



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## POSGRADO DE INGENIERÍA

Título

**Comparación de las curvas hp-d-t proporcionadas por  
el CENAPRED con un continuo de lluvias del proyecto  
TRMM para el estado de Oaxaca**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA**

P R E S E N T A:

Ing. Leo Mijail Castañeda Robles

DIRECTOR DE TRABAJO:

Dra. María del Rosío Ruiz Urbano



Ciudad Universitaria, Cd. De México, 2017

## Contenido

1. Introducción.....	3
2. Componentes del tema.....	4
2.1 Justificación.....	4
2.2 Objetivos.....	4
2.2.1 Objetivo general.....	4
2.2.2 Objetivos específicos.....	4
2.3 Hipótesis.....	5
3. Antecedentes.....	5
3.1 Precipitación.....	5
3.1.1 Tipos de precipitación.....	5
3.1.2 Medición de la precipitación.....	5
3.1.3 Distribución y utilización de la lluvia.....	8
3.1.4 Intensidad y duración de las lluvias.....	8
3.1.5 Curvas precipitación – duración – periodo de retorno.....	8
3.1.6 Ciclones tropicales.....	9
3.1.7 Precipitaciones en México.....	10
3.2 Información Climatológica.....	11
3.2.1 Base de datos climatológicos y meteorológicos.....	11
3.2.2 Estaciones meteorológicas diarias.....	11
3.2.3 Estaciones meteorológicas horarias.....	12
3.3 Percepción remota y sistemas de información geográfica.....	13
3.3.1 Definición de percepción remota.....	13
3.3.2 Fundamentos de la observación remota.....	14
3.3.3 Sensores y satélites utilizados en la percepción remota.....	14
3.3.4 Proyecto “Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM).....	18
3.3.5 Proyecto “Global Precipitation Measurement” (GPM).....	19
4. Caso de estudio. Comparativa del continuo de lluvias “3b42” en el estado de Oaxaca, México con las curvas hp-D-T del CENAPRED y SCT.....	20
4.1 Descripción del problema.....	20
4.2 Información de lluvia estimada de satélite.....	21
4.3 Verificación de validez de datos TRMM en el mundo.....	21

4.3.1 Tratamiento de la información .....	22
4.3.2 Mallas de lluvia CENAPRED .....	22
4.3.3 Mallas de lluvia SCT .....	24
4.3.4 Análisis de máximos diarios TRMM vs Isoyetas CENAPRED.....	28
4.3.5 Recurrencia anual de eventos máximos para el estado de Oaxaca .....	37
4.4 Discusión de resultados.....	41
5. Conclusiones.....	43
6. Bibliografía .....	45

## 1. Introducción.

El análisis de lluvia en México es un elemento de vital importancia para el correcto diseño de obras civiles como los puentes y las carreteras, pero también brinda elementos tácitos para la implementación efectiva y fundamentada de medidas de mitigación del riesgo por inundación, tanto de origen fluvial como pluvial. Así pues, el país ha tratado de sustituir la carencia de información hidrométrica con métodos hidrológicos diversos que tratan de estimar el régimen de caudales basados principalmente en la relación de la lluvia con las características del suelo.

La medición de la lluvia en el país se registra en estaciones climatológicas y meteorológicas automáticas fijas, que sólo son representativas de pequeñas áreas y dada la heterogeneidad del territorio y el tamaño mismo de las cuencas, se hace necesario interpolar valores para generar un continuo de lluvia que cubra la totalidad del territorio a analizar. Es usual encontrarse en medio de la disyuntiva de usar datos de lluvia registrados en estaciones lejanas y con características distintas a los propios de las cuencas, o no utilizarlas y trabajar con un mínimo de registros.

Tomando como base los datos de lluvia registrados en la red de estaciones climatológicas, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) se dio a la tarea de generar isoyetas asociadas a periodos de retorno dados y duraciones diversas. Dichos valores de lluvia son utilizados como referencia para el cálculo de gastos de diseño y tipificación de zonas de riesgo en el país.

Por otro lado, en los últimos años se ha registrado un crecimiento importante del acervo y calidad de datos meteorológicos de origen satelital. Una de estas iniciativas es la emprendida por la NASA y la agencia de exploración espacial Japonesa (JAXA), que a finales de 1997 lanzaron la “Misión de Medición de Lluvias Tropicales” (TRMM por sus siglas en inglés) que estaba enfocada en monitorear y estudiar las precipitaciones tropicales y subtropicales mediante la medición de variables como la lluvia y los relámpagos. La misión TRMM llegó a su fin en abril de 2015 dejando un acervo de 17 años de mediciones y diversos productos derivados. Dando continuidad a la medición de lluvia y también contando a la NASA y JAXA como precursores, se inicia la “Misión de Medición de precipitación global” (GPM por sus siglas en inglés) la cual opera desde febrero de 2014 y hasta la actualidad.

El presente trabajo se enfoca en generar una comparativa de las lluvias diarias de 1998 a 2015 para el estado de Oaxaca derivadas de las misiones TRMM y GPM (aunque es de aclarar que la base de datos refiere sólo a la fuente como a la misión TRMM) con las isoyetas del CENAPRED. Dicho análisis manifiesta que la lluvia no necesariamente sigue patrones en las precipitaciones, sino que también interactúa con elementos como la orografía o la cobertura vegetal y que esta interacción pudiera estar generando la subestimación o sobrestimación de las precipitaciones que ocurren en una cuenca.

Finalmente se genera un análisis sobre las lluvias máximas diarias acumuladas medidas de manera satelital y la correspondencia (si la tuvieran) con los valores máximos prospectados en las isoyetas del CENAPRED en el estado de Oaxaca.

## 2. Componentes del tema

### 2.1 Justificación

Los estudios hidrológicos basados en relaciones lluvia-escorrentamiento tienen un grado de incertidumbre importante y cuanto más grande es la cuenca, más difícil se vuelve caracterizarla, sin embargo y a razón de suponer que se tiene un conocimiento detallado de las características del suelo, de la infraestructura de almacenamiento y/o regulación y la cobertura vegetal que está presente en el área tributaria del sitio de análisis, es que la lluvia se vuelve el elemento “variable”.

La distribución del régimen pluvial en una región y más aún de los máximos que ocurren dado un evento extremo eran muy difíciles de caracterizar, de ahí que los métodos de interpolación y extrapolación se hicieran cada vez más complejos y de uso más generalizado. Pero ahora derivado de los avances en la medición satelital de la precipitación es que podemos caracterizar no sólo eventos máximos de lluvia, si no la distribución de los mismos en una cuenca.

El análisis planteado toma los valores máximos proyectados para el estado de Oaxaca en la isoyetas del CENAPRED y los compara con las lluvias medidas por la misión TRMM en periodos de 24 horas para así buscar señalar que hay zonas donde posiblemente se han presentado picos más grandes de los estimados, y consecuentemente señalar que estos errores no son resultado de una mala estimación de periodos de retorno, sino en la suposición de una correlación espacial directa entre estaciones distantes, con características fundamentalmente distintas.

### 2.2 Objetivos

#### 2.2.1 Objetivo general

Generar una comparativa de valores máximos de lluvia acumulada diaria medidos en la misión TRMM con las isoyetas de CENAPRED para el estado de Oaxaca en el periodo 1998-2015

#### 2.2.2 Objetivos específicos

- Constituir una base de datos de lluvia acumulada diaria de la misión TRMM en el periodo 1998-2015
- Transformar a formato Ráster las isoyetas del CENAPRED y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) a periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años asociadas a duraciones de 24 horas para el estado de Oaxaca.
- Generación de una base de datos de valores comparados de isoyetas vs mallas de lluvia satelital en el periodo 1998-2015.

## 2.3 Hipótesis

La interpolación de lluvia en zonas donde no existen registros de precipitación se hace de forma generalizada no importando la orografía o la cobertura vegetal del terreno, de ahí que se subestime o sobreestimen los valores pluviales. Un claro ejemplo de esta hipótesis se daría en dos estaciones climatológicas, cada una ubicada en un flanco de una cadena montañosa con características altimétricas, cobertura vegetal y de magnitud de registros similares, en dicho escenario los valores de lluvia interpolada serían muy similares a los registrados, sin embargo la realidad podría ser distinta, ya que se pueden presentar otros dos escenarios posibles, uno en que la lluvia se incremente hacia altitudes mayores debido al choque de masas nubosas y un tercero en que la altitud sea tal que las nubes no alcancen a generar precipitación y ésta sea considerablemente menor al de las dos estaciones que fueron base para el análisis de lluvia.

Así pues el análisis busca identificar estas zonas y cuantificar en primera instancia los valores que resultan similares o mayores a los proyectados para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años con duraciones asociadas de 24 horas.

## 3. Antecedentes

### 3.1 Precipitación

#### 3.1.1 Tipos de precipitación

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como el granizo y la nieve. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son la elevación frontal o ciclónica; donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un paisaje frontal; La elevación orográfica, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa; y la elevación convectiva, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica. Las celdas convectivas se originan por el calor superficial, el cual causa una inestabilidad vertical de aire húmedo, y se sostienen por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor de agua sube y se condensa (Ven Te Chow, 1987).



Imagen 1 Tipos de precipitación.

#### 3.1.2 Medición de la precipitación

La cantidad total de precipitación que alcanza el suelo durante un tiempo se expresa por la altura de la capa de agua que cubriría el suelo suponiéndolo perfectamente impermeable y horizontal, sin

que hubiese pérdidas por filtración o pérdidas por evaporación. El objetivo primordial de todo método de medida de la precipitación es obtener una muestra que sea verdaderamente representativa de la precipitación caída en la región a que se refiere esta medición. Por eso la elección del emplazamiento, la forma y la instalación de los instrumentos de medida tienen una gran importancia.

El método de uso más frecuente y el empleado en la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para medir la cantidad de lluvia se basa en el empleo del pluviómetro. Este instrumento está constituido por un embudo especial colocado sobre un recipiente cilíndrico, sujeto a un soporte o parcialmente enterrado en el suelo.



*Imagen 2 Pluviómetro*

#### *3.1.2.1 Aparatos registradores*

Se utilizan en general tres tipos de registradores: de pesada, en estos instrumentos se registra en forma continua y por medio de un mecanismo de resorte o de un sistema de pesas, el peso del recipiente y el de la precipitación que se acumula en él, de este modo, las precipitaciones se registran a medida que se recogen; de flotador, en el la lluvia recogida pasa a un recipiente que contiene un flotador liviano; el movimiento vertical del flotador, al subir el nivel del agua, se transmite por un mecanismo apropiado a la pluma que traza el diagrama; y finalmente el de cangilones, el principio de este tipo de pluviómetro registrador es muy simple, un recipiente de metal liviano, dividido en dos compartimientos se coloca en equilibrio inestable sobre un eje horizontal; en su posición normal, el recipiente reposa sobre uno de sus dos toques, lo que impide que se vuelque completamente, el agua de lluvia es transferida desde un embudo colector ordinario al compartimiento superior, una vez recogido un determinado volumen de lluvia, la cubeta pierde estabilidad y se inclina hacia su segunda posición de reposo. El único instrumento que sirve para medir todos los tipos de precipitación se basa en el principio del peso. Los otros dos se utilizan sobre todo para medir las precipitaciones líquidas.



*Imagen 3 Pluviógrafo*

### *3.1.2.2 Nuevas tecnología en la medición de la precipitación*

En los últimos años se han incrementado notablemente las investigaciones relacionadas con el uso de las estimaciones cuantitativas de precipitación, tanto de radar como satelitales, debido principalmente a la creciente demanda de productos de precipitación con mayor resolución espacial y temporal.

### *3.1.2.3 Radares Meteorológicos*

El Radar Meteorológico se emplea para la medición y seguimiento de fenómenos atmosféricos constituidos por agua, en forma de lluvia, granizo y nieve principalmente. La ventaja de un radar meteorológico es equivalente al empleo de cientos de pluviómetros distribuidos a lo largo de la zona de cobertura del radar, que transmiten la información en tiempo real. El radar tiene además la posibilidad de realizar estudios de volumen de la nube, a diferentes cortes o secciones, así como de dar seguimiento y estudio de fenómenos severos como huracanes. El Radar meteorológico es sin duda una valiosa herramienta con tecnología de punta con que cuentan los Meteorólogos para realizar los pronósticos del tiempo. Esta tecnología es la usada en la misión TRMM; México cuenta con una red de 13 radares meteorológicos en tierra.



*Imagen 4 Radar meteorológico en Sabancuy, Campeche.*

#### 3.1.2.4 Disdrómetro

El disdrómetro mide la intensidad lluvia, velocidad de caída de las gotas y establece una distribución por diámetros de las partículas correspondientes a diferentes tipos de precipitación como pueden ser la lluvia o la nieve. Su funcionamiento se basa en el efecto que produce el paso de una partícula a través de un haz de rayos láser. Este instrumento es clave para la adecuada calibración de los radares meteorológicos o para estudios detallados de erosión hídrica en cuencas. En México sólo se cuenta con pocos de estos instrumentos, la totalidad concentrados en la red de medición del observatorio hidrológico del instituto de ingeniería de la UNAM.



Imagen 5 Disdrómetro

#### 3.1.3 Distribución y utilización de la lluvia

En México la distribución de la precipitación ha sido bien documentada (García, 2003) y varía enormemente en espacio y tiempo; es heterogénea a lo largo del año, geográficamente aumenta en dirección norte-sur debido a la influencia de la latitud, así mismo, está gobernada en gran medida por la proximidad al Océano Pacífico y Golfo de México (Campos, 1992), a la orografía del país y a los rasgos de la circulación atmosférica (García, 2003), así como a la teleconectividad del fenómeno del Niño (Cavazos-Hastenrath, 1990).

#### 3.1.4 Intensidad y duración de las lluvias

La intensidad de lluvia y la duración son dos conceptos asociados entre sí. La primera se define como la altura de lluvia acumulada por unidad de tiempo (usualmente se especifica en mm/h) y la segunda es simplemente un intervalo de tiempo (en minutos). Dado que la lluvia varía con el tiempo, la intensidad de lluvia depende del intervalo de tiempo considerado o duración (min). Para calcular la intensidad de lluvia es preciso conocer el pluviograma de una tormenta. A partir de éste, se define una duración, por ejemplo, de 10 minutos, para ubicar en él algún segmento de curva con dicha duración. La magnitud del desnivel del segmento de curva (mm) dividida entre la duración predefinida convertida en horas dará como resultado la intensidad de lluvia (mm/h) para dicha duración en particular (CONAGUA, 2007).

#### 3.1.5 Curvas precipitación – duración – periodo de retorno

Uno de los primeros pasos que debe de seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, como el diseño de un drenaje urbano, es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben de usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que

involucre una relación entre la intensidad de lluvia (o profundidad), la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra o el sitio.

Usualmente los datos se presentan en forma gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los periodos de retorno de diseño (Ven Te Chow, 1987).

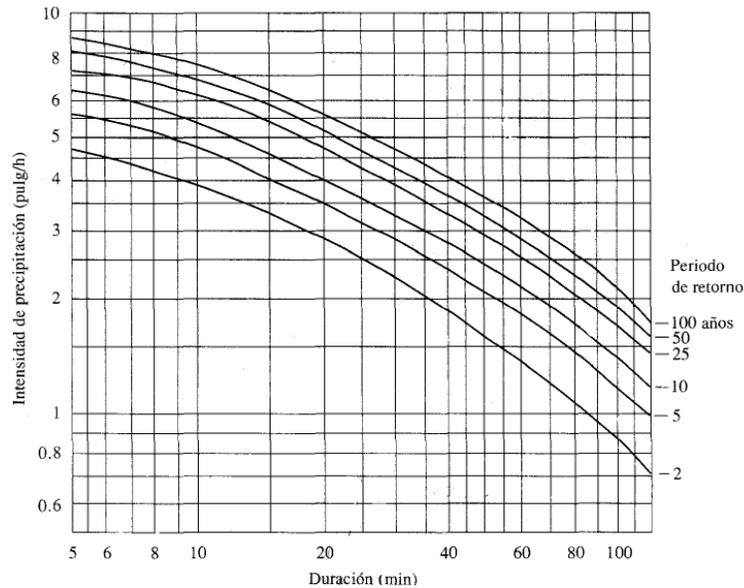


Imagen 6 I-D-Tr

### 3.1.6 Ciclones tropicales

Un ciclón tropical es un sistema atmosférico cuyo viento circula en dirección ciclónica, esto es, en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, y en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio sur. Como su nombre lo indica, el ciclón tropical se origina en las regiones tropicales de nuestro planeta. Como la circulación ciclónica y bajas presiones atmosféricas relativas normalmente coexisten, es común usar los términos ciclón y baja de forma intercambiable. Los ciclones intensos están entre los más destructivos de los desastres naturales, capaces de causar graves daños a poblaciones costeras y ocasionar pérdidas humanas. Sin embargo, proporcionan precipitaciones esenciales para gran parte de las tierras que cruzan (CENAPRED, 2007).

