



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

**Análisis de los patrones espaciales y
temporales de la precipitación
producidos por la tormenta “Manuel” en
la cuenca del río Atoyac.**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Liliana Aguilar Yañez

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Ma. Del Rosío Ruíz Urbano



Ciudad Universitaria, México, D.F. 2015



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/021/14

Señorita
LILIANA AGUILAR YAÑEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. MARÍA DEL ROSÍO RUIZ URBANO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ANÁLISIS DE LOS PATRONES ESPACIALES Y TEMPORALES DE LA PRECIPITACIÓN PRODUCIDOS POR LA TORMENTA "MANUEL" EN LA CUENCA DEL RÍO ATOYAC"

- INTRODUCCIÓN
- I. COMPONENTES DEL TEMA
 - II. ANTECEDENTES
 - III. CASO DE ESTUDIO. CUENCA DEL RÍO ATOYAC (RH19A)
 - IV. CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 26 de mayo del 2015.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Agradecimientos

La conclusión de este trabajo es el punto final a una etapa de mi vida, en la que se vieron involucradas varias personas que contribuyeron en su desarrollo, la cuales no puedo dejar pasar sin que sepan que gracias a ellos es que ahora me encuentro donde estoy.

Mi familia... que siempre me brindó su apoyo incondicional, mi papá que no sólo me proporcionó su sostén económico sino que es gracias a él que me nació el interés por la ingeniería, mi mamá que siempre se preocupó por mis horas de dormir aunque yo le he robado varias de las suyas y ha estado al pendiente de mi bienestar siempre y mi hermana que no sólo me apoya sino que me ha hecho saber que está orgullosa de mi.

Mis amigos... que ya sea dentro o fuera del aula siempre fueron para mí un apoyo, nunca me han dejado sola, sé que cuento con ellos y espero que ellos sepan que cuentan conmigo, en especial Carlos que ha hecho que confié en mi misma, tenga muchas aspiraciones y ganas de llegar muy lejos.

Mis profesores... que me proporcionaron su sabiduría y orientación al interior y exterior del salón de clase, una mención muy especial a mi directora de Tesis, la Dra. Rosío Ruíz Urbano quien no sólo dirigió este trabajo, también ha sido con el transcurso del tiempo una persona que ha marcado mi vida de una manera muy especial, no tengo palabras para agradecerle todo su apoyo.

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería que me proporcionó una formación de calidad para poder hacer frente a la competencia laboral allá afuera.

Y por último pero no menos importante a Dios, por la salud, el bienestar, las bendiciones y porque cada día me da un motivo para seguir esforzándome.

GRACIAS...

ÍNDICE

1. Introducción	13
2. Componentes del tema	15
2.1. Justificación	15
2.2. Objetivos	15
2.2.1 Objetivo general	15
2.2.2 Objetivos específicos	15
2.3. Hipótesis	16
2.4. Marco teórico	16
2.5. Diseño de la investigación	17
3. Antecedentes	19
3.1 Precipitación	19
3.1.1 Tipos de precipitación	24
3.1.2 Medición de la precipitación	25
3.1.3 Pluviógrafo	30
3.1.3.1 Tipos de pluviógrafos	31
3.1.3.2 Importancia del Pluviógrafo	33
3.1.4 Distribución y utilización de la lluvia	34
3.1.5 Intensidad de las lluvias	38
3.1.6 Precipitaciones en México	38
3.2 Información meteorológica	39
3.2.1 Base de datos meteorológicos	40
3.2.2 Estaciones meteorológicas diarias	40
3.2.3 Estaciones meteorológicas horarias	41
3.2.3.1 Estación meteorológica automática (EMA)	41
3.2.3.2 Estación sinóptica meteorológica automática (ESIME)	43
3.3 Percepción remota y sistemas de información geográfica	44
3.3.1 Definición de percepción remota	44
3.3.2 Fundamentos de la observación remota	45
3.3.3 Sensores y satélites utilizados en la percepción remota	47
3.3.4 Definición de sistemas de información geográfica	52
4. Caso de estudio: cuenca del río Atoyac (RH19A)	58
4.1 Descripción de la cuenca	58
4.2 Características fisiográficas de la cuenca	59

4.3	Información de precipitación con base en tierra	65
4.3.1	Prueba de independencia	66
4.3.2	Prueba de homogeneidad	68
4.4	Información de lluvia estimada de satélite	70
4.5	Caracterización del error con lluvia estimada de satélite	71
4.5.1	Tratamiento de la información	71
4.5.2	Validación temporal	73
4.6	Discusión de resultados	74
5.	Conclusiones y/o recomendaciones	81
	Bibliografía	83
	Referencias de Figuras	85
	Anexo A	88
	Anexo B	91
	Anexo C	97
	Anexo D	98
	Anexo E	100

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1:</i>	
Huraken -----	16
<i>Figura 2.2:</i>	
Instituciones que trabajan en materia de observación y pronóstico del tiempo y del clima -----	17
<i>Figura 3.1:</i>	
Núcleos de condensación o de congelamiento -----	19
<i>Figura 3.2:</i>	
Clasificación de nubes -----	21
<i>Figura 3.3:</i>	
Frente frío -----	24
<i>Figura 3.4:</i>	
Frente cálido -----	24
<i>Figura 3.5:</i>	
Desarrollo de una precipitación de tipo convectivo -----	25
<i>Figura 3.6:</i>	
Precipitación orográfica -----	25
<i>Figura 3.7:</i>	
Pluviómetro ordinario -----	26
<i>Figura 3.8:</i>	
Pluviómetro tipo norteamericano -----	27
<i>Figura 3.9:</i>	
Pluviómetro tipo Hellman -----	27
<i>Figura 3.10:</i>	
Nivómetro -----	28
<i>Figura 3.11:</i>	
Totalizador -----	28
<i>Figura 3.12:</i>	
Radar meteorológico -----	29
<i>Figura 3.13:</i>	
Pluviógrafo -----	30
<i>Figura 3.14:</i>	
Pluviograma -----	31
<i>Figura 3.15:</i>	
Pluviógrafo sin sifón automático -----	31

<i>Figura 3.16:</i>	
Pluviógrafo de flotador con sifón automático tipo Hellman -----	32
<i>Figura 3.17:</i>	
Pluviógrafo de balanza -----	32
<i>Figura 3.18:</i>	
Pluviógrafo de oscilación -----	33
<i>Figura 3.19:</i>	
Pluviógrafo tipo Nilsson -----	33
<i>Figura 3.20:</i>	
Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico de México (La precipitación media anual se refiere al periodo 1971 – 2000. Los valores restantes son medidas reportadas al 2009) -----	34
<i>Figura 3.21:</i>	
Distribución de la precipitación anual en México, 1971 – 2000 -----	35
<i>Figura 3.22:</i>	
Intensidad de usos consuntivos (2012) -----	36
<i>Figura 3.23:</i>	
Fuente predominante para usos consuntivos (2012) -----	36
<i>Figura 3.24:</i>	
Uso agrupado consuntivo predominante (2012) -----	37
<i>Figura 3.25:</i>	
Estructura de tipo andamio -----	42
<i>Figura 3.26:</i>	
Estación de tipo torre triangular -----	42
<i>Figura 3.27:</i>	
Estructura de una ESIME -----	44
<i>Figura 3.28:</i>	
Longitud de onda y frecuencia -----	45
<i>Figura 3.29:</i>	
Espectro Electromagnético -----	46
<i>Figura 3.30:</i>	
Satélite TRMM -----	49
<i>Figura 3.31:</i>	
Instrumentos satélite TRMM -----	50
<i>Figura 3.32:</i>	
Satélite Landsat -----	51

