



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Comparación de lluvias de
diseño empleando datos
originales y completados con
interpolación IDW**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Eduardo Malpica Ortiz

DIRECTORA DE TESIS

M.I. Sixta Hinndi Mendoza Pérez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**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 COMPARACION DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACION IDW 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.

EDUARDO MAIPICA ORTIZ
Número de cuenta: 315709333



Este trabajo fue desarrollado dentro del Grupo de Enseñanza e Investigación en Ingeniería y Ciencias del Agua (GEIICA).



GEIICA es un grupo formado por estudiantes de Servicio Social, tesistas de Licenciatura, Especialidad, Maestría, Doctorado y profesores-investigadores del Departamento de Hidráulica, División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Con el compromiso de impulsar la educación a nivel Licenciatura y Posgrado, además de desarrollar investigación en la rama de la ingeniería y ciencias del agua.



Agradecimientos

A Alfonso Malpica y Vivian Ortiz, mis padres, faros constantes en mi vida que me enseñaron a caminar con firmeza vida y darme el amor que todo hijo puede desear, estoy agradecido por todos estos años compartidos que me ayudaron a crecer como persona y que con cada día me moldeaban en la persona que soy, gracias. Sin ustedes me sentiría vacío en esta vida. Los llevo en cada logro y en cada sueño cumplido.

A Mariana Malpica, mi hermana que tanto amo y que tanto admiro, gracias por dejarme acompañarte en tu crecimiento y tener a alguien que se apoye en mí y viceversa. Mi deseo en ti es tan grande como mi cariño.

A Ana Patricia Bravo, Margarita Maury y Javier Malpica, mis abuelos, gracias por la sabiduría y la ternura que me bridaron, toda esa felicidad desborda mi corazón. Sus voces siempre sonaran dentro de mí.

A Adrián, Alejandro, Brenda, Brian, Carlos, Diego, Emily, Gael, Ingrid, Jessé, José, Juan, Marcos, Oscar, y Víctor, mis amigos más cercanos, gracias por hacerme disfrutar de momentos breves de la vida, pero inolvidables y por ayudarme a recorrer este camino.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México y a todos los profesores que me apoyaron en mi educación y que hicieron crecer en mi la pasión de mi carrera universitaria, especialmente a la M.I. Sixta Hinndi Mendoza Pérez por haberme dado la oportunidad de crecer, mejorar y la confianza que he recibido de su parte.

Finalmente, quiero enfatizar que gracias a cada uno estoy donde estoy, cada uno ha tenido, tiene y tendrá un impacto importante en mi vida. Les agradezco de corazón.



Contenido

| | |
|--|----|
| Agradecimientos | 2 |
| Resumen del trabajo | 6 |
| <i>Introducción</i> | 6 |
| <i>Objetivos</i> | 8 |
| 1 Antecedentes | 9 |
| 1.1 Hidrometeorología | 9 |
| 1.2 Instrumentos de medición | 15 |
| 1.3 Fuentes de información oficial | 21 |
| 1.4 Eventos hidrometeorológicos extremos | 26 |
| 1.5 Pruebas de calidad..... | 28 |
| 1.6 Análisis de frecuencias..... | 31 |
| 2 Métodos de interpolación de tormentas | 41 |
| 2.1 Deducción de datos faltantes..... | 41 |
| 2.2 Sistemas de información geográfica..... | 46 |
| 3 Estudio de caso | 50 |
| 3.1 Localización..... | 50 |
| 3.2 Características generales | 52 |
| 3.3 Eventos climatológicos de importancia | 56 |
| 3.4 Interpolación de datos | 60 |
| 3.5 Interpolación IDW | 66 |
| 3.6 Interpolación Kriging ordinario | 70 |
| 4 Análisis de resultados | 72 |
| 4.1 Datos originales y con relleno..... | 72 |
| 4.2 Análisis de frecuencias..... | 74 |
| 4.3 Pruebas de calidad..... | 75 |
| 4.4 Tormentas de diseño | 76 |
| 5 Conclusiones | 82 |
| 6 Bibliografía | 83 |



Figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1 Ciclo hidrológico (Aparicio, 1992)</i> | 10 |
| <i>Figura 2. Circulación atmosférica (Ven Te Chow, 1994)</i> | 11 |
| <i>Figura 3. Evaporación desde una superficie abierta (Ven Te Chow, 1994)</i> | 11 |
| <i>Figura 4. Formación de gotas de lluvia (Ven Te Chow,1994)</i> | 12 |
| <i>Figura 5. Precipitación media anual en el mundo (Ven Te Chow, 1994)</i> | 13 |
| <i>Figura 6 Ciclo de vida de un ciclón, vista en planta (Ven Te Chow, 1994)</i> | 14 |
| <i>Figura 7. Cantidades estimadas de agua en el mundo (Ven te Chow, 1994)</i> | 15 |
| <i>Figura 8. Mapa de estaciones climatológicas convencionales (CONAGUA, 2024)</i> | 16 |
| <i>Figura 9. Mapa de EMAs (CONAGUA, 2025)</i> | 17 |
| <i>Figura 10. Estructura de una EMA (NMX-AA-166/2-SCFI-2015)</i> | 18 |
| <i>Figura 11 Mapa de ESMA (CONAGUA,2025)</i> | 18 |
| <i>Figura 12. Estructura de una ESMA (NMX-AA-166/2-SCFI-2015)</i> | 19 |
| <i>Figura 13. Mapa de estaciones climatológicas en México (SIH, 2025)</i> | 23 |
| <i>Figura 14. Mapa de Estaciones climatológicas del estado de Chiapas (CLICOM, 2025)</i> | 24 |
| <i>Figura 15. Mapa de la página del INEGI de la división hidrológica en México (INEGI, 2025)</i> | 25 |
| <i>Figura 16. Mapa de regiones hidrológicas en México, SINA 3.0 (SINA, 2025)</i> | 25 |
| <i>Figura 17. Agenda de riesgo (CENAPRED, 2009)</i> | 26 |
| <i>Figura 18. Vista aérea de la inundación de 1951 (CONAGUA, 2024)</i> | 27 |
| <i>Figura 19. Inundación en tabasco (CENAPRED, 2020)</i> | 27 |
| <i>Figura 20. Sequía en el norte de México en 2011 (Gobierno de México, 2011)</i> | 28 |
| <i>Figura 21. División de cuenca por Polígonos de Thiessen</i> | 43 |
| <i>Figura 22. Isoyetas aplicadas dentro de una cuenca (Aparicio, 1992)</i> | 44 |
| <i>Figura 23. Interfaz del programa QGIS</i> | 47 |
| <i>Figura 24. Representación de forma vectorial de un paisaje. Río (azul), carretera (verde), arboles (puntos rojos) y casas (polígonos blancos) (QGIS, 2025)</i> | 48 |
| <i>Figura 25. Representación de un raster. Cada píxel representa una región geográfica y el valor de ese píxel representa alguna característica de esa región (QGIS, 2025)</i> | 48 |
| <i>Figura 26. Placa que conforma la RGNP (INEGI, 2025)</i> | 49 |
| <i>Figura 27. Ubicación de la zona de estudio.</i> | 50 |
| <i>Figura 28. Mapa de Regiones Hidrológicas de México (SEMARNAT, 2010)</i> | 51 |
| <i>Figura 29. Mapa de Regiones Hidrológicas Administrativas de México (SEMARNAT, 2010)</i> | 51 |
| <i>Figura 30. Mapa de clima en Chiapas (INEGI,2025)</i> | 52 |
| <i>Figura 31. Cuencas hidrológicas de Costa de Chiapas (INEGI,2025)</i> | 53 |
| <i>Figura 32. Mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI,2025).</i> | 54 |
| <i>Figura 33. Mapa de tipo de suelo, elaboración propia con información de INEGI (2025)</i> | 56 |
| <i>Figura 34. Ciclones tropicales proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2025)</i> | 57 |
| <i>Figura 35. Subcuenca Margaritas y Coapa, río Margaritas y Valdivia (INEGI, 2025)</i> | 58 |
| <i>Figura 36. Trayectoria del huracán "Mitch" 1998 (CONAGUA, SMN, 2009)</i> | 59 |
| <i>Figura 37. Inundación de Valdivia en 1998 (Todos Somos Mastepec, 2014)</i> | 59 |
| <i>Figura 38. Estaciones climatológicas vecinas con la cuenca de estudio</i> | 61 |
| <i>Figura 39. Polígonos de Thiessen de las estaciones climatológicas vecinas con la cuenca de estudio</i> | 62 |
| <i>Figura 40. Precipitación máxima de las estaciones C07019 y CAHCP para el año 2005</i> | 63 |
| <i>Figura 41. Mapa antes de realizar una interpolación</i> | 67 |
| <i>Figura 42. Interfaz de la interpolación IDW en el programa QGIS</i> | 67 |
| <i>Figura 43. Ejemplo de la interpolación IDW en 2005</i> | 68 |



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

| | |
|---|----|
| <i>Figura 44 . Interfaz de la interpolación Kriging en el programa QGIS</i> | 70 |
| <i>Figura 45. Ejemplo de la interpolación Kriging ordinario en 1998</i> | 71 |
| <i>Figura 46. Mapas de lluvias. Tr = 25 años, serie original</i> | 78 |
| <i>Figura 47. Mapas de lluvias. Tr = 25 años, serie con relleno de datos</i> | 78 |
| <i>Figura 48. Mapas de lluvias. Tr = 100 años, serie original</i> | 79 |
| <i>Figura 49. Mapas de lluvias. Tr = 100 años, serie con relleno de datos</i> | 79 |

Tablas

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 1 Etapas de un ciclón tropical. (CENAPRED, 2024)</i> | 13 |
| <i>Tabla 2. Instrumentos de medición en las estaciones climatológicas</i> | 16 |
| <i>Tabla 3. Variables meteorológicas EMAs y ESMA's (CONAGUA, 2019)</i> | 20 |
| <i>Tabla 4. Tipos de suelo en la subcuenca Margaritas y Coapa (INEGI, 2025)</i> | 55 |
| <i>Tabla 5 Fenómenos climatológicos relevantes entre 1997-2020</i> | 60 |
| <i>Tabla 6. Distancias entre el centro de la cuenca a las estaciones seleccionadas</i> | 61 |
| <i>Tabla 7. Características de las estaciones climatológicas. Latitud y longitud en grados, cota en metros sobre el nivel del mar y precipitación en milímetros.</i> | 62 |
| <i>Tabla 8. Precipitaciones diarias del mes de octubre del 2005 para las estaciones C07019 y CAHCP</i> | 64 |
| <i>Tabla 9. Características de las estaciones climatológicas. Latitud y longitud en grados, cota en metros sobre el nivel del mar y precipitación en milímetros</i> | 69 |
| <i>Tabla 10. Características de las estaciones climatológicas. Latitud y longitud en grados, cota en metros sobre el nivel del mar y precipitación en milímetros</i> | 73 |
| <i>Tabla 11. Tormentas de diseño, mm.</i> | 74 |
| <i>Tabla 12. Pruebas de calidad</i> | 75 |
| <i>Tabla 13 Precipitación de diseño en mm a partir de la serie original</i> | 76 |
| <i>Tabla 14 Precipitación de diseño en mm a partir de la serie con relleno de datos</i> | 77 |



Resumen del trabajo

La cantidad y calidad de la información son los elementos más importantes para reducir la incertidumbre al realizar un análisis estadístico y probabilístico en el desarrollo de diversos estudios apoyados sobre datos obtenidos en campo. Los estudios hidrológicos usan información recabada en estaciones climatológicas (EC), las cuales muchas veces tienen registros incompletos (Aparicio, 1992). Para rellenar los datos incompletos, existen métodos de interpolación, con criterios y ecuaciones diversas, pero con el objetivo de operar con la mayor longitud de la serie (Campos, 2011). Es importante saber si esto ayuda o perjudica a un estudio, dicho de otra forma, suponer datos en celdas vacías puede ser benéfico o en ocasiones es mejor trabajar solo con los datos disponibles, para verificar esta situación se realizaron diversas pruebas.

En este trabajo se realizó una comparación de series, utilizando datos medidos contra datos completados con interpolación, en las estaciones climatológicas que afectan una cuenca en el sur de México. Para ello se acotó un radio de 80 km alrededor de la cuenca Margaritas y Coapan, la cual fue afectada por el huracán Mitch en 1998 destruyendo la localidad de Valdivia a su paso. Se realizó una depuración de estaciones climatológicas buscando una longitud mínima de registro de 30 años y se eligieron las estaciones que tuviesen un aporte activo a la zona de interés. Posteriormente se realizó el relleno de datos por medio del método de U.S. National Weather Service a los registros de las estaciones climatológicas con datos faltantes. Se obtuvieron dos tipos de series a comparar, series con los datos originales y series con relleno de datos resultado de las interpolaciones. Se delimitó una franja de datos que comprende desde 1982 a 2020 debido que fue donde se concentró la mayor cantidad de información además de que contiene el evento del año 1998, así como los eventos recientes de mayor magnitud. Se aplicó la Prueba de Anderson para verificar la aleatoriedad de la serie y las pruebas de Helmert, T-Student y Cramer para verificar la homogeneidad en los registros.

A continuación se realizó un ajuste con las funciones de probabilidad: Gamma (2P-M, 2P-MV, 3P-M, 3P-MV), Normal (2P-M-ML), Gumbel (2P-M, 2P-MV), Gumbel-Gumbel y LogNormal (2P-M-MV, 3P-M, 3P-MV), para ambas series, seleccionando la de menor error estándar de ajuste, de manera que se encontró que en las series de datos originales la función de probabilidad Gamma 3P por momentos es la que mejor representa el comportamiento de la serie, mientras que para la serie con relleno de datos, es la función de probabilidad de Gumbel-Gumbel por el método de Máxima Verosimilitud.

Finalmente se obtuvo la precipitación de diseño para cada serie, de modo que al comparar las precipitaciones se puede concluir que de considerarse únicamente la serie original se estaría diseñando con una lluvia inferior a la estimada mediante interpolación, por lo que, la interpolación en este caso brindaría mayor seguridad.

Introducción

Debido a la importancia de los proyectos que se apoyan en los datos obtenidos y archivados en estaciones climatológicas (EC), nace la importancia de tener la mayor cantidad de información medida, dado que este es el elemento más importante para reducir la incertidumbre al momento de realizar un análisis hidrológico. En otras palabras, en cuanto mayor sea la cantidad y calidad de la información, mayor es la seguridad con la que se pueden realizar inferencias, en consecuencia, se tendrán resultados más precisos.



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

En el caso de los estudios hidrológicos, la mayoría se apoya de los datos recabados por las estaciones climatológicas, no obstante, los equipos de medición muchas veces cuentan con series de datos incompletos, la ausencia de información surge de diferentes razones. Con tal obstáculo ante los estudios y con el objetivo de tener mayor evidencia sobre la situación a lo largo de los años, se utilizan los métodos para rellenar datos, estos teniendo criterios y procedimientos diferentes, mientras que tienen el mismo objetivo de operar con la mayor cuantía de datos. Es importante saber si esto ayuda o perjudica a un estudio, dicho de otra forma, suponer datos en celdas vacías realmente es benéfico para los estudios o es mejor trabajar con los datos de los que se dispone sin tener que hacer suposiciones y de esta manera trabajar con los datos que se sabe son verdaderos.

El trabajo se divide en 5 capítulos. El primer capítulo, Antecedentes, habla sobre los eventos hidrometeorológicos, describiendo el proceso por el que pasa el agua en la tierra, en otras palabras, el ciclo del agua, además de describir los fenómenos hidrometeorológicos que conlleva el ciclo y los fenómenos extremos los cuales provocan resultados catastróficos. También, se describen los instrumentos de medición que contienen las estaciones climatológicas convencionales y automáticas (EMA y ESMA) y los cuales se utilizan para medir variables como la precipitación, estos datos pueden ser consultados en el sitio web de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), ordenados de manera diaria u horaria a lo largo de la vida de la estación climatológica. Por último, el capítulo menciona la importancia de relacionar los datos de las estaciones climatológicas con la estadística mostrando funciones de probabilidad recomendadas para la hidrología, las cuales sirven para realizar comparaciones con los eventos de diseño obtenidos, de igual modo se presentan las pruebas de calidad para saber si se tuvo algún cambio significativo estadístico en la serie.

Posteriormente el capítulo dos, Métodos de interpolación de tormentas, se explican diferentes métodos apoyados en la estadística que son utilizados para inferir los datos faltantes o que sean incongruentes en las estaciones climatológicas, de modo que se pueda trabajar con diferentes tipos de series, en este trabajo: series sin relleno de datos y series con relleno de datos. Continuando en el capítulo, se explica lo que es un SIG (Sistema de Información Geográfica) donde se colocaron las estaciones climatológicas para así mediante interpolación IDW utilizando las herramientas del software se obtiene como resultado los datos faltantes de las series, utilizando esta información para obtener mapas de lluvias y las lluvias de diseño.

Una vez establecidos los antecedentes y la metodología que se empleara a lo largo del trabajo, se comienza con el estudio de caso. Dentro de este tema se define la zona de estudio, Cuenca Margaritas y Coapan, zona dentro del estado de Chiapas, lugar de relevancia por el pueblo de Valdivia, desaparecido tras el huracán Mitch de categoría 5 en 1998. A partir de ahí se seleccionaron las estaciones climatológicas que aportan de manera activa y significativamente a la cuenca, realizando una depuración de estaciones climatológicas, descartando las estaciones que no cumplieran con el mínimo de información para poder ser utilizadas en los métodos de relleno de datos.

Posteriormente, utilizando SIG se realizó la interpolación por el método U.S. National Weather Service. Obtenida la interpolación para las estaciones, se extrajeron las series de datos para así realizar las pruebas de independencia y homogeneidad a cada una, después se obtuvieron los eventos de diseño y mapas de lluvias para cada estación climatológica seleccionada, este proceso se realizó para las series con datos originales y para las series con relleno de datos. Es importante resaltar que adicionalmente se realizó un ajuste de función de probabilidad a las series de cada estación teniendo predominio la función Gamma 3P por el método de momentos en la serie con datos originales, mientras que, el ajuste que predominó en las serie con datos rellenados fue la función Gumbel-Gumbel



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

por el método de máxima verosimilitud, esta representa de mejor manera la presencia de huracanes en zonas costeras en México.

Objetivos

Debido a la incertidumbre a la que se enfrenta la hidrología causada por la falta de datos en las estaciones climatológicas, se realiza este trabajo con la intención de atacar esa incertidumbre realizando una metodología en la cual se puedan apoyar los estudios para obtener mayor grado de precisión al momento de obtener eventos de diseños manteniendo una postura encaminada a la seguridad destinada al proceso de diseño en infraestructura hidráulica.

- Obtener datos faltantes en las estaciones empleadas en el estudio mediante el método IDW del U.S. National Weather Service.
- Validar dos tipos de interpolación IDW y Kriging.
- Estimar las tormentas de diseño para cada tipo de interpolación, posteriormente comparar los resultados entre sí y concluir que método es mejor en la zona de estudio.



1 Antecedentes

Debido a la naturaleza humana de realizar construcciones que puedan soportar las condiciones naturales de su entorno, como lo pueden ser: sismos, temperaturas, vientos, entre otros; se originan los estudios de cada una de estas áreas. En el presente trabajo el área de interés es el de la hidrología, entendiéndola como:

"La ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos." (Aparicio, 1992)

Estos estudios tienen la finalidad de gestionar el recurso hídrico, para así de manera más particular en la ingeniería se puedan realizar diseños a la infraestructura que permita que las construcciones sean resistentes a los diferentes movimientos del agua, actuales y a futuro. También se pueden realizar proyecciones para desviar el agua o acumularla dependiendo el objetivo. Como todas las ciencias, la hidrología se apoya de métodos matemáticos y científicos que respaldan los resultados y las conclusiones.

1.1 *Hidrometeorología*

Considerando la circulación del agua en nuestro planeta o también conocido como ciclo hidrológico, el recorrido más importante del agua, ya que está en constante evaporación y precipitación. La evaporación se da por la continua alimentación de energía solar que reciben los océanos y los cuerpos de agua lo que provoca su cambio de estado, por otra parte, la precipitación se debe a la baja presión que hay en las alturas donde se mueven las nubes, el agua precipitada puede infiltrarse en el suelo, ser interceptada por la vegetación, deslizarse en la superficie convirtiéndose en flujo superficial y desembocar como escorrentía superficial en un río. Tanto el agua interceptada como la escorrentía superficial regresan a la atmósfera evaporándose, sin embargo, el agua infiltrada ayuda a recargar el agua subterránea, sumándose así, al flujo subterráneo el cual emerge en manantiales o fluye a los ríos para aumentar la escorrentía superficial, donde, puede evaporarse o circular hasta el mar. (Figura 1).

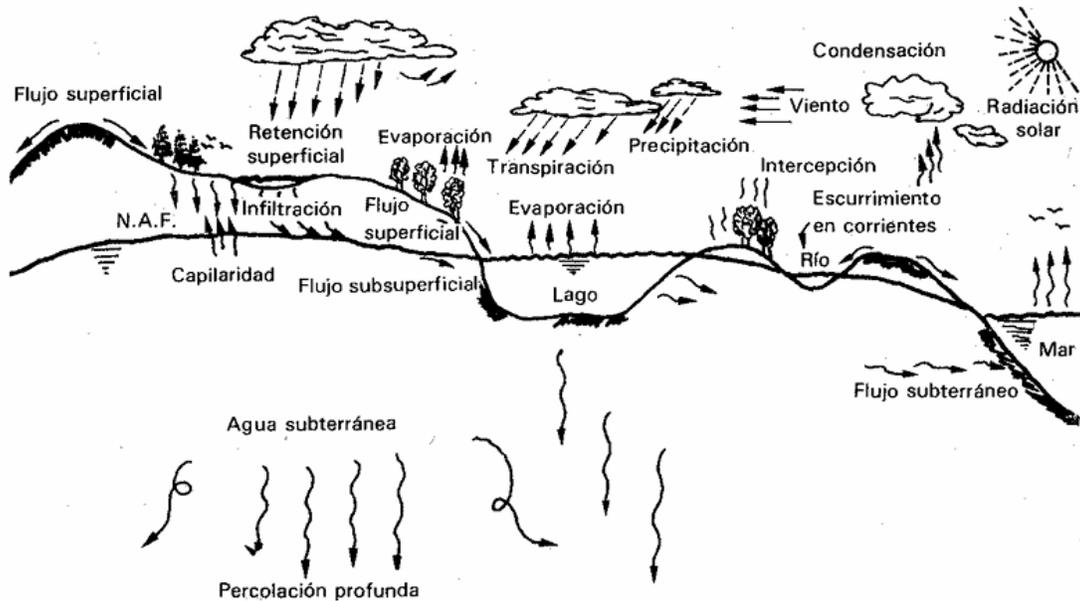


Figura 1 Ciclo hidrológico (Aparicio, 1992)

Como se menciona, para que ocurran los procesos de precipitación y evaporación se requiere de la radiación solar, lo que permite el cambio de fase en el agua de líquido a gas, este gas se transporta por la circulación atmosférica. La circulación atmosférica emerge de la rotación de la tierra y de la transferencia de energía calórica entre el ecuador y los polos. La energía que recibe el planeta no es uniforme, lo que provoca diferentes valores de transferencia de energía siendo mayor en el ecuador con $270 \frac{W}{m^2}$ y menor en los polos con un valor de $90 \frac{W}{m^2}$, debido a esta diferencia la atmósfera transfiere la energía del ecuador a los polos.