### 3.1.6.1 Lluvia y ciclones tropicales

Las lluvias intensas asociadas a los ciclones tropicales en cualquiera de sus etapas, desde depresión tropical y tormenta tropical, hasta huracán, ocurren principalmente en el semicírculo derecho y pueden extenderse a grandes distancias de su región central. En huracanes muy simétricos, la lluvia suele concentrarse cerca de su centro y en todas direcciones.



Imagen 7 Trayectorias de huracanes cercanas al estado de Oaxaca en el periodo 1842-2014 (Fuente: Elaboración propia)

### 3.1.7 Precipitaciones en México

En general, los factores geográficos y geofísicos determinan las condiciones del clima y de la lluvia en las diversas regiones geográficas que conforman la República Mexicana, sobresaliendo las zonas de tipo desértico que son de gran magnitud en nuestro país. Al respecto se puede decir que en el ámbito mundial existen dos fajas desérticas simétricas con respecto al Ecuador terrestre, una en el hemisferio norte entre los paralelos  $9^{\circ} 30'$  y  $37^{\circ} 30'$  de latitud norte y la otra en el hemisferio sur entre los paralelos  $9^{\circ} 30'$  y  $37^{\circ} 30'$  de latitud sur. En estas regiones se localizan la mayor parte de los desiertos del mundo. Ahora bien, al quedar México comprendido entre los paralelos  $14^{\circ} 31'$  y  $32^{\circ} 43'$  de latitud norte, toda su extensión se ubica dentro de una de las fajas de desiertos; se salva de esta fatalidad geográfica gracias a otros factores que propician la ocurrencia de la precipitación pluvial (Breña, 2004).

La República Mexicana, debido a su posición geográfica se encuentra ubicada, en su mayor parte, dentro de las zonas intertropical y subtropical del hemisferio norte, por lo que, climáticamente hablando, su porción meridional viene a quedar en la zona o faja de los vientos Alisios y por lo tanto disfruta de las características de las atmósferas barotrópicas existentes en las latitudes bajas, con su gran estabilidad meteorológica, al menos durante gran parte del año. El resto del país, al norte del Trópico de Cáncer, se encuentra bajo la influencia desecante de los movimientos descendentes del aire, característicos de la zona de las altas presiones subtropicales, que son la causa de los grandes desiertos del Globo (Breña, 2004).

## 3.2 Información Climatológica

### 3.2.1 Base de datos climatológicos y meteorológicos

La medición de la lluvia en México se hace fundamentalmente bajo dos esquemas: mediciones diarias y mediciones a intervalos de tiempo cortos (minutos), la diferencia fundamental radica en el acervo de datos y la cobertura espacial. En México las distintas redes que podríamos mencionar son las siguientes:

- Red de estaciones climatológicas (SMN)
- Red de estaciones meteorológicas automáticas (SMN)
- Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. INIFAP)
- Red de Estaciones climatológicas y meteorológicas (CFE)
- Redes Estatales

### 3.2.2 Estaciones meteorológicas diarias

Siempre a las 8 de la mañana se toma el registro de distintas variables meteorológicas en cada una de las 3329 estaciones en operación (SMN, 2016). Para el caso puntual de la lluvia, la medición corresponde a la lluvia acumulada durante 24 Horas.



*Imagen 8 Estaciones climatológicas en operación*

Se identificaron un total de 220 estaciones climatológicas que inciden en territorio estatal o se encuentran cercanas a los límites. Las estaciones no correspondientes a Oaxaca se reparten entre los estados de Chiapas, Guerrero, Puebla y Veracruz.



Imagen 9 Estaciones climatológicas en operación en el estado de Oaxaca.

### 3.2.3 Estaciones meteorológicas horarias

Una estación meteorológica automática, está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación. Los Sensores que integran la estación son:

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

El número de estaciones meteorológicas automáticas es de 189 y de sinópticas meteorológicas es de 90 y cada cual crece de manera importante, sin embargo el acervo de datos máximo es menor a los 20 años.

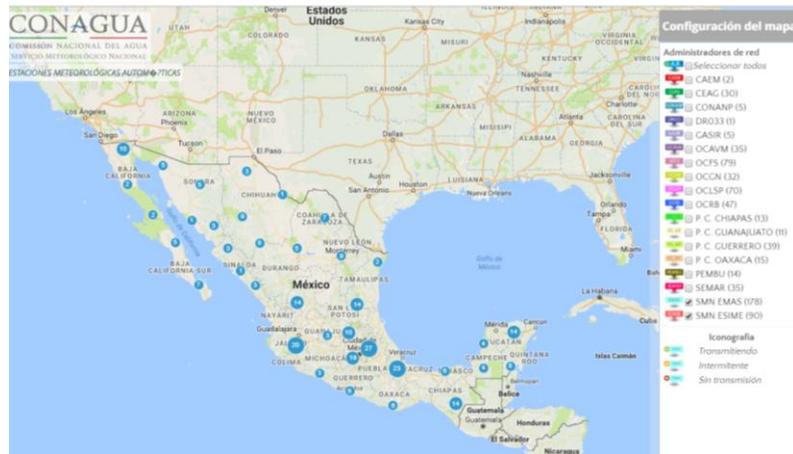


Imagen 10 Redes de Estaciones meteorológicas automáticas en México.

### 3.3 Percepción remota y sistemas de información geográfica

#### 3.3.1 Definición de percepción remota

La percepción remota puede definirse como la ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no esté en contacto físico con dicho objeto. Es una técnica a través de la cual se obtiene información de un objeto sin tener contacto directo con él, esto es posible gracias a la relación sensor-cobertura, la cual en el caso de los barredores multiespectrales se expresa a través de la llamada radiación electromagnética. Esta relación se puede presentar en tres formas: Emisión, Reflexión y Emisión-Reflexión, el flujo de energía que se produce por alguna de estas formas va a estar en función de la transmisión de energía térmica (SIGA-CONAGUA, 2005).

En la percepción remota lo realmente importante es comprender que es una imagen de satélite y como se capta. Al igual que una cámara digital, un sensor de satélite no posee película. En su lugar, cuenta con miles de detectores diminutos que miden la cantidad de radiación electromagnética (es decir, la energía) que refleja la superficie de la tierra y los objetos que hay en ella. Estas mediciones se denominan espectrales. Cada valor de reflectancia espectral se registra como un número digital. Estos números se transmiten de nuevo a la tierra donde un ordenador los convierte en colores o matices de gris para crear una imagen que se parece a una fotografía.

Dependiendo de la sensibilidad para la que han sido concebidos, los sensores miden la reflectancia de la energía en las partes visibles del espectro electromagnético del infrarrojo cercano, medio, térmico, y de microondas.

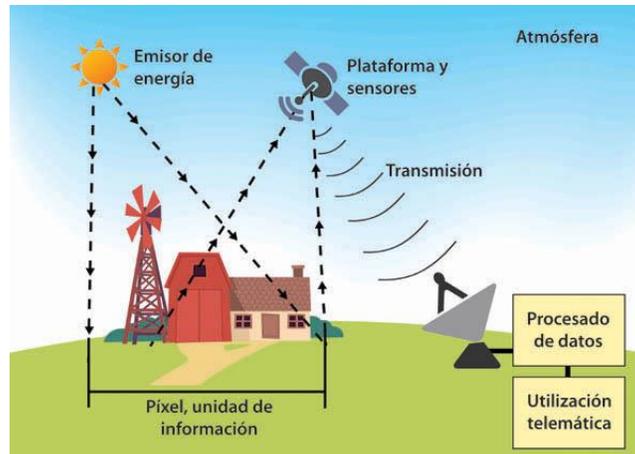


Imagen 11 Esquema de recolección de información por percepción remota.

### 3.3.2 Fundamentos de la observación remota

La naturaleza de la obtención de datos mediante percepción remota está influenciada por las interacciones de las diferentes partes constituyentes de un sistema de percepción remota, tales como:

- La fuente de energía, en la cual influyen el ángulo de elevación y la divergencia solar.
- La cubierta terrestre, en la que intervienen las características físicas, químicas y la rugosidad de la superficie en un instante de tiempo.
- El sensor, el cual influye en la geometría de la toma y la calidad de los datos.
- La atmósfera, especialmente en lo que se refiere a la dispersión selectiva de la radiación electromagnética.

Todos estos factores ponen de manifiesto la complejidad intrínseca de la observación remota ya que modifican las firmas espectrales características de los diferentes tipos de coberturas. Aun así, en la actualidad una de las grandes ventajas de las imágenes satelitales, es que, dado su formato, permiten su manipulación con las computadoras y poniendo de manifiesto el creciente avance en el hardware y software la percepción remota tiene un grandioso futuro.

### 3.3.3 Sensores y satélites utilizados en la percepción remota

Para comprender sobre sensores y plataformas, primero que todo precisaremos a que se le llama satélite. Suele llamársele de esta manera a cualquier objeto que gira alrededor de otro. Por ejemplo, la Luna es el satélite natural de la Tierra pues gira alrededor de ella. En este sentido, los satélites pueden ser entendidos como objetos que gravitan o se sostienen en una órbita planetaria, cuyo movimiento es tradicionalmente directo, de oeste a este, y suelen ir en la misma dirección en que orbitan los objetos centrales, para nuestro ejemplo la Tierra (CIAF, 2009).

Así mismo, existen los satélites artificiales como por ejemplo las naves fabricadas y enviadas al espacio en un vehículo de lanzamiento. Estos satélites artificiales pueden orbitar alrededor de lunas, cometas, asteroides, planetas, estrellas e incluso galaxias. Cada uno es realizado con una especificación única y con un límite de tiempo de uso y monitoreo, de ahí que tras terminar su vida útil pueden quedar orbitando y se convierten en lo que se ha llamado basura espacial (CIAF, 2009).

Los sensores remotos incluidos en la plataforma satelital se clasifican de varias formas, considerando el procedimiento de recibir energía de la cubierta u objeto observado, que puede ser la clasificación más habitual y los diferencia entre sensores pasivos y activos. También, se pueden definir con base en las características de inclinación, forma o altitud de sus órbitas.

### 3.3.3.1 Sistemas de percepción activa

Los sistemas de percepción activa generan una señal, rebota en un objeto, y miden las características de la señal reflejada. Un ejemplo de este tipo de percepción es el RADAR. Las ondas de radio son emitidas por un transmisor y son recogidas por un receptor después de haber sido reflejadas por un objeto. Las señales reflejadas pueden ser usadas por los sistemas RADAR para determinar la distancia y dirección de los objetos percibidos. También se pueden crear imágenes de los objetos. En resumen, los sistemas pasivos se dividen en LIDAR y RADAR (CIAF, 2009).

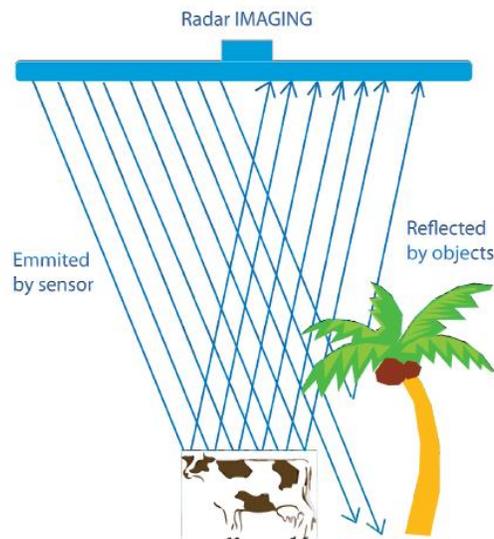
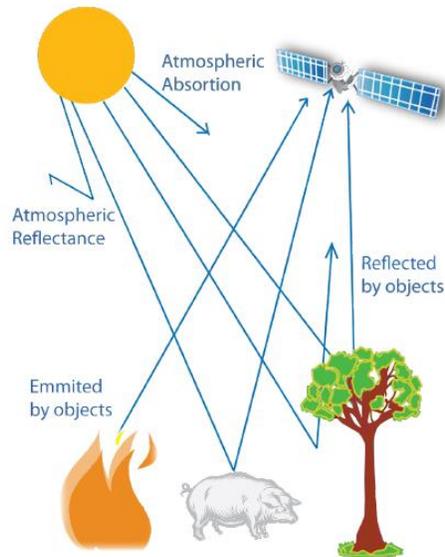


Imagen 12 Sensores Activos

### 3.3.3.2 Sistemas de percepción pasiva

Se les asigna este nombre a los sensores remotos que trabajan con la energía proveniente del Sol, en otras palabras, trabajan con una fuente de energía radiante externa que ilumina el área de donde van a obtener información. Éstos se pueden dividir en función del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos (CIAF, 2009).

Entre ellos están los sensores fotográficos u ópticos (cámaras fotográficas), óptico-electrónicos (exploradores de barrido, empuje y cámaras de vidicon) y de antena (radiómetros de micro-ondas).



*Imagen 13 Sensores Pasivos*

### 3.3.3.2.a Exploradores de Barrido.

En forma perpendicular a la dirección de la trayectoria del satélite, oscila un espejo móvil, permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados. La radiancia recibida por este componente óptico se envía a detectores que la amplifican y convierten en una señal eléctrica, que se transforma a un valor numérico el cual se almacena a bordo o se transmite a antenas receptoras. Los exploradores de barrido multiespectral descomponen la señal recibida en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo especial de detector sensible a este tipo de energía. Al igual que cualquier tipo de sensor, éstos presentarán características visuales que están en función de la resolución. Entre tales características se destacan las siguientes:

- Mayor amplitud de detección de bandas del espectro que la del rango visible
- Facilidad para la corrección radiométrica de los datos
- Realización de coberturas sistemáticas y de grandes espacios, gracias a su capacidad de transmitir datos en tiempo real
- Grabación digital de información, que asegura la fiabilidad y permite su tratamiento asistido por computadora. Estos son incluidos en programas espaciales como Landsat o TIROS-NOAA.

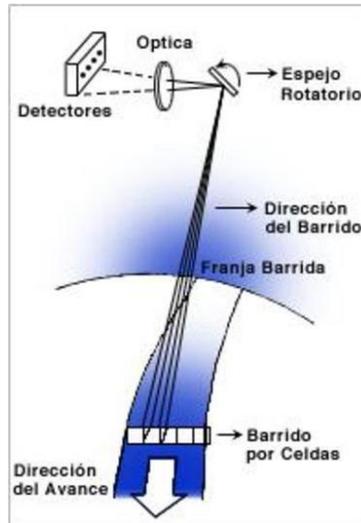


Imagen 14 Diagrama de explorador de barrido.

### 3.3.3.2.b Exploradores de Empuje

Son sensores que capturan la información línea por línea y disponen de una cadena de detectores que cubren todo el campo de visión del sensor, los cuales se van estimulando con el movimiento orbital del satélite de lo que se desprende su nombre (CIAF, 2009).

Los exploradores de empuje permiten aumentar la resolución espacial y eliminar problemas geométricos que se producen en los barreadores; sugiere otras dificultades de calibración en cuanto a su cadena de detectores, capacidad espectral debido al tipo de sensor muy sensibles al calor y de difícil calibración. Los proyectos que han incorporado estos tipos de sensores son SPOT, IRS, IKONOS y QuickBird, entre muchos otros.

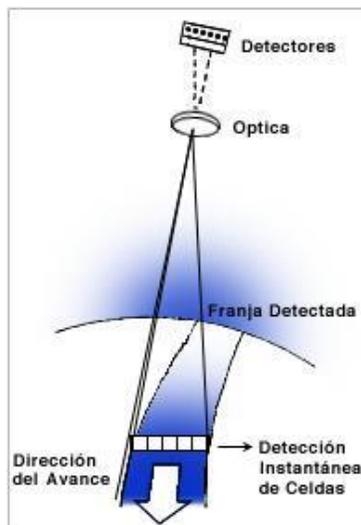


Imagen 15 Diagrama de explorador de empuje

#### 3.3.3.2.c Sensores fotográficos y de Antena

Otros sistemas pasivos son las cámaras de video, éstas se pueden trabajar en forma pancromática o multi-banda, utilizada sobre todo en estudios naturales. En las últimas décadas se han incluido en misiones espaciales tales como Apolo, Mariner, Nimbus y Landsat.

