factible de aplicar a otras cuencas y específicamente para otras zonas de México es viable su uso para la obtención de factores a la cuenca en particular.

Una ventaja de la metodología utilizada es que los factores de corrección para la magnitud de la precipitación requieren muy poca información relativa de estaciones de tierra, siendo tal que con una o dos estaciones de tierra aproximan la magnitud de precipitación en una cuenca de entre 20 y 40 km cuadrados.

Referencias

- Adler, R. F., Kidd, C., Petty, G., Morissey, M., and Goodman, H. M.: (2001) Intercomparison of global precipitation products: The third precipitation intercomparison project (PIP-3), B. Am. Meteorol. Soc., 82, 1377–1396.
- Alexopoulos, M. J., Müller-Thomy, H., Nistahl P., & Bezak N. (2023). Validation of precipitation reanalysis products for rainfall-runoff modelling in Slovenia. Hydrol. Earth Syst. Sci., 27, 2559–2578, 2023.
- Andrade-Velázquez, M., & Montero-Martínez, MJ (2023). Tendencias históricas y proyectadas de la temperatura superficial media en el sur-sureste de México utilizando ERA5 y CMIP6. Climate , 11 (5), 111.
- Arakawa, A., (2004), The cumulus parameterization problem: past, present, and future, J. Climate, 17, 2493–2525.
- Ballari, D., Contreras, J., Ureña, P., (2024) Validación espacio-temporal de Irradiancia Horizontal Global (GHI) de productos de fuentes satelital y de reanálisis en Ecuador, Universidad del Azuay
- Beck, H. E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G. P., Pappenberger, F., & Wood, E. F. (2019). Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. Hydrology and Earth System Sciences, 23(1), 207-224.
- Brown, R. D. & Gillespe, T. J. (1995). Microclimatic landscape design. Creating thermal comfort and energy efficiency. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Cedeño Jiménez, JR, y Brovelli, MA (2024). Estimación de concentraciones de NO₂ a nivel del suelo mediante aprendizaje automático exclusivamente con teledetección y datos ERA5: el caso de estudio de la Ciudad de México. Teledetección , 16 (17), 3320.
- CEIEG (2025), Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica, Información Geográfica, Datos Geográficos.
- CFE (2022), Comisión Federal de Electricidad, Gobierno de México, Reportajes, ¿CÓMO FUNCIONA LA RED DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS DE LA CFE? <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=3734>
- Coiffier, J.: (2011) Fundamentals of Numerical Weather Prediction, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- CONAGUA (2010) Manual de usuario, Estaciones Climatológicas en Google Earth.
- CONAGUA (2019) Servicio Meteorológico Nacional (SMN) Comisión Nacional del Agua, México.

- CONAGUA (2022). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Comisión Nacional del Agua, México.
- Danysoft (2025) Global Mapper <https://www.danysoft.com/global-mapper/>
- Diccionario SIG (2025) <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/thiessen-polygon>
- Ebert, E. E., Janowiak, J. E., and Kidd, C.:(2007) Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models, B. Am. Meteorol. Soc., 88, 47–64.
- ECMWF (2024) Climate Data Store, ERA5-Land hourly data from 1950 to present
- Eltahir, E. A. B., & Bras, R. L. (1996). Precipitation recycling. Reviews of Geophysics, 34(3), 367–378. <https://doi.org/10.1029/96RG01927>
- Espinosa, L. A., Portela, M. M., & Gharbia, S. (2024). Assessing Changes in Exceptional Rainfall in Portugal Using ERA5-Land Reanalysis Data (1981/1982–2022/2023). Water, 16(5), 628.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International Journal of Climatology, 27(12), 1547–1578.
- Gallego Herrezuelo, M. C. (2004). Un estudio de la variabilidad climática en Península Ibérica. Universidad de Extremadura. Tesis doctoral
- Geiger, R. (1950). The climate near the ground. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Gomis-Cebolla J., Rattayova V., Salazar-Galán S., Francés F., (2023) Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020), Atmospheric Research, Volume 284, 106606, 0169-8095.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049.
- Jiang, S., Ren, L., Hong, Y., Yong, B., Yang, X., Yuan, F., & Ma, M. (2012). Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. Journal of Hydrology, 452–453, 213–225.
- Kidd, C., & Huffman, G. (2011). Global precipitation measurement. Meteorological Applications, 18(3), 334–353.
- Larson, L. W., & Peck, E. L. (1974). Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. Water Resources Research, 10(4), 857–863. <https://doi.org/10.1029/WR010i004p00857>