El patrón de la circulación atmosférica tiene tres celdas en cada hemisferio (Figura 2). La celda tropical, celda donde el aire se eleva en el ecuador y se desplaza a los polos perdiendo calor y desciende al suelo donde se separa en dos ramas, una que va hacia el ecuador y otra que se desplaza hacia el polo. Al mismo tiempo existe la celda central, la cual mueve el aire a causa de la fricción entre las otras dos celdas lo que da como resultado el desplazamiento en dirección hacia el polo. Por último, se encuentra la celda polar, celda donde el aire fluye hacia el polo en las capas superiores, enfriándose y regresando al punto de partida de la celda cerca de la superficie. (Ven Te Chow, 1994)

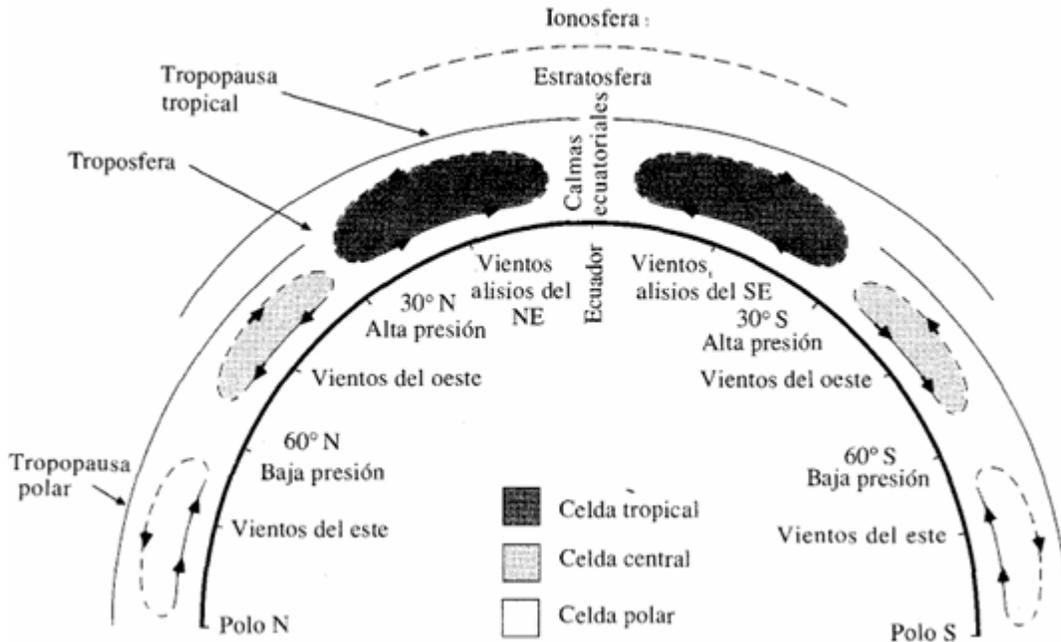


Figura 2. Circulación atmosférica (Ven Te Chow, 1994)

Dicho lo anterior, la evaporación depende de dos factores principales, el primero es el suministro de energía solar en un cuerpo de agua que logre la vaporización, el segundo es la habilidad de transportar el vapor de agua fuera de la superficie de evaporación. La energía es proporcionada por la radiación solar, mientras que la habilidad de transportar el vapor está dada por la velocidad del viento sobre la superficie y del gradiente de humedad específica en el aire por encima de ella. (Figura 3) (Ven Te Chow, 1994)

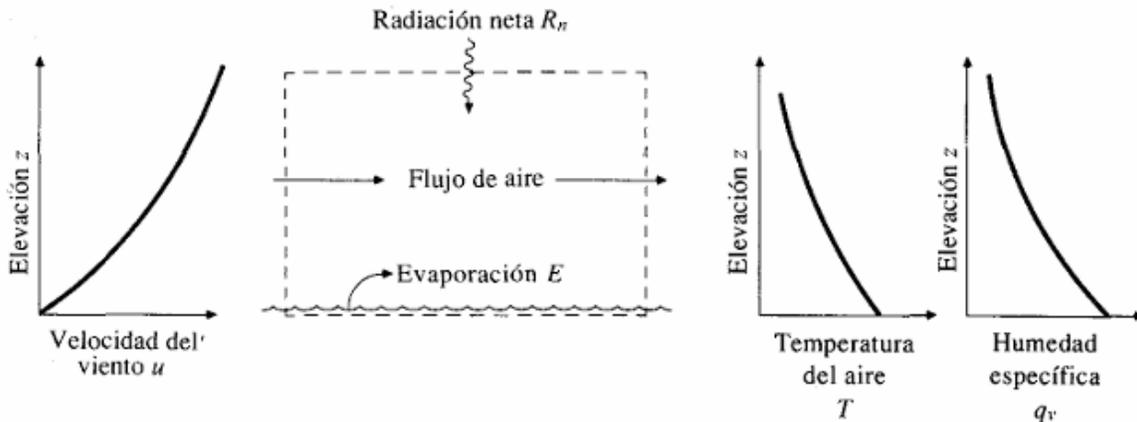


Figura 3. Evaporación desde una superficie abierta (Ven Te Chow, 1994)

La precipitación es uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico, al ser la forma física mediante la cual el agua que se encuentra dentro de la atmósfera retorna a la superficie terrestre tomando la forma de lluvia, nieve, granizo y en los cristales de hielo en las nubes. Se conoce como

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

agua precipitable, a la cantidad de vapor de agua contenido en una columna de atmósfera que puede condensarse y precipitarse en forma de lluvia o nieve.

Para la formación de nubes se requiere de la elevación de la masa de agua hasta el punto donde la temperatura y la presión que afectan a la masa de aire la permitan cambiar de estado gaseoso a líquido, a este cambio de estado físico se le llama condensación. Los tres principales mecanismos para la elevación de la masa de aire son la elevación frontal, la elevación orográfica y la elevación convectiva. Para poder efectuar la condensación el vapor de agua se necesita de un núcleo de condensación con el cual las moléculas del agua pueden unirse entre ellas; las partículas que contienen iones son efectivas para unir las moléculas del agua atrayéndolas por electrostática, en la atmósfera estos iones suelen ser sales resultado de la evaporación marina y compuestos de sulfuro y de nitrógeno, resultado de la combustión. Si la temperatura es menor a la del punto de congelamiento se forman cristales de hielo. (Ven Te Chow, 1994)

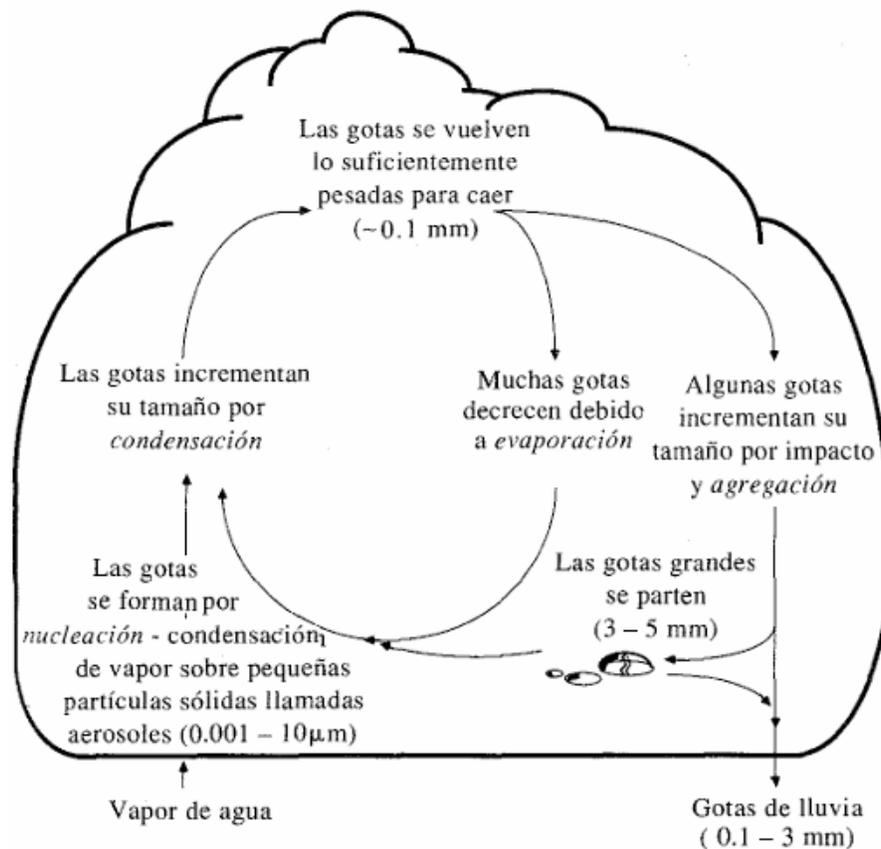


Figura 4. Formación de gotas de lluvia (Ven Te Chow, 1994)

Al ser una variable climatológica, la precipitación no es constante, cambia en el espacio y en el tiempo, esta variación está relacionada a la circulación atmosférica y con factores locales. Algunas fuertes variaciones estacionales en la precipitación ocurren donde la oscilación anual en la circulación atmosférica cambia la cantidad de humedad que entra en esas regiones.

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

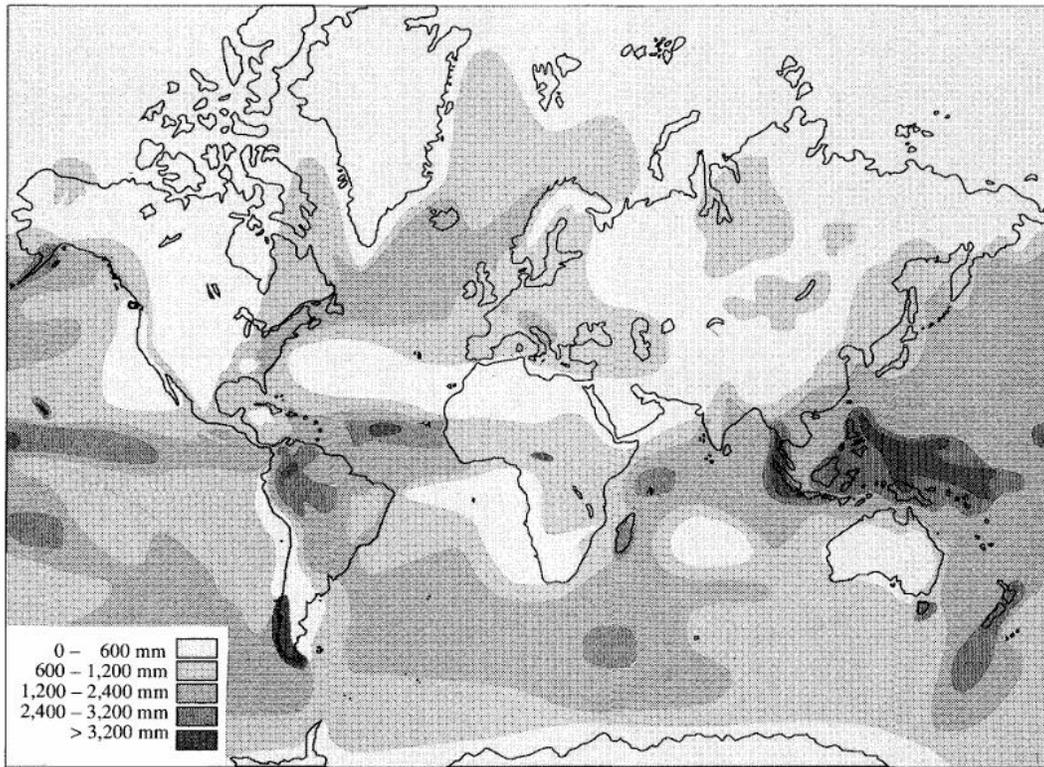


Figura 5. Precipitación media anual en el mundo (Ven Te Chow, 1994)

Dentro de estos fenómenos también se encuentran los que son creados por el aire producto de sus diferentes temperaturas. Estos se pueden separar en:

- Ciclones: Son depresiones bajas, donde el aire fluye en sentido antihorario. (Figura 6)
- Ciclones tropicales: Son producto del movimiento del aire y su ocurrencia se da en alturas relativamente bajas. Estos presentan etapas de madures dependiendo de la velocidad de sus vientos.

Tabla 1 Etapas de un ciclón tropical. (CENAPRED, 2024)

| Etapas del ciclón tropical | Velocidad mínima | Velocidad Máxima |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Depresión tropical | 40 $\frac{km}{h}$ | 60 $\frac{km}{h}$ |
| Tormenta Tropical | 61 $\frac{km}{h}$ | 120 $\frac{km}{h}$ |
| Huracán | 121 $\frac{km}{h}$ en adelante | |

- Ciclones extratropicales: Formados por las diferencias entre las temperaturas del aire
- Anticiclón: Son de altas presiones y opuestos a los ciclones, estos giran en dirección horaria.

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

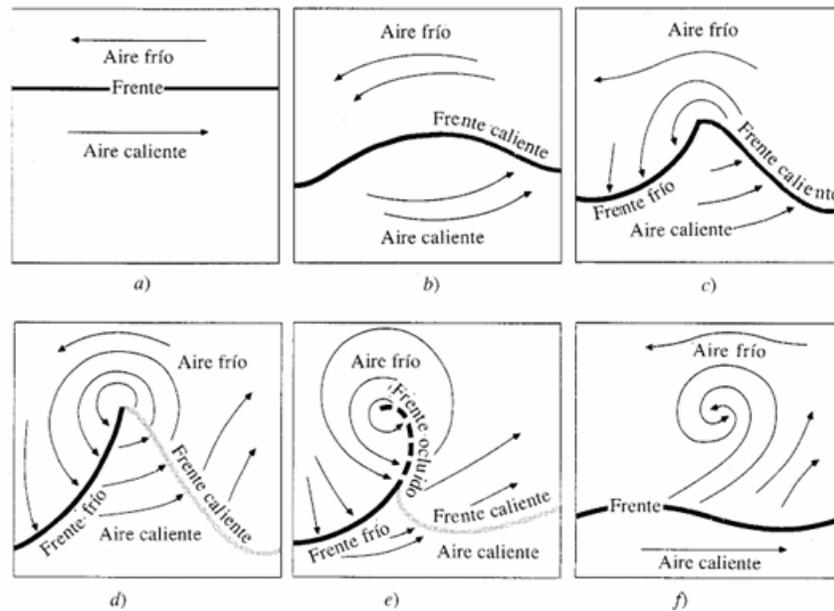


Figura 6 Ciclo de vida de un ciclón, vista en planta (Ven Te Chow, 1994)

- a) Frente superficial entre aire caliente y aire frío
- b) Formación de la onda
- c) Desarrollo de la onda y circulación ciclónica
- d) El frente frío empieza a alcanzar al frente caliente reduciendo el sector cálido
- e) Ausencia del sector cálido
- f) Disipación del ciclón

Acerca del agua en el planeta, aproximadamente el 96.5% pertenece a los océanos, 1.7% se encuentra en casquetes polares, otro 1.7% está en manantiales subterráneos y el 0.1% es el agua superficial y atmosférica. En el caso del agua dulce dos terceras partes de esta pertenecen a los hielos polares, el tercio restante pertenece al agua subterránea, aunque, una pequeña cantidad, la tercera parte, se encuentra en los ríos y el agua biológica.



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

| Ítem | Área (10 ⁶ km ²) | Volumen (km ³) | Porcentaje de agua total | Porcentaje agua dulce |
|------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Océanos | 361.3 | 1,338,000,000 | 96.5 | |
| Agua subterránea | | | | |
| Dulce | 134.8 | 10,530,000 | 0.76 | 30.1 |
| Salada | 134.8 | 12,870,000 | 0.93 | |
| Humedad del suelo | 82.0 | 16,500 | 0.0012 | 0.05 |
| Hielo polar | 16.0 | 24,023,500 | 1.7 | 68.6 |
| Hielo no polar y nieve | 0.3 | 340,600 | 0.025 | 1.0 |
| Lagos | | | | |
| Dulces | 1.2 | 91,000 | 0.007 | 0.26 |
| Salinos | 0.8 | 85,400 | 0.006 | |
| Pantanos | 2.7 | 11,470 | 0.0008 | 0.03 |
| Ríos | 148.8 | 2,120 | 0.0002 | 0.006 |
| Agua biológica | 510.0 | 1,120 | 0.0001 | 0.003 |
| Agua atmosférica | 510.0 | 12,900 | 0.001 | 0.04 |
| Agua total | 510.0 | 1,385,984,610 | 100 | |
| Agua dulce | - | 35,029,210 | 2.5 | 100 |

Figura 7. Cantidades estimadas de agua en el mundo (Ven te Chow, 1994)

1.2 Instrumentos de medición

Parte fundamental de la hidrología es la obtención de datos, los cuales serán procesados posteriormente, para esta recolección de datos se utilizan diferentes instrumentos de medición, todos estos instrumentos se colocan dentro de una estación climatológica.

1.2.1 Estaciones Climatológicas Convencionales

Es una instalación que cuenta con el instrumental, equipos y sistemas destinados a medir y registrar regularmente variables meteorológicas, la cual de manera diaria mide las variables climatológicas de la zona; estas estaciones están distribuidas a lo largo del país en lugares representativos. En México, se cuenta con alrededor de 5,400 estaciones climatológicas, de las cuales aproximadamente el 52% recolectan datos, el resto dejó de operar temporalmente o dejaron de existir (CONAGUA, 2024).

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW



Figura 8. Mapa de estaciones climatológicas convencionales (CONAGUA, 2024)

Tabla 2. Instrumentos de medición en las estaciones climatológicas

| Evento climático | Instrumento |
|------------------------|-----------------------|
| Precipitación, mm | Pluviómetro |
| Temperatura, °C | Termómetro tipo “six” |
| Evaporación | Tanque de evaporación |
| Viento, $\frac{km}{h}$ | Veleta o anemoscopio |
| Tiempo y visibilidad | Observación |

Las variables meteorológicas son el cambio del estado físico de la atmósfera referente a: precipitación, temperatura, magnitud y dirección del viento, evaporación, presión, humedad relativa, radiación solar e insolación. (NMX-AA-166/2-SCFI-2015)

Con respecto a las estaciones climatológicas existen diferentes tipos de estas, sin embargo, todas cumplen con el mismo objetivo de recolección y almacenamiento de datos. Entre estas se encuentran, las estaciones meteorológicas automáticas, las estaciones sinópticas meteorológicas automáticas y las descritas anteriormente, las estaciones convencionales.

1.2.2 EMA (Estación Meteorológica automática)

Es una estación autónoma constituida por sensores de medición, montados sobre una estructura, orientados y conectados al sistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos SAPAD, con el objetivo de realizar medición y registro de variables meteorológicas y transmitir los datos obtenidos a la oficina central, en donde serán utilizados y almacenados en una base de datos. (CONAGUA, 2024)

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW



Figura 9. Mapa de EMAs (CONAGUA, 2025)

Sensores básicos que integran una EMA:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura
- Humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

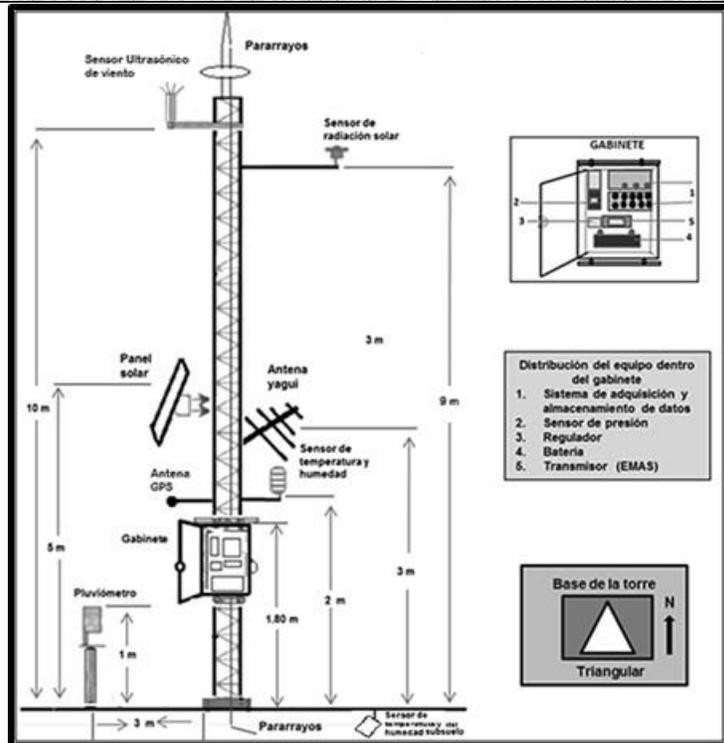


Figura 10. Estructura de una EMA (NMX-AA-166/2-SCFI-2015)

1.2.3 ESMA (Estación Sinóptica Meteorológica Automática)

Cumple con la misma finalidad que una EMA, no obstante, la función principal recae en generar un mensaje codificado llamado sinóptico, (es el reporte que se genera simultáneamente en todos los puntos sinópticos cada tres horas) el cual sigue los lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para su integración y difusión a nivel nacional e internacional (CONAGUA, 2024).