Por último, los radiómetros de micro-ondas, son aquellos que operan longitudes de onda milimétricas en rangos correspondientes del espectro entre 6.8 y 90 GHz, y no son afectadas por la atmósfera ni la iluminación. Sus desventajas se fundamentan en la pobre resolución espacial debido a la imposibilidad de contar con una antena de grandes proporciones, siendo ésta directamente proporcional a su longitud de onda e inversamente proporcional al diámetro de abertura. Sin embargo, sus usos en el tema ambiental son múltiples: humedad del suelo, estrés hídrico en la vegetación y hasta la cartografía de hielo, en tanto que son muy sensibles a las bajas temperaturas (CIAF, 2009).

#### 3.3.4 Proyecto “Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM)

La Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) es una conjunción de exploración espacial entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA). La misión del satélite se centra en proporcionar datos sobre la precipitación tropical y subtropical y estimar su calor latente asociado. TRMM está operativo desde noviembre de 1997 y empezó a proveer los diferentes productos desde 1998. Actualmente se utilizan los productos de TRMM para muchos servicios y productos operacionales. A pesar de ciertas limitaciones, muchos autores han destacado la utilidad de los datos del TRMM para las evaluaciones de los recursos hídricos (Su F., 2008)

Los instrumentos de medición de la precipitación en el satélite TRMM incluyen el radar de precipitación (PR), un radar de escaneo electrónico a 13.8 GHz; Imágenes por Microondas (TMI), un sensor de microondas pasivo diseñado para dar información cuantitativa de lluvias; y un escáner del visible y del infrarrojo (VIRS), con cinco canales del visible e infrarrojo (Huffman & B., 2014).

Continuamente se implementaron mejoras de los productos TRMM para obtener resultados más fiables y con mayor precisión. A finales de 2011, salió una versión más actualizada de la serie de productos del TRMM (versión 7). Esta versión proporciona estimaciones más precisas de precipitación, teniendo en cuenta los diferentes regímenes de lluvia que puedan ocurrir. En esta versión se eliminaron algunas de las limitaciones anteriores del producto, como la sobreestimación de las precipitaciones en sistemas convectivos y la subestimación de la lluvia caliente (Huffman G. , 1997).

El satélite terminó operaciones el 15 de abril de 2015 dejando un acervo de datos de 17 años. El conjunto de datos TRMM se convirtió en el estándar de espacio para la medición de la precipitación, y dio lugar a una investigación que ha mejorado nuestra comprensión de la estructura de los ciclones tropicales y evolución, las propiedades del sistema convectivo, las relaciones rayo de tormenta, el clima y el modelado del tiempo, y los impactos humanos sobre las precipitaciones. Los datos también apoyan las aplicaciones operativas, tales como inundaciones y sequías y la predicción del tiempo.

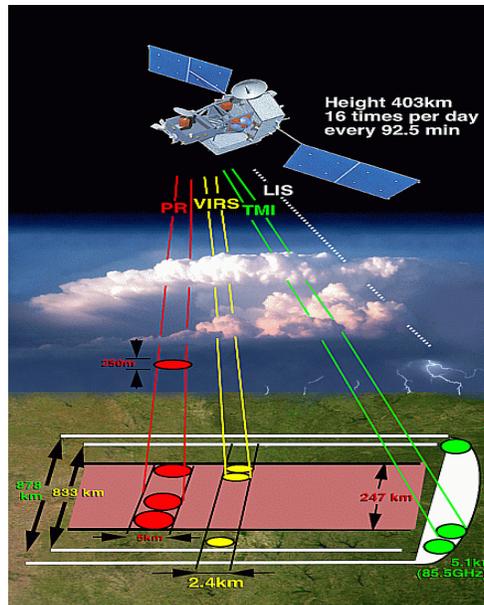


Imagen 16 Instrumentación en la misión TRMM

### 3.3.5 Proyecto “Global Precipitation Measurement” (GPM)

Medición Global de la precipitación (GPM) es una misión internacional de satélites para proporcionar observaciones de lluvia y la nieve en todo el mundo a lapsos de tres horas. La NASA y JAXA lanzaron el satélite GPM Observatorio Core el 27 de febrero de 2014, llevando instrumentos avanzados que establecen un nuevo estándar para las mediciones de precipitación desde el espacio. Los datos que proporcionan se utilizan para unificar medidas de precipitación realizadas por una red internacional de satélites asociados para caracterizar dónde y cuánto llueve o nieva en todo el mundo. La misión GPM contribuye a avanzar en nuestra comprensión de los ciclos del agua y de la energía de la Tierra, mejora el pronóstico de eventos extremos que causan los desastres naturales, y amplía las capacidades actuales de la utilización de la información precipitación por satélite para beneficiar directamente a la sociedad.

El diseño del Observatorio GPM Core es un gran avance respecto al sensor de lluvia del TRMM, que utiliza un radar activo capaz de proporcionar información sobre las partículas de precipitación dentro de las nubes y un generador de imágenes de microondas pasivo capaz de detectar la precipitación total en todas las capas de nubes. Los instrumentos de la misión GPM amplían las capacidades de los sensores del TRMM para detectar la caída de nieve, medir la lluvia ligera y proporcionar por primera vez las estimaciones cuantitativas de partículas de precipitación.

El agua es fundamental para la vida en la Tierra, así que saber dónde y qué cantidad de lluvia cae a nivel mundial, es de vital importancia para la comprensión de como el tiempo y el clima afectan tanto nuestro medio ambiente, los ciclos del agua y de la energía de la Tierra, incluidos los efectos sobre la agricultura, la disponibilidad de agua dulce, y las respuestas a los desastres naturales. Dado que las lluvias y las nevadas varían mucho de un lugar a otro y con el tiempo, los satélites pueden proporcionar observaciones más uniformes de la lluvia y la nieve en todo el mundo que los instrumentos terrestres, especialmente en las zonas donde las mediciones de superficie son difíciles de obtener.

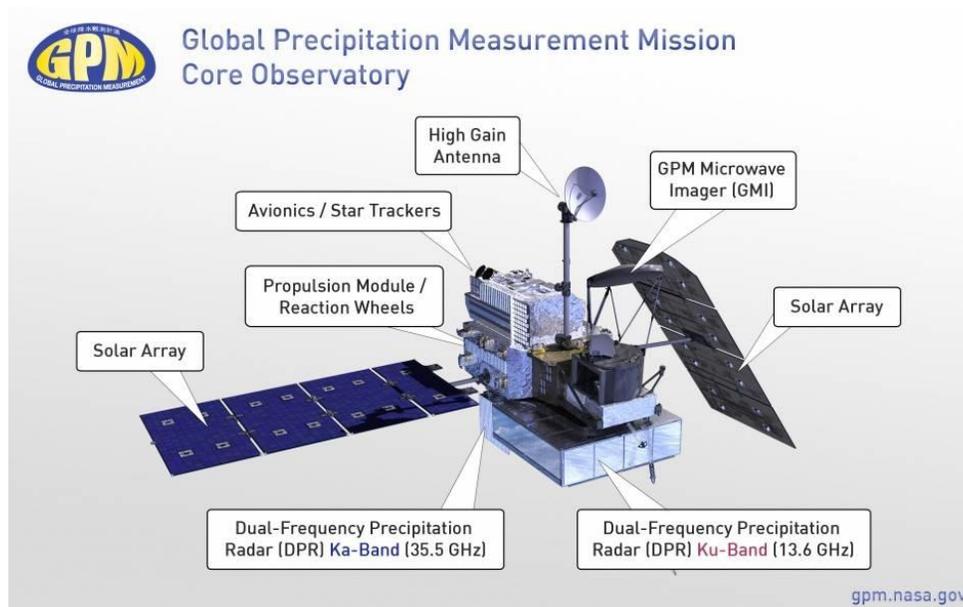


Imagen 17 Instrumentos satélite GPM

## 4. Caso de estudio. Comparativa del continuo de lluvias “3b42” en el estado de Oaxaca, México con las curvas hp-D-T del CENAPRED y SCT

### 4.1 Descripción del problema

El cálculo del régimen de caudales en un punto dado es un elemento fundamental para el diseño de estructuras civiles como los puentes, los drenajes urbanos, las carreteras, etc. Sin embargo, es natural que dado el costo de las obras de debe de asumir un riesgo de pérdida. Así, los daños que pudieran derivar de un evento máximo serían producto de la probabilidad de ocurrencia, un evento desastroso y el costo del proyecto.

Es así que se han desarrollado normativas que establecen elementos de diseño (periodos de retorno) mínimos en muchos tipos de obra y que son base para la construcción de infraestructura en el país. Sin embargo, dichos criterios de diseño se fundamentan en elementos variables o que tienen grandes incertidumbres asociadas, un ejemplo muy claro de esto es la lluvia máxima.

La lluvia máxima como se describe al principio del documento, se registra de manera diaria y con el mayor rango de datos en la red de estaciones climatológicas que administra el servicio meteorológico nacional. Esta información se ha usado para desarrollar productos que sirvan como referencia a las empresas encargadas de ejecutar algún proyecto y con esto facilitar el proceso de los mismos. Dos de estos productos son: Las Isoyetas de la SCT, la cual sirve como cuantía de lluvia válida para los proyectos de esa dependencia y las Isoyetas del CENAPRED que son principalmente usados como insumos en los atlas de riesgos municipales y estatales.

Dichas isoyetas fueron resultado de interpolaciones en zonas donde no existen mediciones puntuales y dado que la lluvia depende de elementos como la orografía, la altimetría o la cobertura vegetal entre otros, es claro que pudieran presentarse errores muy diversos. El presente estudio

busca analizar la ocurrencia de eventos máximos de lluvia diaria en el estado de Oaxaca en la base de datos de lluvia satelital TRMM en el periodo 1998-2015 y compararlos con las lluvias de diseño estimadas por el CENAPRED.

*Nota: Las isoyetas de la SCT tienen valores fuera del orden de magnitud de los registros, de ahí que no se tomen en cuenta en el presente trabajo y sólo se caractericen de manera general.*

El análisis planteado busca identificar espacialmente esas zonas donde se está subestimando la lluvia y plantear la necesidad de corrección de las isoyetas haciendo uso de información satelital que se encuentra disponible de manera gratuita.

#### 4.2 Información de lluvia estimada de satélite

Dentro del acervo de datos de la misión TRMM y GPM se seleccionó para este trabajo el producto 3b42\_daily (la base de datos tiene sólo como fuente a la misión TRMM), el cual representa la lluvia acumulada en un lapso de 24 horas. Este producto de precipitación se obtiene tomando como base un algoritmo que calibra y combina las estimaciones por microondas, ya sea del sensor de microondas pasivo (TMI) del satélite, como de otros satélites, a intervalos de tres horas y a una resolución de 0.25° (Huffman & B., 2014). Las estimaciones 3b42 se producen en cuatro etapas:

- Se toman las estimaciones de precipitación por microondas para consecuentemente calibrarse y combinarse,
- Se generan estimaciones de precipitación con base en medición infrarroja
- Los cálculos de precipitación con microondas e Infrarrojo se combinan,
- Se calibran con datos pluviométricos para validación.

La base de datos 3b42\_Daily está dentro de la gama de productos de la misión TRMM de los más usados en diversos estudios. Para el presente trabajo se descargaron datos del 1 de enero de 1998 al 31 de Julio de 2015, dando un total 6421 mallas diarias de lluvia acumulada.

#### 4.3 Verificación de validez de datos TRMM en el mundo

Dentro de las aplicaciones realizadas usando la lluvia estimada por satélite como datos de entrada a modelos hidrológicos, podemos mencionar los estudios realizados por (B Collischonn, 2008) donde realizaron una modelización hidrológica en la cuenca amazónica, utilizaron estimaciones de precipitación TRMM. (Ranyére Silva Nóbrega, 2008) Analizaron los datos de satélite TRMM en un modelo hidrológico semi-distribuido en la cuenca del río Jamari. (Lavado-Casimiro, 2009) Validaron la lluvia utilizando TRMM en dos cuencas amazónicas peruanas y aplicaron en modelos mensuales de balance hídrico; (Dinku, 2010) realizaron una comparación sobre regiones montañosas de África y América del Sur.

Estudios recientes (Kizza, 2012; (Li, 2012); Li-Zhangy Xu, 2014; Mantas-Liu-Caro y Pereira, 2015) concluyeron que las estimaciones de precipitación provenientes del TRMM constituyen una alternativa aceptable y que estas puedan ser incluidas en modelos hidrológicos, para áreas donde no se disponga de una adecuada distribución espacial de estaciones meteorológicas.

### 4.3.1 Tratamiento de la información

Como primer elemento dentro del análisis, se procedió a integrar los datos de lluvia generados por el CENAPRED y la SCT. Dicha información para el caso del centro especializado en desastres se obtuvo en formato *Shapefile* en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años y una duración de 24 horas. Para la información de SCT el caso fue distinto ya que solo se obtuvieron las imágenes estatales de las isoyetas asociadas a los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años y fue necesario digitalizar las imágenes para generar los *Shapefile* correspondientes.

### 4.3.2 Mallas de lluvia CENAPRED

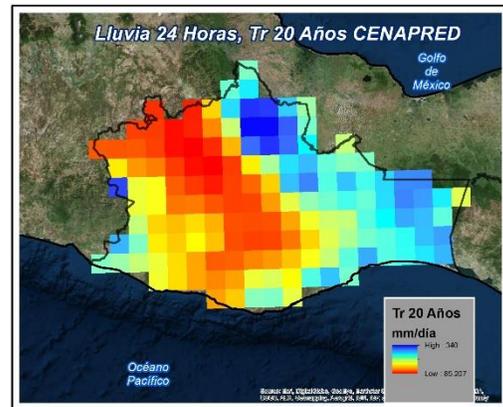
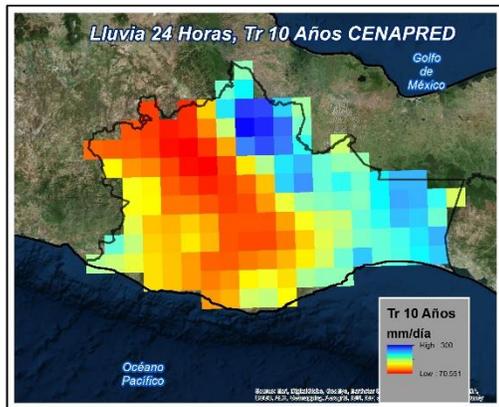
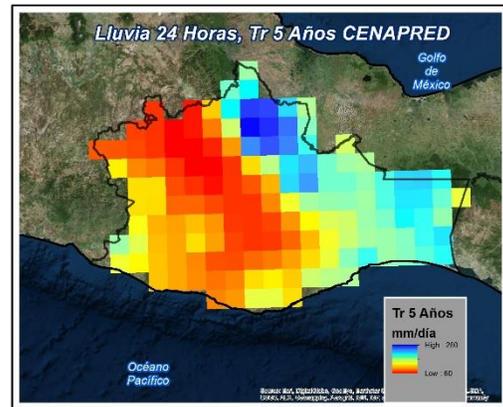
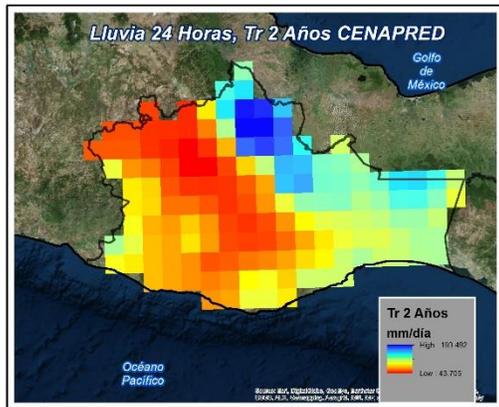
Como se mencionó anteriormente, las isoyetas se pudieron obtener en formato *Shapefile*, pero fue necesario generar cortes correspondientes al estado de Oaxaca para trabajar sólo en el área seleccionada. Las lluvias máximas diarias asociadas del CENAPRED se muestran en la siguiente imagen.