<i>Figura 3.33:</i>	
Satélite SPOT 5 -----	51
<i>Figura 3.34:</i>	
NOAA -----	52
<i>Figura 3.35:</i>	
Mapa raster de unidades espaciales areales (cuatro polígonos) -----	54
<i>Figura 3.36:</i>	
Mapa vectorial de unidades espaciales areales (cuatro polígonos) -----	55
<i>Figura 3.37:</i>	
Base de datos vectorial (tres capas temáticas) -----	56
<i>Figura 4.1:</i>	
Cuenca “R. Atoyac y otros” -----	58
<i>Figura 4.2:</i>	
Hidrografía -----	59
<i>Figura 4.3:</i>	
Centroide de la cuenca -----	61
<i>Figura 4.4:</i>	
Modelo de elevación de la cuenca -----	61
<i>Figura 4.5:</i>	
Red hídrica de la cuenca -----	62
<i>Figura 4.6:</i>	
Número de orden de la cuenca -----	63
<i>Figura 4.7:</i>	
Pendiente media de la cuenca -----	64
<i>Figura 4.8:</i>	
Pendiente reclasificada -----	64
<i>Figura 4.9:</i>	
Pendiente media -----	65
<i>Figura 4.10:</i>	
Estaciones meteorológicas -----	66
<i>Figura 4.11:</i>	
Imagen del día 15 de Septiembre del 2013 (13:30 hrs) en formato netCDF -----	75
<i>Figura 4.12:</i>	
Zonas UTM de México -----	75

Figura 4.13:
Imagen satelital del día 15 de Septiembre del 2013 (13:30 hrs) -----76

Figura 4.14:
Imagen satelital del día 15 de Septiembre del 2013 (acumulado) -----76

Figura 4.15:
Isoyetas e isolíneas (estaciones meteorológicas automáticas) 15/Sep./13 -----77

Figura 4.16:
Isoyetas e isolíneas (imágenes) 15/Sep./13 -----78

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1:</i>	
Velocidad terminal de las gotas de agua en aire en reposo (Presión de 1013.3 milibares, temperatura 20°C, humedad relativa del 50%) -----	20
<i>Tabla 3.2:</i>	
Principales tipos de nubes y su simbología (s. Peatterssen, 1964) -----	21
<i>Tabla 3.3:</i>	
Precipitación pluvial normal mensual por RHA, 1971 – 2000 (milímetros) -----	38
<i>Tabla 3.4:</i>	
Estaciones climatológicas e hidrométricas -----	39
<i>Tabla 3.5:</i>	
Conjunto de instrumentos -----	40
<i>Tabla 3.6:</i>	
Magnitudes radiométricas utilizadas en Teledetección -----	47
<i>Tabla 3.7:</i>	
Descripción de los instrumentos del satélite TRMM -----	50
<i>Tabla 4.1:</i>	
Centroide y área de las subcuencas que conforman la RH19A -----	60
<i>Tabla 4.2:</i>	
Cálculo del centroide -----	60
<i>Tabla 4.3:</i>	
Elevación de la cuenca -----	62
<i>Tabla 4.4:</i>	
Longitud de tributarios -----	62
<i>Tabla 4.5:</i>	
Pendiente media -----	65
<i>Tabla 4.6:</i>	
Registro de precipitación “Acapulco” -----	67
<i>Tabla 4.7:</i>	
Coefficiente de autocorrelación y límites al 95% -----	67
<i>Tabla 4.8:</i>	
Registro de precipitación 15 de Septiembre del 2013 -----	68
<i>Tabla 4.9:</i>	
Prueba de homogeneidad -----	69

<i>Tabla 4.10:</i>	
Registros de la estación “Acapulco” 14 de Septiembre del 2013	69
<i>Tabla 4.11:</i>	
Prueba de homogeneidad estación “Acapulco”	70
<i>Tabla 4.12:</i>	
Características del TRMM 3B42	71
<i>Tabla 4.13:</i>	
Resumen de datos del pixel No. 19	78
<i>Tabla 4.14:</i>	
Valores estimados de $h_{p_{TRMM}}$ utilizando la recta de ajuste	80

ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 3.1:</i> Distribución de los volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos (2012) -----	35
<i>Gráfica 3.2:</i> Volúmenes concesionados para usos consuntivos agrupados, por RHA (2012) -----	37
<i>Gráfica 3.3:</i> Precipitación pluvial mensual normal en México -----	38
<i>Gráfica 3.4:</i> Perfiles de precipitación (milímetros) -----	39
<i>Gráfica 3.5:</i> Precipitación pluvial anual, 2000 – 2012 (mm) -----	39
<i>Gráfica 4.1:</i> Correlograma de la estación “Acapulco” -----	68
<i>Gráfica 4.2:</i> Comportamiento de la precipitación acumulada (24 hrs.) comparativamente entre estaciones e imágenes -----	79
<i>Gráfica 4.3:</i> Recta de ajuste a los puntos observados en las estaciones e imágenes -----	79
<i>Gráfica 4.4:</i> Técnica gráfica “Box – Plot” que representa la correlación entre las estaciones y las imágenes (10 – 20 de Septiembre del 2013) -----	80

Introducción

Los estudios del clima en la Nueva España y en Europa, depositaban grandes esperanzas en la eventual predicción del estado del tiempo. La observación del aire de la atmósfera, así como su sequedad, humedad, calor y frío, podía predecir casi con exactitud el tiempo que se avecinaba, la confianza de este método estableció las bases de la meteorología y representó un salto hacia la investigación de esta área de conocimiento.

En la actualidad se incorporan los avances tecnológicos y científicos para satisfacer los requerimientos de los usuarios, de acuerdo con las nuevas realidades sociales y económicas, debido a que es de gran importancia contar con información meteorológica y climatológica de la mejor calidad para la toma de decisiones.

Por su posición geográfica, México se encuentra ubicado en la zona de convergencia intertropical, región del planeta en la cual, durante el periodo definido por los meses de julio a noviembre, se producen fenómenos hidrometeorológicos extremos, que generan cuantiosas pérdidas económicas, especialmente en zonas densamente pobladas. En consecuencia, diversas regiones del país han sido propensas a inundaciones, como Guerrero que registró durante septiembre del 2013 numerosos daños como resultado de la concurrencia de dos tormentas tropicales.

El evento, resultó de la presencia simultánea de las tormentas tropicales Manuel en el Pacífico e Ingrid en el Golfo de México, produjo lluvias torrenciales que derivaron en situaciones de emergencia para la población. El día 15 de septiembre de 2013, es cuando el centro de la tormenta tropical Manuel se ubica en las costas de Guerrero. Sin embargo, de acuerdo con información recabada las lluvias intensas se registraron desde un día anterior.

Consecuentemente, los datos de precipitación conforman una de las variables más importantes en la modelación hidrológica, y la precisión de esta variable se incrementa si se disponen de registros confiables y adecuadamente distribuidos.

De este modo, en este trabajo inicio definiendo a la precipitación como una fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las corrientes superficiales y profundas, también se hablara sobre las técnicas de valoración y medida de la lluvia, empezando desde la

descripción de cada uno de los aparatos de registro hasta llegar a las estaciones meteorológicas; continuando con una de las herramientas que ha fortalecido el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica, la *Percepción Remota*, con el fin de conocer los satélites meteorológicos que realizan las lecturas para estimar la lluvia con diversas técnicas.

La utilización de datos de precipitación provenientes de imágenes satelitales se ha incrementado debido a las muchas ventajas que aporta, por ejemplo, su cobertura global, que proporciona información sobre la frecuencia y la intensidad de las precipitaciones en las regiones que son inaccesibles a otros sistemas de observación. La desventaja es que son estimaciones indirectas de las precipitaciones, por lo que su precisión depende de ciertos factores como son, la zona climática, la topografía, la altura a la que se encuentra la nube, su contenido líquido y de hielo.

Por consiguiente, en el Capítulo "*Caso de estudio: Cuenca del Río Atoyac (RH19A)*" se describe naturalmente la cuenca y posteriormente se presentan las características fisiográficas de la misma, para proseguir con el procesamiento de la información con base en tierra realizando estudios de homogeneidad e independencia de las estaciones, así como la información obtenida estimada por el satélite, con la finalidad de realizar un análisis temporal y espacial que compare los valores de la lluvia.

Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados que nos permitirán entender un poco más el comportamiento que presenta el pronóstico de la lluvia de las imágenes satelitales, con el registrado en las estaciones meteorológicas. Con el fin de conocer más sobre los fenómenos naturales para general información que nos permita tomar decisiones preventivas y así poder salvar vidas humanas.