- Lavers, D.A., Simmons, A., Vamborg, F. & Rodwell, M.J.(2022) An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748) 3124–3137.
- Liu, X., Yang, T., Hsu, K., Liu, C., & Sorooshian, S. (2017). Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 169–181.
- Muñoz Andrés,V., Álvarez Rodríguez,J., Asedegbega Nieto,E., Pérez Cadenas, M. (2019). *Gestión y conservación de aguas y suelos*. España: UNED.
- Muñoz J. (2019) First ERA5-Land dataset to be released this spring, ECMWF,
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., and Thépaut, J.-N.: (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4349–4383, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
- Muñoz-Sabater, J.: (2019) ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) [data set], <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>.
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., Brisson, E., Kollet, S., Schmidli, J., van Lipzig, N. P. M., and Leung, R.: (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges, *Rev. Geophys.*, 53, 323–361.
- Qin Jiang, Weiyue Li, Zedong Fan, Xiaogang He, Weiwei Sun, Sheng Chen, Jiahong Wen, Jun Gao, Jun Wang, (2021) Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland, *Journal of Hydrology*, Volume 595, 125660, ISSN 0022-1694.
- Springall, G R.1980.Hidrología (primera parte). pp 207 Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., & Ashouri, H. (2018). A review of global precipitation datasets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79-107.
- Tan M., Armanuos A., Ahmadianfar I, Demir V, Heddarn S., Al-Areeq A., Abba S., Halder B., Kilinc H., Yaseen Z., (2023) Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes, *Journal of Hydrology*, Volume 624, 129940, 0022-1694.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1217.
- Ureña, E. F. (2011). Utilización de estaciones meteorológicas automáticas como nueva alternativa para el registro y transmisión de datos.*Rev. Posgrado y Sociedad*. 11(1):33-49.

Wilby, R., & Wigley, T. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 21(4), 530–548.

Yilmaz, K. K., Hogue, T. S., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2005). Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 6(4), 497–517.

Glosario de Terminos

AI Área de Influencia, m^2 o km^2

AT Área Total, m^2 o km^2

FC Factor de Corrección

GM Global Mapper

N_{E5L} Numero de datos considerados de ERA5-Land

N_T Numero de datos en tierra

$P_{acum(i-1)hrs}$ es la precipitación acumulada en la hora inmediata anterior, en mm