Imagen 18 Isoyetas asociadas a una duración de 24 horas con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Dados los *shapefiles* de isoyetas fue necesario generar rásters con 25 km de resolución para poder compararlas con la base de datos TRMM. El proceso para generar las mallas fue primero generar un TIN (red irregular de triángulos) y luego convertirlos a Ráster. Los resultados se muestran a continuación.



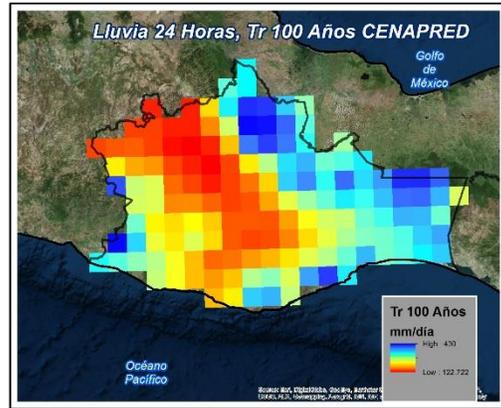
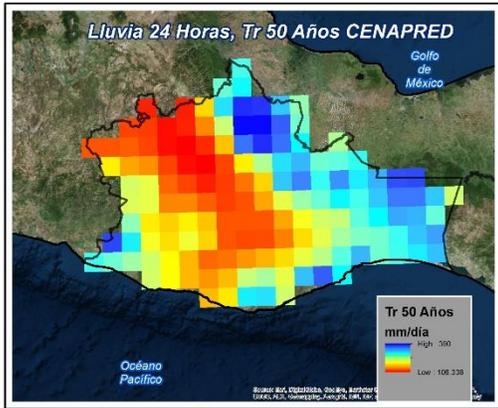
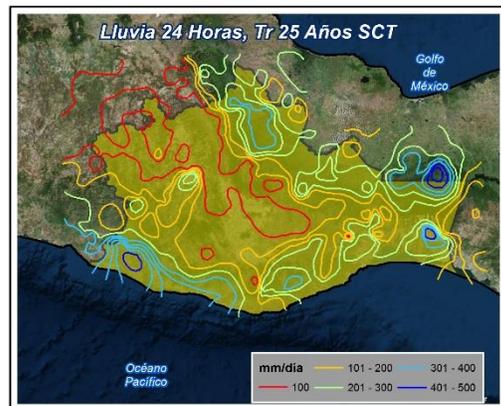
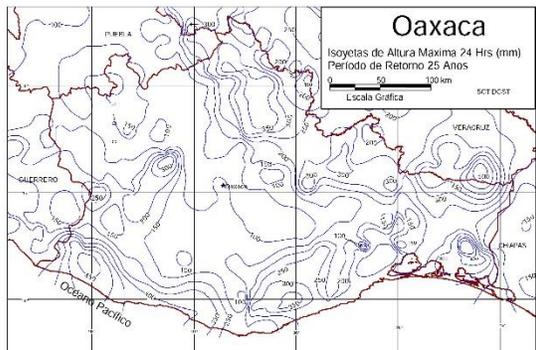
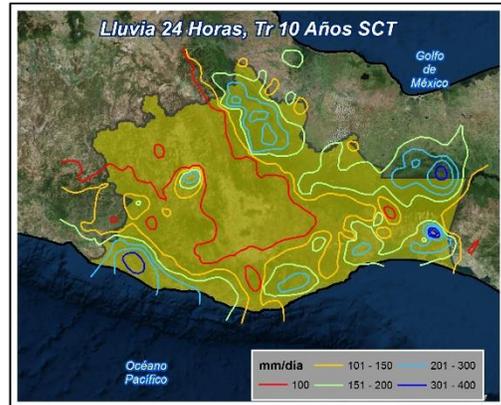
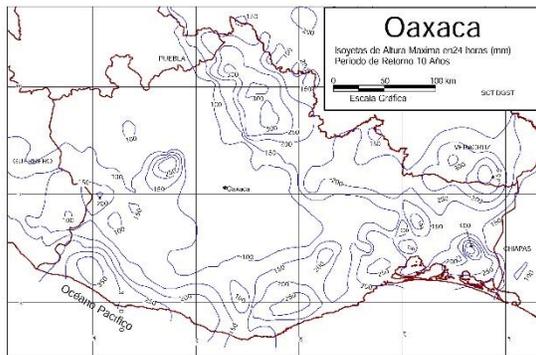


Imagen 19 Mallas de 25 km de resolución del CENAPRED asociadas a una duración de 24 horas con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años

#### 4.3.3 Mallas de lluvia SCT

Las isoyetas de la secretaria de comunicaciones y transportes tuvieron el inconveniente de sólo estar en formato de imagen, así que en primera instancia se digitalizaron las isoyetas a formato *Shapefile*.



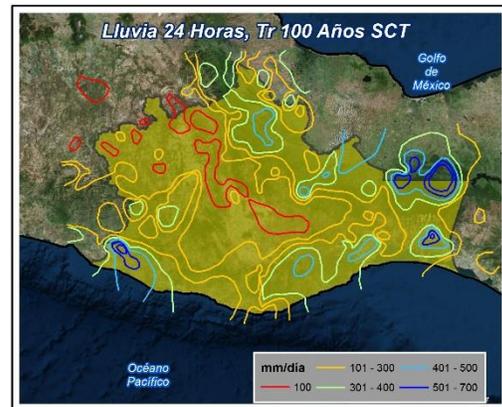
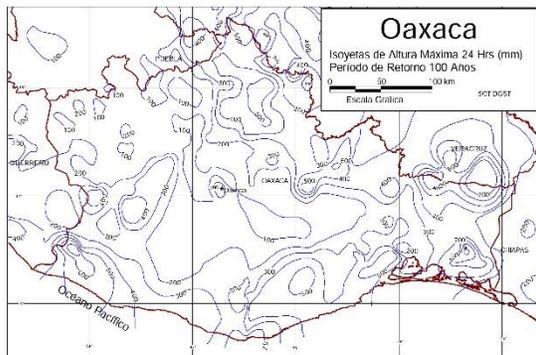
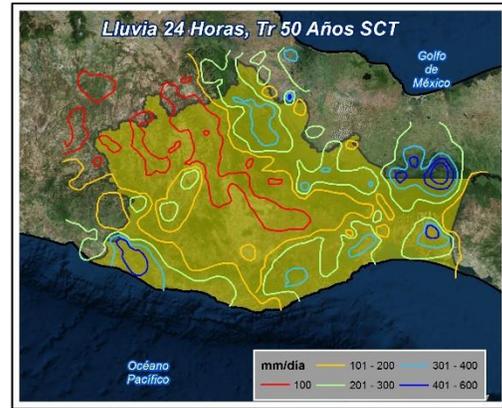
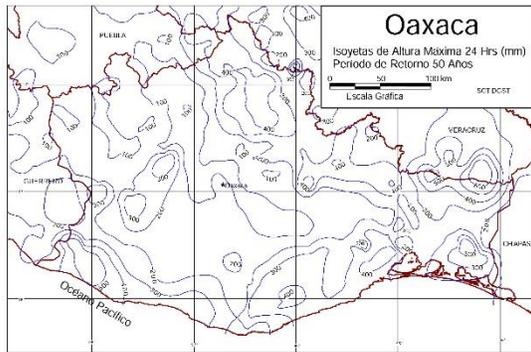
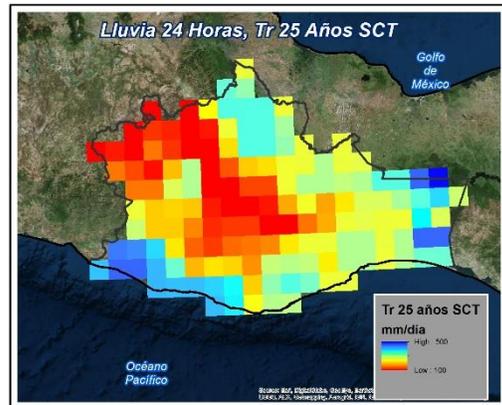
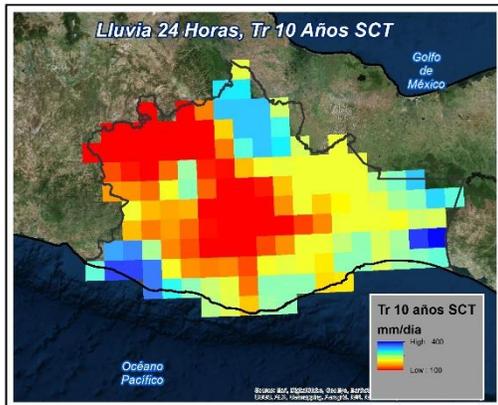


Imagen 20 Digitalización de Isoyetas SCT a formato Shapefile para el estado de Oaxaca

Al igual que el caso anterior, es necesario generar mallas con resolución de 25 km para poder compararlos con los datos TRMM. El proceso fue generar TIN'S y después Ráster. Los resultados se muestran a continuación.



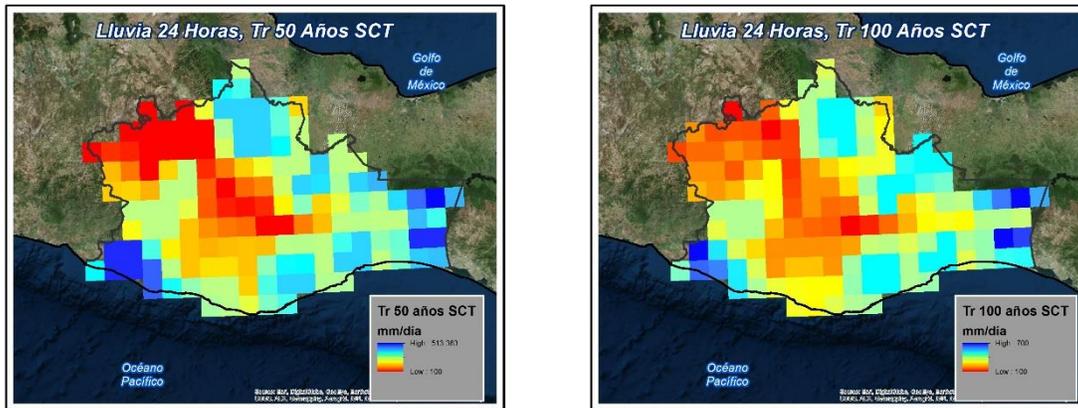


Imagen 21 Mallas de 25 km de resolución de la SCT asociadas a una duración de 24 horas con periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años

#### 4.3.3.1 Mallas de lluvia TRMM (3b42\_daily)

Para el presente trabajo se descargaron las mallas de lluvia para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1998 y el 31 de julio del 2015, esto se hizo a partir del visualizador de descarga de datos del GESDISC (Centro de servicios de información sobre ciencias de la tierra) de la NASA.

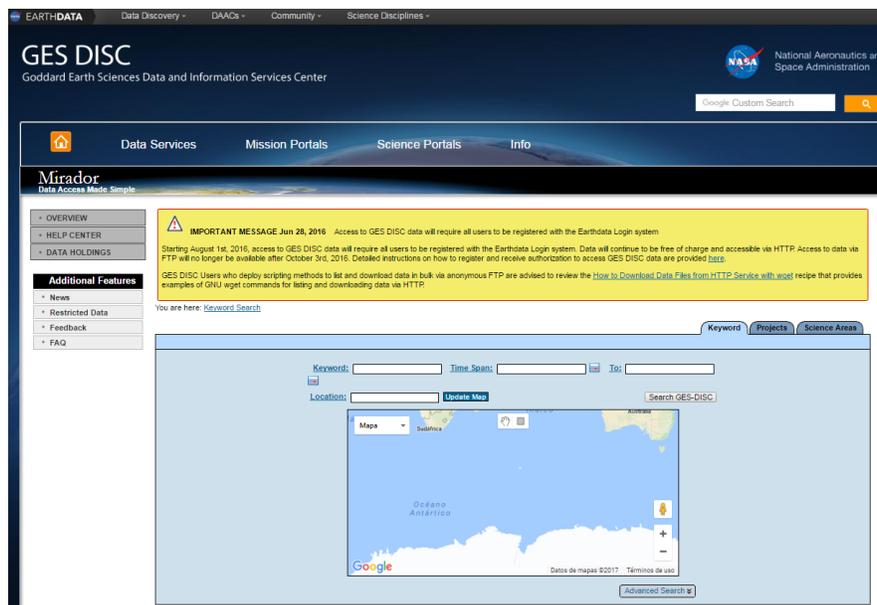


Imagen 22 Página de descarga de datos TRMM ([https://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/homepageAlt.pl?CGISESSID=c42ad842ea8c981b6caea4fbdab028fb&CURRENT\\_CONTEXT=KeywordSearch&keyword=](https://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/homepageAlt.pl?CGISESSID=c42ad842ea8c981b6caea4fbdab028fb&CURRENT_CONTEXT=KeywordSearch&keyword=))

Como se mencionó en la descripción de la misión TRMM son varios los productos que se producen. Para el presente trabajo se descargaron los datos de la base **3b42 Daily RT V7**, la cual corresponde a lluvia diaria acumulada derivada de revisiones con datos en tierra.

Sin embargo los datos se encontraban en formato NetCDF (formulario de datos comunes en red) y fue necesario convertirlas a formato GRID para poder trabajarlas en un entorno SIG (Sistema de

Información Geográfica). El proceso se realizó mediante conversión de bloques en Global Mapper versión 15. En total se contabilizaron 6421 mallas.

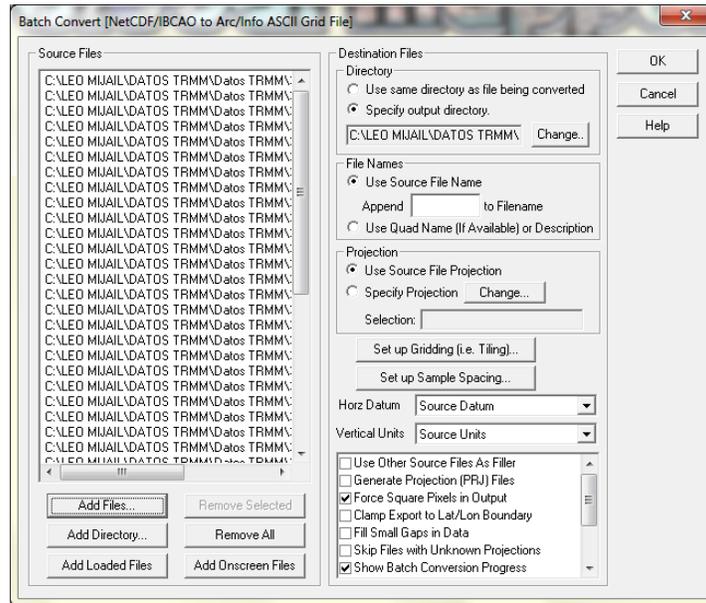


Imagen 23 Conversión de NetCDF a GRID de ArcGis.

Obtenidas las mallas de datos de lluvia diaria, fue necesario generar cortes para el estado de Oaxaca. Esta acción se hizo mediante “batches” de ArcGis versión 10. Una imagen resultado se muestra a continuación:

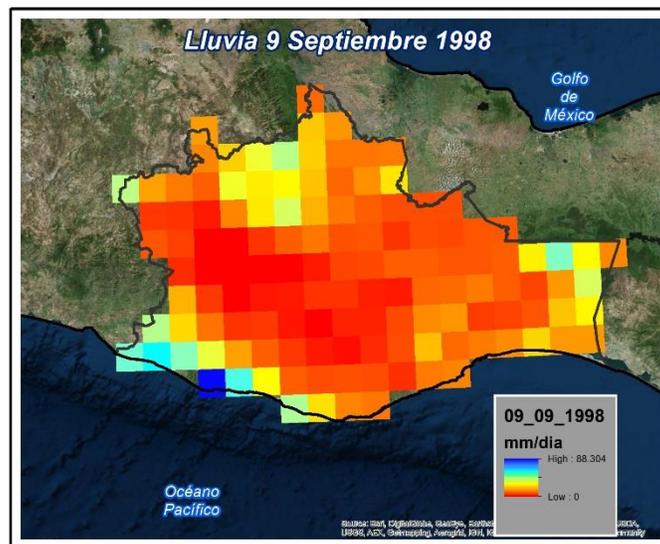


Imagen 24 Corte de lluvia para Oaxaca del 9 de septiembre de 1998.

#### 4.3.4 Análisis de máximos diarios TRMM vs Isoyetas CENAPRED

Dadas las mallas de lluvia del CENAPRED asociados a varios periodos de retorno y contando con la base de datos diarios de lluvia acumulada TRMM se realiza la siguiente operación espacial.