Componentes del tema

2.1 JUSTIFICACIÓN

Uno de los mayores retos de la actualidad es el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento de datos meteorológicos, ya que existe un gran interés por obtener pronósticos de precipitaciones extremas para implementar acciones preventivas.

Los fenómenos hidro-meteorológicos pueden provocar la pérdida de vidas humanas y ocupan el primer lugar en desastres que afectan económicamente al país, pueden ser causados por ciclones tropicales o huracanes.

Por lo mencionado antes, es necesaria la investigación del origen de este tipo de tormentas, el monitoreo de las mismas y la generación de una red de alerta temprana para la población.

Sin embargo, no se debe olvidar que las mediciones asociadas con imágenes de satélite son indirectas y representan sólo una aproximación del fenómeno.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo General

Evaluar la utilidad de la estimación de lluvia por satélite en la cuenca hidrológica del río Atoyac.

2.2.2 Objetivos Específicos

- ◆ Comparar la precipitación obtenida por un medio satelital con una lectura convencional.
 - ◆ Obtener patrones espaciales y temporales de la precipitación, que permitirán caracterizar el error de la lluvia estimada por satélite a través de herramientas estadísticas para tener una visión más detallada del mismo.
 - ◆ Corroborar que las mediciones por satélite, asociadas a precipitaciones de gran magnitud, proporcionan una sobreestimación del registro obtenido a nivel terrestre.
-

2.3 HIPÓTESIS

Debido a que la utilización de los datos provenientes de imágenes satelitales tiene la desventaja de realizar estimaciones indirectas, presentaran valores menores en la época lluviosa, es decir subestimara las precipitaciones en dicha época.

2.4 MARCO TEÓRICO

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. Sus objetivos se concentran en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos y para llevarlos a cabo cuenta con una red sinóptica de superficie, integrada por 79 observatorios meteorológicos y un aproximado de 389 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) a lo largo de la República Mexicana.

El SMN vigila y emite información sobre las condiciones atmosféricas del país, así como pronostica y alerta sobre eventos hidrometeorológicos que puedan ocasionar daños a la población o a las actividades productivas en territorio nacional.



Figura 2. 1 Huraken

Los ciclones tropicales también denominados huracanes en las aguas de las Antillas; donde la palabra huracán se deriva de *Huraken* (Figura 2.1 *Huraken*) dios de las tormentas, son los más violentos que se pueden experimentar y de acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres, se presentan en México, entre los meses de mayo a noviembre.

Los aspectos destructivos que marcan la intensidad de los ciclones tropicales, son cuatro: viento, oleaje, marea de tormenta y lluvia, donde este último es el más conocido para los pobladores debido a su magnitud.

Los huracanes arrastran consigo enormes cantidades de humedad que al precipitarse, provocan fuertes tormentas y deslizamientos de tierra, dada su alta recurrencia, se ha fortalecido una cultura de prevención de desastres y de detección temprana, sin que esto último suponga el conocimiento exacto de su trayectoria y magnitud.

El huracán Manuel se convirtió en tormenta tropical el 13 de Septiembre del 2013, en la noche de ese mismo día los vientos registrados fueron de 95 km/h, de acuerdo a su trayectoria, a las 4:00 p.m. del 15 de Septiembre tocó tierra, aumentando su velocidad de desplazamiento, generando oleajes de hasta tres metros de altura y lluvias torrenciales, de estas últimas se experimentaron intensidades de lluvia de 120 mm/h y una lámina total de 414 mm.

La intensidad del fenómeno dio como resultado una de las mayores afectaciones que se haya presentado en la República Mexicana. La gran mayoría del territorio nacional se vio afectado de alguna manera por “Manuel”, aunque el impacto más significativo se encontró en Guerrero.

En la actualidad la información obtenida a través de las redes de observación tiene el propósito de contar con datos que ayudan a entender el clima, su variabilidad y el comportamiento ante eventos extremos como fue el caso antes mencionado, también sirve como punto de partida para estimar y pronosticar escenarios ante condiciones futuras.

Las actividades y trabajos realizados en materia de observación y pronóstico del tiempo y del clima son llevados a cabo por grupos de trabajo multiinstitucionales, tales como el Sistema Meteorológico Nacional ya antes indicado, el Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Centro Nacional de Prevención de Desastres, la Secretaría de Marina, por referir algunos (*Figura 2.2 Instituciones que trabajan en materia de observación y pronóstico del tiempo y del clima*), todos ellos buscan diagnosticar la situación actual y proponer medidas para mejorar los sistemas de observación, monitoreo, pronóstico, prevención e información meteorológica, para analizar los efectos y posibles acciones que nos conduzcan a fortalecer una cultura de prevención.



Figura 2. 2 Instituciones que trabajan en materia de observación y pronóstico del tiempo y del clima

2.5 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La precisión, la profundidad así como también el éxito de los resultados de la investigación dependen de la elección adecuada del diseño de investigación. Cada tipo posee características particulares y su eficiencia depende de si se ajusta a la investigación que se está realizando.

La investigación es de tipo no experimental, la cual se divide en el método transversal y el longitudinal, el primero de ellos es el diseño de investigación a utilizar en este

trabajo, ya que tiene el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado, dentro del mismo encontramos los diseños transversales correlacionales/causales, que son aquellos en los cuales las causas y efectos ya ocurrieron en la realidad, por lo que son observados y reportados.

Debido a lo anterior, uno de los mayores retos de la actualidad es el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento de datos meteorológicos, se evaluara la utilidad de la estimación de lluvia por satélite utilizando las imágenes proporcionadas por TRMM teniendo como población la zona donde se encuentra ubicada la cuenca hidrológica del río Atoyac RH19A, para ello se utilizaron los registros de seis estaciones automáticas en los días que tuvo ocurrencia el fenómeno hidrometeorológico “Manuel”, con el fin de que los resultados observados nos sirvan para elaborar una comparación entre lo que se pronostica utilizando este método y lo que se registró en tierra.

3.1 PRECIPITACIÓN

La precipitación es la fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las corrientes superficiales y profundas.

Para que ocurra la precipitación, se requiere algún mecanismo que enfríe el aire lo suficiente para que llegue al punto de saturación. Este fenómeno se lleva a cabo por medio de barreras orográficas o sistemas convectivos o convergentes que resultan de radiaciones desiguales.

Cuando se alcanza la saturación en el aire, la formación de brumas y neblinas, gotas de agua o cristales de hielo por lo común requiere de la presencia de **núcleos de condensación** (Figura 3.1). Estos núcleos son pequeñas partículas no necesariamente higroscópicas, que por lo general se componen de productos de combustión, óxidos de nitrógeno y partículas de sal.

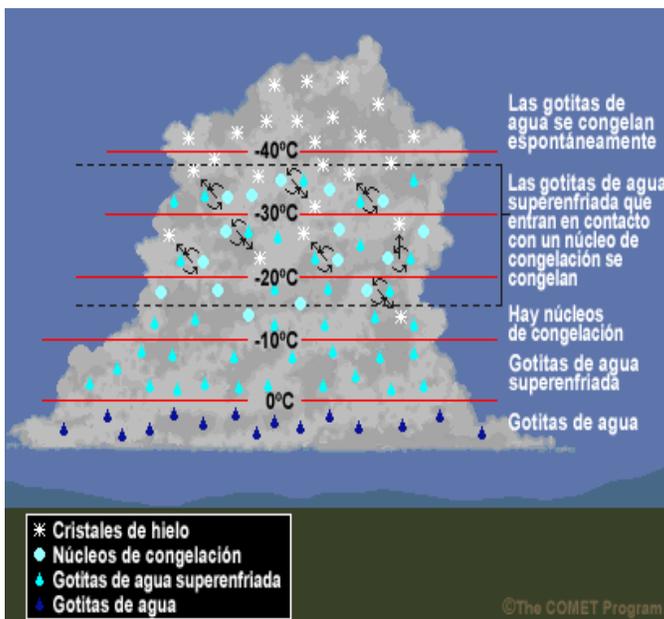


Figura 3. 1 Núcleos de condensación o de congelamiento

Los núcleos artificiales que se utilizan con más frecuencia en la modificación del clima (bombardeo de nubes) son el dióxido de carbono (hielo seco) y el yoduro de plata.