$P_{acum_i hrs}$ es la precipitación acumulada a tal hora, en mm

P_{Cor} Precipitación Corregida, en mm

P_{E5L} Precipitación de ERA5-Land, en mm

PI_i Porcentaje de influencia

P_{Med} Precipitación Media, mm

PT_{E5L} Precipitación total de ERA5-Land, en mm

PT_T Precipitación total en tierra, en mm

P_{Tierra} Precipitación de ERA5-Land cercana a su respectiva estación, mm

P_{Tierra} Precipitación en tierra en una estación, mm

P_{Tot_REAL} Precipitación total real, mm

P_{Tot_TEO} Precipitación total teórica, mm

$P_{i hrs}$ es la precipitación en una hora, en mm

P_i Precipitación de una estación o punto, mm

$Prom_{E5L}$ Precipitación promedio de ERA5-Land, mm

$Prom_T$ Precipitación promedio en tierra, mm

SIG Sistema de Información Geográfico

Anexos

Base de Datos CFE y ERA5-Land de estaciones 13, 17 y 19

	CFE			ERA5-Land		
Estación	13	17	19	13	17	19
Longitud	17.4452	17.3644	17.1997	17.4452	17.3644	17.1997
Latitud	-93.4578	-93.3814	-93.6048	-93.4578	-93.3814	-93.6048
24/09/2020 01:00	0	0	0	0.29949844	0.23767352	0.3605783
24/09/2020 02:00	0	0	0	0.0051111	0.005126	0.04450977
24/09/2020 03:00	0	0	0	0.05592406	0.16480684	0.02987683
24/09/2020 04:00	0	0	0	0.00540912	0.00737608	0.00716745
24/09/2020 05:00	0	0	0	0.00084936	0.00014901	0.00086427
24/09/2020 06:00	0	0	0	0	0	0
24/09/2020 07:00	0	0	0	0.00227988	0.00029802	0.00840426
24/09/2020 08:00	0	0	0	0.00794232	0.01272559	0.02081692
24/09/2020 09:00	0	0	0	0.03141165	0.0294447	0.0472665
24/09/2020 10:00	0	0	0	0.10924041	0.17589331	0.05584953
24/09/2020 11:00	0	0	0	0.16358496	0.18505753	0.17173587
24/09/2020 12:00	0.26	0.09	0	0.0915825	0.1210868	0.0868887
24/09/2020 13:00	0	0	0	0.01572075	0.0328869	0.0235438
24/09/2020 14:00	0	0	0	1.21316305	3.1002463	0.9082407
24/09/2020 15:00	0	0	0	0.1550617	0.1848488	0.3737062
24/09/2020 16:00	0	0	0	0.273138	0.1606049	0.0624805
24/09/2020 17:00	0	0	0	6.7171007	6.1453877	3.3126774
24/09/2020 18:00	0	0	0	0.590399	1.108512	1.021862
24/09/2020 19:00	0	0	0	1.5406199	1.2869816	1.4037266
24/09/2020 20:00	0	0	0	3.2738931	3.1715424	2.1677465
24/09/2020 21:00	1.81	0.62	1.36	1.704283	1.6970155	1.5785547
24/09/2020 22:00	0	0	0	0.6813707	0.6547605	0.3780198
24/09/2020 23:00	3.62	1.24	0	1.0369413	1.190521	0.4526824
25/09/2020 00:00	26.88	9.23	0	1.547881	1.5251485	1.3019963
25/09/2020 01:00	6.2	2.13	1.36	2.05493	2.3168175	0.9560817
25/09/2020 02:00	0.26	0.09	0	2.216935	2.4750755	1.515731
25/09/2020 03:00	0	0	0	1.364998	1.3166745	1.176863
25/09/2020 04:00	9.56	3.28	0	0.236109	0.188738	0.281513
25/09/2020 05:00	0.26	0.09	0	0.031785	0.031084	0.026271
25/09/2020 06:00	0.78	0.27	0	0.0017165	0.001717	0.001358
25/09/2020 07:00	44.2	15.18	34.03	0	0.000343	0
25/09/2020 08:00	5.17	1.78	93.25	0	0.000357	0
25/09/2020 09:00	0.79	0.34	1.75	0.0016995	0.001699	0.001788
25/09/2020 10:00	0.4	0.17	0.12	0.006824	0.015289	0.003175
25/09/2020 11:00	0	0	0.12	0.027478	0.05573	0.013321