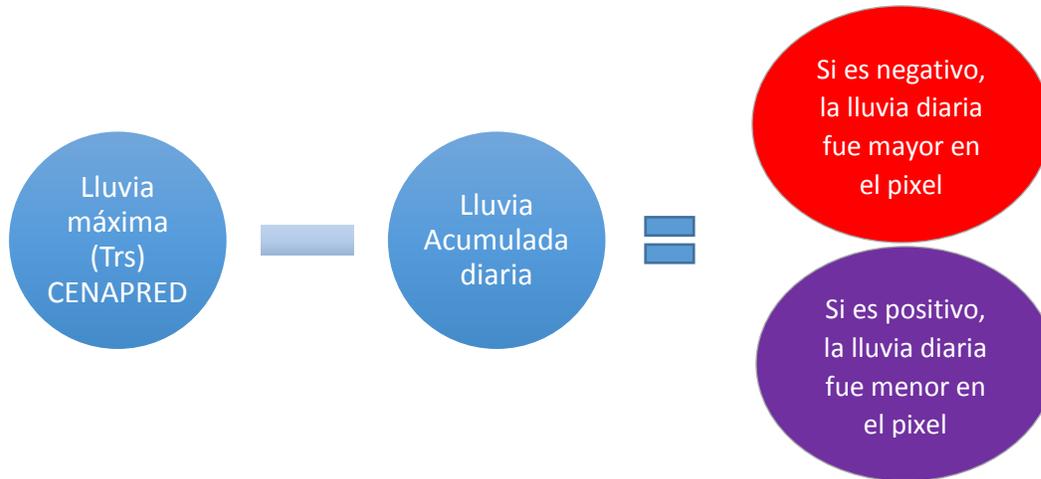
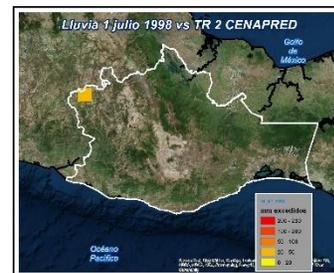
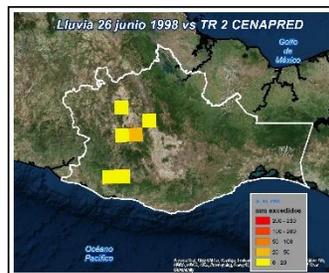
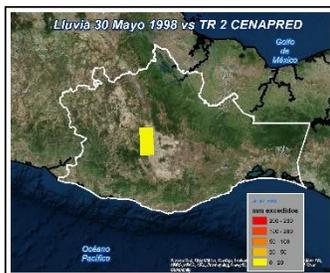


Imagen 25 Esquema de operación de las mallas de lluvia

De este modo, cuando las mallas resultado tuvieran valores negativos significaría que la lluvia diaria estimada superaría la lluvia proyectada, como la máxima en un tiempo de retorno dado para duraciones de 24 horas en ambos casos. Esta operación se efectuó para todas las mallas diarias y las mallas CENAPRED, dando un total de **38526** procesos de cálculo. A manera de ejemplo se muestran las mallas que excedieron los valores de lluvia máximos asociados a un periodo de retorno de 2 años en el año 1998.





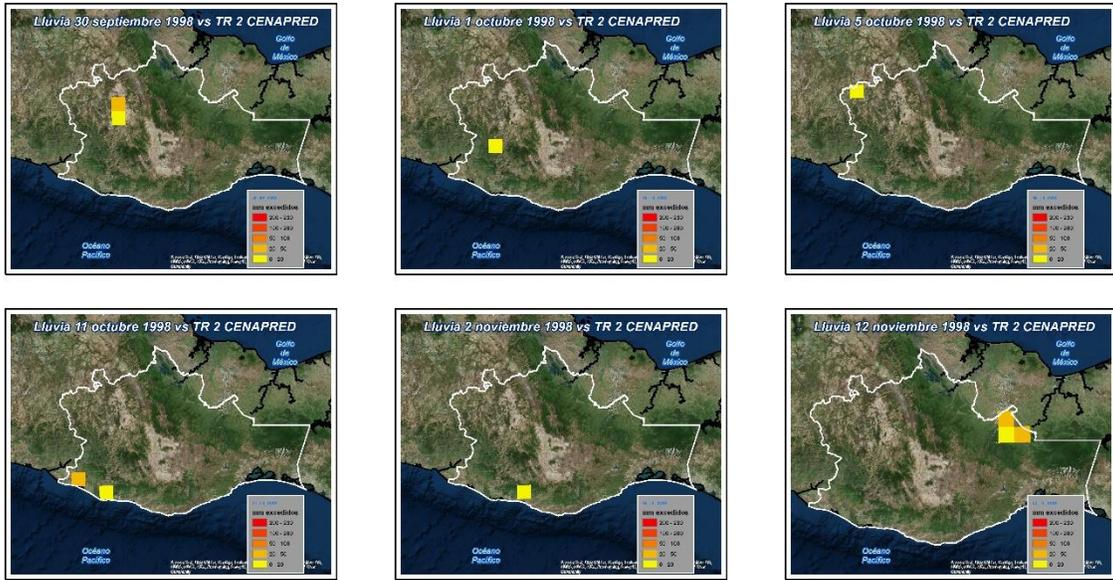


Imagen 26 Lluvia excedente diaria en comparación con malla CENAPRED Tr 2 años para el año 1998

Es claro que representar el total de los resultados de manera gráfica no es muy conveniente, así que se decidieron generar tablas resultados en las que se resaltan los días en que se rebasaron los umbrales máximos diarios estimados para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años en el intervalo del 1 de enero de 1998 al 31 de julio de 2015.

Fecha 1	Fecha2	Fecha3	Fecha4	Fecha5	Fecha6	Fecha7	Fecha8	Fecha9
30_05_1998	29_06_2000	10_05_2002	07_06_2004	02_09_2005	02_09_2007	02_08_2009	18_07_2011	19_08_2013
26_06_1998	19_07_2000	05_06_2002	15_06_2004	14_09_2005	03_09_2007	05_08_2009	22_07_2011	26_08_2013
01_07_1998	24_07_2000	10_06_2002	22_06_2004	15_09_2005	09_09_2007	16_08_2009	23_07_2011	01_09_2013
02_07_1998	29_07_2000	13_06_2002	07_07_2004	04_10_2005	11_09_2007	17_08_2009	27_07_2011	03_09_2013
06_07_1998	08_08_2000	15_06_2002	09_07_2004	05_10_2005	12_09_2007	18_08_2009	06_08_2011	13_09_2013
09_07_1998	09_08_2000	18_06_2002	18_07_2004	07_11_2005	15_09_2007	27_08_2009	09_08_2011	14_09_2013
10_07_1998	10_08_2000	20_06_2002	20_07_2004	02_05_2006	28_09_2007	12_09_2009	16_08_2011	22_09_2013
15_07_1998	14_08_2000	14_07_2002	21_07_2004	07_06_2006	19_10_2007	16_09_2009	22_08_2011	07_10_2013
23_07_1998	15_08_2000	15_07_2002	23_07_2004	12_06_2006	04_06_2008	22_09_2009	24_08_2011	08_10_2013
28_07_1998	29_08_2000	20_07_2002	30_07_2004	21_06_2006	06_06_2008	07_10_2009	29_08_2011	23_10_2013
22_08_1998	01_09_2000	22_07_2002	31_07_2004	30_06_2006	09_06_2008	11_10_2009	01_09_2011	11_05_2014
01_09_1998	03_09_2000	28_07_2002	03_08_2004	01_07_2006	02_07_2008	25_10_2009	03_09_2011	13_05_2014
04_09_1998	05_09_2000	29_07_2002	04_08_2004	02_07_2006	06_07_2008	01_11_2009	14_09_2011	24_05_2014
05_09_1998	07_09_2000	11_08_2002	12_08_2004	07_07_2006	07_07_2008	06_06_2010	15_09_2011	04_06_2014
07_09_1998	11_09_2000	14_08_2002	15_08_2004	11_07_2006	14_07_2008	30_06_2010	06_09_2011	05_06_2014
08_09_1998	12_09_2000	15_08_2002	19_08_2004	14_07_2006	16_07_2008	07_07_2010	28_09_2011	14_06_2014
09_09_1998	15_09_2000	24_08_2002	21_08_2004	19_07_2006	26_07_2008	08_07_2010	11_10_2011	17_06_2014
15_09_1998	16_09_2000	28_08_2002	05_09_2004	20_07_2006	19_07_2008	09_07_2010	26_05_2012	18_06_2014
19_09_1998	23_09_2000	29_08_2002	16_09_2004	26_07_2006	30_07_2008	13_07_2010	10_06_2012	20_06_2014
24_09_1998	24_09_2000	05_09_2002	23_09_2004	01_08_2006	31_07_2008	14_07_2010	16_06_2012	24_06_2014
30_09_1998	26_09_2000	09_09_2002	25_09_2004	14_08_2006	04_08_2008	27_07_2010	19_06_2012	05_07_2014
01_10_1998	27_09_2000	20_09_2002	04_10_2004	20_08_2006	09_08_2008	04_08_2010	22_06_2012	10_07_2014
05_10_1998	06_05_2001	21_09_2002	11_10_2004	21_08_2006	16_08_2008	07_08_2010	25_06_2012	17_07_2014
11_10_1998	07_05_2001	28_09_2002	15_10_2004	26_08_2006	17_08_2008	12_08_2010	29_06_2012	19_07_2014
02_11_1998	08_05_2001	09_10_2002	03_11_2004	28_08_2006	22_08_2008	14_08_2010	13_07_2012	24_07_2014
11_11_1998	24_05_2001	18_10_2002	29_05_2005	01_09_2006	25_08_2008	15_08_2010	19_07_2012	30_07_2014

11_06_1999	23_06_2001	03_11_2002	30_05_2005	06_09_2006	27_08_2008	18_08_2010	01_08_2012	06_08_2014
15_06_1999	03_06_2001	06_11_2002	31_05_2005	11_09_2006	02_09_2008	21_08_2010	09_08_2012	07_08_2014
24_06_1999	04_06_2001	12_11_2002	20_06_2005	24_09_2006	04_09_2008	22_08_2010	10_08_2012	08_08_2014
28_06_1999	09_06_2001	01_06_2003	23_06_2005	25_09_2006	06_09_2008	23_08_2010	13_08_2012	12_08_2014
01_07_1999	10_06_2001	07_06_2003	24_06_2005	29_09_2006	07_09_2008	28_08_2010	21_08_2012	18_08_2014
04_07_1999	12_06_2001	10_06_2003	26_06_2005	01_10_2006	14_09_2008	29_08_2010	22_08_2012	04_09_2014
05_07_1999	01_07_2001	14_06_2003	30_06_2005	04_10_2006	07_10_2008	30_08_2010	26_08_2012	11_09_2014
10_07_1999	09_07_2001	21_06_2003	03_07_2005	05_10_2006	17_05_2009	31_08_2010	01_09_2012	20_09_2014
11_07_1999	23_07_2001	26_06_2003	15_07_2005	14_10_2006	02_06_2009	01_09_2010	10_09_2012	17_10_2014
20_07_1999	24_07_2001	27_06_2003	20_07_2005	16_10_2006	05_06_2009	04_09_2010	17_09_2012	18_10_2014
31_07_1999	06_08_2001	04_07_2003	25_07_2005	19_10_2006	14_06_2009	05_09_2010	18_09_2012	21_10_2014
24_08_1999	10_08_2001	08_07_2003	26_07_2005	22_10_2006	18_06_2009	26_09_2010	20_09_2012	21_05_2015
09_09_1999	12_08_2001	17_07_2003	28_07_2005	28_10_2006	19_06_2009	27_09_2010	08_10_2012	18_06_2015
28_09_1999	14_08_2001	29_07_2003	04_08_2005	03_05_2007	24_06_2009	28_09_2010	27_05_2013	02_07_2015
29_09_1999	15_08_2001	05_08_2003	05_08_2005	04_05_2007	25_06_2009	28_10_2010	28_05_2013	12_07_2015
05_10_1999	16_08_2001	21_08_2003	11_08_2005	17_06_2007	26_06_2009	29_10_2010	29_05_2013	16_07_2015
09_10_1999	27_08_2001	06_09_2003	13_08_2005	03_07_2007	30_06_2009	18_05_2011	30_05_2013	26_07_2015
10_10_1999	28_08_2001	13_09_2003	16_08_2005	04_07_2007	01_07_2009	20_06_2011	02_06_2013	
24_05_2000	08_09_2001	15_09_2003	20_08_2005	05_07_2007	02_07_2009	22_06_2011	21_06_2013	
26_05_2000	09_09_2001	27_09_2003	23_08_2005	16_07_2007	04_07_2009	27_06_2011	26_06_2013	
15_06_2000	18_09_2001	07_10_2003	24_08_2005	20_07_2007	10_07_2009	28_06_2011	04_07_2013	
16_06_2000	06_10_2001	13_10_2003	27_08_2005	29_07_2007	18_07_2009	30_06_2011	06_07_2013	
17_06_2000	07_10_2001	01_11_2003	30_08_2005	30_07_2007	23_07_2009	10_07_2011	14_07_2013	
18_06_2000	10_10_2001	14_05_2004	31_08_2005	16_08_2007	27_07_2009	11_07_2011	30_07_2013	
19_06_2000	14_10_2001	04_06_2004	01_09_2005	22_08_2007	31_07_2009	16_07_2011	18_08_2013	

Tabla 1 Fechas (día\_mes\_año) en que al menos un pixel de la malla diaria TRMM fue mayor que la lluvia Máxima Tr 5 años del CENAPRED

Fecha	Fecha2	Fecha3	Fecha4	Fecha5	Fecha6	Fecha7	Fecha8	Fecha9
10_07_1998	24_05_2000	20_06_2002	30_07_2004	20_08_2006	25_06_2009	09_08_2012	18_08_2009	22_08_2011
15_09_1998	24_09_2000	24_08_2002	01_09_2005	28_10_2006	26_06_2009	10_08_2012	19_06_2009	24_08_2011
19_09_1998	26_05_2000	28_08_2002	03_07_2005	03_05_2007	27_07_2009	10_09_2012	22_09_2009	27_07_2011
22_08_1998	26_09_2000	29_08_2002	04_08_2005	04_05_2007	30_06_2009	16_06_2012	25_06_2009	09_08_2012
26_06_1998	29_07_2000	08_07_2003	04_10_2005	09_09_2007	05_09_2010	22_08_2012	26_06_2009	10_08_2012
30_09_1998	06_05_2001	10_06_2003	05_10_2005	16_07_2007	13_07_2010	29_06_2012	27_07_2009	10_09_2012
04_07_1999	06_08_2001	15_09_2003	14_09_2005	22_08_2007	14_07_2010	02_06_2013	30_06_2009	16_06_2012
05_07_1999	07_05_2001	26_06_2003	20_08_2005	28_09_2007	14_08_2010	14_09_2013	05_09_2010	22_08_2012
05_10_1999	09_09_2001	27_06_2003	24_06_2005	07_07_2008	23_08_2010	18_08_2013	13_07_2010	29_06_2012
20_07_1999	10_08_2001	27_09_2003	24_08_2005	07_09_2008	28_08_2010	23_10_2013	14_07_2010	02_06_2013
24_06_1999	10_10_2001	03_11_2004	25_07_2005	07_10_2008	29_08_2010	28_05_2013	14_08_2010	14_09_2013
29_09_1999	12_06_2001	04_08_2004	26_06_2005	09_08_2008	31_08_2010	04_06_2014	23_08_2010	18_08_2013
03_09_2000	15_08_2001	04_10_2004	30_08_2005	22_08_2008	01_09_2011	04_09_2014	28_08_2010	23_10_2013
09_08_2000	23_07_2001	05_09_2004	02_07_2006	26_07_2008	06_08_2011	05_07_2014	29_08_2010	28_05_2013
12_09_2000	24_05_2001	11_10_2004	06_09_2006	30_07_2008	10_07_2011	07_08_2014	31_08_2010	04_06_2014
14_08_2000	06_11_2002	15_10_2004	07_06_2006	01_07_2009	16_08_2011	08_08_2014	01_09_2011	04_09_2014
15_06_2000	09_09_2002	18_07_2004	11_07_2006	14_06_2009	18_07_2011	17_07_2014	06_08_2011	05_07_2014
15_09_2000	09_10_2002	20_07_2004	14_10_2006	18_07_2009	22_07_2011	18_10_2014	10_07_2011	07_08_2014
17_06_2000	13_06_2002	21_07_2004	16_10_2006	18_08_2009	22_08_2011	20_09_2014	16_08_2011	08_08_2014
18_06_2000	14_07_2002	23_07_2004	19_10_2006	19_06_2009	24_08_2011	24_06_2014	18_07_2011	17_07_2014
19_07_2000	15_08_2002	25_09_2004	20_07_2006	22_09_2009	27_07_2011	12_07_2015	22_07_2011	18_10_2014
						20_09_2014	24_06_2014	12_07_2015