Para que ocurra precipitación, los elementos de la nube deben aumentar en tamaño hasta que su velocidad de caída exceda la tasa ascensorial del aire, así como ser lo suficientemente grandes para penetrar en el aire no saturado que está localizado por debajo de la base de la nube, sin evaporarse antes de llegar a la tierra.

La velocidad máxima de caída, o *velocidad terminal*, tiende a nivelarse cuando las gotas de agua se acercan a su tamaño máximo. Para diámetros grandes, la deformación puede ser lo suficientemente grande para que las gotas se rompan antes de obtener su velocidad terminal (*Tabla 3.1*).

Tabla 3. 1 Velocidad terminal de las gotas de agua en aire en reposo
(Presión de 1013.3 milibares, temperatura 20°C, humedad relativa del 50%)

VELOCIDAD TERMINAL DE LAS GOTAS DE AGUA EN AIRE EN RE-POSO
Presión de 1013,3 milibares, temperatura 20°C, humedad relativa del 50 %.

Diámetro de las gotas		Velocidad terminal	
mm	in.	cm/s	ft/s
0,5	0,02	206	6,8
1,0	0,04	403	13,2
1,5	0,06	541	17,7
2,0	0,08	649	21,3
3,0	0,12	806	26,4
4,0	0,16	883	29,0
5,0	0,20	909	29,8
5,5	0,22	915	30,0
5,8	0,23	917	30,1

Fuente: De R. Gunn y G.D. Kinzer, The Terminal Velocity of Fall of Water Droplets in Stagnant Air, *J. Meteorol.*, vol. 6, pp. 243-248, agosto de 1949. Usada con permiso de la American Meteorological Society.

Las corrientes ascendentes más fuertes impiden que aún las gotas más grandes caigan, y llevan todos los elementos de la precipitación a las partes superiores de las nubes, produciendo una acumulación de agua líquida, cuyo valor medio de concentración de agua es cercano a los 2 g/m³.

Por otro lado, una *nube* es una porción de aire enturbiada por el vapor de agua condensado en estado líquido (gotitas) o sólido (cristales y agujas) o por la mezcla de ambos estados. De lo anterior deriva la clasificación física de las nubes, en nubes totalmente líquidas, nubes de cristales de hielo, nubes heladas y nubes mixtas; originadas cada una por la temperatura a la que se produce la condensación.

Con respecto a la estructura de las nubes resulta difícil comprender por qué se tiene nubes tan oscuras y densas a la vista, sin embargo, ello se debe a que el espesor de las nubes es de cientos de metros y aún de varios kilómetros.

Es oportuno indicar que en las nubes, la suspensión de sus pequeñísimas gotas es sólo aparente, en realidad no flotan en el aire, sino que están cayendo en forma continua debido a su peso, aunque muy lentamente, pues la resistencia del aire es inversamente proporcional al diámetro de dichas gotas.

A continuación, se describen los géneros de nubes, destacando la información que brinda cada uno sobre la lluvia:

CIRRUS

Las delicadas fibras de estas nubes son formadas por pequeños cristales de hielo, de brillo sedoso. No determinan lluvia, pero pueden indicar la posición de una tormenta distante.



CIRROCUMULUS

Están formados por muy pequeños gránulos, mezclados o separados, pero siempre dispuestos con mayor o menor regularidad. Precursores de un frente cálido y se espesan al acercarse una tormenta, formando cirrostratos.



CIRROSTRATOS

Un halo alrededor del Sol, que proverbialmente anuncia lluvia, está formado por los pequeños cristales de hielo de los cirrostratos. Cuando esa nube se espesa, el proverbio se convierte en hecho: lloverá dentro de las próximas 24 horas.



ALTOCUMULUS

Formados por gotitas de agua en lugar de hielo, forman una cubierta de láminas, masas redondeadas y cilíndricas de color blanco o gris. Esta nube es señal de lluvia e indican posibles tormentas eléctricas.



ALTOSTRATOS

Es posible que el cielo esté cubierto por estas nubes, pero su capa fibrosa es lo bastante delgada para que se perciba el Sol, como si fuera visto a través de un cristal esmerilado. Un aumento de los Altostratos puede indicar lluvia o nieve de naturaleza duradera y continua.



NIMBOSTRATOS

Son lo bastante espesos para obstruir el sol y descargan lluvia o nieve. Esta nube se forma a partir de Altostratos que se han acercado a la Tierra. A veces reciben también el nombre de “nimbos”.



STRATOCUMULUS

Constituyen una cubierta continua de pliegues y capas irregulares mezclados con láminas o manchas oscuras, susceptibles de formarse en la estela de un frente frío. No acostumbran ser una nube de precipitación, pero pueden originar pequeñas nevadas.



STRATUS

Son las nubes más bajas y de aspecto más uniforme, aparecen a veces cuando la niebla se arrastra sobre la superficie caliente de la tierra y luego se levanta. Son nubes cuya parte inferior es semejante a un techo y con frecuencia proporcionan lloviznas o gránulos de nieve.



CUMULUS

De contorno denso y definido, se desarrollan verticalmente en forma de montañas y de torres. Sus cúspides son de un blanco brillante al Sol; sus bases, con frecuencia oscuras. No acarrear lluvia, a menos de que lleguen a hacerse muy altos.



CUMULONIMBOS

Estas nubes, casi siempre llevan consigo tormentas eléctricas y lluvia; a veces producen granizo. Los más altos alcanzan con su cúspide el aire frío superior, con lo cual sus techos adquieren la forma de yunques, que arrastran mechones de cirrus.



3.1.1 Tipos de precipitación

La intensidad y cantidad de precipitación dependen del contenido de humedad en el aire y de la velocidad vertical del mismo. De estos procesos se derivan los diferentes tipos de precipitación:

1. *Precipitación ciclónica*

Está asociada al paso de una perturbación ciclónica, se presentan dos casos frontal y no frontal. La precipitación frontal puede ocurrir en cualquier depresión barométrica y es asociada a un frente frío o a un frente cálido.

En los frentes fríos (*Figura 3.3*) el aire cálido es desplazado hacia arriba por el aire frío, dando lugar a nubosidad de gran desarrollo vertical acompañada de chubascos que a veces son muy intensos, así como de tormentas y granizo.

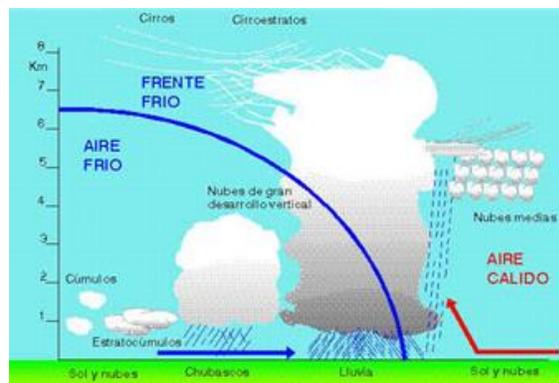


Figura 3. 3 Frente frío

En los frentes cálidos (*Figura 3.4*) el aire caliente asciende con relativa suavidad, dando lugar a una nubosidad más estratiforme y, por lo tanto, a lluvias y lloviznas más continuas y prolongadas, pero de menor intensidad instantánea.

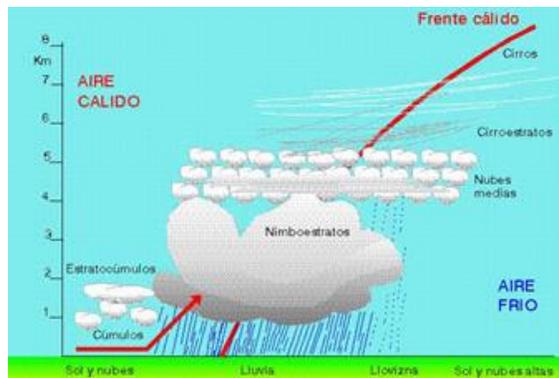


Figura 3. 4 Frente cálido

2. *Precipitación convectiva*

Tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes (*Figura 3.5*). La masa de aire caliente asciende, se enfría, se

condensa y se forma la nubosidad de tipo cumuliforme, originando precipitaciones en forma de chubascos o tormentas.