25/09/2020 12:00	0	0	0	0.075474	0.141606	0.04375
25/09/2020 13:00	0.79	0.34	0	0.192285	0.588835	0.072271
25/09/2020 14:00	0	0	0	0.125797	0.267803	0.113099
25/09/2020 15:00	0	0	0	0.406652	0.948996	0.248017
25/09/2020 16:00	0	0	0	0.365375	1.042425	0.187754
25/09/2020 17:00	0	0	0	0.35459	0.528781	0.179291
25/09/2020 18:00	0	0	0	0.592291	0.514836	0.458956
25/09/2020 19:00	0	0	0	0.0802353	0.03515929	0.29702112
25/09/2020 20:00	0	0	0	0.06610155	0.035107136	0.16182288
25/09/2020 21:00	0	0	0.23	0.17978995	0.111997124	0.17769635
25/09/2020 22:00	0	0	4.32	0.3511906	0.34385175	0.13982505
25/09/2020 23:00	1.58	0.69	2.34	0.383839	0.3633499	0.1230687
26/09/2020 00:00	1.19	0.52	0.58	0.2632737	0.2028644	0.2439618
26/09/2020 01:00	0	0	0	2.2956729	2.5332421	0.8633137
26/09/2020 02:00	0	0	0	1.7504843	1.8281043	0.7074027
26/09/2020 03:00	1.98	0.86	0	2.1180211	1.656711	1.5296487
26/09/2020 04:00	0.4	0.17	0.12	1.2003776	1.286536	0.3317004
26/09/2020 05:00	0	0	0	0.889152	0.859127	0.2368536
26/09/2020 06:00	0	0	0	0.396342	0.376582	0.092298
26/09/2020 07:00	0	0	0	0.284448	0.288532	0.051856
26/09/2020 08:00	0	0	0	0.177353	0.28339	0.310853
26/09/2020 09:00	0	0	0	0.1247675	0.14761	0.2230106
26/09/2020 10:00	0	0	0	0.1737185	0.182346	0.1945348
26/09/2020 11:00	0	0	0	0.267744	0.369698	0.1905412
26/09/2020 12:00	0	0	0	0.359684	0.968456	0.1820179
26/09/2020 13:00	0	0	0	0.449866	1.351193	0.1987515
26/09/2020 14:00	0	0	0.06	0.74622	1.952871	0.866741
26/09/2020 15:00	0	0	0.13	0.211776	0.337497	1.041993
26/09/2020 16:00	0	0	0.19	0.272452	0.582875	0.302017
26/09/2020 17:00	0	0	0	0.337959	0.55915	0.536174
26/09/2020 18:00	0	0	0	0.843733	0.226677	1.307488
26/09/2020 19:00	0	0	0	0.053634867	0.02885051	0.11589751
26/09/2020 20:00	0	0	0	0.030254943	0.021142886	0.05000829
26/09/2020 21:00	0	0	0	0.018570574	0.015880914	0.02354756
26/09/2020 22:00	8.67	3.78	5.55	0.006429851	0.00607595	0.00628829
26/09/2020 23:00	3.3	1.44	0.06	0.001288951	0.00128895	0.00075251
27/09/2020 00:00	0	0	0	0	0	0.00010431
27/09/2020 01:00	0	0	0	0.037692484	0.03289431	0.05854666
27/09/2020 02:00	0	0	0	0.14204533	0.31850488	0.1070574
27/09/2020 03:00	0	0	0	0.09658187	0.2615303	0.0526309
27/09/2020 04:00	0	0	0	0.00882149	0.0126436	0.0090152

27/09/2020 05:00	0	0	0	0.00213831	0.0017807	0.00222027
27/09/2020 06:00	0	0	0	0.00084937	0.00084936	0.00095368
27/09/2020 07:00	0	0	0	0.00084936	0.00085684	0.00121444
27/09/2020 08:00	0	0	0	0.00243932	0.0022307	0.00138878
27/09/2020 09:00	0	0	0	0.0185594	0.03945826	0.00458957
27/09/2020 10:00	0	0	0	0.04304946	0.05378574	0.04465133
27/09/2020 11:00	0	0	0	0.08769332	0.1095906	0.0792444
27/09/2020 12:00	0	0	0	0.1259744	0.1165122	0.13810393
27/09/2020 13:00	0	0	0	0.0370443	0.0561177	0.06873907
27/09/2020 14:00	0	0	0	0.05051495	0.0767857	0.07662176
27/09/2020 15:00	0	0	0	0.40368735	0.4084259	0.61827894
27/09/2020 16:00	0	0	0	3.4309471	1.6358195	4.7329662
27/09/2020 17:00	0	0	0	2.7733447	3.524065	0.768438
27/09/2020 18:00	1.37	0.37	0	0.5674813	0.5524459	0.013143
27/09/2020 19:00	0	0	0	0.007688999	0.000858679	0.005465001
27/09/2020 20:00	5.47	1.47	0	0.002276153	0.000299886	0.005759299
27/09/2020 21:00	12.32	3.32	0	0.002283603	0.000301749	0.003945082
27/09/2020 22:00	1.37	0.37	0	0	0	0
27/09/2020 23:00	5.47	1.47	0	0	0	0
28/09/2020 00:00	0	0	0	0.014737249	0.015586614	0
28/09/2020 01:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 02:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 03:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 04:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 05:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 06:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 07:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 08:00	0	0	0	0	0	0
28/09/2020 09:00	0	0	0.03	0	0	0
28/09/2020 10:00	0	0	0.25	0.009596347	0.029951334	0.007748604
28/09/2020 11:00	0	0	0.01	0.06136298	0.155970458	0.057518484
28/09/2020 12:00	0	0	0	0.05374849	0.13665855	0.0590831
28/09/2020 13:00	0	0	0	0.00451505	0.0141859	0.00832975
28/09/2020 14:00	0	0	0	0.01499057	0.03799796	0.01123548
28/09/2020 15:00	0	0	0	0.63680112	0.97744167	0.6299168
28/09/2020 16:00	0	0	0	0.01564624	0.0109822	0.4761517
28/09/2020 17:00	0	0	0	0.0191927	0.0584572	0.1298338
28/09/2020 18:00	0.16	0.06	0	0.0031143	0.0084788	0.157088
28/09/2020 19:00	0	0	0	0.016506761	0.019112602	0.34275278
28/09/2020 20:00	0	0	0	0.243030489	0.674614648	0.61654297
28/09/2020 21:00	0	0	0	1.12919135	1.42014405	2.12201125