Tabla 2 Fechas (día\_mes\_año) en que al menos un pixel de la malla diaria TRMM fue mayor que la lluvia Máxima Tr 5 años del CENAPRED

Fecha	Fecha2	Fecha3	Fecha4	Fecha5	Fecha6	Fecha7	Fecha8	Fecha9
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

10_07_1998	15_06_2000	23_07_2001	05_09_2004	05_10_2005	07_07_2008	26_06_2009	10_08_2012	12_07_2015
15_09_1998	17_06_2000	06_11_2002	11_10_2004	02_07_2006	07_09_2008	30_06_2009	10_09_2012	
19_09_1998	19_07_2000	09_09_2002	18_07_2004	07_06_2006	07_10_2008	14_08_2010	16_06_2012	
30_09_1998	06_08_2001	13_06_2002	23_07_2004	11_07_2006	09_08_2008	06_08_2011	14_09_2013	
04_07_1999	07_05_2001	14_07_2002	25_09_2004	20_08_2006	01_07_2009	18_07_2011	05_07_2014	
05_10_1999	10_10_2001	29_08_2002	01_09_2005	28_10_2006	14_06_2009	22_07_2011	17_07_2014	
29_09_1999	12_06_2001	27_06_2003	03_07_2005	04_05_2007	18_08_2009	22_08_2011	18_10_2014	
12_09_2000	15_08_2001	03_11_2004	04_10_2005	22_08_2007	22_09_2009	09_08_2012	20_09_2014	

Tabla 3 Fechas (día\_mes\_año) en que al menos un pixel de la malla diaria TRMM fue mayor que la lluvia Máxima Tr 10 años del CENAPRED

Fecha	Fecha2	Fecha3	Fecha4	Fecha5	Fecha6	Fecha7	Fecha8	Fecha9
10_07_1998	05_10_1999	03_11_2004	11_10_2004	05_10_2005	09_08_2008	30_06_2009	22_08_2011	18_10_2014
19_09_1998	29_08_2002	05_09_2004	04_10_2005	11_07_2006	18_08_2009	22_07_2011	10_08_2012	

Tabla 4 Fechas (día\_mes\_año) en que al menos un pixel de la malla diaria TRMM fue mayor que la lluvia Máxima Tr 20 años del CENAPRED

Fecha	Fecha2	Fecha3	Fecha4	Fecha5
10_07_1998	29_08_2002	05_09_2004	05_10_2005	22_08_2011
05_10_1999	03_11_2004	11_10_2004	22_07_2011	10_08_2012

Tabla 5 Fechas (día\_mes\_año) en que al menos un pixel de la malla diaria TRMM fue mayor que la lluvia Máxima Tr 50 años del CENAPRED

Fecha1	Fecha2
10_07_1998	22_08_2011
11_10_2004	10_08_2012

Tabla 6 Fechas (día\_mes\_año) en que al menos un pixel de la malla diaria TRMM fue mayor que la lluvia Máxima Tr 100 años del CENAPRED

Concluido el proceso de comparación, se puede observar que a medida que aumenta el periodo de retorno, son menos los eventos que sobrepasan los umbrales.

Periodo de retorno	Eventos
2 años	451
5 años	192
10 años	65
20 años	17
50 años	10
100 años	4

Tabla 7 Eventos que rebasan los umbrales máximos diarios en el periodo 1998-2015

Ahora, si representamos los eventos que rebasaron los periodos de retorno estimados por CENAPRED por año, podríamos representarlo en la siguiente gráfica

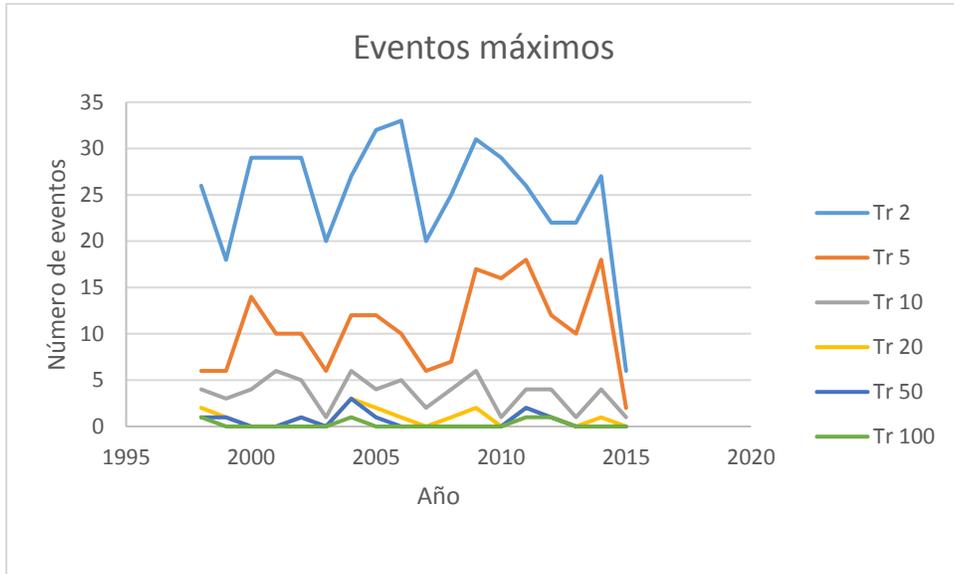
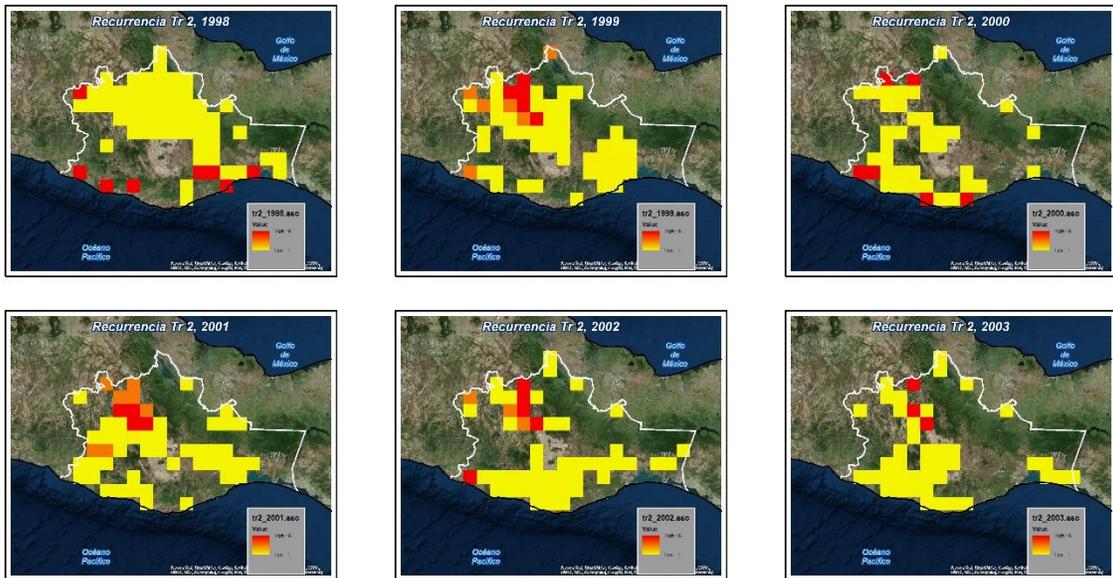


Tabla 8 Eventos anuales que rebasan los umbrales máximos diarios en el periodo 1998-2015 por periodo de retorno

#### 4.3.4.1 Distribución espacial de la recurrencia de eventos máximos

Identificados los días de lluvias máximas en los que se superan los eventos de diseño, se suman las mallas correspondientes por año y por periodo de retorno. Dichas mallas representarán la recurrencia de eventos anuales y la distribución espacial de las mismas. Así, si el valor del pixel supero el umbral, se marcara 1, si no lo supero, 0. Por ejemplo, si un pixel de un cierto año tuviera un valor de 5, querría decir que en ese año en el **dominio espacial del pixel**, se superaron 5 veces los umbrales del periodo de retorno dado. A continuación se muestran los resultados para los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, esto a razón de ser los que cuentan con eventos máximos durante todos los años de 1998 a 2014. Para el caso de los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años el número de eventos que rebasan los umbrales se ven disminuidos de gran manera.



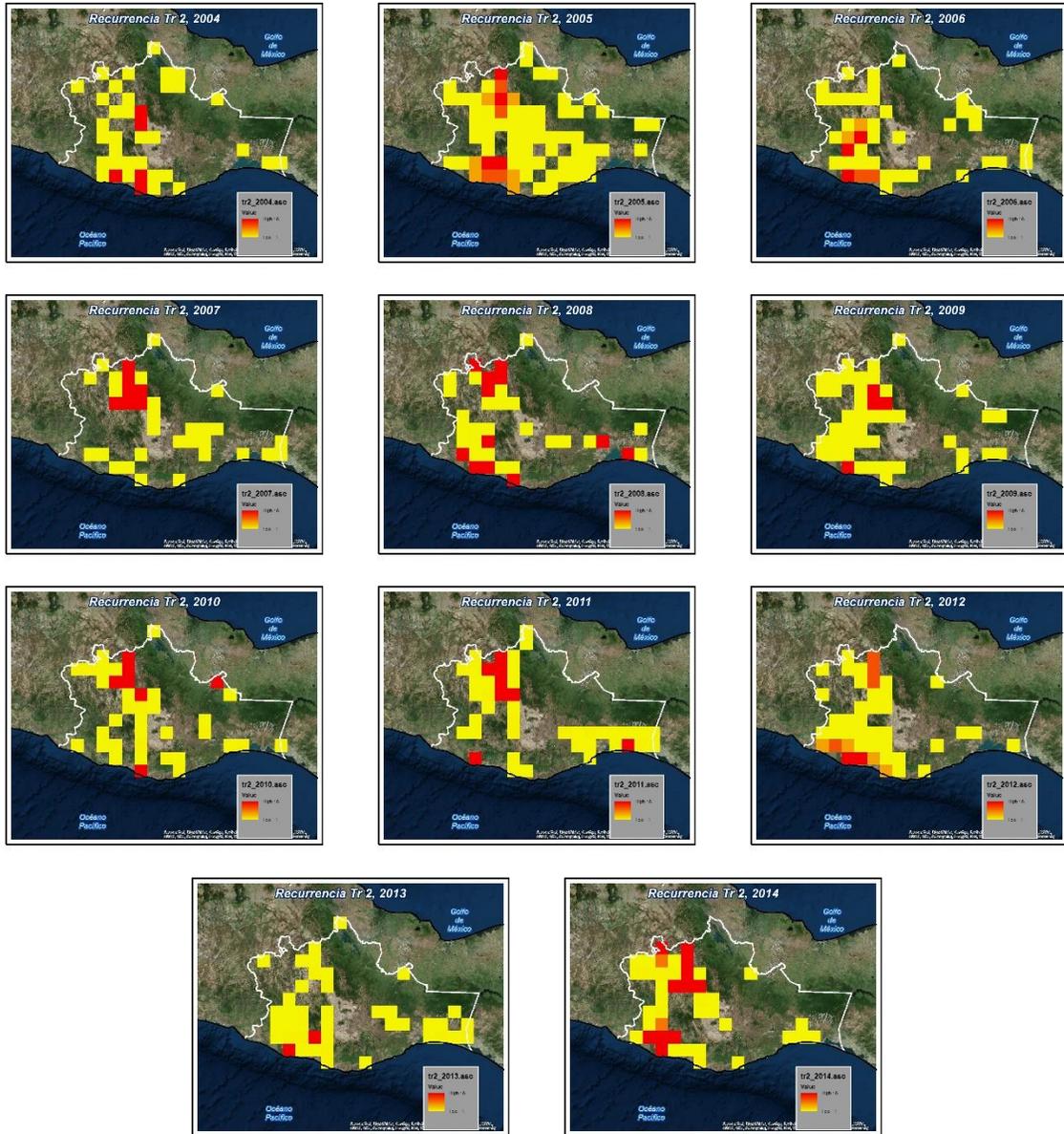
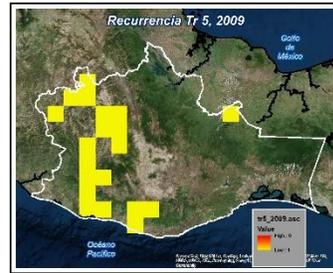
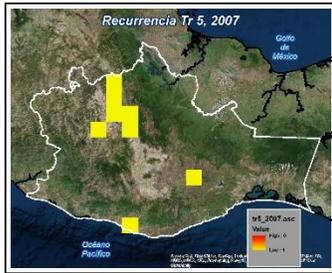
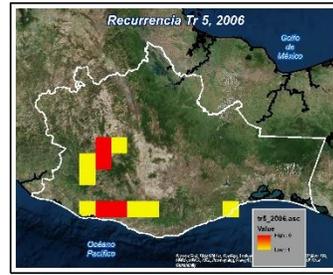
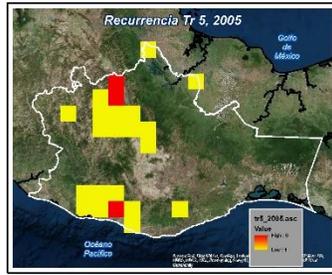
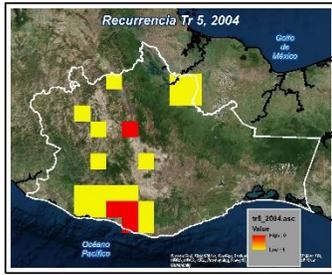
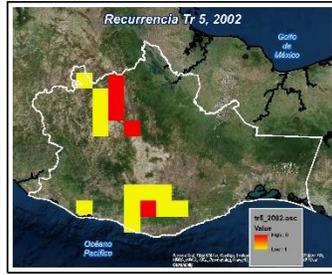
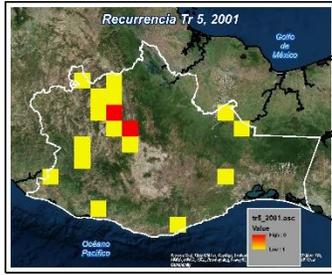
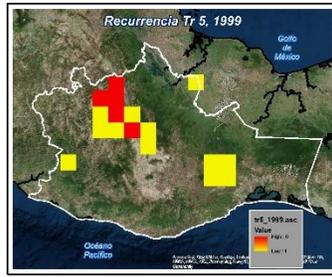


Imagen 27 Recurrencia de eventos máximos en comparación lluvias asociadas a un periodo de retorno de 2 años del CENAPRED en el periodo 1998-2014.

Nota: Debido a que los mapas de recurrencia son anuales, no se coloca el año 2015 debido a que solo contamos con datos hasta el 31 de julio.