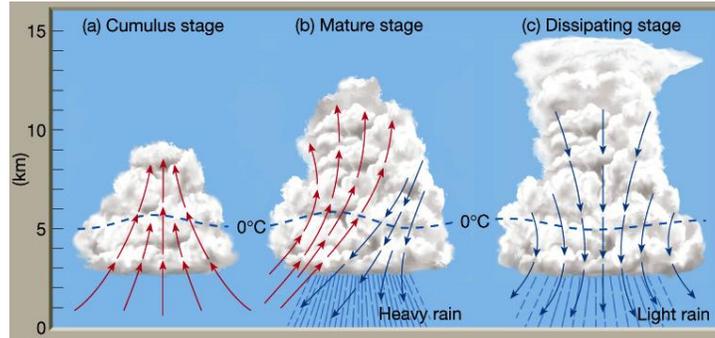


Figura 3. 5 Desarrollo de una precipitación de tipo convectivo

3. Precipitación orográfica

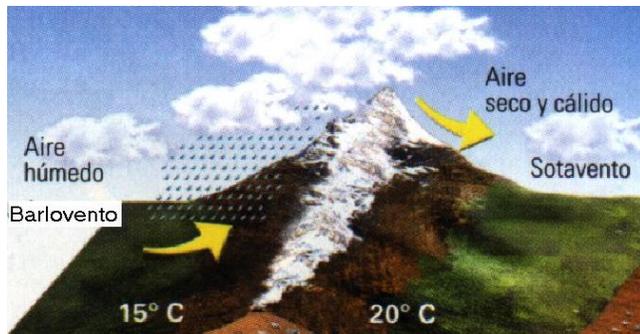


Figura 3. 6 Precipitación orográfica

Es aquella que tiene su origen en el ascenso de una masa de aire, forzado por una barrera montañosa (Figura 3.6).

La precipitación es mayor a barlovento, disminuyendo rápidamente a sotavento. En las cadenas montañosas

importantes, el máximo de precipitación se produce antes del parteaguas. A veces, con menores altitudes, el máximo se produce pasada éste, debido a que el aire continúa en ascenso.

3.1.2 Medición de la precipitación

Las técnicas de valoración y medida de la precipitación del agua se agrupan bajo el nombre de pluviometría, para efectuarla es necesario recordar:

1. La forma en que llega la precipitación a la superficie terrestre.
 - A) Precipitación propiamente dicha
 - a. El agua cae sobre la superficie terrestre en forma líquida (lluvia).
 - b. En forma sólida amorfa (granizo).
 - c. En forma sólida cristalizada (nieve).
 - d. En forma intermedias (nieve granulada, aguanieve, etc.).
 - B) Precipitación oculta
 - a. Llega por condensación (rocío).
 - b. Llega por sublimación (escarcha).
2. Las unidades en que se mide la precipitación.
 - A) Se mide por la altura en milímetros que alcanzaría sobre una superficie plana y horizontal donde no se perdiera por infiltración o evaporación.

- B) Las precipitaciones de nieve se miden:
 - a. Por la altura que alcanzaría la nieve sobre una superficie plana y horizontal.
 - b. Por la altura que alcanzara el agua resultante de la fusión de la nieve.
- 3. Las dificultades de las medidas de precipitación:
 - A) Las superficies receptoras de los aparatos que miden la precipitación son muy pequeñas en relación con aquéllas para las que se hace la estimación.
 - B) Las lecturas de la precipitación a distintas alturas de una misma ladera son muy divergentes.
- 4. Las comparaciones efectuadas entre lecturas de diversos pluviómetros indican que las diferencias en las lecturas llegan hasta el 10% sobre las sumas anuales.

Aparatos de medida y registro: Para la medida y registro de las precipitaciones se emplea un material de observación básico muy sencillo.

1. Aparatos

A. Para medir cantidades de precipitación:

a) Pluviómetros

1. *Pluviómetros ordinarios (Figura 3.7):* El aparato que tradicionalmente sirve para medir la precipitación es el pluviómetro. Consiste en un cilindro recto, de sección conocida, con un borde agudo horizontal (boca) y un dispositivo para recoger el agua (colector). Entre éstos por lo general existe un embudo.

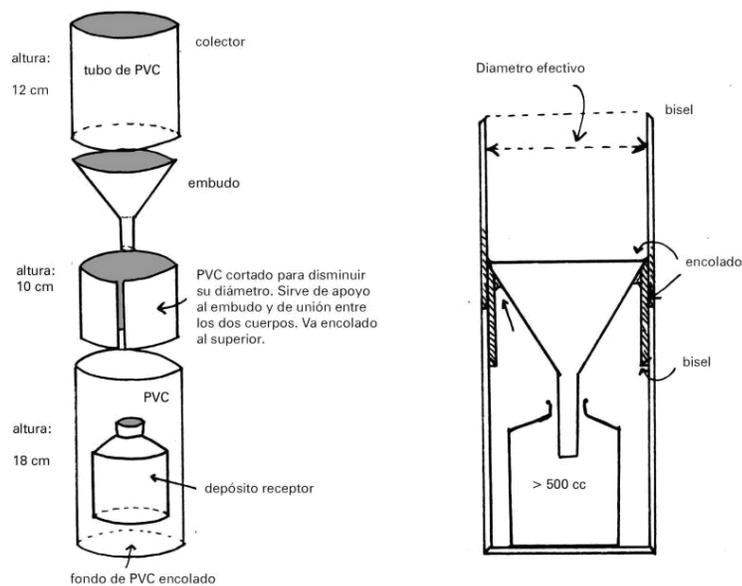


Figura 3. 7 Pluviómetro ordinario

Existen muy diversos tipos de pluviómetros, en principio, todos son un mismo pluviómetro, lo que varía es la altura de la boca del aparato sobre el suelo, la situación del colector sobre tierra o bajo tierra, la forma de hacer la lectura, etcétera.

a) Tipo norteamericano:

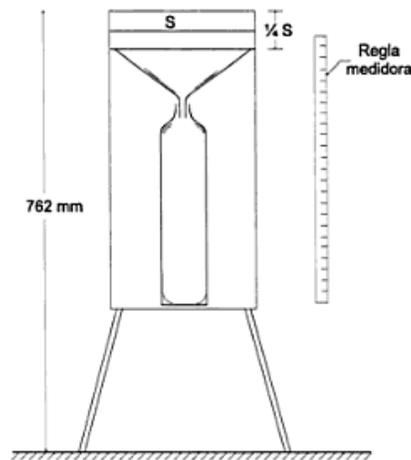


Figura 3. 8 Pluviómetro tipo norteamericano

Es un pluviómetro común, donde la medición se hace con una regla fina de acero que se introduce por la boca del pluviómetro en el depósito colector, que tiene su base prácticamente al nivel del suelo. Cuando se desborda el colector, si la cantidad de precipitación es superior a su capacidad, el agua desbordada queda en la armadura del pluviómetro. Se mide vertiéndola en el colector y tomando de éste la altura con la regla (Figura 3.8).

b) Tipo español y alemán (Hellman):

Las características más importantes respecto a su instalación son: que la boca del pluviómetro se encuentra a 1.50 m del suelo, que va sujeto por un soporte lateral a un poste cuyo extremo superior está cortado en bisel y que es fácilmente desmontable del soporte para hacer la lectura (Figura 3.9).

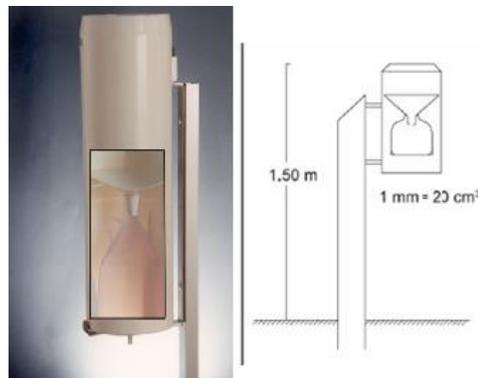


Figura 3. 9 Pluviómetro tipo Hellman

b) Nivómetros

Con los Nivómetros (Figura 3.10) se mide la nieve precipitada. Son necesarios cuando la cantidad de nieve es considerable y su fusión es más difícil. Son como los pluviómetros anteriores con modificaciones. La más común es la supresión del embudo, y la colocación en el interior de dos tabiques verticales, esto evita que los remolinos del viento saquen la nieve recogida. Otra técnica para medir la altura de la nieve consiste en emplear un cilindro hueco que se introduce verticalmente y después se cierra por debajo, sacándolo y fundiendo la nieve recogida.