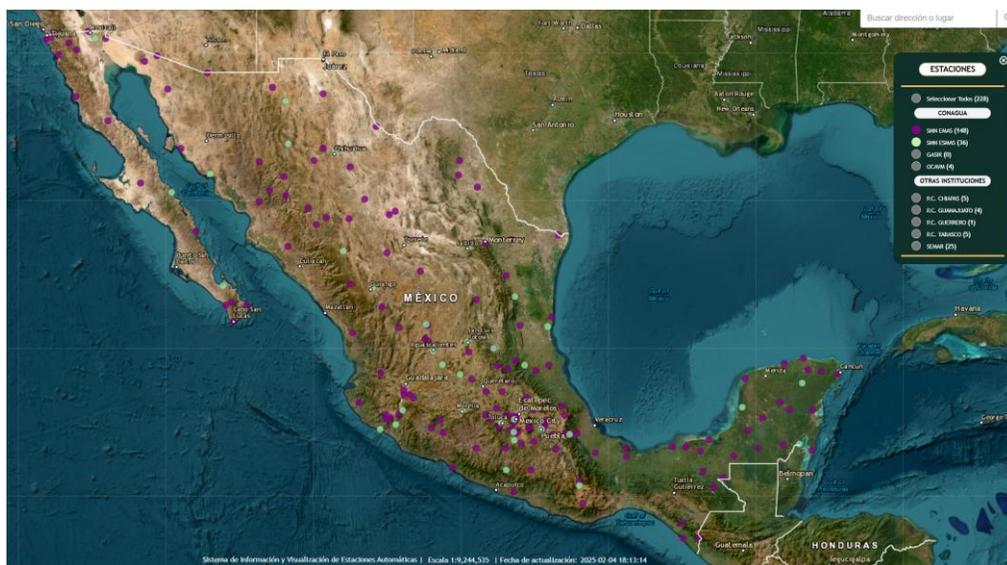


Figura 11 Mapa de ESMA (CONAGUA, 2025)

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

Sensores básicos que integran una ESMA:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura
- Humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación

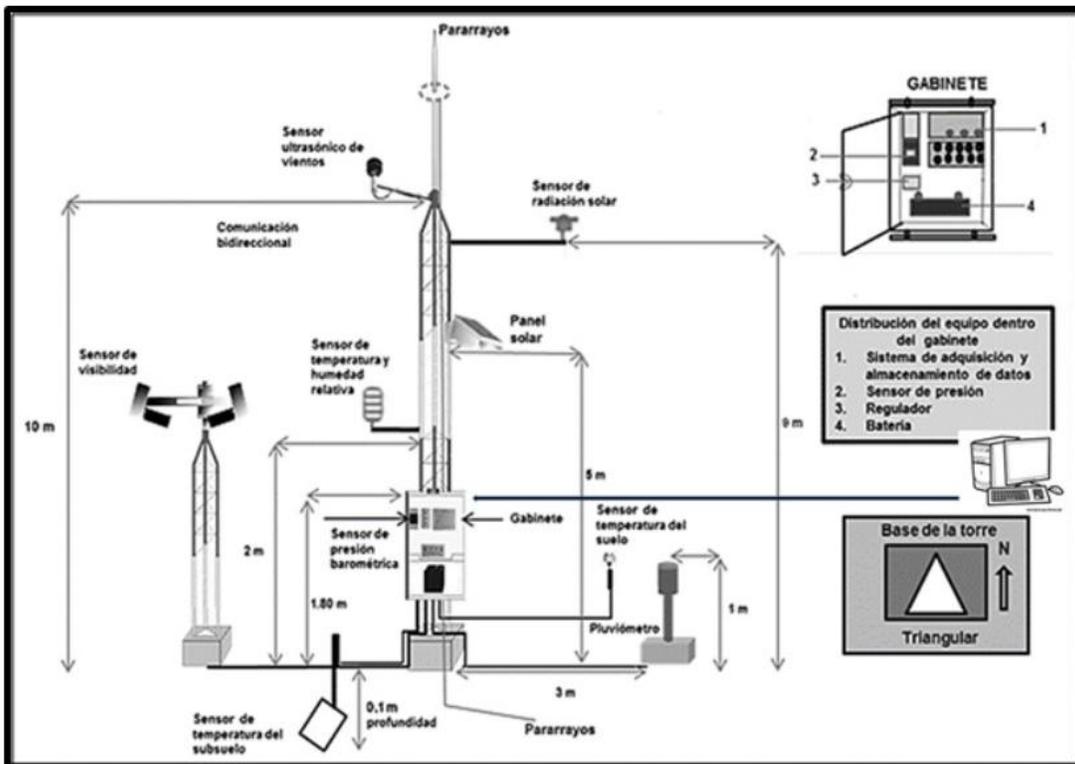


Figura 12. Estructura de una ESMA (NMX-AA-166/2-SCFI-2015)



| VARIABLES METEOROLÓGICAS | | |
|---------------------------------------|--------------------|--|
| VARIABLE | ABREVIATURA | DESCRIPCIÓN |
| DIRECCIÓN DEL VIENTO | DIRS | El valor obtenido es el promedio de 10 minutos de la dirección del viento. La unidad es en grados Dextrorsum (giro en sentido de las manecillas del reloj donde 0° es norte verdadero) |
| DIRECCIÓN DEL VIENTO DE RAFAGA | DIRR | Es la dirección de donde proviene la ráfaga más intensa en un lapso de 10 minutos su unidad de medida es grados Dextrorsum (giro en sentido de las manecillas del reloj) |
| VELOCIDAD DEL VIENTO | VELS | Es el promedio aritmético de las velocidades medidas en un lapso de 10 minutos, su unidad de medición es $\frac{km}{h}$ |
| VELOCIDAD DEL VIENTO DE RÁFAGA | VELR | Es la velocidad máxima medida en un intervalo de 10 minutos (se toman muestras cada 5 segundos) su unidad de medida $\frac{km}{h}$ |
| TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO | TEMP | Es la temperatura ambiente promedio de las mediciones realizadas en un lapso de 10 minutos (se toman muestras cada minuto), su unidad es n °C |
| HUMEDAD RELATIVA | HR | Es el promedio de las mediciones realizadas en un lapso de 10 minutos (se toman muestras cada minuto), su unidad de medición es % |
| PRESIÓN ATMOSFÉRICA | PB | Es el promedio de las mediciones realizadas en un lapso de 10 minutos |



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

| VARIABLES METEOROLÓGICAS | | |
|---------------------------------|--------------------|---|
| VARIABLE | ABREVIATURA | DESCRIPCIÓN |
| | | (se toman muestras cada minuto), su unidad es Hpa (hectopascal) |
| PRECIPITACIÓN | PREC | Es la lámina de precipitación acumulada de un lapso de 10 minutos, su unidad de medida es mm |
| RADIACIÓN | RAD-SOL | Son los valores promedio medidos en un lapso de 10 minutos (se toman mediciones cada minuto) su unidad de medición es $\frac{W}{m^3}$ |

1.3 Fuentes de información oficial

La hidrología, como todas las ramas de la ciencia, se sostiene en información que es verificable y comprobable, por lo que es de vital importancia mantenerse en constante actualización sobre la información que es nueva, las hipótesis que son aceptadas y las que no, así como de los diferentes métodos y elementos que ayudan a tener una investigación o análisis más minuciosos, que retorne información que nutra y avance poco a poco esta rama. Es por lo anterior y a que un humano por sí solo no puede realizar mediciones y/o investigaciones en todos los lugares, es que se deben de tener fuentes de información que proporcionen y dispongan con facilidad material seguro y confiable, de modo que se esté manejando información que paso por un proceso de aprobación y se eviten incongruencias entre los datos utilizados con los datos de los eventos reales.

En el caso de la hidrología, se dispone con fuentes de información en páginas en línea. A continuación, se mostrarán algunas de las páginas oficiales que recaban y publican información en el ámbito de la hidrología en México:

1.3.1 *Página en línea de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*

Con el objetivo:

“Preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sustentable y garantizar la seguridad hídrica con la corresponsabilidad de los órdenes de gobierno y la sociedad en general.”
(CONAGUA)

La página de CONAGUA recaba y proporciona información sobre la calidad, cantidad, usos y conservación del agua en México. La información que proporciona la CONAGUA incluye: calidad del agua, precipitación acumulada mensual, monitoreo de presas, sistema de seguridad de presas, vulnerabilidad climática, uso de suelo y vegetación, áreas naturales protegidas, entre otros.



1.3.2 *Página en línea de la Servicio Meteorológico Nacional (SMN)*

Con la misión:

“Proveer pronósticos, alertas e información del estado del tiempo y del clima estratégica y útil para el país, que sustente la toma de decisiones.” (SMN)

Es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. El Servicio Meteorológico Nacional, depende de la Comisión Nacional del Agua, la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Los objetivos del SMN se concentran en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las distintas actividades económicas y sobre todo originar la pérdida de vidas humanas. El SMN también realiza el acopio de la información climatológica nacional.

Sus funciones principales son:

1. Mantener informado al Sistema Nacional de Protección Civil, de las condiciones meteorológicas que puedan afectar a la población y a sus actividades económicas.
2. Difundir al público boletines y avisos de las condiciones del tiempo, especialmente durante la época de ciclones.
3. Proporcionar al público información meteorológica y climatológica.
4. Realizar estudios climatológicos o meteorológicos.
5. Concentrar, revisar, depurar y ordenar la información, generando el Banco Nacional de Datos Climatológicos, para consulta del público.

Para llevar a cabo sus objetivos el Servicio Meteorológico Nacional cuenta con una red de infraestructura de observación:

- Red sinóptica de superficie, integrada por 76 observatorios meteorológicos.
- Red sinóptica de altura. Consta de 15 estaciones de radiosondeo.
- Red de 13 radares meteorológicos distribuidos en el Territorio Nacional.
- Estación terrena receptora de imágenes del satélite meteorológico GOES-16.

El SMN difunde su información en forma de boletines o avisos especiales ya sea vía telefónica, correo electrónico o en internet. (SMN, 2025)

1.3.3 *Página en línea del Sistema de Información Hidrológica (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. (SIH, 2025)

En esta página se puede consultar lo siguiente:

- Mapas y reportes de precipitaciones acumuladas de las 8:00 h a la hora de corte y en las últimas 24 h, a nivel nacional.
- Reporte semanal del Índice de Sequía por Escurrimiento (SDI).
- Base de datos históricos de estaciones Climatológicas, Hidrométricas y Presas.

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

Estaciones climatológicas



Figura 13. Mapa de estaciones climatológicas en México (SIH, 2025)

1.3.4 Página en línea de CICESE

Administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLimate COMputing project. Las observaciones diarias del CLICOM representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos de 1920 a 2012.

El propósito de esta página es dar a conocer una herramienta para procesar y visualizar los datos diarios del CLICOM en su formato original de estaciones puntuales (CLICOM Estaciones) y en un formato de malla.

CLICOM Estaciones permite hacer gráficas (ciclo anual y series de tiempo de temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor) y descargarlas, así como los datos de las gráficas en texto (CLICOM, 2025).

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

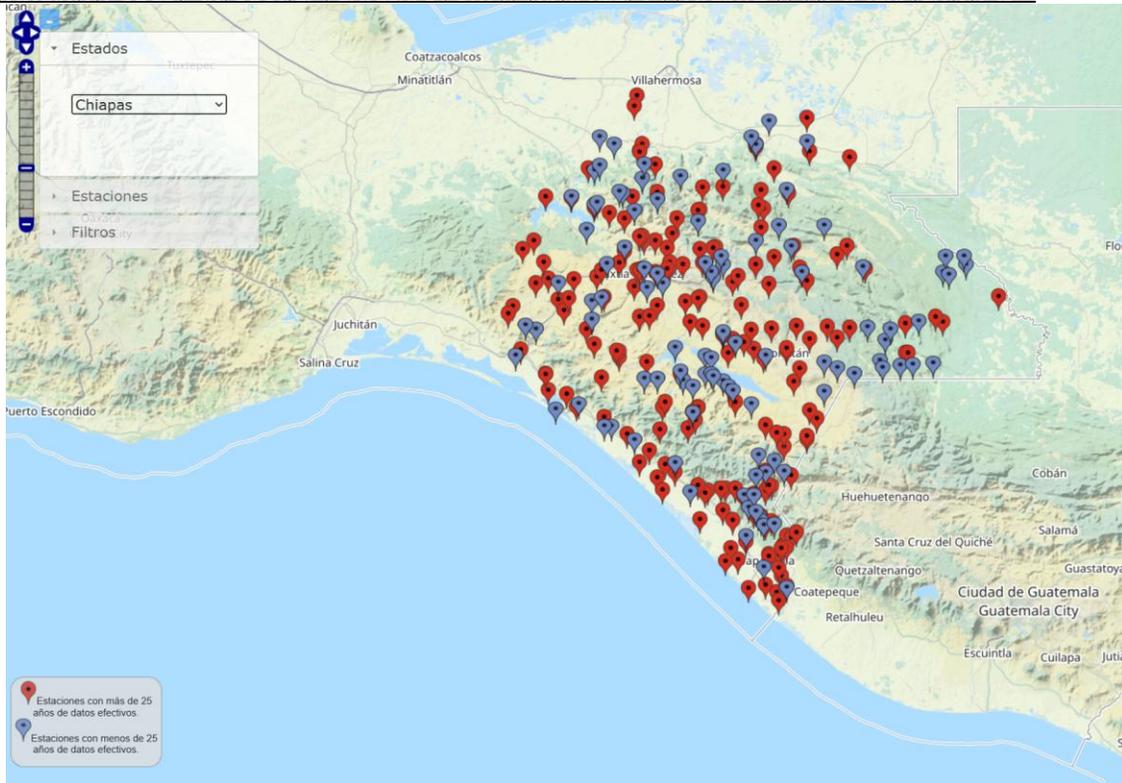


Figura 14. Mapa de Estaciones climatológicas del estado de Chiapas (CLICOM, 2025)

1.3.5 Página en línea del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

El objetivo prioritario del INEGI es lograr que el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG) suministre a la sociedad y al Estado información de calidad, pertinente, veraz y oportuna, a efecto de coadyuvar al desarrollo nacional, bajo los principios de accesibilidad, transparencia, objetividad e independencia. (INEGI, 2025) Para este propósito, sus atribuciones son:

- Normar y coordinar el desarrollo del SNIEG.
- Normar las actividades estadísticas y geográficas.
- Producir información estadística y geográfica.
- Prestar el Servicio Público de Información.
- Promover el conocimiento y uso de la información.
- Conservar la información.

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

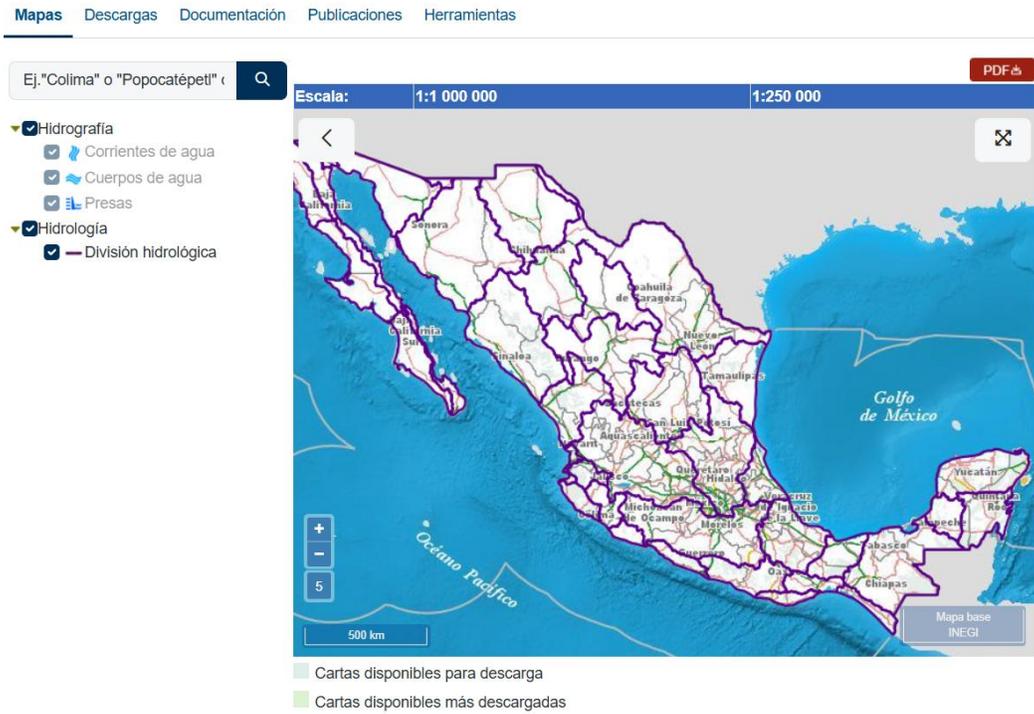


Figura 15. Mapa de la página del INEGI de la división hidrológica en México (INEGI, 2025)

1.3.6 *Página en línea del Sistema Nacional de Información del Agua*

El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) es un instrumento para la gestión de la información estratégica de los recursos hídricos en México. En el SINA se integra, analiza y brinda información estadística y geográfica del sector hídrico proveniente de diversas áreas de la CONAGUA y de otras instituciones para apoyar la toma de decisiones en el diseño (SINA, 2025).



Figura 16. Mapa de regiones hidrológicas en México, SINA 3.0 (SINA, 2025)



1.4 Eventos hidrometeorológicos extremos

Los eventos hidrometeorológicos son producidos en la atmósfera, algunos de estos eventos pueden ser: ciclones, lluvias extremas e inundaciones. Por otra parte, los eventos hidrometeorológicos extremos son aquellos que generan daños importantes; ya sea en escuelas, vías de comunicación, equipamiento urbano, y también ocasionan muertes, dicho de otra forma, los daños afectan a los “bienes nacionales”. En su mayoría los eventos extremos son inundaciones y sequías, los cuales han afectado al país a lo largo del tiempo, en esto radica la importancia de los estudios en esta rama, para de esta forma tomar decisiones y medidas que logren mitigarlos o preparar al país para recibirlos.

Las inundaciones son definidas como: un evento que debido a la precipitación (lluvia, nieve o granizo extremo), oleaje, marea de tormenta o falla en alguna estructura hidráulica, provoca el incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños a la población, agricultura, ganadería e infraestructura (CENAPRED, 2009). Existen diferentes tipos de inundaciones cada una con diferente origen que las ocasiona, entre ellas están:

- Inundaciones pluviales
- Inundaciones fluviales
- Inundaciones costeras
- Inundaciones súbitas
- Inundaciones lentas



Figura 17. Agenda de riesgo (CENAPRED, 2009)

De las inundaciones más importantes que ha sufrido el país en los últimos años se encuentran las inundaciones de 1951 en la Ciudad de México y en 2020 en el sureste de México. La primera fue una inundación que duro aproximadamente tres meses en la ciudad, provocó que la gente tuviera que usar lanchas de madera y balsas de hule para transportarse, se estima que dos terceras partes de la ciudad

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

se inundaron y que se tuvo una profundidad de dos metros en las zonas más bajas. Esto provocó la entubación del río Churubusco, la construcción de varios cárcamos y plantas de bombeo (CONAGUA, 2024).



Figura 18. Vista aérea de la inundación de 1951 (CONAGUA, 2024)

Mientras tanto la inundación del 2020 afectó principalmente a los estados de Tabasco, Chiapas y Veracruz. Dejando una cifra de 28 muertos y 368,000 afectados a partir del 14 de noviembre de ese año.



Figura 19. Inundación en tabasco (CENAPRED, 2020)

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

Por otro lado, las sequías se definen como: el déficit transitorio o prolongado de lluvia que se caracteriza por un periodo de precipitaciones menores a las lluvias promedio de una región, cuyo inicio y conclusión es difícil de determinar (CONAGUA, 2020). Al igual que las inundaciones, existen diferentes tipos de sequía, entre estas están:

- Sequía Meteorológica
- Sequía Agrícola
- Sequía Hidrológica

En el caso de las sequías, entre las más importantes que han sucedido estos últimos años han sido la sequía de la presa La Requena en 2024 y la sequía del 2011. La presa llegó a un mínimo de 2.5% de su capacidad en 2024 afectando a agricultores y pescadores teniendo como consecuencia pérdidas económicas importantes. Por el otro lado, la sequía del 2011 afectó aproximadamente al 85% del país siendo una de las más intensas de los últimos años.



Figura 20. Sequía en el norte de México en 2011 (Gobierno de México, 2011)

1.5 Pruebas de calidad

Con el objetivo de obtener series de datos confiables, se utilizan las pruebas de homogeneidad y de independencia de manera que se puedan detectar errores o variaciones en ellas, garantizando que la información que se utiliza para el estudio sea representativa.

Las pruebas de homogeneidad se utilizan para evaluar si el patrón de las series hidrológicas muestra cambios significativos ya sea debido a causas naturales o antropogénicas. También estas pruebas ayudan a identificar variaciones significativas en la serie al completarla. Eso se demuestra mediante la afectación en las características estadísticas como la media y la desviación estándar, así como, cambios de signo en los coeficientes de correlación serial.



Por otro lado, las pruebas de independencia tienen como objetivo determinar si las series tienen un comportamiento *estocástico*, en otras palabras, si la serie tiene un comportamiento aleatorio, un requisito esencial para poder realizar análisis estadístico de frecuencias.

1.5.1 Prueba de independencia de Anderson

La prueba mide la autocorrelación serial de la muestra para diferentes intervalos de tiempo. En una muestra completamente independiente, el coeficiente de autocorrelación para cualquier intervalo de tiempo es igual a cero (Escalante y Reyes, 2014). La expresión es:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Para } r_0 = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n}{3} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ecuación 2}$$

Además, los límites de confianza para r_k al 95% se pueden obtener como:

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad \text{Ecuación 3}$$

Si solo el 10% de los valores de r_k sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie X_i es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.

1.5.2 Prueba estadística de Helmer

Mediante el análisis consecutivo de signos en las desviaciones de cada evento, con respecto al valor medio, se puede determinar una frecuencia, si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se determina una secuencia, mientras que, por el otro lado, si los signos no se repiten se considera un cambio (Escalante y Reyes, 2014). La serie es homogénea respecto al estadístico media si se cumple:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- n_j es el tamaño de la muestra
- S hace referencia a una secuencia. Entendiendo como secuencia a la repetición sucesiva en el signo de dos desviaciones consecutivas.
- C hace referencia a un cambio. Entendiendo como cambio a secuencia sucesiva de dos desviaciones con signo diferente.



1.5.3 Prueba de homogeneidad de Cramer

Para comprobar si el valor medio no varía significativamente de un periodo a otro se aplica la prueba de Cramer, con el propósito de comprobar la homogeneidad en el registro. El registro se divide al 30% y 60% de los últimos valores de la muestra, la prueba compara el valor del registro total con cada sección.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$S_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\bar{X}_{30} = \sum_{i=1}^{n_{30}} \frac{X_k}{n_{30}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\tau_{30} = \frac{\bar{X}_{30} - \bar{X}}{S_x} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\bar{X}_{60} = \sum_{i=1}^{n_{60}} \frac{X_k}{n_{60}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\tau_{60} = \frac{\bar{X}_{60} - \bar{X}}{S_x} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$t_w = \left[\frac{n_w(n-2)}{n - n_w(1 - \tau_w^2)} \right]^{\frac{1}{2}} |\tau_w| \quad \text{Para } w = 60 \text{ y } w = 30 \quad \text{Ecuación 11}$$

El estadístico t_w tiene distribución t de Student de dos colas con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad, para un nivel $\alpha = 0.05$.

Si y solo si el valor absoluto de t_w para $w = 60$ y $w = 30$, es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie X_i se considera no homogénea.



1.5.4 Prueba de homogeneidad de T de Student

Si se considera una serie de tamaño n para la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n}{2}$ entonces el estadístico de prueba se define como (Escalante y Reyes, 2014):

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left(\left(\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- \bar{x}_1, s_1 es la media y varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1
- \bar{x}_2, s_2 es la media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad. Si y solo si, el valor absoluto de t_d es mayor que el crítico de la distribución T-Student, se concluye no homogeneidad.