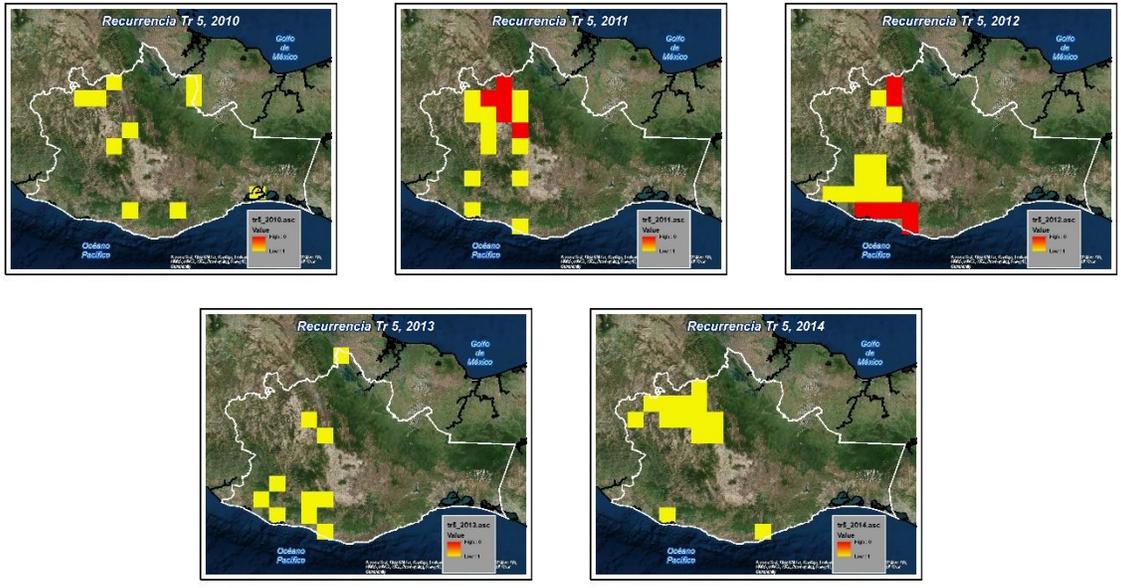
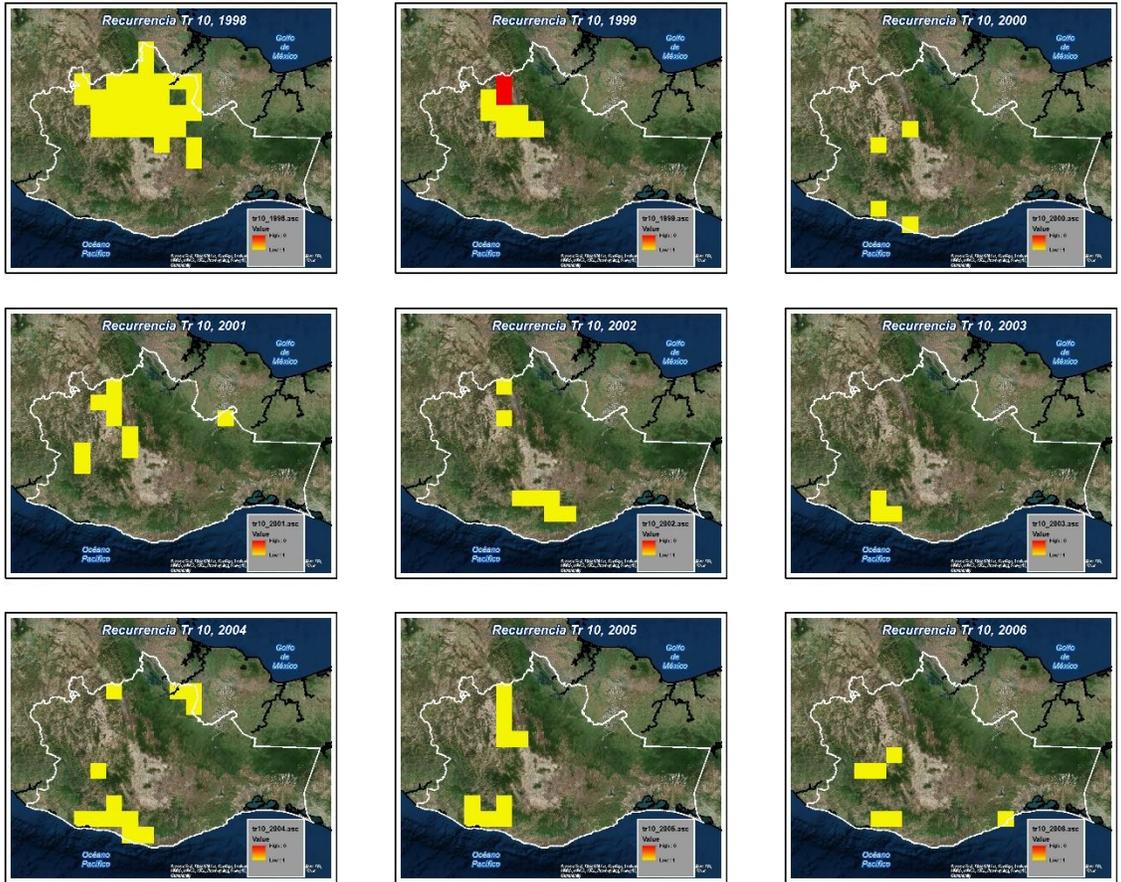


Imagen 28 Recurrencia de eventos máximos en comparación Iluvias asociadas a un periodo de retorno de 5 años del CENAPRED en el periodo 1998-2014.



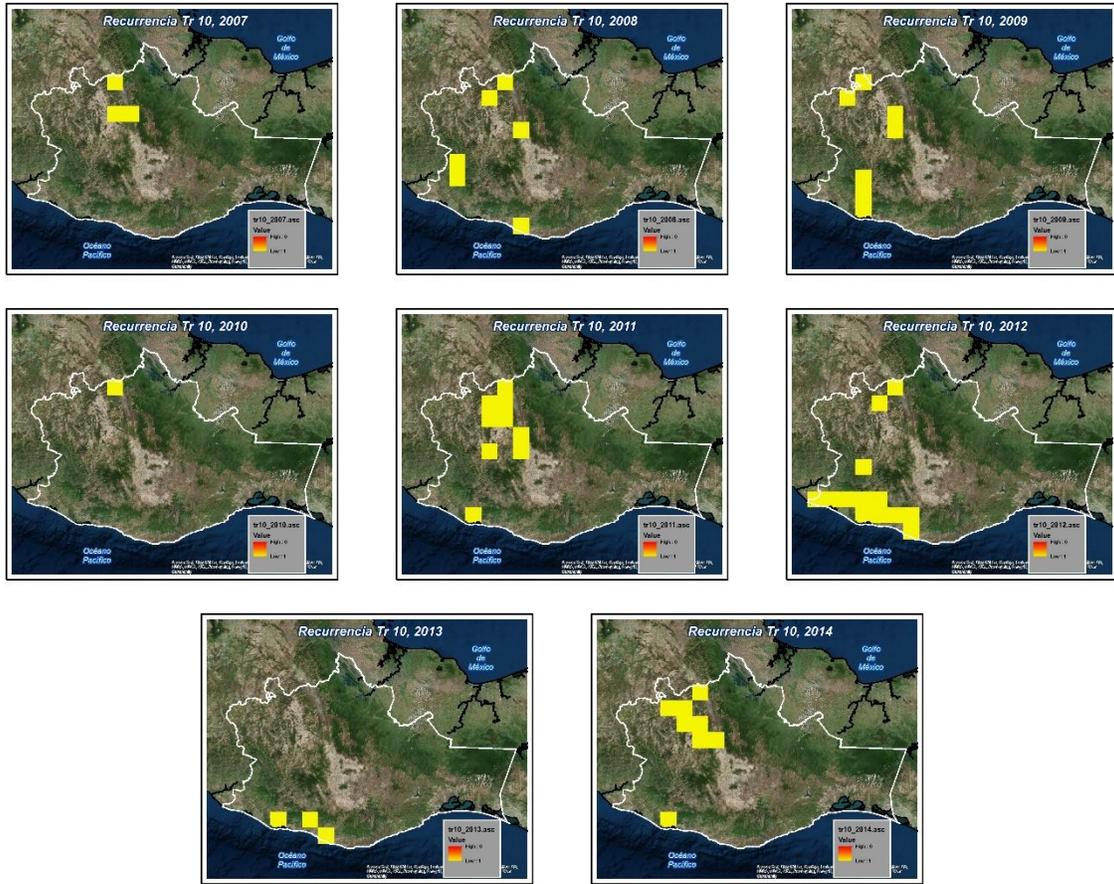


Imagen 29 Recurrencia de eventos máximos en comparación lluvias asociadas a un periodo de retorno de 10 años del CENAPRED en el periodo 1998-2014.

#### 4.3.5 Recurrencia anual de eventos máximos para el estado de Oaxaca

Generadas las mallas de recurrencia anual de eventos máximos para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, se generaron mallas de recurrencia histórica. Las mallas de recurrencia histórica resultan de las suma de las series anuales.

$$\text{Recurrencia histórica} = \text{Rec. 1998} + \text{Rec. 1999} \dots \dots + \text{Rec. 2014}$$

La recurrencia histórica asociada a cada periodo de retorno cobra significancia ya que se identifican aquellas zonas donde más frecuentemente los umbrales de lluvia estimados son rebasados. Los resultados se muestran en las siguientes figuras.

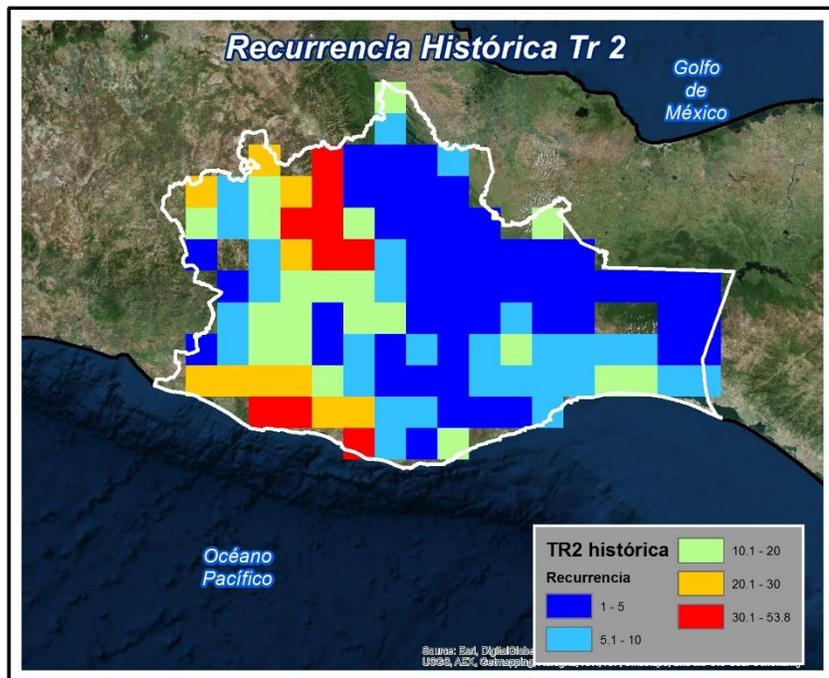


Imagen 30 Recurrencia de eventos máximos en el periodo 1998-2014 en comparación Iluvias asociadas a un periodo de retorno de 2 años del CENAPRED

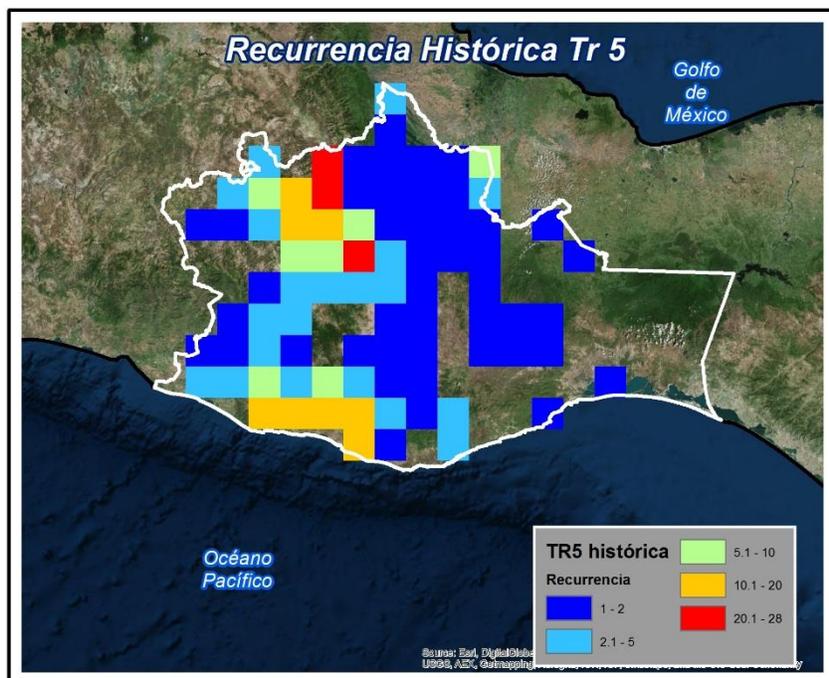


Imagen 31 Recurrencia de eventos máximos en el periodo 1998-2014 en comparación Iluvias asociadas a un periodo de retorno de 5 años del CENAPRED

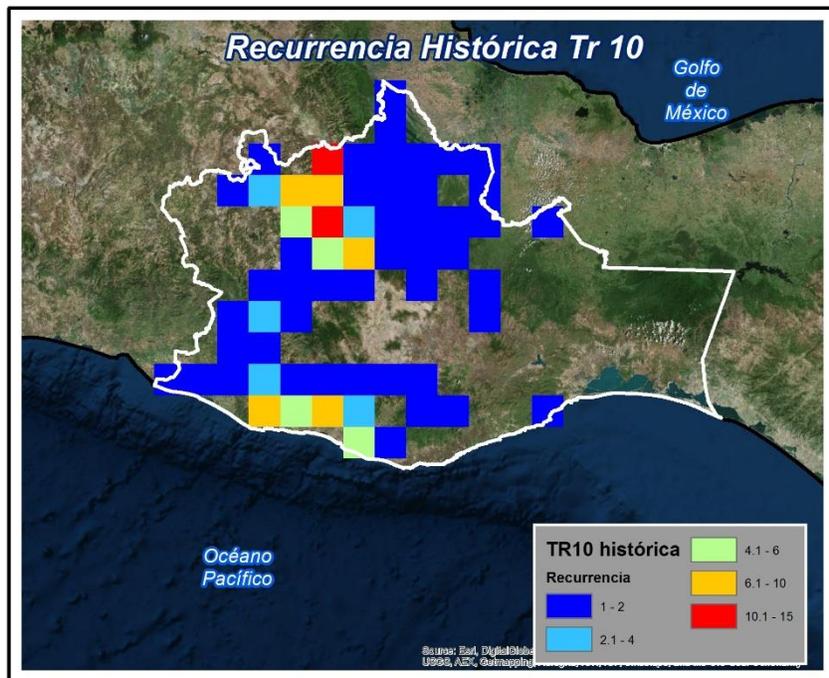


Imagen 32 Recurrencia de eventos máximos en el periodo 1998-2014 en comparación lluvias asociadas a un periodo de retorno de 10 años del CENAPRED

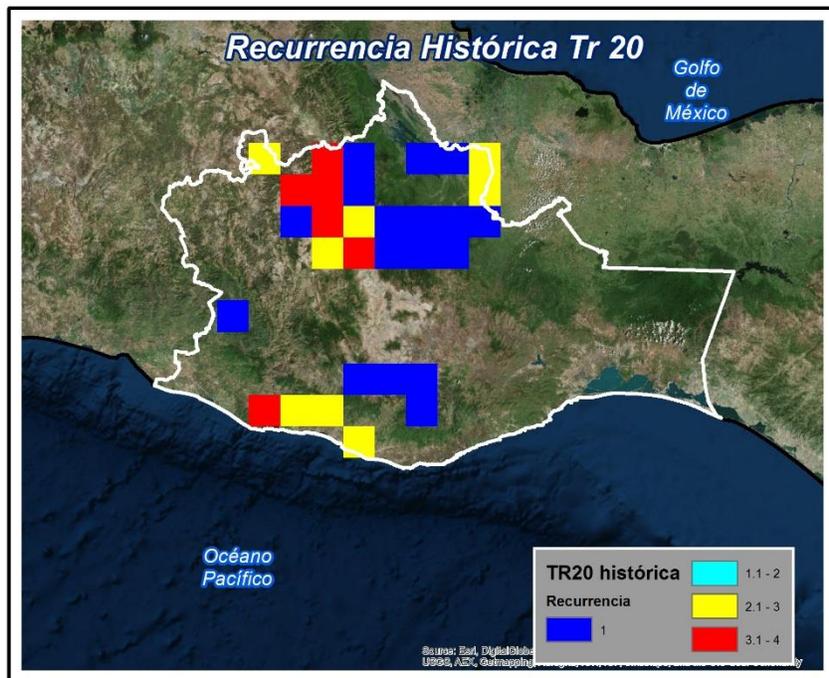


Imagen 33 Recurrencia de eventos máximos en el periodo 1998-2014 en comparación lluvias asociadas a un periodo de retorno de 20 años del CENAPRED