28/09/2020 22:00	2.81	1.09	0	0.9074881	1.0713265	1.4834775
28/09/2020 23:00	0.16	0.06	1.31	0.3639533	0.6061271	0.4649163
29/09/2020 00:00	42.29	16.45	4.25	0.1843425	0.1484453	0.2927702
29/09/2020 01:00	0.16	0.06	0.03	0.3522932	0.1009998	0.9278733
29/09/2020 02:00	0.16	0.06	0.05	0.0172703	0.010133	0.3554597
29/09/2020 03:00	1.56	0.61	0	0.0035615	0.001587	0.0087843
29/09/2020 04:00	1.56	0.61	0	0.0028537	0.001855	0.0044477
29/09/2020 05:00	2.18	0.85	0.04	0.0017211	0.001714	0.0023696
29/09/2020 06:00	0	0	0	0.0059991	0.0030264	0.0073848
29/09/2020 07:00	0.78	0.3	0.01	0.0267626	0.0404716	0.023231
29/09/2020 08:00	2.18	0.85	0.03	0.0579356	0.103116	0.0356136
29/09/2020 09:00	0.32	1.44	0.08	0.0498594	0.092372	0.036955
29/09/2020 10:00	0	0	0	0.2005397	0.1867265	0.1918376
29/09/2020 11:00	0	0	0	0.3647208	0.3847031	0.3234894
29/09/2020 12:00	0	0	0	0.2835989	0.2639744	0.3229974
29/09/2020 13:00	0.02	0.1	0	0.9055506	0.6867717	0.8190496
29/09/2020 14:00	0	0	0	1.2609643	0.7498989	1.867948
29/09/2020 15:00	0	0	0	1.0710957	0.6536098	1.56337
29/09/2020 16:00	0	0	0	2.553388	3.1413586	2.327964
29/09/2020 17:00	0	0	0	2.5203375	2.962961	1.967028
29/09/2020 18:00	0	0	0	1.427248	1.796484	1.243636
29/09/2020 19:00	0	0	0	2.0570047	2.7552824	1.5930758
29/09/2020 20:00	0	0	0.08	1.5338585	2.4476816	1.0054297
29/09/2020 21:00	2.3	10.27	0.1	1.2163298	1.8828066	1.0408983
29/09/2020 22:00	3.41	15.19	0.25	0.9571574	1.4467084	0.7991752
29/09/2020 23:00	0.69	3.08	8.01	1.0506806	1.437806	0.8863135
30/09/2020 00:00	1.43	6.36	1.05	1.610689	1.965247	1.1883159
30/09/2020 01:00	1.61	7.19	0.77	1.987437	2.277646	1.4319
30/09/2020 02:00	0.6	2.67	0.58	1.888778	2.443896	1.4395516
30/09/2020 03:00	0.48	2.16	0.23	1.569561	1.799547	1.322933
30/09/2020 04:00	0.28	1.23	0.02	1.074419	1.041353	0.872888
30/09/2020 05:00	0.05	0.21	0	0.765212	0.612124	0.7134815
30/09/2020 06:00	0.32	1.44	0.23	0.476777	0.323833	0.466794
30/09/2020 07:00	0.48	2.16	0.02	0.374376	0.283331	0.2356025
30/09/2020 08:00	1.01	4.52	0.59	0.183882	0.120915	0.188008
30/09/2020 09:00	1.45	1.9	0.06	0.200667	0.190929	0.172786
30/09/2020 10:00	1.61	2.11	2.1	0.366836	0.324532	0.188634
30/09/2020 11:00	1.61	2.11	1.45	0.320763	0.349909	0.124007
30/09/2020 12:00	0.24	0.32	0.34	0.616758	1.058355	0.156672
30/09/2020 13:00	3.71	4.86	1.02	0.254691	0.249758	0.312491
30/09/2020 14:00	10.32	13.53	1.86	0.289545	0.33699	0.309572