1.6 Análisis de frecuencias

Para pronosticar las lluvias, los gastos o volúmenes de diseño de las obras hidráulicas asociados a cierto período de retorno o frecuencia de ocurrencia, se aplican métodos estadísticos, que, para su obtención, requieren de datos o registros de eventos máximos anuales, con lo que, a mayor cantidad de datos, menor es la incertidumbre de los eventos de diseño. Los métodos para evaluar los eventos de diseño se consideran a partir de un periodo de retorno, que tienen en cuenta al gasto o lluvia máxima anual como variables aleatorias que se distribuyen de acuerdo con una función de probabilidad, es común que se cuente con pocos años de registro, o menor al requerido para diseño, por lo que las curvas de distribución de probabilidad se tienen que extender en sus extremos a fin de inferir eventos mayores o menores a los registrados. Las funciones de distribución de probabilidad recomendadas en hidrología son las siguientes: (Escalante y Reyes, 2014)

1.6.1 Gamma con dos parámetros (2P-M, 2P-MV)

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} dx \quad \text{Ecuación 13}$$

$$f(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} \quad \begin{array}{l} 0 \leq x < \infty \\ \alpha > 0 \rightarrow \gamma > 0 \\ \gamma > 0 \end{array} \quad \text{Ecuación 14}$$



$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} u^{\beta-1} e^{-u} du$$

Ecuación 15

Donde

- α es el parámetro de escala
- β es el parámetro de forma
- $\Gamma(\beta)$ es la función Gamma completa (Ecuación 15)

Además:

$$\mu = \alpha\beta$$

Ecuación 16

$$\sigma^2 = \alpha^2\beta$$

Ecuación 17

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$$

Ecuación 18

$$0 \leq x < \infty$$

$$\alpha > 0$$

$$0 < \gamma < 2$$

- **Obtención de los parámetros Momentos (M)**

$$\hat{\alpha} = \frac{s^2}{\bar{X}}$$

Ecuación 19

$$\hat{\beta} = \left(\frac{\bar{X}}{s}\right)^2$$

Ecuación 20



○ **Estimadores por máxima verosimilitud (MV)**

$$\hat{\alpha} = \frac{\bar{X}}{\beta} \quad \text{Ecuación 21}$$

1.6.2 *Gamma con tres parámetros (3P-M, 3P-MV)*

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \quad \begin{array}{l} x_0 \leq x < \infty \\ \alpha > 0 ; \beta > 0 \end{array} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde

- x_0 es el parámetro de ubicación
- α es el parámetro de escala
- β es el parámetro de forma
- $\Gamma(\beta)$ es la función Gamma completa

Además:

$$\mu = x_0 + \alpha\beta \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\sigma^2 = \alpha^2\beta \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$k = 3 \left(1 + \frac{\gamma^2}{2}\right) \quad \text{Ecuación 26}$$

- **Obtención de los parámetros Momentos (M)**



$$\hat{\beta} = \frac{4}{g^2} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{S}{\sqrt{\hat{\beta}}} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\hat{X}_0 = \bar{X} - S\sqrt{\hat{\beta}} \quad \text{Ecuación 29}$$

○ **Estimadores por máxima verosimilitud (MV)**

$$\hat{\beta} = \frac{1}{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_0) \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(X_i - \hat{X}_0)} \right]}} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_0) - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(X_i - \hat{X}_0)} \right]} \quad \text{Ecuación 31}$$

1.6.3 Normal con dos parámetros (2P-M-ML)

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad \text{Ecuación 32}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty \quad \text{Ecuación 33}$$



Donde

- μ es el parámetro de ubicación
- σ es el parámetro de escala

Además:

$$E(x) = \mu \quad \text{Ecuación 34}$$

$$E[(x - \mu)^2] = \sigma^2 \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\gamma = 0 ; k = 3 \quad \text{Ecuación 36}$$

- **Obtención de los parámetros por Momentos y Máxima Verosimilitud (M y MV)**

$$\hat{\mu} = \bar{X} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad \text{Ecuación 38}$$

1.6.4 Gumbel con dos parámetros (2P-M, 2P-MV)

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-1}{\alpha}\right)}} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{xv}{\alpha}\right)}} \quad \begin{array}{l} -\infty < x < \infty \\ \alpha > 0 \end{array} \quad \text{Ecuación 40}$$



Donde

- ν es el parámetro de ubicación
- α es el parámetro de escala
- $\gamma = 1.1396$
- $k = 5.4002$

$$E(x) = \hat{\nu} + 0.5772\hat{\alpha} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$\sigma = \frac{\pi^2 \hat{\alpha}^2}{6} \quad \text{Ecuación 42}$$

- **Obtención de los parámetros Momentos (M)**

$$\hat{\nu} = \bar{X} - 0.45s \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\hat{\alpha} = 0.78s \quad \text{Ecuación 44}$$

- **Estimadores por máxima verosimilitud (MV). Considerando la variable reducida se tiene el siguiente proceso iterativo**

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i} \quad \text{Ecuación 46}$$

El criterio de convergencia es:



$$\frac{P}{\hat{\alpha}} \approx 0 \quad \text{Ecuación 47}$$

Y

$$\frac{-R}{\hat{\alpha}} \approx 0 \quad \text{Ecuación 48}$$

Con incrementos de

$$\delta_{ij} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_i}{n} \quad \text{Ecuación 49}$$

$$\delta_{\alpha j} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_j}{n} \quad \text{Ecuación 50}$$

Nuevos valores

$$\hat{v}_{j+1} = \hat{v}_j + \delta_{ij} \quad \text{Ecuación 51}$$

$$\hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j + \delta_{\alpha j} \quad \text{Ecuación 52}$$

Finalmente, los eventos de diseño se calculan mediante:

$$\hat{X}_T = \hat{v} - \hat{\alpha} \left[\text{Ln} \left[-\text{Ln} \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right] \quad \text{Ecuación 53}$$

1.6.5 Gumbel-Gumbel

$$F(X) = pe^{-e^{-\left(\frac{X-v_1}{\alpha_1}\right)}} + (1-p)e^{-e^{-\left(\frac{X-v_2}{\alpha_2}\right)}} \quad \text{Ecuación 54}$$



$$f(X) = pe^{-e^{-\left(\frac{X-v_1}{\alpha_1}\right)}} e^{-\left(\frac{X-v_1}{\alpha_1}\right)} + (1-p)e^{-e^{-\left(\frac{X-v_2}{\alpha_2}\right)}} e^{-\left(\frac{X-v_2}{\alpha_2}\right)} \quad \text{Ecuación 55}$$

$$x > 0 \quad \alpha_i > 0, \quad 0 < p < 1$$

Donde:

- v_1 parámetros de ubicación de la primera población
- α_1 parámetros de escala de la primera población
- v_2 parámetros de ubicación de la segunda población
- α_2 parámetros de escala de la primera población
- p parámetros de ubicación de la primera población

1.6.6 LogNormal con dos parámetros (2P-M-MV)

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left|\frac{\ln(x)\mu_y}{\sigma_y}\right|^2}, \quad x > 0 \quad \text{Ecuación 56}$$

Donde:

- μ_y es el parámetro de ubicación
- σ_y es el parámetro de escala
- $\gamma > 0$
- **Obtención de los parámetros por Momentos y Máxima Verosimilitud**

$$\hat{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(X_i) \quad \text{Ecuación 57}$$

$$\hat{\sigma}_y = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln(X_i) - \hat{\mu}_y)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 58}$$



• **LogNormal con tres parámetros (3P-M, 3P-MV)**

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left|\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{\sigma_y}\right|^2}, \quad x > x_0 \quad \text{Ecuación 59}$$

Donde:

- x_0 es el parámetro de ubicación
- μ_y es el parámetro de forma
- σ_y es el parámetro de escala

○ **Obtención de los parámetros Momentos (M)**

$$\hat{X}_0 = \bar{X} \left(1 - \frac{\hat{\eta}_x}{\hat{\eta}_z}\right) \quad \text{Ecuación 60}$$

$$\hat{\eta}_x = \frac{S}{\bar{X}} \quad \text{Ecuación 61}$$

$$\hat{\eta}_z = \frac{1 - w^{\frac{2}{3}}}{w^{\frac{1}{3}}} \quad \text{Ecuación 62}$$

Donde

$$w = \frac{(g^2 + 4)^{\frac{1}{2}} - g}{2} \quad \text{Ecuación 63}$$

$$\hat{\eta}_y = \ln\left(\frac{S}{\hat{\eta}_z}\right) - \frac{1}{2}\ln(\hat{\eta}_z^2 + 1) \quad \text{Ecuación 64}$$



$$\hat{\sigma}_y = [\text{Ln}(\hat{\eta}_z^2 + 1)]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 65

- **Estimadores por máxima verosimilitud (MV)**

$$\hat{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{Ln}(X_i - \hat{X}_0)}{n}$$

Ecuación 66

$$\sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Ln}(X_i - X_0) - \hat{\mu}_y)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 67

El estimador X_0 se obtiene de resolver:

$$F(\hat{X}_0) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(X_i - X_0)} (\hat{\mu}_y - \hat{\sigma}_y^2) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{(X_i - X_0)} \text{Ln}(\hat{\mu}_y - \hat{\sigma}_y^2) = 0$$

Ecuación 68

Finalmente, los eventos de diseño se calculan mediante:

$$\hat{X}_T = \hat{X}_0 + \exp(\hat{\mu}_y + \sigma_y U_T)$$

Ecuación 69



2 Métodos de interpolación de tormentas

Las estaciones climatológicas convencionales en nuestro país cuentan con instrumentos de medición y estos en su mayoría cumplen con su objetivo, a pesar de esto, es muy probable que no siempre se disponga de todos los datos, como se mencionó en el capítulo de instrumentos de medición, solo el 52 % de las estaciones totales recolecta datos y considerando que esa recolección de datos es influenciada por varios factores, es algo común que una estación climatológica no cuente con un registro completo; esto provoca incertidumbre al momento de realizar los estudios hidrológicos. Ante esta problemática, métodos matemáticos, de probabilidad y estadística se han utilizado para el relleno de datos. Cabe resaltar que a pesar de que los métodos nos proporcionan más información, existen casos donde los fenómenos fueron severos y debido a la magnitud de estos no fue posible tener el registro. Aun así, no se puede generalizar esta situación a todos los datos faltantes, también pueden ser causas humanas o de mantenimiento.

2.1 Deducción de datos faltantes

Debido a que las estaciones climatológicas presentan datos faltantes porque no siempre están operando, errores de captura o daños a lo largo del tiempo, existen métodos para inferir los datos que sean una incógnita, y de esta manera trabajar con un menor grado de incertidumbre. Entre estos métodos, se encuentran los siguientes:

2.1.1 Promedio global de la estación

Para este método, se consideran todos los datos como una serie, para así posteriormente asumir que el valor de todos los datos faltantes es igual al promedio de los valores de la estación a lo largo del tiempo (Escalante y Reyes, 2014).

$$\overline{hp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hp_i$$

Ecuación 70

Donde:

\overline{hp} Precipitación media de la serie, mm

n Número de datos por estación

hp_i Precipitación en el tiempo i , mm

2.1.2 Estación geográficamente más cercana

Nacido de la idea de que la estación más cercana a la estación de interés pudo ser afectada por el evento del que se busca el valor, se propone que los datos de la estación j (donde no existe registro) serán complementados por los datos de la estación i para las fechas correspondientes (Escalante y Reyes, 2014).



$$hp_j = hp_i$$

Ecuación 71

Donde:

hp_j Precipitación faltante para la estación j

hp_i Precipitación para el día, mes o año de la estación geográficamente más cercana

2.1.3 Promedio aritmético

A partir del área de estudio se obtendrá la media de los valores para las incógnitas de la estación de interés, utilizando para este promedio los valores de todas las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca de interés para así posteriormente sustituir el ponderado en lugar del dato vacío (Escalante y Reyes, 2014).

$$\overline{hp}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hp_i$$

Ecuación 72

Donde:

\overline{hp}_j Dato faltante para el día, mes o año de interés en la estación j , mm

hp_i Valor de precipitación para el día, mes o año en la estación i , mm

n Número de estaciones

2.1.4 Polígonos de Thiessen

Por medio de la unión de estaciones climatológicas cercanas, se trazan líneas rectas que forman triángulos entre ellas, para posteriormente obtener las mediatrices de cada segmento de los triángulos, generando conjuntos de polígonos que sirven como frontera para cada estación climatológica donde cada una tendrá su influencia dentro de estos polígonos. De modo que se calcula la precipitación media (Escalante y Reyes, 2014):

$$\overline{hp} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i hp_i$$

Ecuación 73

Donde:

\overline{hp} Altura de precipitación media, mm

hp_i Altura de precipitación en la estación i , mm

A_T Área total de la cuenca, km²

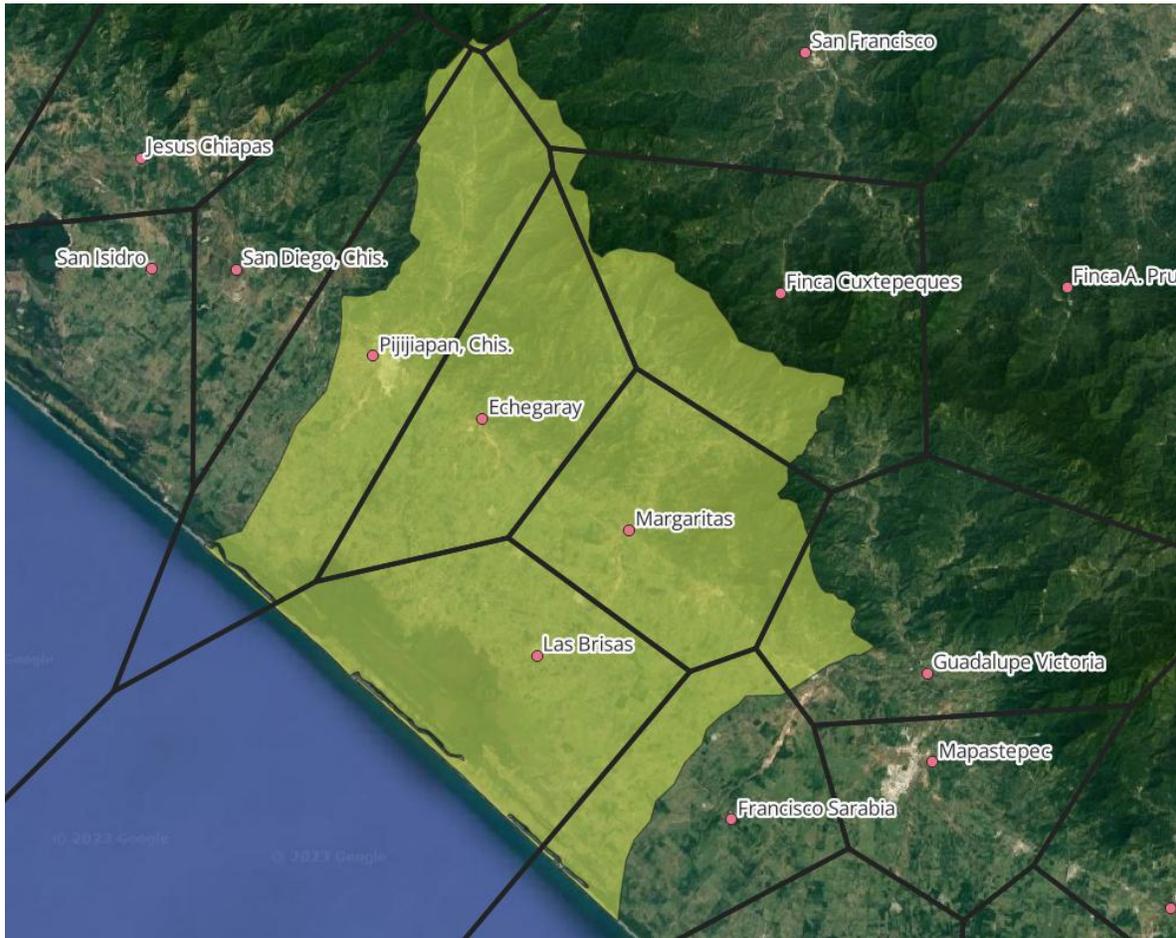


Figura 21. División de cuenca por Polígonos de Thiessen

2.1.5 Método de isoyetas

Al unir las estaciones con precipitación cuyo valor sea igual y donde la línea está gobernada por la topografía del lugar, se originan las isoyetas. Dando lugar al cálculo de la precipitación media como (Escalante y Reyes, 2014):

$$\bar{hp} = \frac{\sum_{i=1}^n hp_i a_i}{A} \quad \text{Ecuación 74}$$

Donde:

\bar{hp} Altura de precipitación media, mm

hp_i Altura de precipitación media entre dos isoyetas, mm

a_i Área entre dos isoyetas, km^2

n Número de tramos entre isoyetas

A Área total de la cuenca, km²

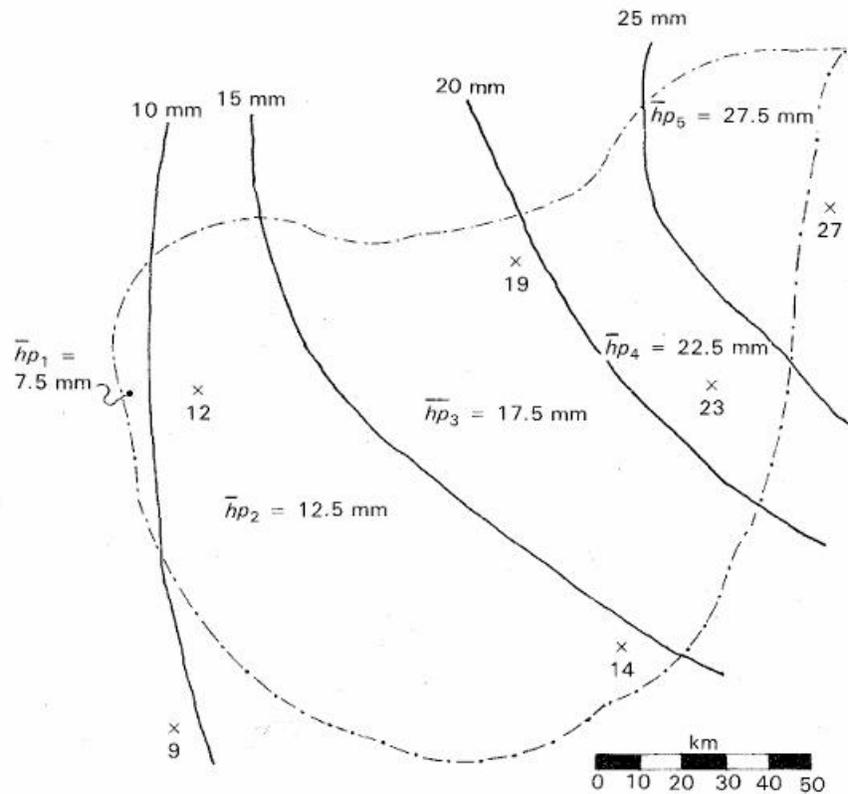


Figura 6.23

Figura 22. Isoyetas aplicadas dentro de una cuenca (Aparicio, 1992)

2.1.6 Kriging Ordinario

Si se desea estimar un valor $Z^*(X)$ en la ubicación X_i desconocida se expresa como una combinación lineal ponderada de los valores muestreados (Zavaleta, 2010):

$$Z^*(X) = \sum_{i=1}^n \gamma_i Z(X_i) \quad \text{Ecuación 75}$$

Donde:

$Z^*(X)$ es el valor estimado en la ubicación X .

$Z(X_i)$ son los valores observados en la ubicación X_i .



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

γ_i son los pesos asignados a cada punto X_i , determinados por la solución de un sistema de ecuaciones basadas en el variograma o la función de covarianza. Los pesos de γ_i se obtienen minimizando la varianza del error de estimación bajo la restricción de insesgadez:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1 \quad \text{Ecuación 76}$$

Siendo un sistema lineal de $n+1$ ecuaciones y con $n+1$ incógnitas, puede ser resuelto como un sistema de ecuaciones para obtener los factores de peso. En este caso la varianza del error de interpolación es (Escalante y Reyes, 2014):

$$\hat{\sigma}_e^2 = \sum_{j=1}^n W_j \gamma(d_{ej}) + \lambda \quad \text{Ecuación 77}$$

El sistema se resuelve mediante un arreglo matricial:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \cdots & \gamma_{n,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{1,n} & \cdots & \gamma_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{e1} \\ \gamma_{en} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 78}$$

$$[G][W] = [F] \quad \text{Ecuación 79}$$

$$[W] = [G]^{-1}[F] \quad \text{Ecuación 80}$$

n es el número de puntos vecinos utilizados para la estimación.

μ es el multiplicador de Lagrange.

2.1.7 Método del U.S. National Weather Service (IDW)

El método de interpolación IDW fue introducida por Donald Shepard en 1968. Shepard propuso esta técnica para estimar los valores en ubicaciones donde no se haya tenido medición, utilizando datos irregulares en un espacio bidimensional.

Los valores faltantes en la estación en estudio ($\overline{p_x}$), pueden ser obtenidos a través de los registros de las estaciones cercanas sin importar si la escala de tiempo es diaria, mensual o anual.



La metodología consiste en asignar un factor de peso (W) a las estaciones cercanas al punto con datos faltantes, este factor de peso tomará en cuenta la distancia (D) que existe entre el sitio con datos faltantes y la estación vecina, así como su precipitación registrada (p_i) para el día mes o año en cuestión, es decir (Escalante y Reyes, 2014):

$$\bar{p}_x = \frac{\sum_{i=1}^n p_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{Ecuación 81}$$

Donde:

p_i es la precipitación registrada en la estación con datos

\bar{p}_x es la precipitación obtenida para la estación "x"

W_i es el factor de peso

$$W_i = \frac{1}{D^2} \quad \text{Ecuación 82}$$

D es la distancia de la estación con datos faltantes a la estación con datos

$$D = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad \text{Ecuación 83}$$

(x, y) son las coordenadas del punto de estimación

(x_i, y_i) son las coordenadas del punto de muestra

2.2 **Sistemas de información geográfica**

Se le llama sistema de información geográfica al conjunto de herramientas, datos, software, hardware y metodologías que permiten capturar, almacenar, analizar y representar la información geográfica. De tal manera que un SIG es un programa que facilita la interacción, representación y análisis con el fin de relacionar fenómenos geográficos de cualquier naturaleza, algunos ejemplos son: mapas, parcelas agrícolas, densidad poblacional, entre otros. Siendo una base de datos geográfica, la representación digital de los objetos físicos de manera que cada representación cuenta con series de información que ayuda al usuario a realizar consultas para conocer diferentes tipos de datos, como lo son: el área, la precipitación, la longitud, etc. El sistema permite separar la información en diferentes capas, de tal manera que se puede trabajar con diferentes archivos para una misma zona sin que uno intervenga directamente con el otro, facilitando la visualización de datos.

Existen los softwares de licencia libre, estos son programas que se pueden utilizar, modificar y compartir sin restricciones permitiendo el acceso a los usuarios para acceder a la información geográfica con mayor facilidad, fomentando la innovación y colaboración de los usuarios. Sus mayores ventajas son:

- Acceso gratuito



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

- Libertad de modificación
- Sin restricción de licencia

Dentro de los softwares de licencia libre, en el ámbito de la información geográfica se encuentran:

- QGIS: Versátil, con una interfaz intuitiva y soporta grandes cantidades de formatos espaciales.
- GRASS GIS: Potente análisis geoespacial y cuenta herramientas de modelado de terreno.
- SAGA GIS: Potente análisis geoespacial, cuenta herramientas de modelado de terreno, especializado en análisis ráster y procesamiento de datos.