Un método útil en las montañas, consiste en colocar barras graduadas fijas en el suelo. Estas barras son bastante altas y con marcas que semejan peldaños de escalera de caracol que se pueden fotografiar desde un avión.

Existen nivómetros radiactivos, basados en el amortiguamiento que experimenta la intensidad de la radiación de un foco emisor al atravesar un cierto espesor de nieve.

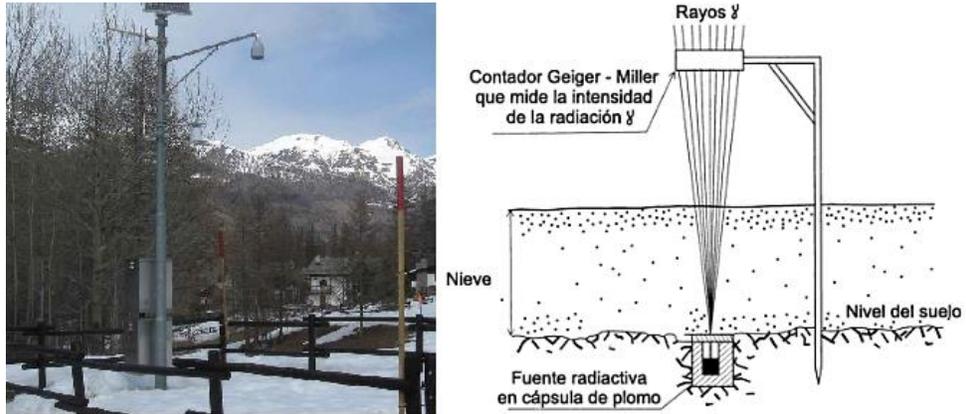


Figura 3. 10 Nivómetro

c) Totalizadores

Tienen por objeto obtener en una sola medida la precipitación total caída en un cierto punto durante un largo período. Se instalan en lugares que sólo pueden visitarse con escasa frecuencia.

Un totalizador consta de un depósito para recoger precipitaciones hasta de 7500 mm. La boca se sitúa a 2.50 m sobre el suelo y está provista de un aro de latón de borde cortante. En el fondo lleva un tapón de rosca o un grifo. El depósito va metido en otro de chapa galvanizada (Figura 3.11).

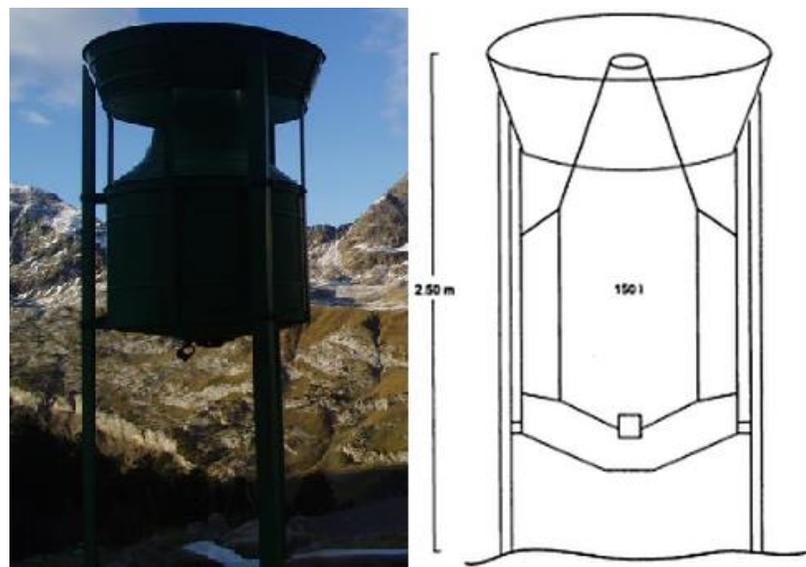


Figura 3. 11 Totalizador

B. Para medir la precipitación a distancia:

a) Radar meteorológico

Las medidas de la precipitación mediante el radar (*Figura 3.12*) se abocan a la altura y a la intensidad de la precipitación.

Por lo que respecta a la altura de la precipitación, se toman fotografías que proyectan el área del temporal que la produce; en éstas aparecen zonas luminosas de mayor o menor intensidad. En lo referente a la intensidad de la precipitación, en las pantallas del radar meteorológico el eco de las gotas de agua es distinto del producido por otros obstáculos, por lo que éste puede ser definido como lluvia.

Los datos generados por el radar son de gran utilidad para el manejo de situaciones ocasionadas por fuertes precipitaciones. Por otro lado, representa un medio para efectuar medidas de precipitación en zonas inaccesibles.

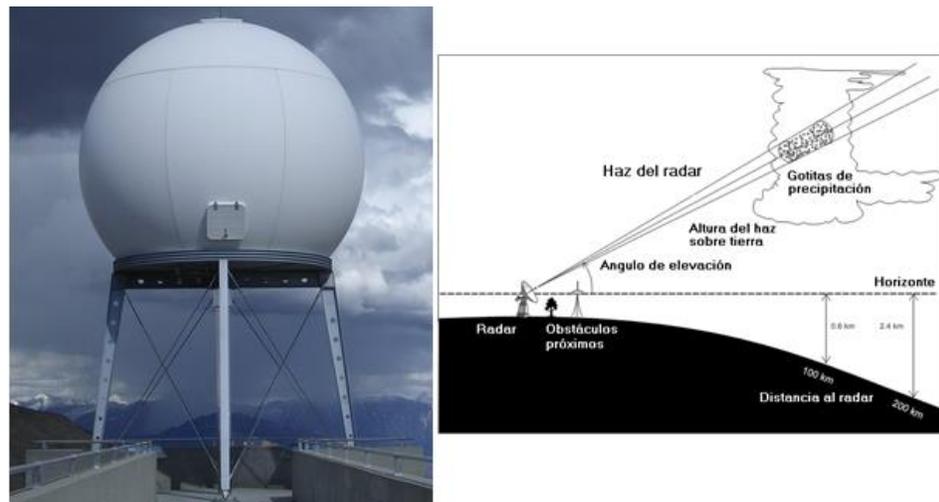


Figura 3. 12 Radar meteorológico

b) Satélites

La estimación de la precipitación de lluvia desde el espacio está basada en la medición de la cantidad de radiación reflejada y emitida a través de las cimas de las nubes. La mayor parte de la radiación no penetra profundamente en las regiones nubosas que contienen partículas de tamaño similar o superior al de la longitud de onda de la radiación. Así pues, gran parte de la radiación proviene de las regiones superiores de las nubes precipitantes.

La intensidad de la lluvia varía con la tasa de dilatación de la superficie de la cima de las nubes a baja temperatura ($T = 235 \text{ }^\circ\text{K}$), sin embargo, las temperaturas muy bajas no son siempre imprescindibles para que haya precipitación. Por otro lado, el desarrollo de este método condujo al **Global Precipitation Index** (GPI) (índice de precipitación mundial).

Las **microondas pasivas** permiten efectuar mediciones físicamente más ajustadas a la precipitación real, especialmente en las franjas de mayor longitud de onda. Las técnicas de medición están basadas en dos principios físicos: absorción y dispersión.

1. Mediciones basadas en la absorción: Las gotas de agua presentan un coeficiente de absorción/emisión relativamente alto, que aumenta para frecuencias más elevadas.
2. Mediciones basadas en la dispersión: Las partículas de hielo presentan valores de absorción/emisión bajos, pero dispersan eficazmente la radiación en microondas, especialmente en frecuencias elevadas.