30/09/2020 15:00	3.06	4.02	1.79	0.339088	0.409988	0.305666
30/09/2020 16:00	1.69	2.22	2.26	0.843493	0.576359	0.850256
30/09/2020 17:00	0.89	1.16	0.96	1.292139	0.881985	1.110017
30/09/2020 18:00	2.01	2.64	0.4	2.365722	1.448675	2.267704
30/09/2020 19:00	0.97	1.27	0.53	2.8041377	1.5681069	3.4163556
30/09/2020 20:00	0.48	0.63	0.28	3.6429057	2.257051	4.6189354
30/09/2020 21:00	0.32	0.42	0.31	2.6895586	2.1545511	3.379557
30/09/2020 22:00	1.13	1.48	0.53	2.3240675	2.378203	2.593369
30/09/2020 23:00	1.45	1.9	0.9	2.4272205	2.287217	2.788051
01/10/2020 00:00	2.9	3.81	1.02	2.797388	2.732358	3.61427
01/10/2020 01:00	5.88	7.72	0.99	2.428978	3.64247	2.261921
01/10/2020 02:00	8.14	10.68	1.11	2.20266	3.743783	1.967691
01/10/2020 03:00	4.75	6.24	1.73	1.640975	3.250464	1.328432
01/10/2020 04:00	3.47	4.55	0.71	1.353533	2.866255	0.92931
01/10/2020 05:00	3.63	4.76	1.21	1.493826	2.865507	0.919104
01/10/2020 06:00	3.87	5.07	0.77	1.251846	2.474562	0.678285
01/10/2020 07:00	14.75	19.35	1.95	1.032458	1.998662	0.455216
01/10/2020 08:00	14.67	19.24	3.71	1.085326	2.035216	0.402927
01/10/2020 09:00	5.16	7.6	1.73	1.193835	1.859814	0.57474
01/10/2020 10:00	2.91	4.29	0.74	1.46924	2.247482	0.823346
01/10/2020 11:00	7.52	11.09	1.72	1.638741	2.296878	0.999169
01/10/2020 12:00	5.58	8.23	1.79	1.274467	1.559094	0.795826
01/10/2020 13:00	10.07	14.85	1.45	2.79559	2.951816	2.185001
01/10/2020 14:00	5.22	7.69	2	3.228517	3.01279	2.844544
01/10/2020 15:00	5.82	8.59	0.83	3.609107	4.117998	2.8546
01/10/2020 16:00	4.97	7.34	1.8	3.522781	4.230858	2.294734
01/10/2020 17:00	5.52	8.14	1.13	4.102542	4.778057	3.174053
01/10/2020 18:00	9.4	13.87	1.17	3.67445	3.792097	3.247973
01/10/2020 19:00	7.64	11.27	1.79	3.984507	3.6834722	3.9117894
01/10/2020 20:00	1.64	2.42	1.1	3.180709	3.2291728	3.1092876
01/10/2020 21:00	3.46	5.1	1.93	2.331197	2.576839	2.054959
01/10/2020 22:00	4.37	6.44	1.54	1.695052	1.92991	1.487248
01/10/2020 23:00	2	2.95	0.85	1.7405075	2.116918	1.361229
02/10/2020 00:00	0.06	0.09	0.19	2.0349925	2.229683	1.6817
02/10/2020 01:00	0.61	0.89	0.05	2.524375	3.473325	1.284808
02/10/2020 02:00	0.49	0.72	0.14	2.187237	3.376485	0.790514
02/10/2020 03:00	2.43	3.58	0.21	2.031596	3.216669	0.669195
02/10/2020 04:00	4.13	6.08	0.25	2.308159	3.502353	0.863896
02/10/2020 05:00	4.06	5.99	0.87	2.183095	3.008723	1.06971
02/10/2020 06:00	4.06	5.99	1.06	1.843243	2.61335	0.806316
02/10/2020 07:00	1.03	1.52	0.57	1.503616	2.161176	0.629456