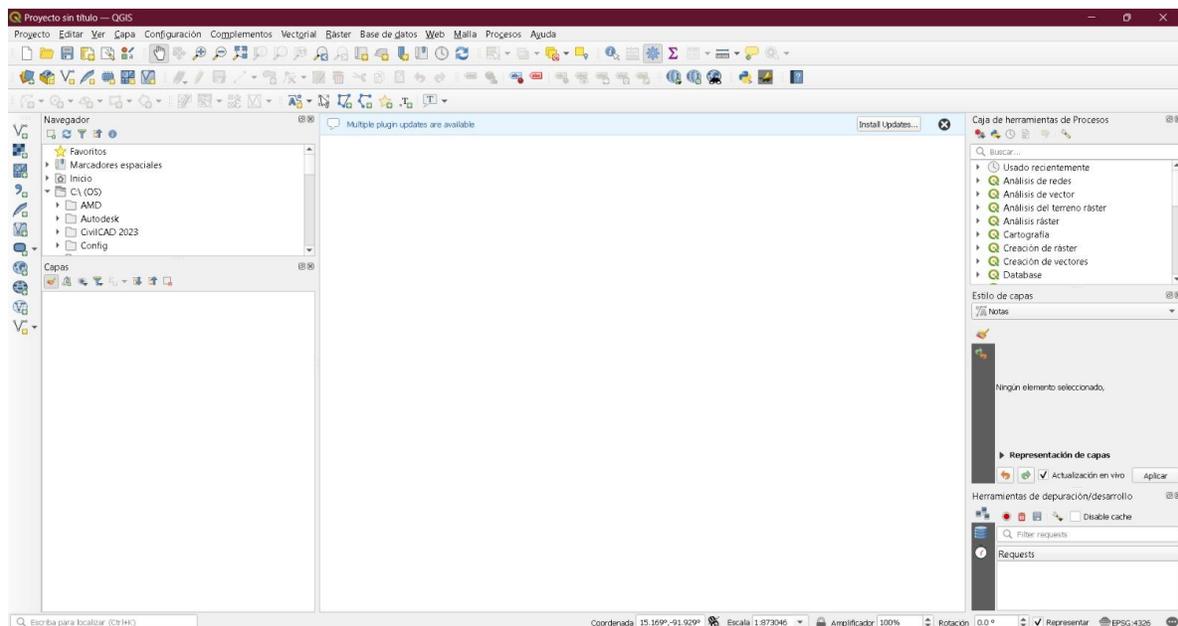


Figura 23. Interfaz del programa QGIS

Algunas de las ventajas que brinda QGIS son los datos que se pueden manipular dentro del programa como:

- Datos vectoriales: Utilizan geometría (puntos, polilíneas y polígonos) para representar el mundo real. Pueden ser documentos de tipo: DXF, GML, SDTS, etc. (QGIS, 2025)

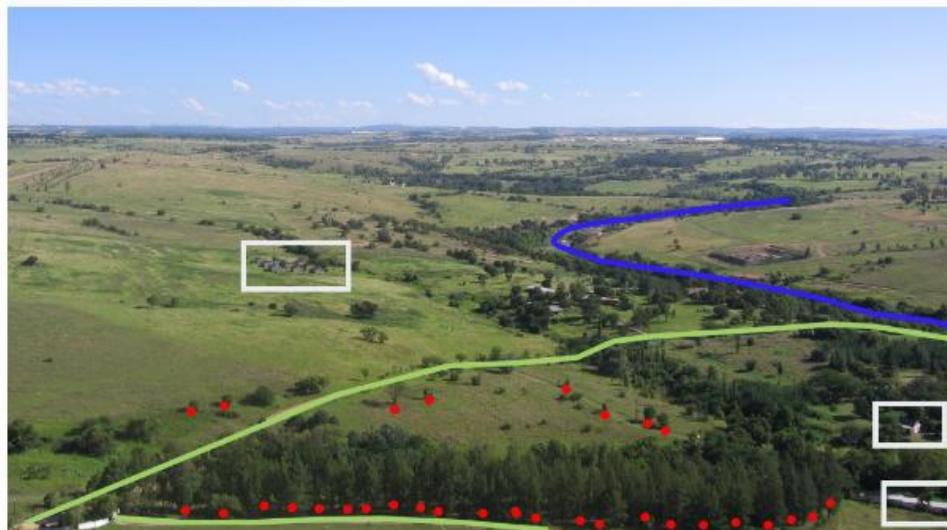


Figura 24. Representación de forma vectorial de un paisaje. Río (azul), carretera (verde), arboles (puntos rojos) y casas (polígonos blancos) (QGIS, 2025)

- Datos ráster: Están formados por una matriz de píxeles, cada uno de los cuales contiene un valor que representa las condiciones del área cubierta por esa celda. Pueden ser documentos tipo: TIFF, JPEG, PNG, etc. (QGIS, 2025)

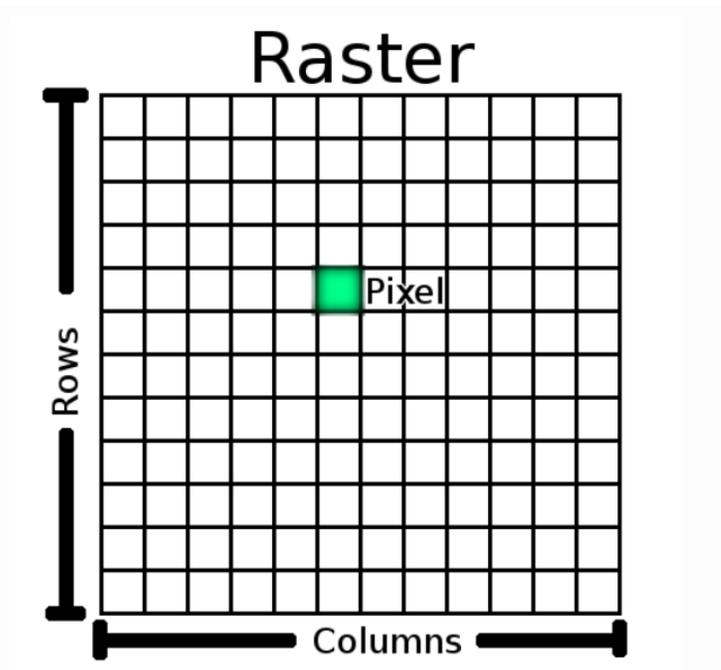


Figura 25. Representación de un raster. Cada píxel representa una región geográfica y el valor de ese píxel representa alguna característica de esa región (QGIS, 2025)

Por otro lado, INEGI dispone de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), la cual está constituida por un conjunto de estaciones distribuidas a lo largo del territorio nacional que operan de manera



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

permanente proporcionando servicios de posicionamiento geodésico y dispone de la información en su página web de manera gratuita (INEGI). Dentro de las aplicaciones de la Red Geodésica Nacional Activa se tiene:

- Levantamientos geodésicos.
- Definición de límites político-administrativos.
- Establecimiento y densificación de la Red Geodésica Horizontal para el control de obras de ingeniería e infraestructura.
- Apoyo terrestre necesario para trabajos fotogramétricos.
- Determinación de la posición geodésica de monumentos internacionales que definen las fronteras de México con los países vecinos.
- Delimitación de la zona económica exclusiva, mar patrimonial y espacios marítimos del país de conformidad con la convención de las Naciones Unidas y el Derecho Internacional.
- Estudios de tectónica y riesgos para el reordenamiento territorial y protección civil.
- Investigación y monitoreo de fenómenos geodinámicos y geofísicos.

Por otro lado, se encuentra la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP) constituida por 100, 000 estaciones geodésicas materializadas sobre el terreno con una placa empotrada que identifica a cada una de ellas. Las estaciones geodésicas distribuidas en la República Mexicana se clasifican en tres capas de interés: Red Geodésica Vertical, Red Geodésica Horizontal y Red Geodésica Gravimétrica (INEGI).



Figura 26. Placa que conforma la RGNP (INEGI, 2025)

3 Estudio de caso

3.1 Localización

Con el propósito de aplicar las interpolaciones IDW y Kriging se ha seleccionado la cuenca Margaritas y Coapa, ubicada dentro del estado de Chiapas, en el municipio de Mapastepec, dentro de la Región Hidrológica Costa de Chiapas (RH 23) colindando con las Regiones Hidrológicas Grijalva-Usumacinta y Tehuantepec (Figura 28) y la Región Hidrológica Administrativa que corresponde a la cuenca es Frontera Sur (RHA XI) que comparte frontera con Guatemala y Belice, así como las Regiones Hidrológicas Administrativas de Península de Yucatán, Pacífico sur y Golfo centro (Figura 29) (SEMARNAT, 2010).



Figura 27. Ubicación de la zona de estudio.

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW



Figura 28. Mapa de Regiones Hidrológicas de México (SEMARNAT, 2010)



Figura 29. Mapa de Regiones Hidrológicas Administrativas de México (SEMARNAT, 2010)

3.2 Características generales

3.2.1 Clima

Los tipos de clima que existen dentro de la zona de estudio son:

- Cálido húmedo: Se caracteriza por presentar poca oscilación térmica, tanto a lo largo del día como en el transcurso del año, esto significa que la diferencia entre la menor temperatura del año o del día en relación con la mayor, está por debajo de los 10 °C. (CONAVI, 2021)
- Cálido Subhúmedo: El clima cálido subhúmedo tiene una temperatura media anual por encima de los 20 °C, y suele presentar poca oscilación térmica durante el día, sin embargo, tiene una estación de lluvias definida comúnmente en los meses de verano con una temperatura de 22 °C aproximadamente, y una temporada invernal seca con una temperatura mayor a los 18 °C. (CONAVI, 2021)
- Semicálido húmedo: Se encuentra en altitudes intermedias, con temperaturas más moderadas y lluvias abundantes, especialmente en verano. La vegetación típica incluye bosques mesófilos de montaña. (CONAVI, 2021)
- Templado húmedo: Se presenta una temperatura media anual cercana a los 15 °C, y se observa una oscilación térmica de aproximadamente 5 °C a lo largo de todo el año, por lo que las condiciones ambientales se mantienen muy similares tanto en la época invernal como en los meses correspondientes a la primavera y verano. (CONAVI, 2021)

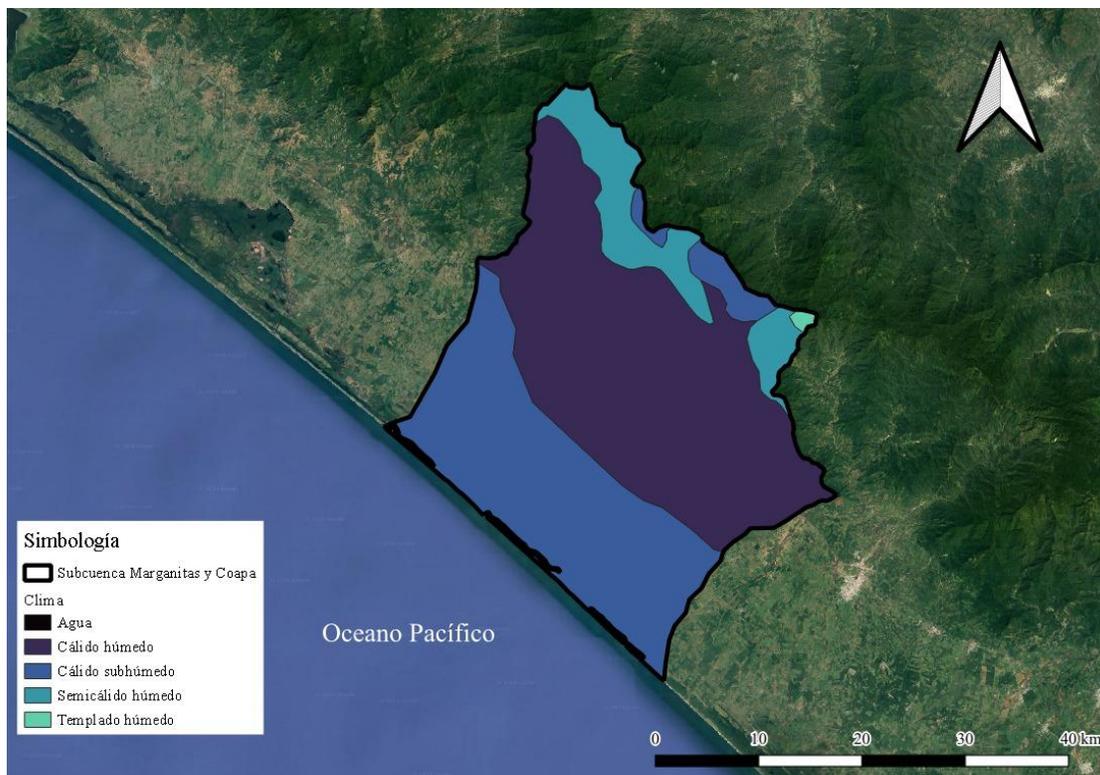


Figura 30. Mapa de clima en Chiapas (INEGI, 2025)

3.2.2 Hidrografía

La Región Hidrológica a la que pertenece la zona es RH23 “Costa de Chiapas”. La subcuenca de interés pertenece a la cuenca Río Pijijiapan y otros. Cuenta con un área de 2,925 km² y tiene seis ríos principales que son: Margaritas, Coapa, Pijijiapan, San Diego, El Porvenir, Jesús y Laguna La Joya, estos nacen en el parteaguas de la Sierra Madre entre 10 y 30 Km de distancia de la Planicie Costera, en altitudes entre 2,000 y 2,480 m.s.n.m. desembocando en la misma en temporada de lluvias. (CONAGUA, 2014).



Figura 31. Cuencas hidrológicas de Costa de Chiapas (INEGI, 2025)

3.2.3 Uso de suelo y vegetación

En la cuenca Margarinas y Coapa se encuentran 6 tipos de vegetación, entre los que están: tular, manglar, palmar inducido, pastizal, vegetación secundaria y bosque mesófilo de montaña. Entre los usos a los que se destina el suelo están: agricultura y asentamientos humanos (INEGI, 2025).

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

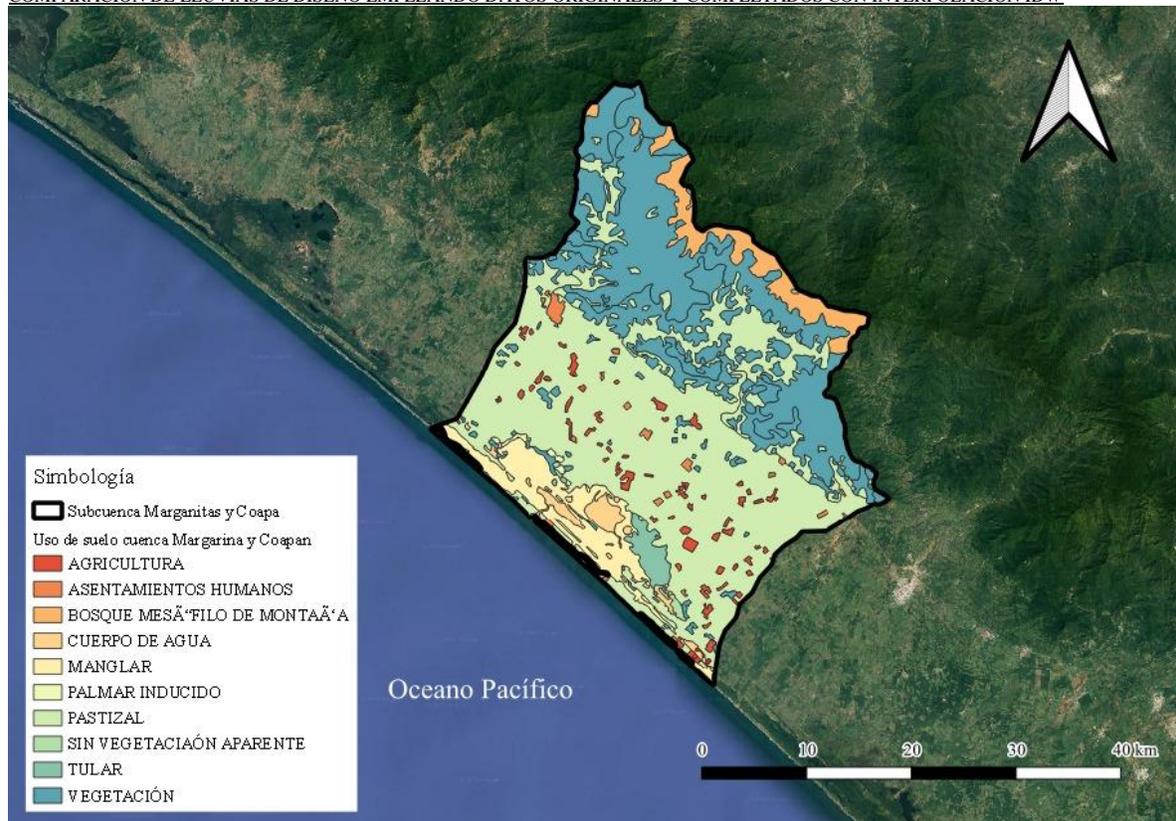


Figura 32. Mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI,2025).

3.2.4 Tipo de suelo

Los tipos de suelo más relevantes en la subcuenca son: leptosol, regosol y cambisol. Mientras que la textura que predomina dentro de la subcuenca es del tipo 1, lo que significa una mayor existencia de arenas; siguiendo el tipo 2, que representa los limos, y finalmente el tipo 3, que representa las arcillas.



| Clave del suelo | Nombre del suelo | Textura | Porcentaje de área % |
|------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------|
| GL | Gleysol | 2 | 9.10 |
| LP | Leptosol | 1 | 29.60 |
| FL | Fluvisol | 1 | 2.26 |
| LV | Luvisol | 3 | 3.71 |
| RG | Regosol | 1 | 28.48 |
| AR | Arenosol | 1 | 0.90 |
| CM | Cambisol | 2 | 21.07 |
| SC | Solonchak | 3 | 3.88 |
| NA | No aplica | NA | 1.00 |

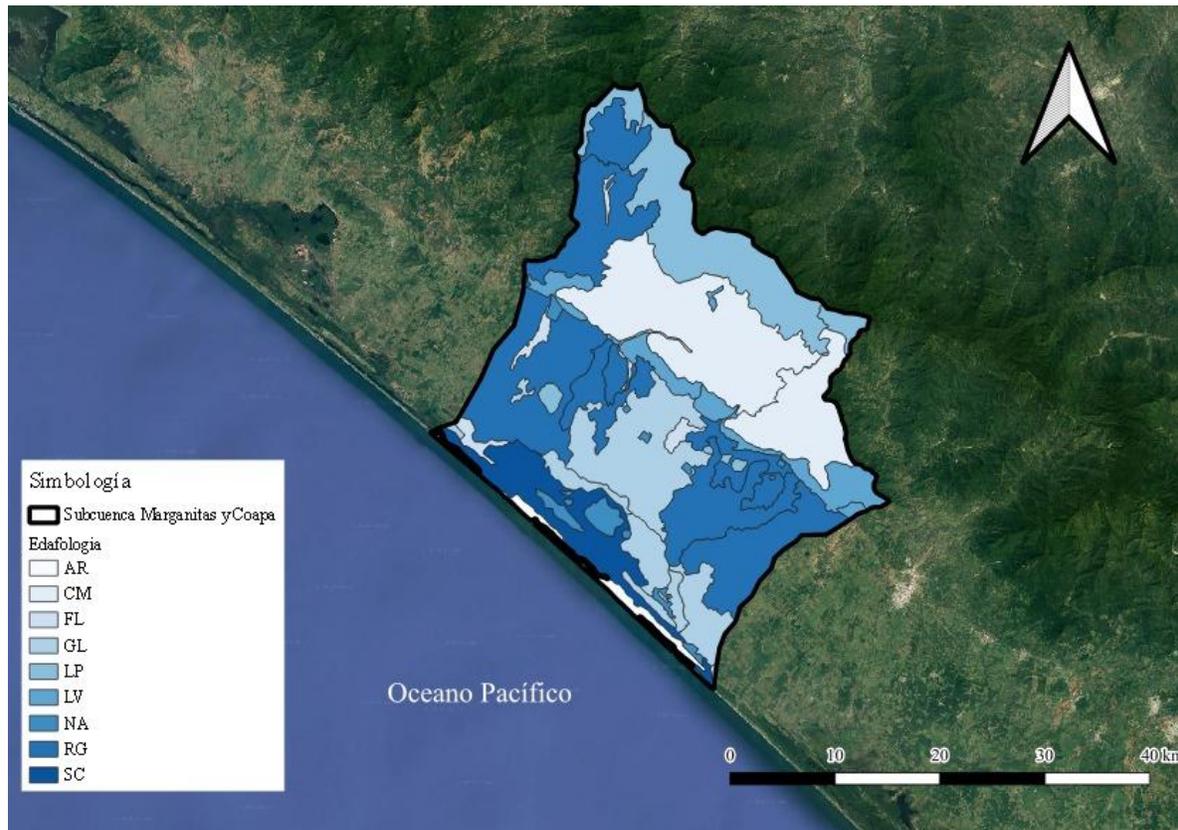


Figura 33 . Mapa de tipo de suelo, elaboración propia con información de INEGI (2025)

3.3 **Eventos climatológicos de importancia**

Los datos utilizados fueron las precipitaciones máximas anuales registrados en las estaciones climatológicas convencionales proporcionadas por CONAGUA a través del Sistema de Información Estadística Climatológica, adicionalmente el estudio considero los últimos 38 años a partir del 2020; en otras palabras, se tiene un rango a partir del año 1982 al año 2020. Dentro de este rango de datos se cuenta con la presencia de fenómenos climatológicos de los cuales destaca el huracán “Mitch” en 1998 (Tabla 5) por el impacto que tuvo sobre el pueblo de Valdivia, cabe decir que el Servicio Meteorológico Nacional solo dispone de ciclones tropicales a partir del año 1997 (Figura 34).

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

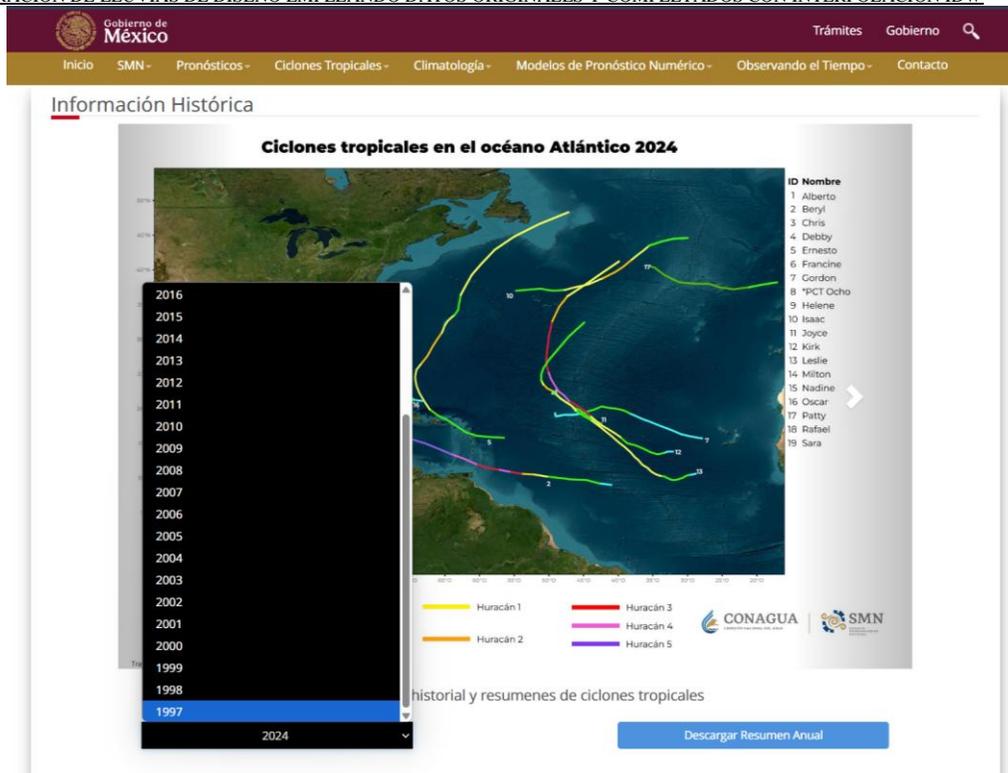


Figura 34. Ciclones tropicales proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2025)

La localidad de Valdivia era un pueblo de aproximadamente 4 mil personas, que se encontraba al sur de México dentro del municipio de Mapastepec, cerca del río Novillero dentro de la cuenca Margaritas y Coapa en Chiapas. El pueblo contaba con un área de 2.5 km², considerada una de las localidades más grandes de Mapastepec. Dentro del pueblo se tenían iglesias, clínicas, áreas deportivas y escuelas. Valdivia desapareció por el desbordamiento de los ríos Novillero y Las Arenas como consecuencia del aumento de lluvias del huracán Mitch de categoría 5 en 1998, el lugar sufrió pérdidas humanas y daños a la infraestructura lo que provocó el abandono, transformándolo en un pueblo fantasma, este fenómeno provocó un incremento en el río Novillero.