Uno de los principales factores que limitan la exactitud de los métodos de microondas pasivas es el gran tamaño de la huella, que ocasiona el llenado parcial del haz. La resolución es considerablemente mayor con el satélite de la **Misión de medición de lluvias tropicales (TRMM)** que conlleva también una mejora del grado de exactitud esperado en las estimaciones de lluvia mediante microondas. Las estimaciones más aproximadas de la precipitación mundial desde el espacio se obtienen combinando las mediciones de satélites TRMM y geoestacionarios.

La validación de los algoritmos satelitales para la estimación de las acumulaciones de lluvia es un proceso complejo, que deberá ser abordado de modo que la utilización de técnicas diferentes proporcione datos de características similares.

3.1.3 Pluviógrafo



Figura 3. 13 Pluviógrafo

Los pluviógrafos (*Figura 3.13*) son semejantes a los pluviómetros, con la diferencia de que tienen un mecanismo para producir un registro continuo de precipitación. Este mecanismo está formado por un tambor que gira a velocidad constante sobre el que se coloca un papel graduado. En el recipiente se coloca un flotador que se une a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel, tiene una capacidad de 10 mm de lluvia y, al alcanzarse esta capacidad, se vacía automáticamente mediante un sifón. Son instrumentos destinados a medir la distribución de la lluvia en el tiempo además de su intensidad en un determinado lugar.

El registro que se obtiene de un pluviógrafo se llama pluviograma. Normalmente, este registro es similar al mostrado a continuación (*Figura 3.14*).

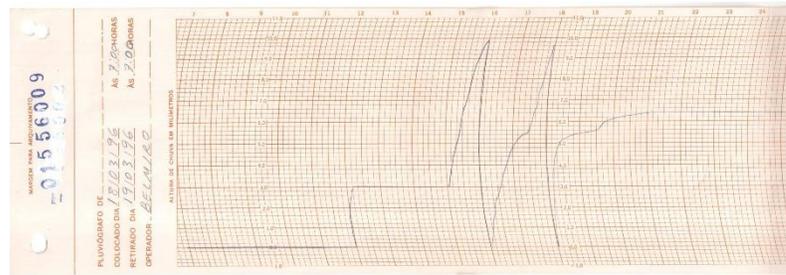


Figura 3. 14 Pluviograma

Es frecuente que el pluviógrafo tenga alguna falla y por ello los registros resultan defectuosos. En ocasiones es posible recuperar los datos de un registro, dependiendo del tipo de falla.

3.1.3.1 Tipos de Pluviógrafo

El pluviógrafo antes descrito es el de uso más común en México, aunque existen otros tipos en el mundo:

a. De flotador sin sifón automático (*Figura 3.15*)

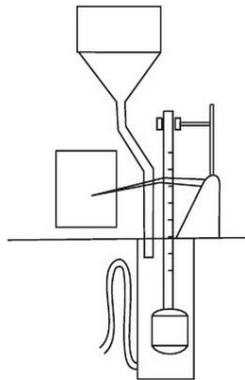


Figura 3. 15 Pluviógrafo sin sifón automático

El flotador tiene un vástago vertical provisto de salientes a intervalos iguales. En ellos se apoya un brazo que sujeta la plumilla; este brazo lleva un dispositivo tal, que cuando la plumilla llega a la parte superior de la banda cae al de abajo. El depósito se vacía con un sifón que se carga dándole un impulso al flotador o añadiendo agua para cebarlo. Tiene como ventajas la sencillez y la falta de error acumulativo. Su inconveniente, como el de todos los Pluviógrafos de flotador, es que éste puede ser dañado por las heladas.

b. Pluviógrafo de flotador con sifón automático (*Figura 3.16*)

El sifón automático se ceba por sí mismo cuando la plumilla ha alcanzado su máxima altura, y al mismo tiempo ésta vuelve al cero.

En el tipo de Pluviógrafo Hellman la lluvia caída escurre a un receptor que, una vez lleno, se vacía automáticamente por un sifón. Los cambios de altura del agua en dicho receptor son registrados por una plumilla fijada a un vástago unido al flotador. El tambor da la revolución completa en una semana. La boca de este tipo de aparato, está situada a 1.50 m del suelo.

Para regular el momento en que se vacía el receptor, puede variarse la altura del codo del sifón mediante un dispositivo. El sifón de este aparato tiene el inconveniente de que su descarga se inicia con un goteo preliminar que evidentemente origina un error en el registro.

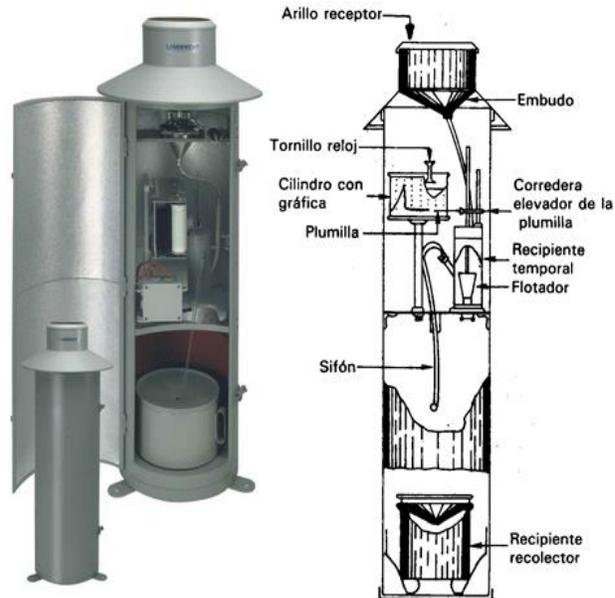


Figura 3. 16 Pluviógrafo de flotador con sifón automático tipo Hellman

En los Pluviógrafos Lambrecht, el inconveniente de la nieve está resuelto con una lámpara de infrarrojo instalada en el interior de la armadura donde se aloja el sistema de registro.

c. Pluviógrafo de balanza (*Figura 3.17*)

El Pluviógrafo de balanza no resulta dañado por las heladas y, además, sirve de nivógrafo. El colector va colocado sobre el plato de un mecanismo tipo pesacartas (instrumento de medición mecánico, pequeño y muy preciso para pesar cartas) que acciona la plumilla inscriptora. Un inconveniente son las vibraciones debidas al viento, que influyen en el registro; éstas se evitan con amortiguadores de aceite. Va provisto de dos dispositivos, lo cual permite la rápida sustitución del colector cuando el que está colocado en el aparato se ha llenado.

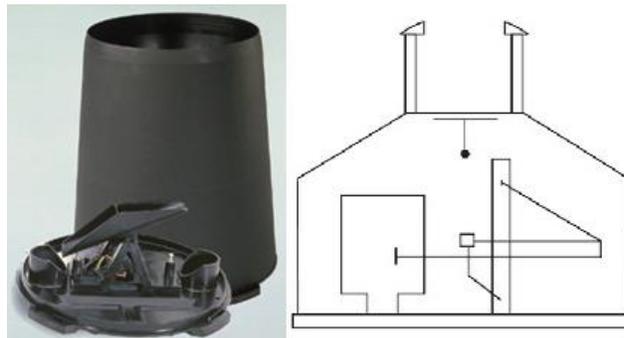


Figura 3. 17 Pluviógrafo de balanza

d. Pluviógrafo de oscilación (*Figura 3.18*)

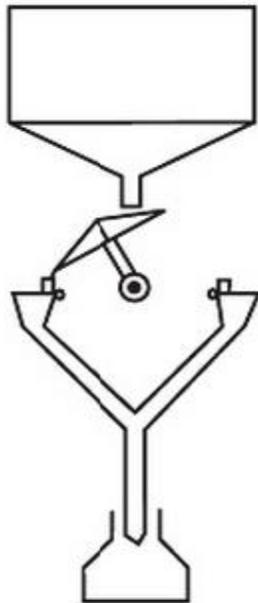


Figura 3. 18 Pluviógrafo de oscilación

El agua recogida por la boca cae en un depósito gemelo de otro, llamados canales. Cada vez que los canales oscilan se genera un movimiento en el engranaje que se transmite hasta la plumilla, la cual registra en la gráfica la altura de agua precipitada. En otros pluviógrafos cuando uno de los canales está lleno, el desplazamiento del centro de gravedad del sistema móvil le obliga a girar hasta tocar un contacto eléctrico, quedando entonces el otro canalón bajo la boca, repitiendo así la operación alternativamente. El tiempo que transcurre para efectuar el cambio de un canalón a otro es de aproximadamente 0.2 segundos, suficiente para generar un error en la medición, que aumenta con la intensidad de la lluvia. El error es de poca importancia para lluvias de intensidad inferior a 50 mm por hora, dándose muy pocas veces intensidades superiores.