02/10/2020 08:00	0.85	1.25	0.09	1.660632	2.15556	0.813602
02/10/2020 09:00	1.58	3.87	0.67	1.504255	1.959621	0.68611
02/10/2020 10:00	7.16	17.53	3.96	1.839907	2.708287	0.578611
02/10/2020 11:00	6.06	14.82	3.01	2.578542	3.399742	0.828654
02/10/2020 12:00	4	9.78	3.01	3.709465	4.900398	1.131862
02/10/2020 13:00	1.03	2.52	3.9	3.702626	5.41383	1.291663
02/10/2020 14:00	0.63	1.55	0.06	4.766121	6.973576	1.988292
02/10/2020 15:00	0.71	1.74	0.67	4.070226	6.42224	1.74798
02/10/2020 16:00	0.55	1.36	0.95	3.774313	5.941926	1.901538
02/10/2020 17:00	0	0	0.22	3.404915	4.984944	2.245845
02/10/2020 18:00	3.76	9.2	1.56	3.188267	4.326686	2.26405
02/10/2020 19:00	0.71	1.74	4.63	2.8686671	3.7731416	1.9624605
02/10/2020 20:00	2.37	5.81	1.56	2.3948069	2.9485638	1.9317122
02/10/2020 21:00	1.66	4.07	1.28	2.427835	2.4553166	2.3349819
02/10/2020 22:00	2.93	7.17	3.46	2.159096	2.353995	1.8811754
02/10/2020 23:00	0.55	1.36	4.85	1.850442	1.875319	1.824557
03/10/2020 00:00	0.04	0.1	0	1.4403235	1.529746	1.249373
03/10/2020 01:00	0.04	0.1	1.34	2.6587725	3.375408	1.555222
03/10/2020 02:00	0	0	0.06	2.713374	3.506145	1.807488
03/10/2020 03:00	0	0	0	2.631085	2.98229	2.112645
03/10/2020 04:00	1.98	4.84	3.62	1.979856	2.436399	1.343219
03/10/2020 05:00	0.48	1.16	0	1.390429	1.692921	1.034916
03/10/2020 06:00	0.63	1.55	0.11	1.3365	1.519993	1.14359
03/10/2020 07:00	0.87	2.13	0.22	1.145273	1.571148	0.872567
03/10/2020 08:00	0.24	0.58	0	1.413061	1.6035	1.139967
03/10/2020 09:00	3.45	3.95	0.24	1.678408	2.209709	0.815289
03/10/2020 10:00	5.28	6.03	3.52	2.178596	2.55048	1.193865
03/10/2020 11:00	4.18	4.78	5.07	2.024755	2.653973	1.131029
03/10/2020 12:00	0.8	0.92	2.46	1.10118	1.799045	0.895187
03/10/2020 13:00	0.02	0.03	0.19	1.095013	1.027123	1.173332
03/10/2020 14:00	0	0	0	1.974597	1.898899	1.999512
03/10/2020 15:00	0	0	0	2.44467	1.943055	2.834709
03/10/2020 16:00	0	0	0	1.63737	1.835464	1.862403
03/10/2020 17:00	0.05	0.06	0.05	0.627216	0.75209	0.702653
03/10/2020 18:00	0	0	0.96	0.213714	0.239491	0.203369
03/10/2020 19:00	0.39	0.44	0.41	0.20256825	0.3139265	0.15837699
03/10/2020 20:00	0.83	0.95	1.01	0.27089752	0.49769135	0.15654788
03/10/2020 21:00	0	0	0	0.26191399	0.44406955	0.17926469
03/10/2020 22:00	0	0	0	0.20099431	0.3102682	0.13739614
03/10/2020 23:00	0	0	0	0.19095093	0.2881885	0.11684
04/10/2020 00:00	0	0	0	0.1791194	0.2575664	0.12028965