El huracán Mitch comenzó su formación como depresión tropical el 21 de octubre de 1998 al Sur del Mar Caribe, tuvo una duración de aproximadamente 305 horas desde su formación. En la mañana del 26 de octubre mientras se desplazaba hacia el oeste, alcanzó la categoría 5 en escala de intensidad Saffir-Simpson con vientos máximos de $250 \frac{Km}{h}$ y rachas de $305 \frac{Km}{h}$, alcanzando en las últimas horas del día su máxima intensidad con vientos máximos de $285 \frac{Km}{h}$, el 28 de octubre se debilitó a huracán de categoría 3, después, el 29 de octubre bajó a categoría 1. Los remanentes del huracán "Mitch" siguieron desplazándose hacia el Norte, el día 3 de noviembre los restos interactuaron con una baja presión en el Golfo de México, donde se desarrollaron a tormenta tropical por segunda vez en su trayectoria. Finalmente, el día 5 en la madrugada, "Mitch" cruzó sobre la parte Sur de la Península de La Florida, en el Sureste de los Estados Unidos, al atardecer, mientras se internaba rápidamente en aguas del Atlántico Norte, "Mitch" empezó a debilitarse, ahora con vientos máximos de 90 km/h y rachas de 110 km/h. Al final del día, se convirtió en ciclón extratropical. (CONAGUA, SMN, 2009)

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

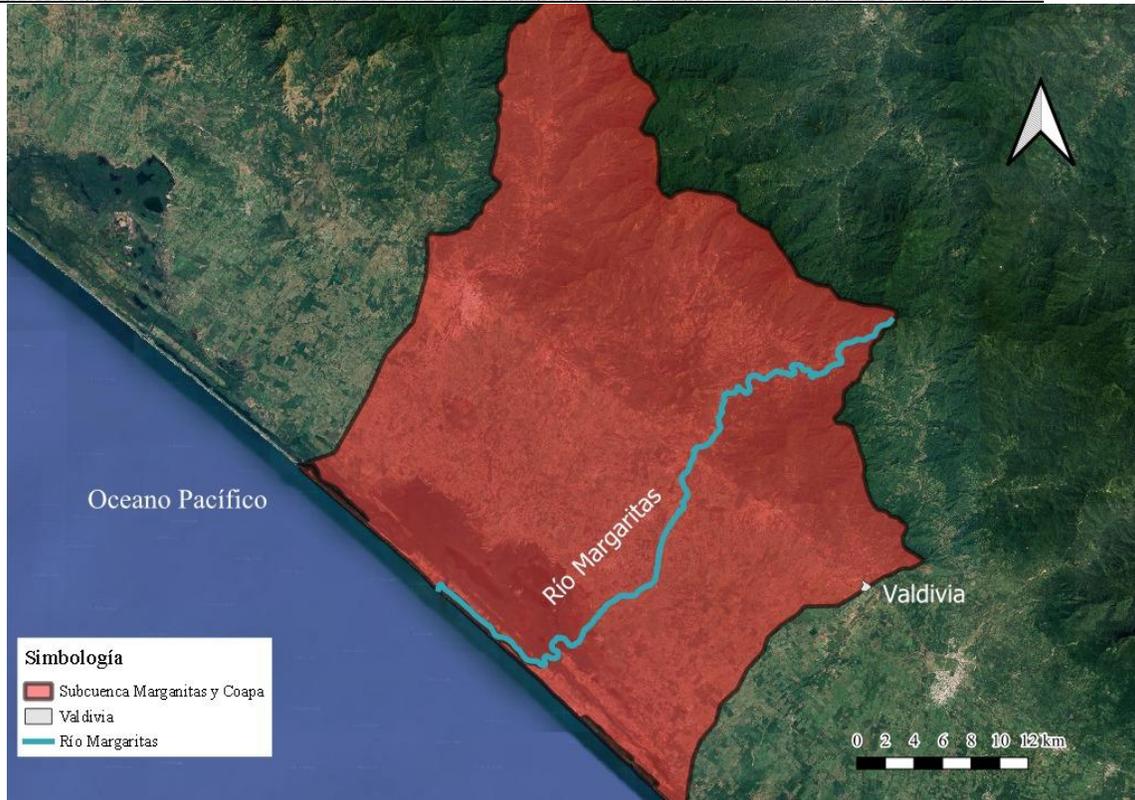


Figura 35. Subcuenca Margaritas y Coapa, río Margaritas y Valdivia (INEGI, 2025)

“Mitch” fue catalogado desde los primeros avisos del SMN como un huracán extremadamente peligroso y el más intenso en los últimos diez años. El hecho de permanecer estacionado en las cercanías de las costas durante 18 horas seguidas con sus bandas nubosas afectando en territorio continental, después por casi 48 horas sobre territorio de Honduras y posteriormente 24 horas sobre Guatemala, dio lugar a lluvias torrenciales en varios estados del Sureste de México, Belice, Honduras, Nicaragua, El Salvador y Guatemala, con inundaciones, desgajamiento de cerros, desbordamiento de ríos y en general, graves daños en estos países de Centroamérica. La máxima acumulación de lluvia en 24 horas en el territorio nacional fue de 341 mm el día 2 de noviembre en Campeche. (CONAGUA, SMN, 2009).

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

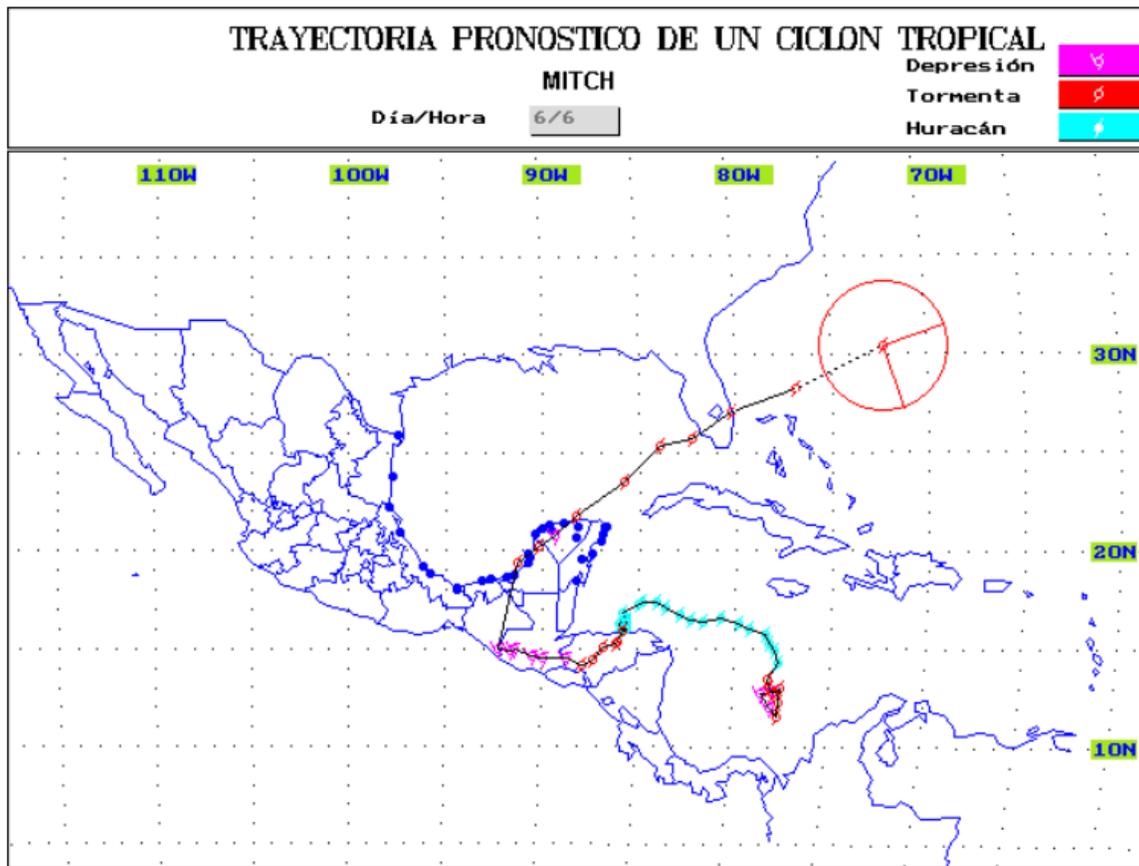


Figura 36. Trayectoria del huracán "Mitch" 1998 (CONAGUA, SMN, 2009)



Figura 37. Inundación de Valdivia en 1998 (Todos Somos Mastepec, 2014)



| Fenómeno | Fecha | DESCRIPCIÓN |
|------------------------|--------------|--|
| Huracán Rick | 1997 | Precipitación de 243 [mm] |
| Huracán Mitch | 1998 | Precipitación de 341 [mm] categoría 5 |
| Huracán Chantal/Iris | 2001 | Precipitación de 211 [mm] / 122 [mm] |
| Huracán Stan | 2005 | Precipitación de 307 [mm] intensidad máxima de 130 [km/h] |
| Huracán Barbara | 2007 | Precipitación de 126 [mm] |
| Huracán Matthew/Agatha | 2010 | Precipitación de 257.2 [mm] / 131.7 [mm] |
| Huracán Harvey | 2011 | Precipitación de 198 [mm] con intensidades máximas de 95-110 [km/h] |
| Tormenta severa | 2015 | Se presentó viento, lluvia y granizo obligando a los habitantes a tener que tomar medidas de resguardo |
| Huracán Ramon | 2017 | Precipitación de 246.4 [mm] con intensidades máximas de 95-110 [km/h] |
| Huracán Carlotta | 2018 | Precipitación de 77 [mm] con intensidades máximas de 100-120 [km/h] |
| Huracán Gamma | 2020 | Precipitación de 268.8[mm] |

3.4 Interpolación de datos

Se analizaron 29 EC en un radio de 80 kilómetros alrededor de la cuenca (Figura 38), todas esas estaciones cuentan con un registro mínimo de 30 años de información a lo largo de su vida, evitando las estaciones climatológicas que puedan interferir en la interpolación como se ha mencionado anteriormente, como lo son estaciones climatológicas sin valores registrados. Realizando interpolaciones para los años con fenómenos relevantes (Tabla 5) entre los años 1982 a 2020.

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

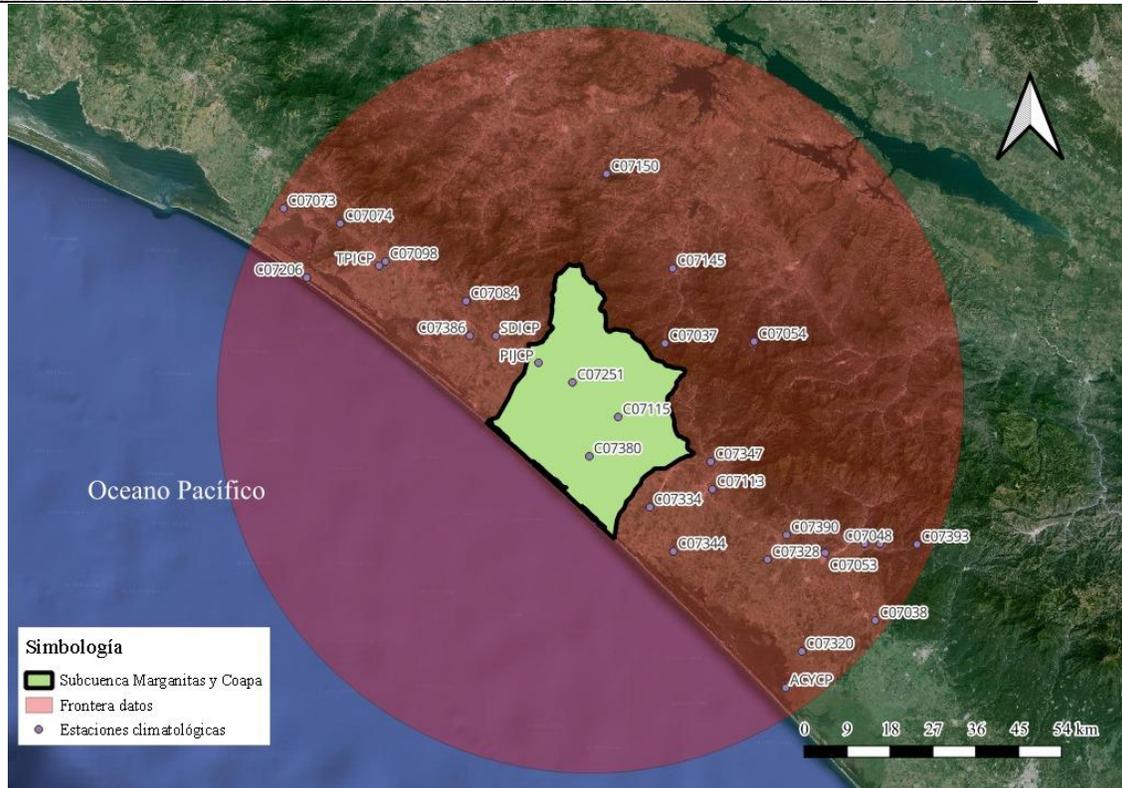


Figura 38. Estaciones climatológicas vecinas con la cuenca de estudio

Se trazaron polígonos de Thiessen (Figura 39) y se observó que de las 29 estaciones climatológicas, ocho tienen influencia en la zona de estudio. Las distancias de cada estación climatológica al centro de la cuenca son las mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6. Distancias entre el centro de la cuenca a las estaciones seleccionadas

| Punto A | Punto B | Distancia en metros |
|---------------------|---------|---------------------|
| Centro de la cuenca | C07115 | 7,346.69 |
| Centro de la cuenca | C07380 | 8,459.67 |
| Centro de la cuenca | PIJCP | 14,657.81 |
| Centro de la cuenca | C07037 | 23,024.74 |
| Centro de la cuenca | C07334 | 23,660.59 |
| Centro de la cuenca | C07347 | 28,420.02 |

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

| Punto A | Punto B | Distancia en metros |
|---------------------|---------|---------------------|
| Centro de la cuenca | C07145 | 36,322.41 |
| Centro de la cuenca | C07054 | 39,189.29 |

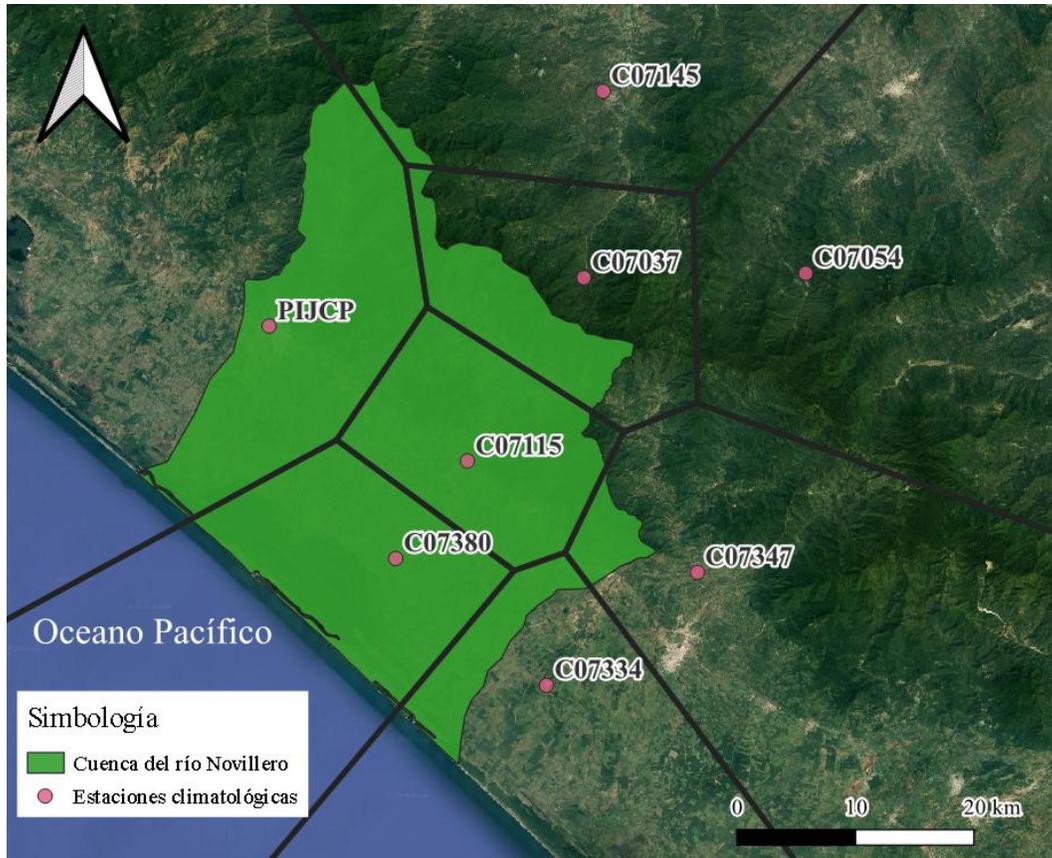


Figura 39. Polígonos de Thiessen de las estaciones climatológicas vecinas con la cuenca de estudio

Tabla 7. Características de las estaciones climatológicas. Latitud y longitud en grados, cota en metros sobre el nivel del mar y precipitación en milímetros.

| Clave | PIJCP | C07380 | C07115 | C07334 | C07037 | C07145 | C07347 | C07054 |
|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Latitud. | 15.6 | 15.5 | 15.5 | 15.4 | 15.7 | 15.8 | 15.5 | 15.7 |
| Longitud. ° | -93.2 | -93.1 | -93.0 | -93.0 | -92.9 | -92.9 | -92.8 | -92.7 |



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

| Clave | PIJCP | C07380 | C07115 | C07334 | C07037 | C07145 | C07347 | C07054 |
|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cota. m.s.n.m | 38.0 | 10.0 | 90.0 | 25.0 | 1550 | 540.0 | 130.0 | 1040 |
| Datos | 39 | 26 | 24 | 24 | 33 | 30 | 26 | 26 |
| Pmax. mm | 274 | 358 | 341 | 300 | 513 | 200 | 552 | 300 |
| Año Pmax | 1998 | 1998 | 1998 | 1998 | 2005 | 2014 | 2005 | 2005 |
| Pmin. mm | 56 | 60 | 64 | 54 | 57 | 52 | 55 | 44 |
| Año Pmin | 1984 | 1996 | 2002 | 1982 | 2000 | 1989 | 2012 | 2002 |
| Pmed. mm | 126 | 137 | 129 | 118 | 126 | 96 | 121 | 109 |

Inicialmente se realizó una depuración de las estaciones que mostraban datos inconsistentes con respecto del comportamiento de las estaciones vecinas de acuerdo con la siguiente metodología:

- Se identificó la estación climatológica con un valor que sobresaliera a la vista. Como se puede observar en la Figura 40 que se tiene dos datos muy cercanos uno del otro; que tienen una diferencia considerable entre sí.



Figura 40. Precipitación máxima de las estaciones C07019 y CAHCP para el año 2005



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

- Una vez identificados los datos, se procede a realizar el análisis dentro de las precipitaciones diarias en cada estación. En el caso mostrado, el fenómeno meteorológico relacionado al 2005 fue el huracán “Stan” el cual tuvo una duración de 5 días, del primero al 5 de octubre de 2005. Entonces, se procede a revisar esas fechas en cada estación climatológica.

Tabla 8. Precipitaciones diarias del mes de octubre del 2005 para las estaciones C07019 y CAHCP

| Día | Mes | Año | Precipitación en mm | |
|-----|-----|------|---------------------|-------|
| | | | C07019 | CAHCP |
| 1 | 10 | 2005 | 68.5 | - |
| 2 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 3 | 10 | 2005 | 220 | - |
| 4 | 10 | 2005 | - | - |
| 5 | 10 | 2005 | - | - |
| 6 | 10 | 2005 | - | - |
| 7 | 10 | 2005 | 140 | - |
| 8 | 10 | 2005 | 15 | - |
| 9 | 10 | 2005 | 25.4 | - |
| 10 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 11 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 12 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 13 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 14 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 15 | 10 | 2005 | 3.5 | - |
| 16 | 10 | 2005 | 4.2 | - |



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

| Día | Mes | Año | Precipitación en mm | |
|-----|-----|------|---------------------|-------|
| | | | C07019 | CAHCP |
| 17 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 18 | 10 | 2005 | 4.5 | - |
| 19 | 10 | 2005 | 7.2 | - |
| 20 | 10 | 2005 | 37.2 | - |
| 21 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 22 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 23 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 24 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 25 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 26 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 27 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 28 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 29 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 30 | 10 | 2005 | 0 | - |
| 31 | 10 | 2005 | 0 | - |

- Como se puede observar, la estación de CAHCP no tiene precipitaciones registradas para esa fecha por lo que se selecciona el valor de 220 mm. Por otro lado, el valor de 110.5 mm de la estación CAHCP se localiza el día 24 de junio del 2005.



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

| Día | Mes | Año | Precipitación en mm |
|-----|-----|------|------------------------|
| | | | CAHCP |
| 24 | 6 | 2005 | 110.5 |

- De forma que el valor de 110.5 mm se descarta.

En la comparación de datos de precipitación se utilizaron dos series:

- Serie con datos originales omitiendo los datos faltantes en la serie
- Serie con datos originales y relleno de datos mediante interpolación IDW (interpolación del inverso de la distancia)

3.5 Interpolación IDW

Para realizar la interpolación de datos y relleno de datos se utilizó el método del U.S. National Weather Service (IDW). Mediante el software QGIS, se realizó la interpolación IDW (Ecuación 81) utilizando una franja común de 39 años (1982-2020) para todas las EC empleadas en este análisis, este periodo incluye eventos recientes y de magnitud de importancia. Una vez completada la interpolación, se dividió la información en 2 series para cada estación: serie con datos originales y serie con relleno de datos interpolados.

Se realizó la depuración mencionada en el capítulo 3.4 “Interpolación de datos” con la finalidad de evitar incongruencias en los resultados de la interpolación, adicionalmente, se tuvo el cuidado de que el programa no realizara extrapolaciones, de manera que al momento de interpolar se tendrá un rango de datos que no superaría los datos originales de las estaciones, en otras palabras, la interpolación no podrá tener como resultado un valor mayor a un valor máximo ya definido por la estación climatológica con el mayor valor dentro de la zona, de igual forma no se podrá tener un valor menor al mínimo, limitando con este rango los valores supuestos que resultan de la interpolación.