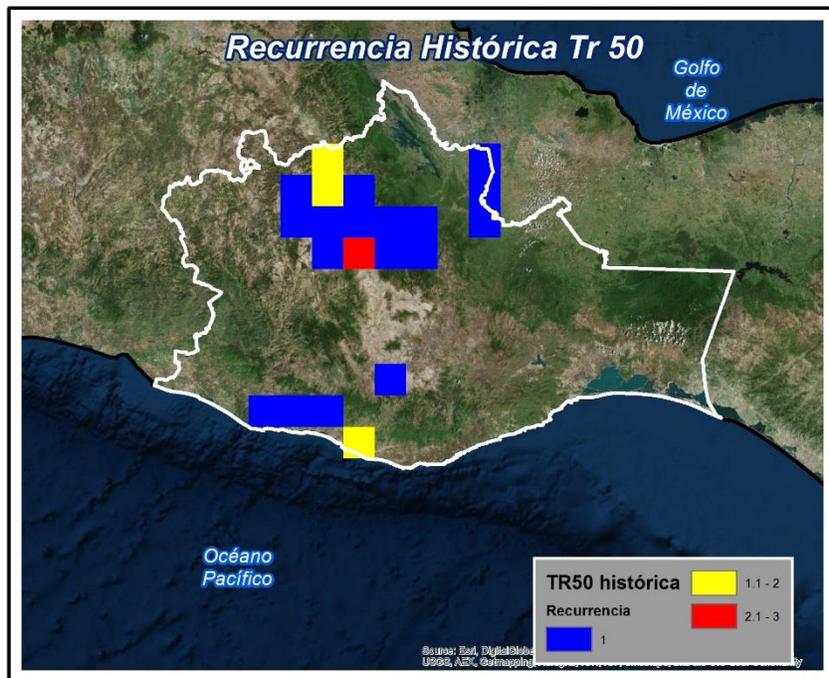


Imagen 34 Recurrencia de eventos máximos en el periodo 1998-2014 en comparación lluvias asociadas a un periodo de retorno de 50 años del CENAPRED

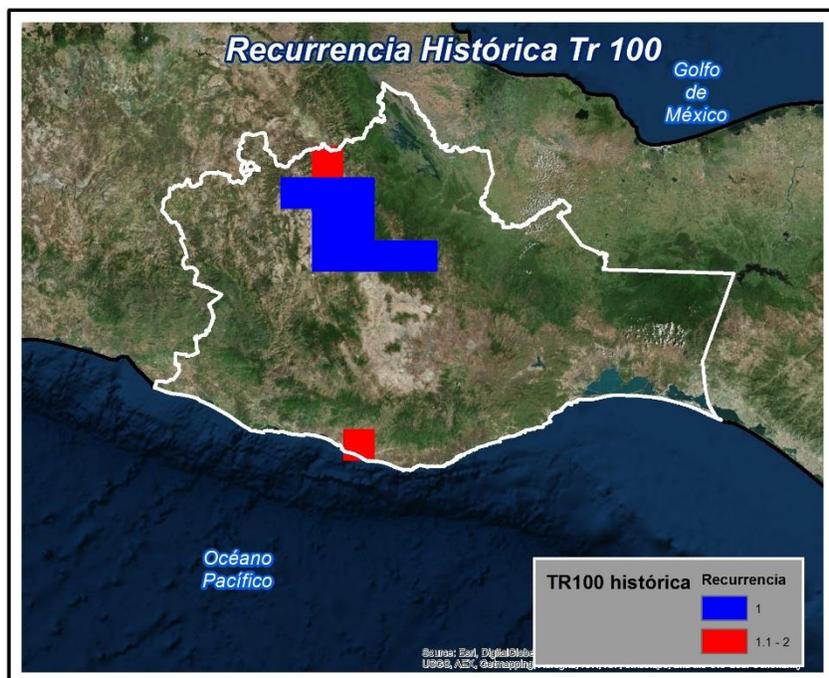


Imagen 35 Recurrencia de eventos máximos en el periodo 1998-2014 en comparación lluvias asociadas a un periodo de retorno de 100 años del CENAPRED

#### 4.4 Discusión de resultados

La recurrencia de eventos máximos asociados al periodo de retorno de 2 años es alta; puntualmente en la zona noroeste del estado (Región mixteca y flanco oeste de la región de la cañada) se registran pixeles hasta con 54 eventos que sobrepasaron las lluvias estimadas al periodo de retorno mencionado. También hacia el sur, en la región de la costa hay valores pico que alcanzan hasta 43 eventos.

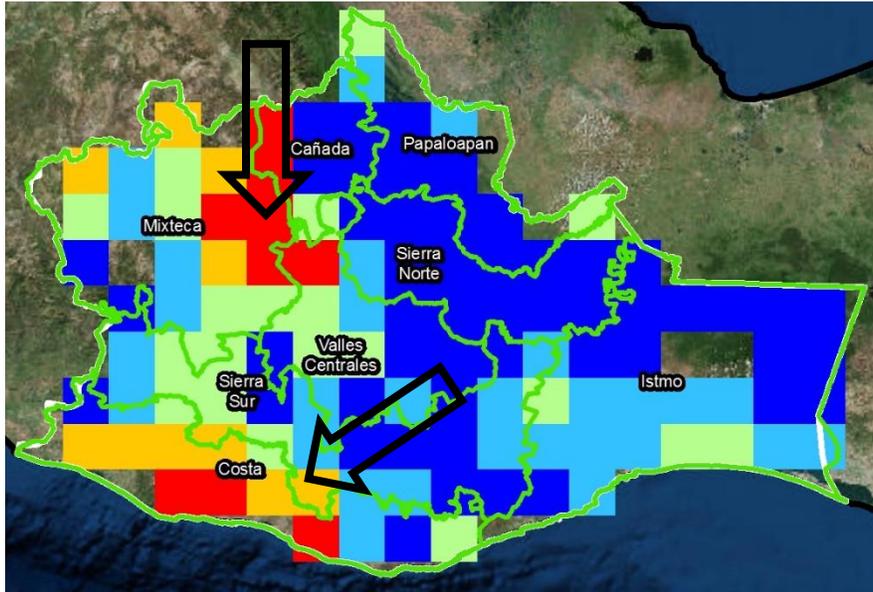


Imagen 36 Detalle de eventos recurrente Tr 2 años

Así también, se muestra que la parte Oeste del estado tiene una marcada mayoría de eventos máximos respecto de la parte este. En el mismo son, se encuentran los históricos de periodos de retorno de 5, y 10 años.

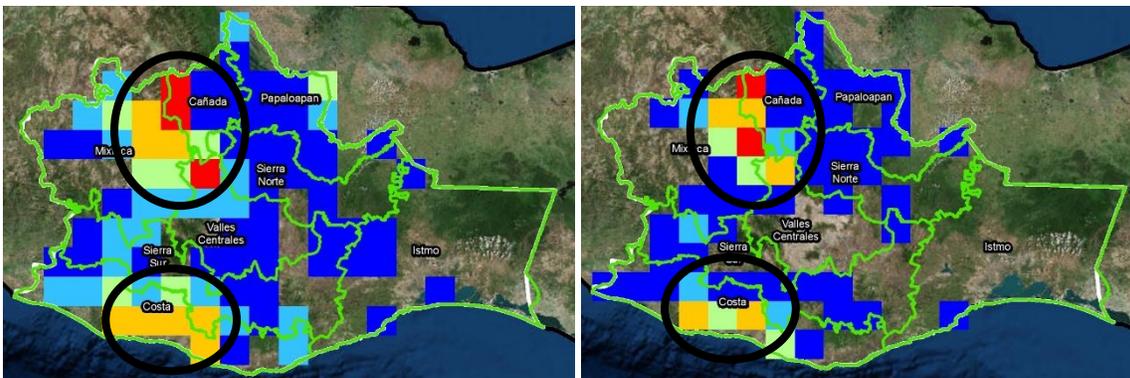


Imagen 37 Detalle de eventos recurrentes Tr 5 años (izquierda) y 10 años (derecha)

En las mallas de recurrencia histórica de periodos de retorno de 20, 50 y 100 años hay mucha menor extensión espacial, ya que como es de esperarse este tipo de eventos no se dan muy frecuentemente. Sin embargo, se identifica que las zonas de confluencia de la región mixteca con la cañada, además del flanco derecho de la región de la costa, concentran la recurrencia de este tipo de eventos.

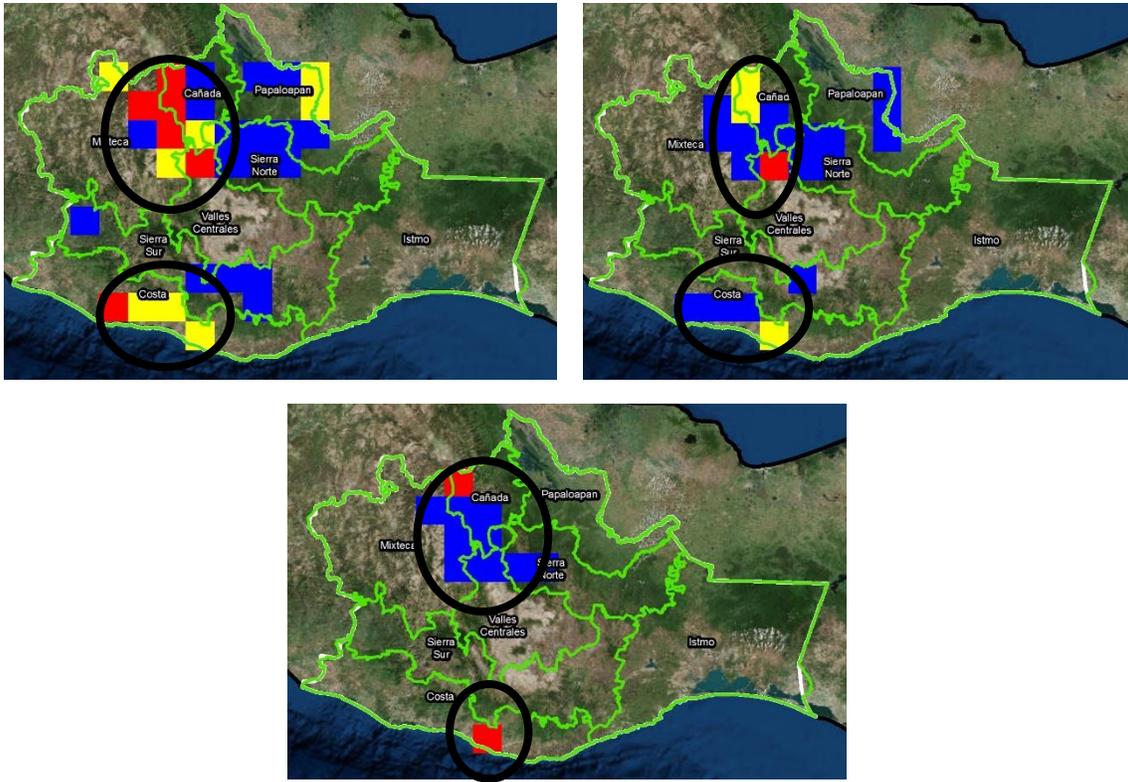


Imagen 38 Detalle de eventos recurrentes Tr 20 años (izquierda superior) y Tr 50 años (derecha superior) y Tr 100 años (Centro Inferior)

## 5. Conclusiones

El presente trabajo buscó representar de manera primordial la distribución de eventos máximos en el estado de Oaxaca que sobrepasan los umbrales de los valores estimados en las isoyetas del CENAPRED para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Consecuente al análisis, se realizaron mapas de recurrencia y es notable la gran frecuencia de eventos que sobrepasan los umbrales.

En relación a las lluvias estimadas para un periodo retorno de 2 años se registraron 451 eventos que al menos en un pixel rebasaron los umbrales. Además hubo recurrencias máximas de 54 eventos, esto tiene una significancia importante ya que refleja la subestimación de las lluvias a periodos de retorno muy usados en el diseño de estructuras civiles.

Para el caso de los periodos de retorno restantes, se reafirma la focalización de eventos frecuentes máximos en la zona de los límites de la cañada y la región mixteca, del mismo modo que en la parte este de la región de la costa. Al revisar la distribución de estaciones climatológicas que operan en esas regiones se observa la poca densidad de estaciones. Por otro lado, también revisamos la orografía del territorio y se pone manifiesto que hay grandes variaciones altimétricas en los vacíos de la red de medición climatológica.

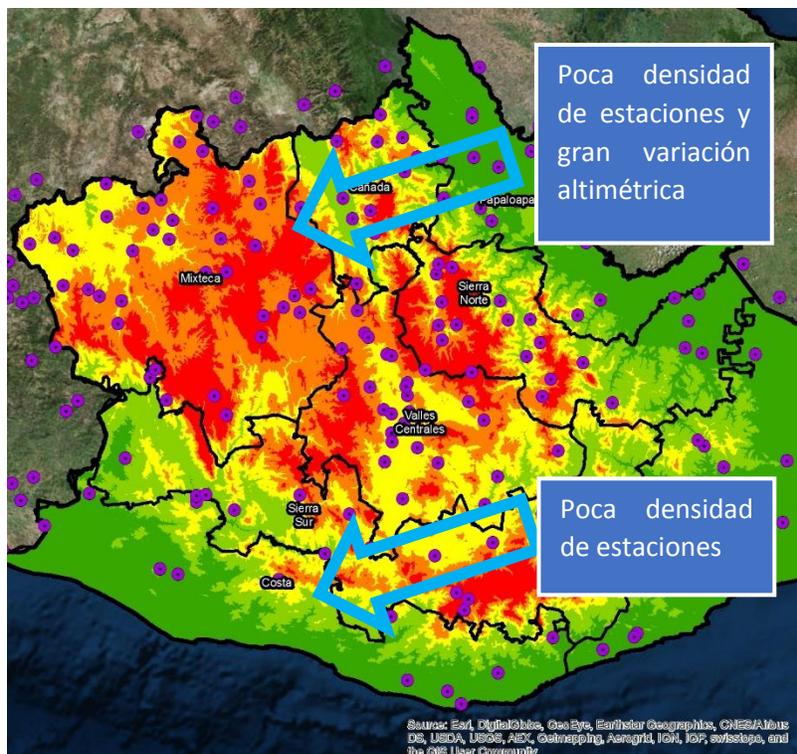


Imagen 39 Red de estaciones climatológicas y altimetría en zonas de alta recurrencia de eventos máximos para el estado de Oaxaca.

El presente trabajo muestra como el continuo de lluvias interpoladas entre una red cualquiera de medición climatológica no refleja de manera clara el comportamiento del régimen pluvial en las zonas de nulidad de información, si no que la lluvia es heterogénea y es fuertemente afectada por elementos como la orografía.

La disponibilidad y accesibilidad de información satelital en la actualidad debe empezar a usarse en la cotidianidad del diseño y la planeación.

La información de las isoyetas de la SCT muestra valores de lluvia en un orden de magnitud que no concuerda con los registros históricos de lluvia.

## 6. Bibliografía

- B Collischonn, W. C. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 207-216.
- Breña, P. (2004). *Precipitación y Recursos Hidráulicos en México*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Campos. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Cavazos-Hastenrath. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 377-386.
- CENAPRED. (2007). *Ciclones Tropicales*. Ciudad de México: CENAPRED.
- CIAF. (2009). *Cuerso: Fundamentos de percepción remota*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- CONAGUA. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento "MAPAS"*. Ciudad de México: CONAGUA.
- Dinku, T. S. (2010). Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and South America. En M. G. Hossain, *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* (págs. 193-204).
- García. (2003). Distribución de la precipitación en la Republica Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 67-76.
- Huffman, &. B. (2014). Real-Time TRMM Multi-Satellite Precipitation. *Analysis Data Set Documentation*.
- Huffman, G. (1997). Estimates of root-mean-square random error for finite samples of estimated precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 1191-1201.
- Lavado-Casimiro, W. D. (2009). TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon–Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model. *IAHS*, 245–252.
- Li, X.-H. Q.-Y. (2012). Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin. *Journal of hydrology*, 426–427.
- Ranyére Silva Nóbrega, E. P. (2008). ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE DADOS DO SATÉLITE TRMM EM UM MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUÍDO NA BACIA DO RIO JAMARI (RO. *Revista Brasileira de Geografia Física*.
- SIGA-CONAGUA. (2005). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ciudad de México: CONAGUA.
- Su F., H. Y. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 622-640.
- Ven Te Chow, D. R. (1987). *Hidrología Aplicada*. Austin, TX: McGraw-Hill.