04/10/2020 01:00	0.32	0.36	0	0.0602603	0.0917615	0.05177408
04/10/2020 02:00	0.15	0.17	0.02	0.1378208	0.1495553	0.11103597
04/10/2020 03:00	0	0	0.02	0.090018	0.1259151	0.0878945
04/10/2020 04:00	0	0	0	0.1362934	0.1590474	0.1367927
04/10/2020 05:00	0	0	0	0.131026	0.1941472	0.1652018
04/10/2020 06:00	0	0	0	0.1334175	0.1588315	0.1174211
04/10/2020 07:00	0	0	0	0.1755208	0.1430289	0.1748129
04/10/2020 08:00	0.15	0.17	0.14	0.2005696	0.2713352	0.2004058
04/10/2020 09:00	0	0.67	0	0.077918	0.1586824	0.1149328
04/10/2020 10:00	0	0.11	0	0.1881869	0.2007784	0.2613363
04/10/2020 11:00	0	0	1.5	0.3816636	0.3758669	0.4247427
04/10/2020 12:00	0	0	0.21	0.1722274	0.1434087	0.174597
04/10/2020 13:00	0	0	0	0.207767	0.1460314	0.2072453
04/10/2020 14:00	0	0	0	0.1291184	0.0498743	0.1613052
04/10/2020 15:00	0	0	0	0.1074822	0.0463423	0.1249609
04/10/2020 16:00	0	0.11	0	0.0720771	0.0309798	0.082314
04/10/2020 17:00	0	0	0	0.050023	0.0587105	0.0346008
04/10/2020 18:00	0	0.11	0	0.0517666	0.0818372	0.0214724
04/10/2020 19:00	0	0	0	0.030763447	0.013463199	0.044416636
04/10/2020 20:00	0	0	0	0.02584979	0.050637871	0.018868594
04/10/2020 21:00	0	0	0	0.073205683	0.07610023	0.09284169
04/10/2020 22:00	0	0	0.43	0.05021318	0.04512072	0.08668005
04/10/2020 23:00	0	0	0	0.05160645	0.04608556	0.09567291
05/10/2020 00:00	0	0	0.43	0.06741285	0.07024408	0.09932369
05/10/2020 01:00	0	0	0	0.0270307	0.02137571	0.04225969
05/10/2020 02:00	0	0	0.43	0.01364947	0.01366437	0.02395364
05/10/2020 03:00	0	0	0	0.05625189	0.07502734	0.05215404
05/10/2020 04:00	0	0	0	0.18019974	0.20958482	0.16966462
05/10/2020 05:00	0	0	0	0.2928823	0.3581643	0.31815474
05/10/2020 06:00	0	0	0	0.318259	0.4057586	0.3222078
05/10/2020 07:00	0	0	0	0.286445	0.2396107	0.3815442
05/10/2020 08:00	0	0	0	0.347823	0.4125537	0.3277959
05/10/2020 09:00	0	0	0	0.1504719	0.1602321	0.1491158
05/10/2020 10:00	0.07	0.5	0.1	0.1660138	0.3260076	0.193566
05/10/2020 11:00	0	0	0.15	0.2762973	0.5313754	0.3082157
05/10/2020 12:00	0	0	0	0.1503825	0.2604127	0.2228021
05/10/2020 13:00	0	0	0	0.5925596	0.736743	0.4668236
05/10/2020 14:00	0	0	0	0.1190007	0.181288	0.1899302
05/10/2020 15:00	0	0	0	0.2621412	0.395864	0.1900792
05/10/2020 16:00	0	0	0.05	0.1879633	0.3044605	0.2036692
05/10/2020 17:00	0	0	0.51	0.1425445	0.2390145	0.1918074

05/10/2020 18:00	0	0	0	0.1494882	0.2275706	0.1571779
05/10/2020 19:00	0	0	0.05	0.15199557	0.22057258	0.1397673
05/10/2020 20:00	0.25	1.75	0	0.12035295	0.18356554	0.12798421
05/10/2020 21:00	0.11	0.75	1.98	0.15397743	0.21146608	0.16008319
05/10/2020 22:00	0	0	0	0.11243298	0.162296	0.1216642
05/10/2020 23:00	0	0	0	0.07392842	0.10365995	0.09911515
06/10/2020 00:00	0	0	0	0.04133952	0.05341321	0.07202845
06/10/2020 01:00	0	0	0	0.09810179	0.12634694	0.09414554