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

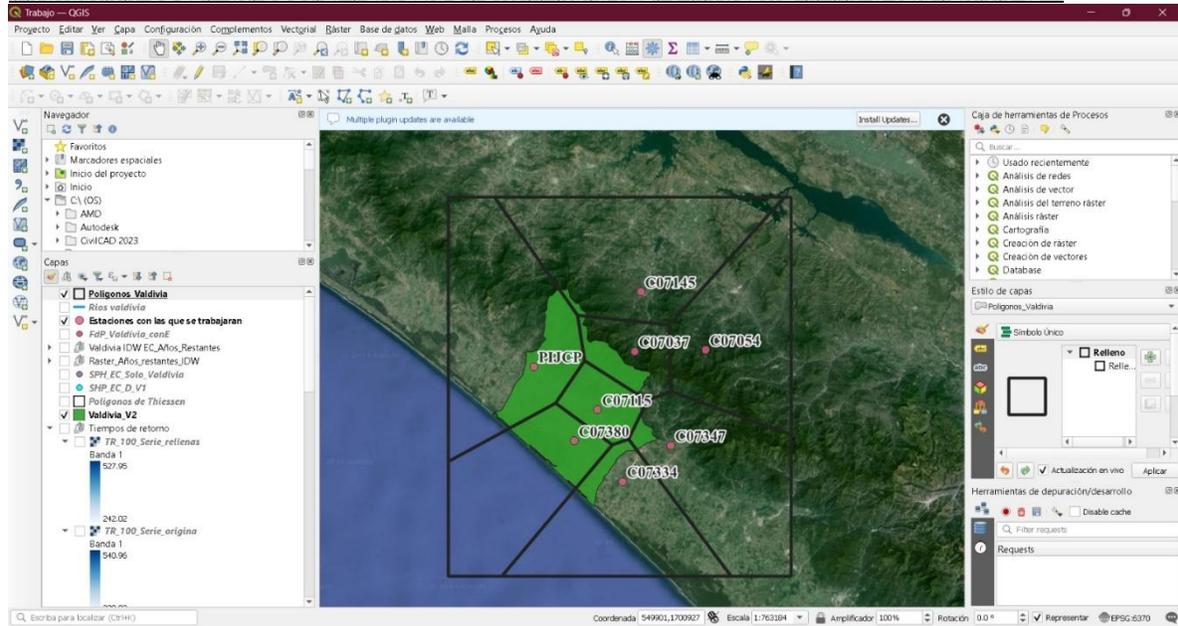


Figura 41. Mapa antes de realizar una interpolación

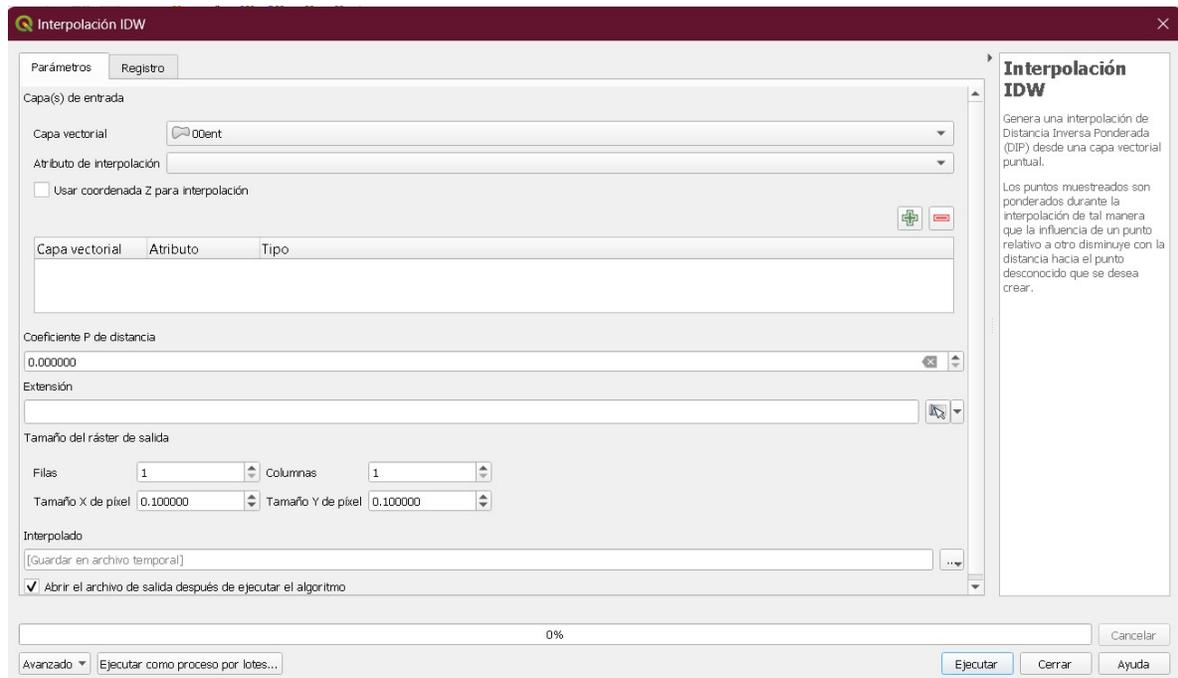


Figura 42. Interfaz de la interpolación IDW en el programa QGIS

La herramienta Interpolación IDW de QGIS considera las siguientes variables:

- Capa de entrada: En este apartado se coloca la capa vectorial la cual tiene las variables que se desean interpolar. Por ejemplo, en el caso de estudio fue la capa que contenía la información de las estaciones climatológicas.

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

- Atributo de interpolación: Aquí se coloca la variable a interpolar contenida en la capa de entrada. En este caso las variables a interpolar fueron las precipitaciones máximas de cada año.
- Coeficiente P de distancia: Hace referencia a la ponderación dada por las distancias. Entre mayor sea su valor, se incrementa la influencia de puntos más cercanos. En las interpolaciones realizadas se utilizó un valor de P igual a dos.
- Extensión: Esta opción está relacionada con el tamaño de la capa de salida.
- Tamaño ráster de salida: En este parámetro podemos definir las dimensiones del tamaño del pixel de la capa resultado. Se utilizó un tamaño de pixel de 300 x 300.
- Interpolado: Finalmente se le asigna un nombre a la capa de salida.

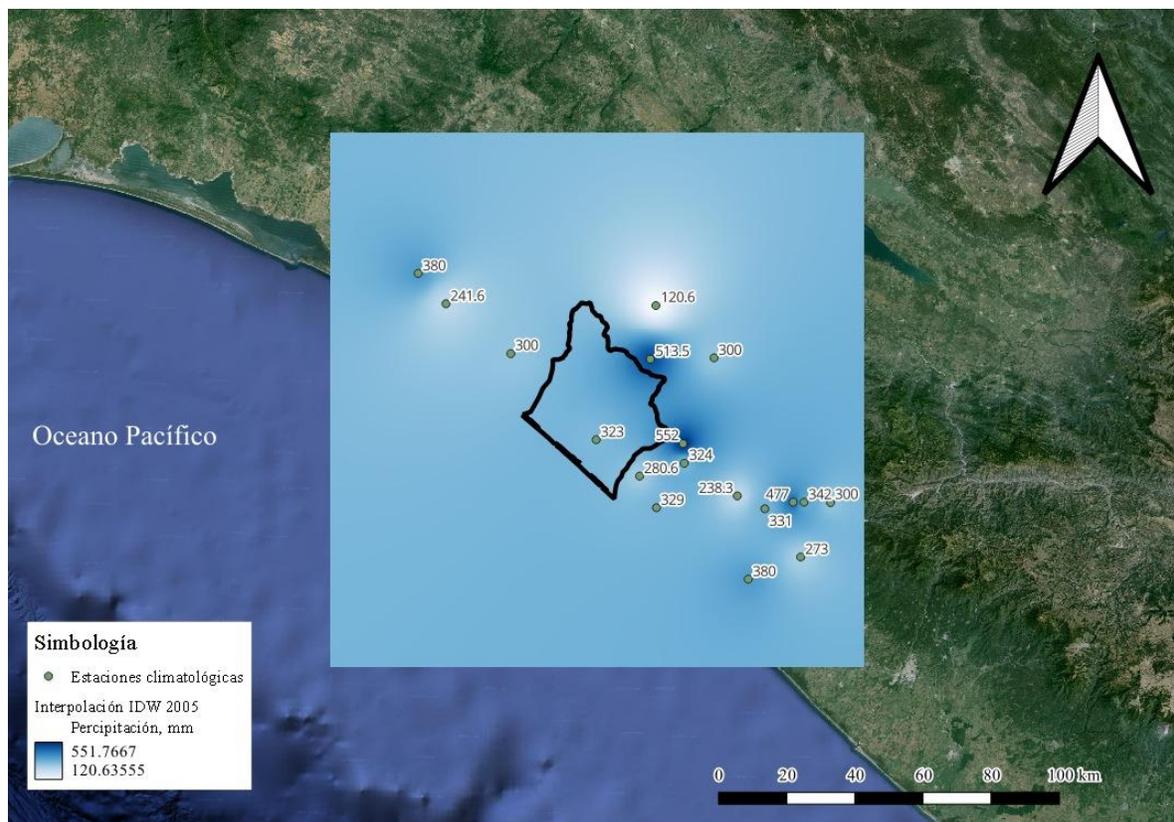


Figura 43. Ejemplo de la interpolación IDW en 2005

Este tipo de interpolación se aplicó a los años donde ocurrieron fenómenos climatológicos relevantes que afectaron a la zona (Tabla 5), en total se obtuvieron 11 rásters. Se utilizaron diferentes estaciones para cada año, esto porque se realizó utilizando los datos que tuvieran un valor para ese año, en otras palabras, si la estación no contaba con un valor, no se utilizaba para realizar la interpolación, es por eso por lo que para algunos años se utilizaron más estaciones climatológicas que en otros años.



Tabla 9. Características de las estaciones climatológicas. Latitud y longitud en grados, cota en metros sobre el nivel del mar y precipitación en milímetros

| Serie original | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Clave | PIJCP | C07380 | C07115 | C07334 | C07037 | C07145 | C07347 | C07054 |
| Latitud. | 15.6 | 15.5 | 15.5 | 15.4 | 15.7 | 15.8 | 15.5 | 15.7 |
| Longitud. ° | -93.2 | -93.1 | -93.0 | -93.0 | -92.9 | -92.9 | -92.8 | -92.7 |
| Cota. m.s.n.m | 38.0 | 10.0 | 90.0 | 25.0 | 1550 | 540.0 | 130.0 | 1040 |
| Datos | 39 | 26 | 24 | 24 | 33 | 30 | 26 | 26 |
| Pmax. mm | 274 | 358 | 341 | 300 | 513 | 200 | 552 | 300 |
| Año Pmax | 1998 | 1998 | 1998 | 1998 | 2005 | 2014 | 2005 | 2005 |
| Pmin. mm | 56 | 60 | 64 | 54 | 57 | 52 | 55 | 44 |
| Año Pmin | 1984 | 1996 | 2002 | 1982 | 2000 | 1989 | 2012 | 2002 |
| Pmed. mm | 126 | 137 | 129 | 118 | 126 | 96 | 121 | 109 |
| Serie con relleno de datos | | | | | | | | |
| Clave | PIJCP | C07380 | C07115 | C07334 | C07037 | C07145 | C07347 | C07054 |
| Datos | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 |
| Pmax. mm | 274 | 358 | 352 | 300 | 513 | 200 | 552 | 300 |
| Año Pmax | 1998 | 1998 | 2005 | 1998 | 2005 | 2014 | 2005 | 2005 |
| Pmin. mm | 56 | 60 | 64 | 54 | 57 | 52 | 55 | 44 |
| Año Pmin | 1984 | 1996 | 2002 | 1982 | 2000 | 1989 | 2012 | 2002 |
| Pmed. mm | 126 | 134 | 140 | 124 | 125 | 99 | 132 | 115 |

3.6 Interpolación Kriging ordinario

Se realizó la interpolación Kriging ordinario aplicando las mismas condiciones de depuración y selección a las estaciones climatológicas que se utilizaron en la interpolación IDW, con el fin de analizar las diferentes interpolaciones partiendo de la misma información proporcionada, al mismo tiempo, se tuvo el mismo cuidado que en la interpolación IDW evitando lo anteriormente dicho, como extrapolaciones y mantener los resultados dentro de un rango. De igual forma se realizó la interpolación mediante SIG.

La herramienta Ordinary Kriging de QGIS considera las siguientes variables:

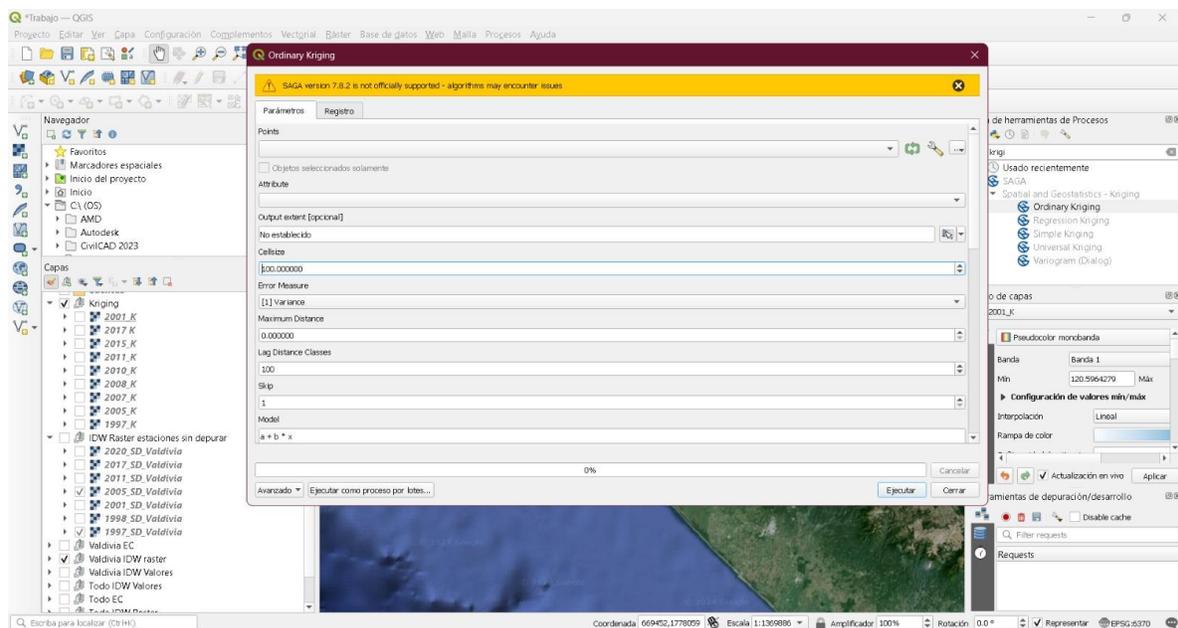


Figura 44 . Interfaz de la interpolación Kriging en el programa QGIS

- Puntos: En este apartado se coloca la capa de entrada que contenga las variables que se desean interpolar.
- Atributo: Aquí se coloca la variable a interpolar en contenida en la capa de entrada.
- Variograma: Los principales modelos de variograma son:
 - Modelo esférico
 - Modelo exponencial
 - Modelo gaussiano
 - Modelo Lineal
- Radio de búsqueda: Controla la cantidad de puntos usados en la interpolación

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

- Número de vecinos: Define cuantos puntos se consideran para estimar cada celda
- Tamaño de celda: Es la resolución de la capa salida
- Extensión: Esta opción está relacionada con el tamaño de la capa de salida.

Las interpolaciones realizadas mediante Kriging ordinario, se utilizaron los valores predeterminados que proporciona el software.

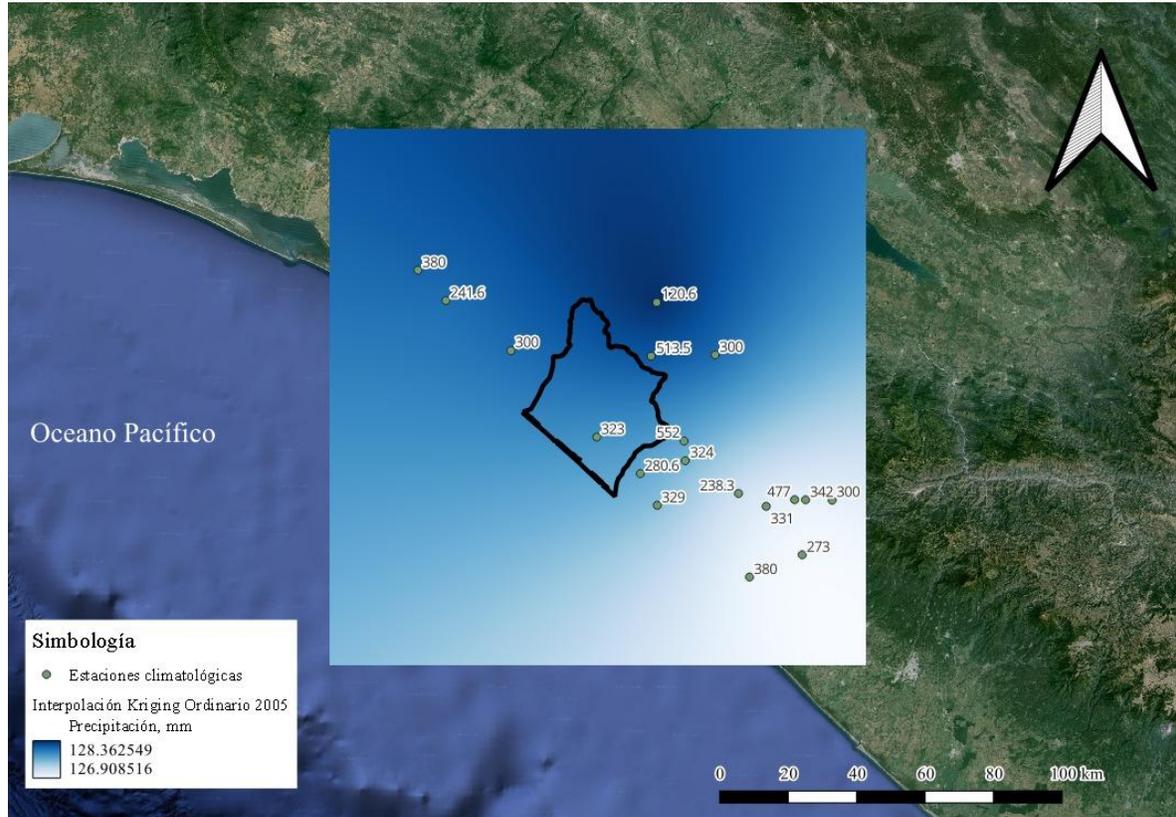


Figura 45. Ejemplo de la interpolación Kriging ordinario en 1998

Esta interpolación se descartó debido a los rangos obtenidos. Al momento de comparar visualmente la interpolación IDW con la interpolación Kriging se puede notar la diferencia, mientras que la interpolación IDW nos da resultados en límites que no superan los máximos y los mínimos de cada año, la interpolación Kriging presenta rangos muy reducidos que a pesar de que estos no son mayores ni menores a los máximos y mínimos de cada año, estos parecen limitar la información obtenida, de manera que en algunas ocasiones se pueden tener valores muy bajos cerca de estaciones donde el valor original es mayor.



4 Análisis de resultados

Aplicando la metodología IDW se obtuvieron los siguientes resultados que se desglosan en los siguientes subcapítulos.

4.1 *Datos originales y con relleno*

Analizando las precipitaciones máximas y mínimas para ambas series de datos de las estaciones más cercanas a la cuenca de Margaritas y Coapa, se puede observar que para ambas series la mayor parte de las precipitaciones máximas se encuentran en los años de ocurrencia de fenómenos meteorológicos, por un lado, para la serie original las precipitaciones máximas se encuentran en su mayoría en el año 1998, mientras que para las series con relleno de datos se encuentran en el año 2005, ambos años tuvieron fenómenos meteorológicos relevantes. En cuanto a las precipitaciones mínimas de todos los años estas se presentan en fechas donde no se tuvieron fenómenos meteorológicos relevantes. En la Tabla 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Cabe mencionar que los errores obtenidos mediante la ecuación al comparar ambas series, la serie de datos rellenados contra los datos originales fueron menores al 10%, tomando la serie original como referencia.



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

Tabla 10. Características de las estaciones climatológicas. Latitud y longitud en grados, cota en metros sobre el nivel del mar y precipitación en milímetros

| Serie original | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Clave | PIJCP | C07380 | C07115 | C07334 | C07037 | C07145 | C07347 | C07054 |
| Latitud. | 15.6 | 15.5 | 15.5 | 15.4 | 15.7 | 15.8 | 15.5 | 15.7 |
| Longitud. ° | -93.2 | -93.1 | -93.0 | -93.0 | -92.9 | -92.9 | -92.8 | -92.7 |
| Cota. m.s.n.m | 38.0 | 10.0 | 90.0 | 25.0 | 1550 | 540.0 | 130.0 | 1040 |
| Datos | 39 | 26 | 24 | 24 | 33 | 30 | 26 | 26 |
| Pmax. mm | 274 | 358 | 342 | 300 | 513 | 200 | 552 | 300 |
| Año Pmax | 1998 | 1998 | 1998 | 1998 | 2005 | 2014 | 2005 | 2005 |
| Pmin. mm | 56 | 60 | 64 | 54 | 57 | 52 | 55 | 44 |
| Año Pmin | 1984 | 1996 | 2002 | 1982 | 2000 | 1989 | 2012 | 2002 |
| Pmed. mm | 126 | 137 | 129 | 118 | 126 | 96 | 121 | 109 |
| Serie con relleno de datos | | | | | | | | |
| Clave | PIJCP | C07380 | C07115 | C07334 | C07037 | C07145 | C07347 | C07054 |
| Datos | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 |
| Pmax. mm | 274 | 358 | 352 | 300 | 513 | 200 | 552 | 300 |
| Año Pmax | 1998 | 1998 | 2005 | 1998 | 2005 | 2014 | 2005 | 2005 |
| Pmin. mm | 56 | 60 | 64 | 54 | 57 | 52 | 55 | 44 |
| Año Pmin | 1984 | 1996 | 2002 | 1982 | 2000 | 1989 | 2012 | 2002 |
| Pmed. mm | 126 | 134 | 140 | 124 | 125 | 99 | 132 | 115 |



4.2 Análisis de frecuencias

Finalmente, se ajustaron diferentes funciones de distribución de probabilidad, las cuales fueron: Gamma (2P-M, 2P-MV, 3P-M, 3P-MV), Normal (2P-M-ML), Gumbel (2P-M, 2P-MV), Gumbel-Gumbel y LogNormal (2P-M-MV, 3P-M, 3P-MV) (Chow, Maidment, & Mays, 1994) y se seleccionó la que mostró el menor error estándar de ajuste, EEA (Ecuación 84 y Tabla 11). La precipitación estimada (acumulada en 24 horas) se transformó en lluvia diaria mediante un factor de 1.13, debido al intervalo fijo de observación (Campos, 2010).

$$EE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_a - P)^2}{n - mp} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 84}$$

Tabla 11. Tormentas de diseño, mm.

| Clave | Serie original | | Serie con relleno de datos | |
|---------------|----------------|---------|----------------------------|---------|
| | FDP | EE [mm] | FDP | EE [mm] |
| PIJCP | Gum-Gum | 8.10 | Gum-Gum | 8.10 |
| C07380 | Gamma 3P-M | 20.52 | Gum-Gum | 9.59 |
| C07115 | Gamma 3P-M | 17.93 | Gum-Gum | 5.12 |
| C07334 | Gamma 3P-M | 24.04 | Gum-Gum | 15.43 |
| C07037 | Gum-Gum | 25.39 | Gum-Gum | 20.82 |
| C07145 | Gum-Gum | 7.41 | Gumbel 2P-ML | 7.13 |
| C07347 | Gamma 3P-M | 50.40 | Gamma 3P-M | 52.91 |
| C07054 | Gamma 3P-M | 19.77 | Gum-Gum | 15.54 |

Como se puede observar de manera general la mayoría de las EC tuvieron un mejor ajuste con la FDP Gumbel-Gumbel la cual se considera que representa de mejor manera la presencia de huracanes en zonas costeras en México. Para el caso de la serie con relleno de datos se tiene un mejor ajuste a la FDP Gumbel-Gumbel pasando de ser tres estaciones las que tuvieron un menor error con la función de probabilidad, a ser seis de las ocho estaciones climatológicas que aportan a la cuenca.



4.3 Pruebas de calidad

Para verificar la calidad de la información se realizaron pruebas de independencia de eventos y homogeneidad de la serie de cada estación antes y después del relleno de datos con interpolación. Se utilizó la prueba de Anderson para verificar independencia de datos, y las pruebas de Helmert (H), T-Student (T-S) y Cramer (C) para verificar homogeneidad en el registro Posteriormente se obtuvieron las lluvias de diseño.(Campos, 2011).

Tabla 12. Pruebas de calidad

| Clave | Serie original | | Serie con relleno de datos | |
|--------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | Prueba de independencia | Pruebas de Homogeneidad | Prueba de independencia | Pruebas de Homogeneidad |
| PIJCP | Independiente | Homogénea (H, T-S) | Independiente | Homogénea (H, T-S) |
| C07380 | Independiente | Homogénea (H, T-S, C) | Independiente | Homogénea (H, T-S, C) |
| C07115 | Independiente | Homogénea (H, T-S, C) | Independiente | Homogénea (H, T-S, C) |
| C07334 | Independiente | Homogénea (H, T-S, C) | Independiente | Homogénea (H, T-S, C) |
| C07037 | Independiente | Homogénea (T-S) | Independiente | Homogénea (T-S, C) |
| C07145 | Independiente | Homogénea (T-S) | Independiente | Homogénea (H) |
| C07347 | Independiente | No homogénea | Independiente | Homogénea (H, T-S, C) |
| C07054 | Independiente | Homogénea (T-S) | Independiente | No homogénea |



4.4 Tormentas de diseño

La precipitación de diseño con datos originales y con datos completados mediante interpolación se muestra en las Tabla 13 y Tabla 14.

Tabla 13 Precipitación de diseño en mm a partir de la serie original

| | T-5 | T-10 | T-25 | T-50 | T-100 | T-500 | T-1000 |
|--------|-----|------|------|------|-------|-------|--------|
| PIJCP | 157 | 205 | 244 | 265 | 285 | 330 | 348 |
| C07380 | 188 | 238 | 304 | 354 | 404 | 521 | 572 |
| C07115 | 165 | 207 | 264 | 308 | 352 | 459 | 507 |
| C07334 | 158 | 202 | 261 | 307 | 354 | 465 | 514 |
| C07037 | 140 | 222 | 368 | 457 | 541 | 729 | 809 |
| C07145 | 123 | 150 | 183 | 207 | 230 | 284 | 307 |
| C07347 | 136 | 201 | 310 | 407 | 515 | 801 | 937 |
| C07054 | 136 | 172 | 222 | 262 | 303 | 402 | 447 |



Tabla 14 Precipitación de diseño en mm a partir de la serie con relleno de datos

| | T-5 | T-10 | T-25 | T-50 | T-100 | T-500 | T-1000 |
|--------|-----|------|------|------|-------|-------|--------|
| PIJCP | 157 | 205 | 244 | 265 | 285 | 330 | 348 |
| C07380 | 159 | 202 | 306 | 342 | 372 | 437 | 464 |
| C07115 | 169 | 208 | 343 | 348 | 351 | 360 | 365 |
| C07334 | 148 | 184 | 239 | 281 | 322 | 418 | 459 |
| C07037 | 139 | 185 | 367 | 422 | 470 | 572 | 616 |
| C07145 | 143 | 167 | 197 | 220 | 242 | 294 | 316 |
| C07347 | 165 | 229 | 334 | 426 | 528 | 796 | 923 |
| C07054 | 147 | 173 | 206 | 231 | 255 | 311 | 335 |

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

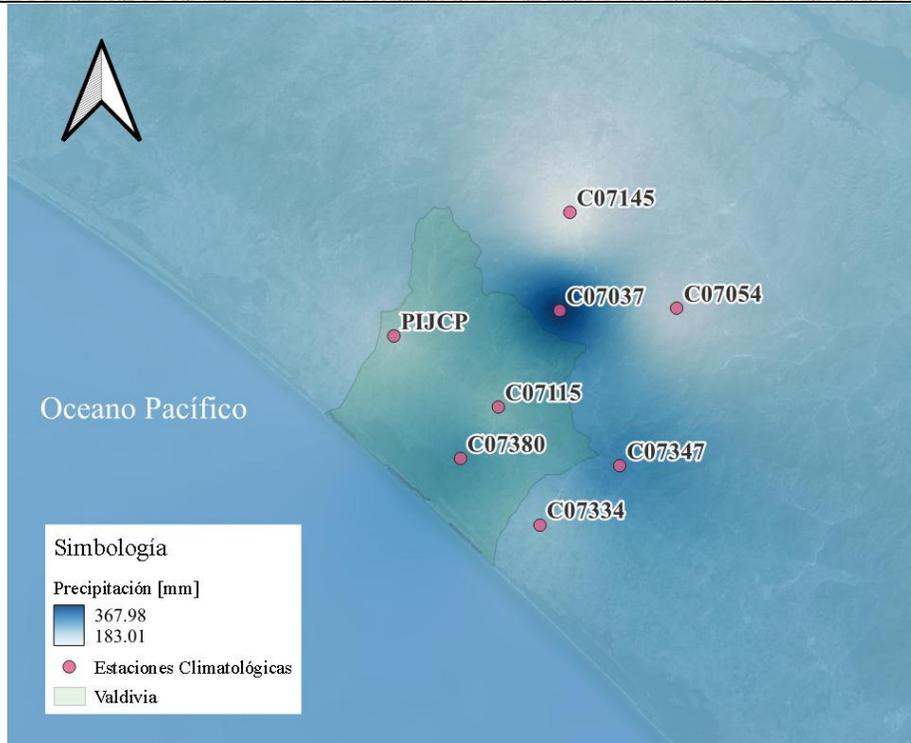


Figura 46. Mapas de lluvias. $T_r = 25$ años, serie original

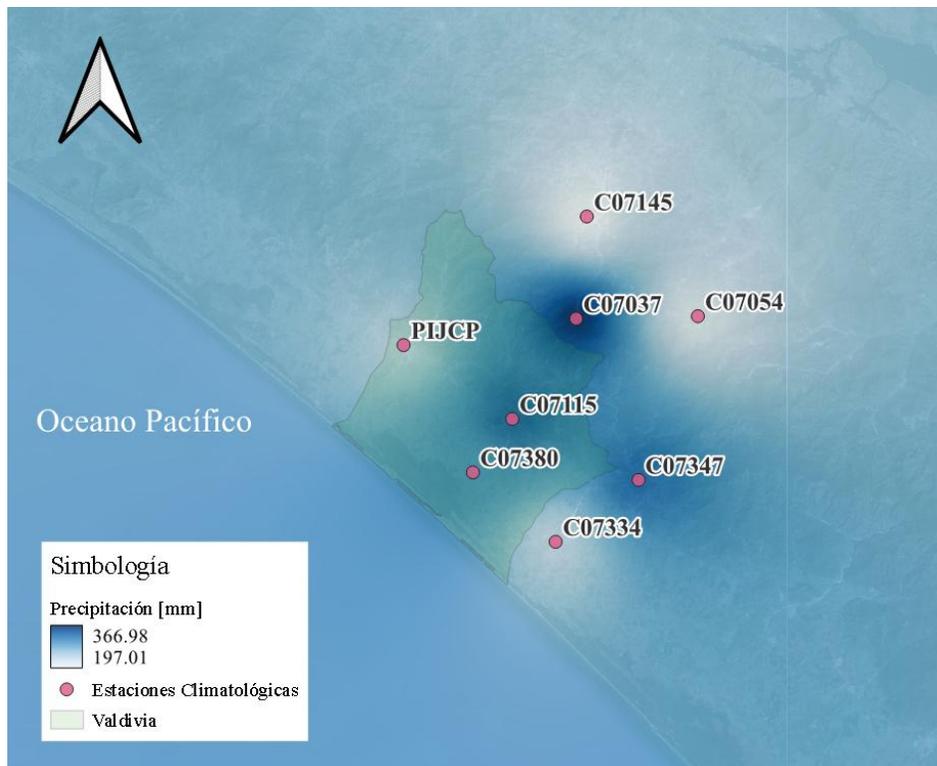


Figura 47. Mapas de lluvias. $T_r = 25$ años, serie con relleno de datos

COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

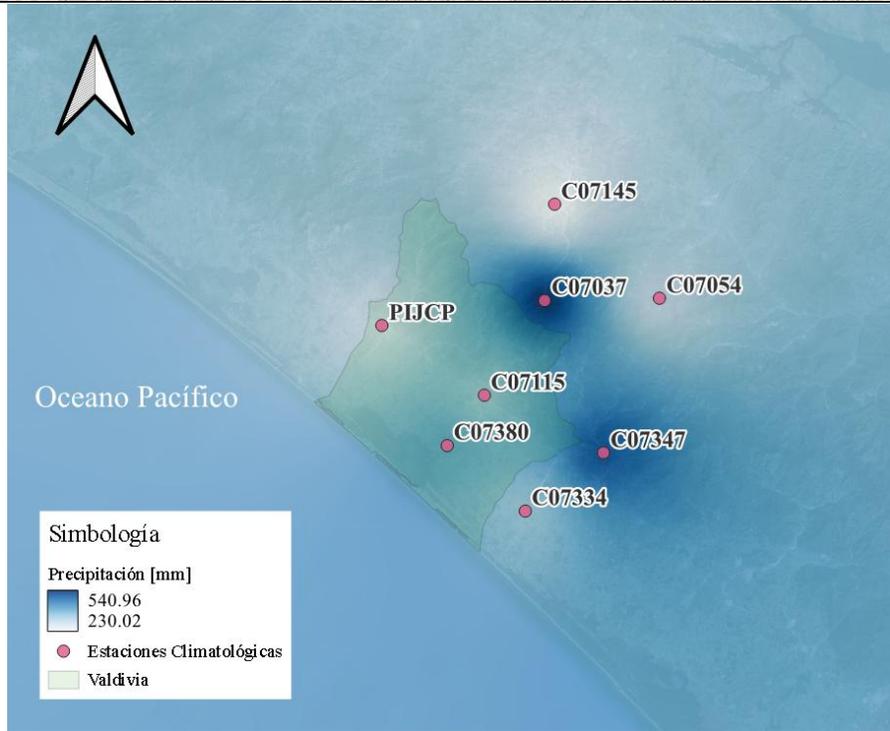


Figura 48. Mapas de lluvias. Tr = 100 años, serie original

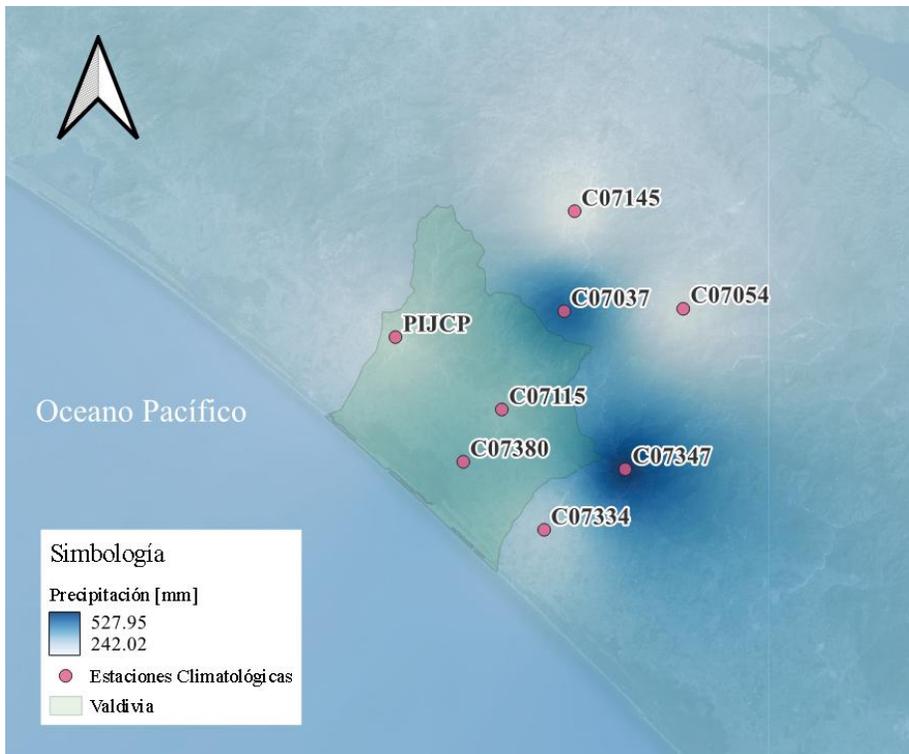


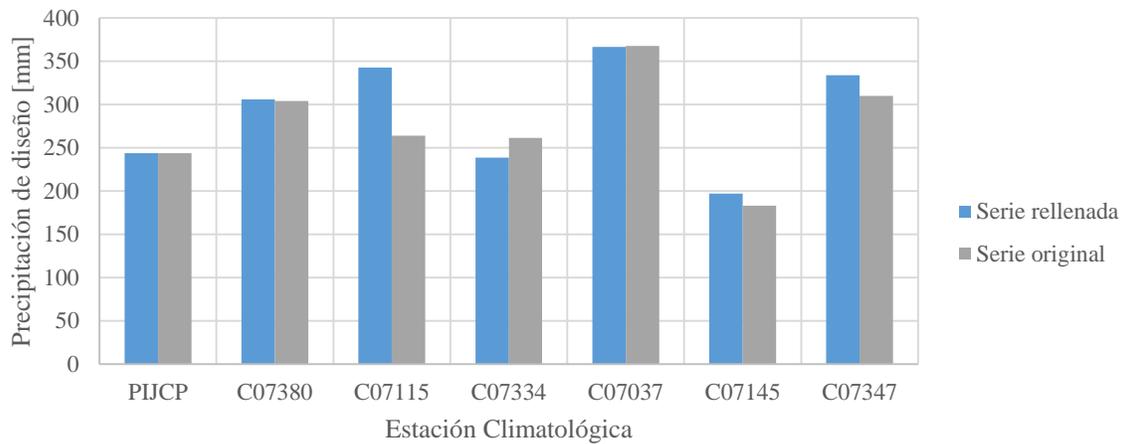
Figura 49. Mapas de lluvias. Tr = 100 años, serie con relleno de datos



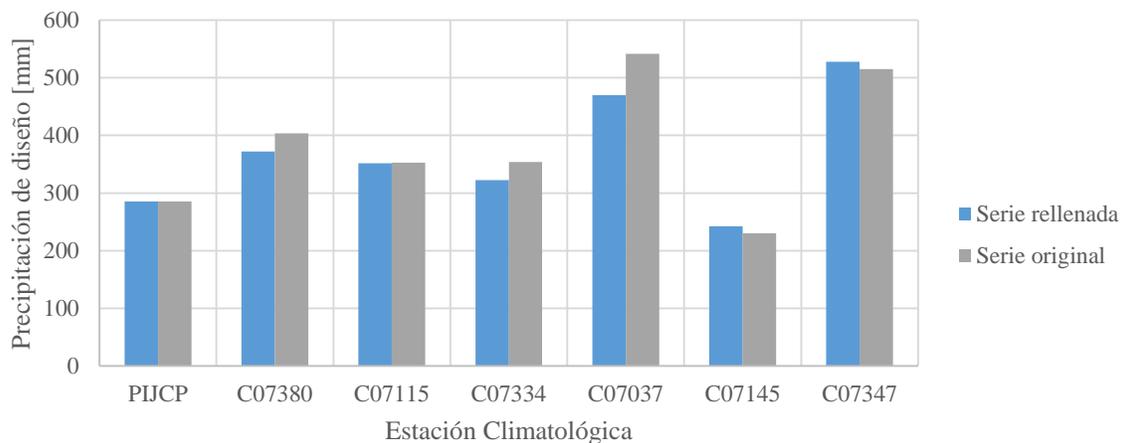
COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

De manera gráfica los resultados obtenidos en los eventos de diseño para cada estación son:

Comparación de eventos de diseño a 25 años



Comparación de eventos de diseño a 100 años



La precipitación de los gráficos anteriores muestra una similitud de datos en la obtención de ambas series. Es necesario recalcar que a estas se les realizan pruebas de calidad para poder decidir si es factible ajustarlas a una función de probabilidad o si el análisis se interrumpe. Por otro lado, se debe principalmente a que las series con relleno de datos mantienen la tendencia de la región.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, la precipitación para el periodo de retorno de 25 años son similares para ambas series, teniendo valores un poco mayores en los tiempos de retorno para las series con relleno, mientras que para los tiempos de retorno de 100 años los valores que son mayores en su mayoría son los valores de las series originales. Con esta información, al comparar la lluvia asociada al huracán Mitch leída en la estación C07115 con un valor de 341.9 mm, el mayor en la cercanía a la localidad de Valdivia, la precipitación se observa en un periodo de retorno cercano a 100 años ya que se estiman 352 mm para la serie original, mientras que para la serie con relleno de datos adopta un periodo de retorno de 25 años estimando 342 mm, esto debido a que a diferencia de



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

la serie original, se incluye más información a través de la interpolación en la serie con relleno de datos lo que nos proporcionaría un panorama más completo para obtener los eventos de diseño. De considerarse únicamente la serie original se estaría diseñando con una lluvia menor que la esperada, por lo que, la interpolación en este caso brindaría mayor precisión al considerar la lectura de tormentas del mismo evento en las estaciones vecinas y con influencia



5 Conclusiones

Se realizó un análisis de las EC de la cuenca Margaritas y Coapan en el estado de Chiapas, México, lugar donde se encontraba la comunidad de Valdivia, la cual desapareció en el año de 1998 debido a la ocurrencia de un evento climatológico extremo. Se obtuvo el registro histórico de lluvias, proporcionado por la entidad reguladora de lluvias en México (CONAGUA) y con esta información se realizó un análisis. Partiendo de 29 estaciones de la región con las cuales se obtuvieron dos series, la primera con datos originales considerando que la serie contiene vacíos en el registro y la siguiente con datos rellenados mediante interpolación IDW. Los errores obtenidos al comparar las series de datos rellenados contra los datos originales fueron menores al 10%, tomando la serie original como referencia.

La mayoría de las EC tuvieron un mejor ajuste con la FDP Gumbel-Gumbel, la cual se considera que representa de mejor manera la presencia de huracanes en zonas costeras en México.

Para verificar la calidad de la información se realizaron pruebas de independencia de eventos y homogeneidad de la serie de cada estación antes y después del relleno de datos con interpolación. Posteriormente se obtuvieron las lluvias de diseño. Con esta información, la lluvia asociada al huracán Mitch leída en la estación C07115 fue de 341.9 mm se observa en un periodo de retorno cercano a 100 años ya que se estiman 352 mm para la serie original, mientras que para la serie con relleno de datos adopta un periodo de retorno de 25 años estimando 342 mm, esto debido a que a diferencia de la serie original, se incluye más información a través de la interpolación en la serie con relleno de datos lo que nos proporcionaría un panorama más completo para obtener los eventos de diseño. De considerarse únicamente la serie original se estaría diseñando con una lluvia menor que la esperada, por lo que, la interpolación en este caso brindaría mayor precisión al considerar la lectura de tormentas del mismo evento en las estaciones vecinas y con influencia.

La interpolación de lluvias es utilizada en diversos estudios de investigación tanto nacionales como extranjeros. Su objetivo principal es el de obtener una base de datos más robusta que la disponible en las fuentes oficiales, las cuales por lo general presentan huecos debido a la ocurrencia de eventos severos que dañan las estaciones climatológicas, extravío de registros, datos erróneos, entre otras. Su fundamento es que las variables climatológicas como la precipitación varían espacialmente, por lo que, si se tienen datos en estaciones vecinas, es posible inferir el valor de una estación que se encuentre al interior de un polígono definido por estas estaciones climatológicas vecinas, además este evento inferido siempre se obtiene por una interpolación, por lo que nunca excederá o será menor que los datos registrados en estaciones vecinas.



6 Bibliografía

- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Ciudad de México. LIMUSA.
- Campos, D. (2010). *Introducción a la Hidrología Urbana*. San Luis Potosí. PRINTEGO
- Campos, D. (2011). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. San Luis Potosí. PRINTEGO
- Escalante, C. & Reyes, L. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología*. México, D.F.: UNAM, Facultad de Ingeniería.
- Escalante, C. & Reyes, L. (2014). *Hidrología básica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Campos, D. (2023). *Temas recientes del análisis de frecuencias hidrológico*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). (s.f.) *Estrategias de diseño arquitectónico con enfoque bioclimático: Criterios técnicos para una vivienda adecuada*. Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI). Obtenido de <https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/disenio/Estrategias%20de%20Dise%C3%B1o%20Arquitectonico.pdf>
- Canseco, A. (8 de septiembre de 2023). *El Heraldo de Chiapas*. Obtenido de <https://www.elheraldodechiapas.com.mx/local/municipios/huracan-mitch-el-devastador-fenomeno-que-enterro-la-costa-de-chiapas-10666545.html>
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGRAW-HILL.
- CONAGUA. (2025). *Información histórica de los ciclones tropicales*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Zavaleta, J. (2010). *Kriging: un método de interpolación sobre datos dispersos*. [Diapositivas de power point]. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://tikhonov.fcencias.unam.mx/presentaciones/2010sep23.pdf>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019). *Folleto de inundación*. Recuperado de https://www.sancristobal.gob.mx/wp-content/uploads/2024/02/4-190518_RI_Folleto-de-inundaci%C3%B3n_mod.pdf
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2020). *La última gran inundación de la Ciudad de México*. Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/la-ultima-gran-inundacion-de-la-ciudad-de-mexico>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2025). *Tipos de sequía*. Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/smn/videos/tipos-de-sequia#:~:text=Sinopsis-.Se%20define%20como%20sequ%C3%ADa%20al%20d%C3%A9ficit%20transitorio%20o%20prolongado%20de.conclusi%C3%B3n%20es%20dif%C3%ADcil%20de%20determinar.>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). *Mapas*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. (2025). *BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL (SISTEMA CLICOM)*. Obtenido de <https://cucapaclicom.cicese.mx/>
- Comisión Nacional del Agua. (2025). *Sistema de Información Hidrológica*. Obtenido de <https://sih.conagua.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2025). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Comisión Nacional del Agua. (2025). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=base>



COMPARACIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO EMPLEANDO DATOS ORIGINALES Y COMPLETADOS CON INTERPOLACIÓN IDW

De Leon I. (2022). *En Chiapas, “El Barón” advirtió a los habitantes de Valdivia de la tragedia*. Diario del Sur. Obtenido de <https://oem.com.mx/diariodelsur/local/en-chiapas-el-baron-advirtio-a-los-habitantes-de-valdivia-de-la-tragedia-14366655>

Mejía C. (2020). *La colonia Valdivia a 22 años del paso de Mitch en Mapastepec*. Diario del Sur. Obtenido de <https://oem.com.mx/diariodelsur/local/la-colonia-valdivia-a-22-anos-del-paso-de-mitch-en-mapastepec-tragedia-sobrevivientes-inundaciones-14339404>

Todos somos Mastepec. (2014). *Álbum de fotos*. Obtenido de <https://www.facebook.com/media/set/?s=12&set=a.341229692709633&>

Secretaría de Economía. (2015). *NMX-AA-166/2-SCFI-2015: ESTACIONES METEOROLÓGICAS, CLIMATOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS. PARTE 2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS QUE DEBEN CUMPLIR EL EMPLAZAMIENTO Y EXPOSICIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS Y CONVENCIONALES*. Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166838/nmx-aa-166-2-scfi-2015.pdf>