e. Combinación del pluviógrafo de balanza con el de oscilación

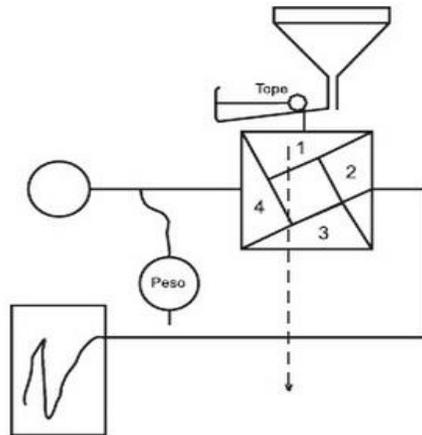


Figura 3. 19 Pluviógrafo tipo Nilsson

El pluviógrafo Nilsson (*Figura 3.19*) tiene un depósito con cuatro compartimentos a los que impide girar un tope que sostiene a cada uno de ellos. El sistema total está equilibrado y se mueve hacia abajo cuando la lluvia cae en uno de los compartimentos, accionando la plumilla inscriptora. Cuando han caído 3 mm de lluvia, el tope suelta el depósito giratorio vaciando el agua y quedando el compartimiento siguiente.

3.1.3.2 Importancia del pluviógrafo

El pluviógrafo está diseñado para determinar la intensidad de la lluvia durante largos periodos de tiempo. El desarrollo tecnológico de los pluviógrafos ha ido avanzando y hoy existen diferentes variantes que emplean los avances de la electrónica y la informática para la captación, almacenamiento y postprocesamiento de los datos de lluvia.

El pluviógrafo es un invento del siglo XIX. Los primeros registros que se archivan datan del pluviógrafo de balancín de Walravens en enero de 1893. Sin embargo, la primera patente es del pluviógrafo de flotador presentada por Chappell en mayo de 1938.

Es un instrumento meteorológico empleado en el estudio y análisis de las precipitaciones, tiene por función registrar de forma continua la cantidad de precipitación caída en un periodo de tiempo determinado.

El registro de la precipitación puede realizarse a base del peso, volumen o altura de la lámina precipitada. Con los registros pluviográficos es posible conocer la distribución temporal de las lluvias reflejada gráficamente en la curva de masa.

Las necesidades del desarrollo de la actividad hidráulica han conducido al diseño y desarrollo de un pluviógrafo automatizado empleando tecnología electrónica para su construcción e implementando un programa para procesar la base de datos recolectada digitalmente.

3.1.4 Distribución y utilización de la lluvia

Anualmente México recibe del orden de 1,489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 71.6% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.2% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua, así como la recarga incidental, el país cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable.

Las importaciones de otros países representan el volumen de agua que se genera en las ocho cuencas compartidas con los tres países con los que México tiene fronteras y que escurre hacia nuestro país (*Figura 3.20*).

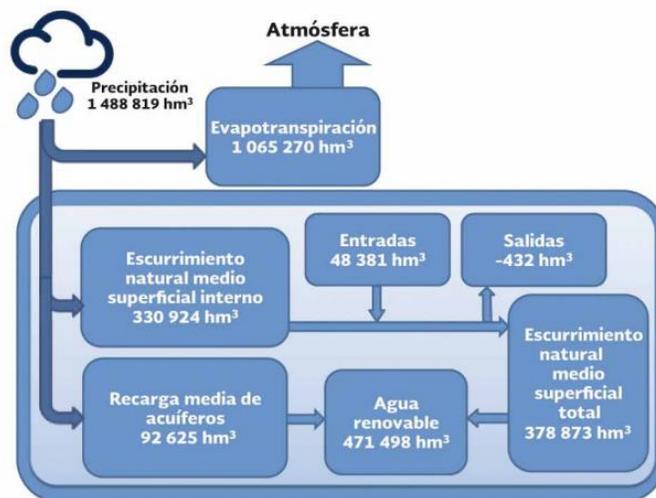


Figura 3. 20 Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico de México (La precipitación media anual se refiere al período 1971-2000. Los valores restantes son medidas reportadas al 2009)

En la mayor parte de nuestro país, la precipitación ocurre predominantemente entre Junio y Septiembre, con excepción de la península de Baja California. Es importante señalar que la distribución de la precipitación (*Figura 3.21*) acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso.

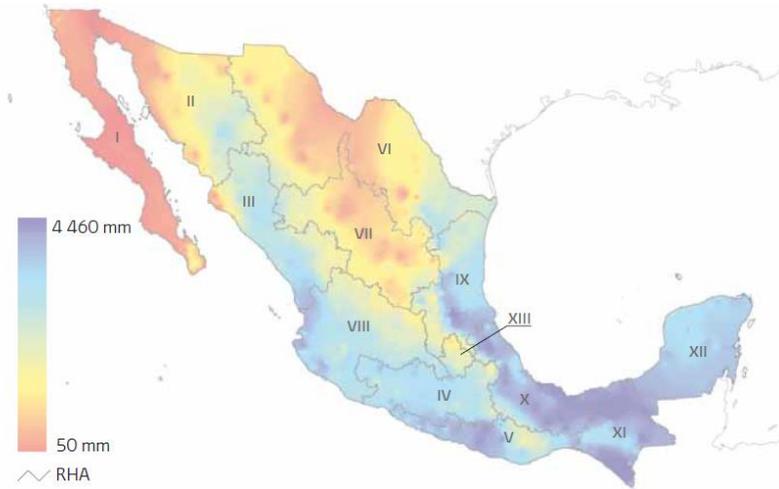
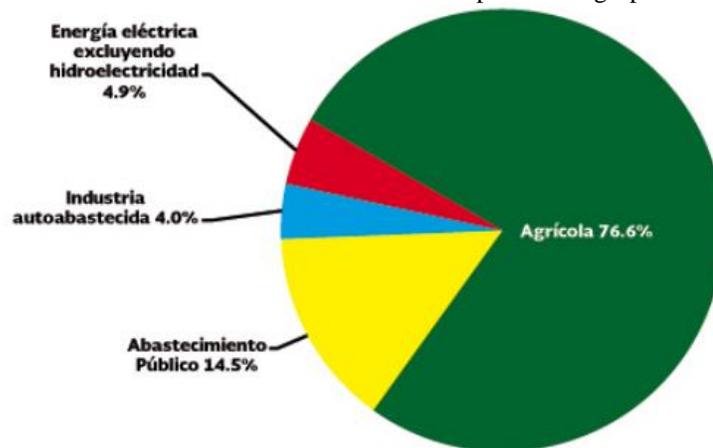


Figura 3.21 Distribución de la precipitación anual en México, 1971-2000

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas. En el Registro Público de Derechos del Agua se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, mismos que para fines prácticos se han agrupado en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, a saber, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y la generación de energía, y último el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo.

Para usos consuntivos en el periodo del 2001 al 2012, el 61.6 % del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales, mientras que el 38.4% restante proviene de fuentes subterráneas. El mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde al uso agrícola (*Gráfica 3.1*).

Gráfica 3. 1 Distribución de los volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos (2012)



Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2013, pp. 47.

En lo que se refiere a las centrales hidroeléctricas, se utilizaron en el país 155.7 miles de millones de metros cúbicos de agua en el 2012. Debe aclararse que para este uso la misma agua se contabiliza varias veces, en todas las centrales del país.

En los siguientes mapas se muestra el volumen de agua que se concede o asigna (Figura 3.22), el tipo de fuente superficial y subterránea (Figura 3.23), así como el volumen concesionado para usos consuntivos en el año 2012 (Figura 3.24):

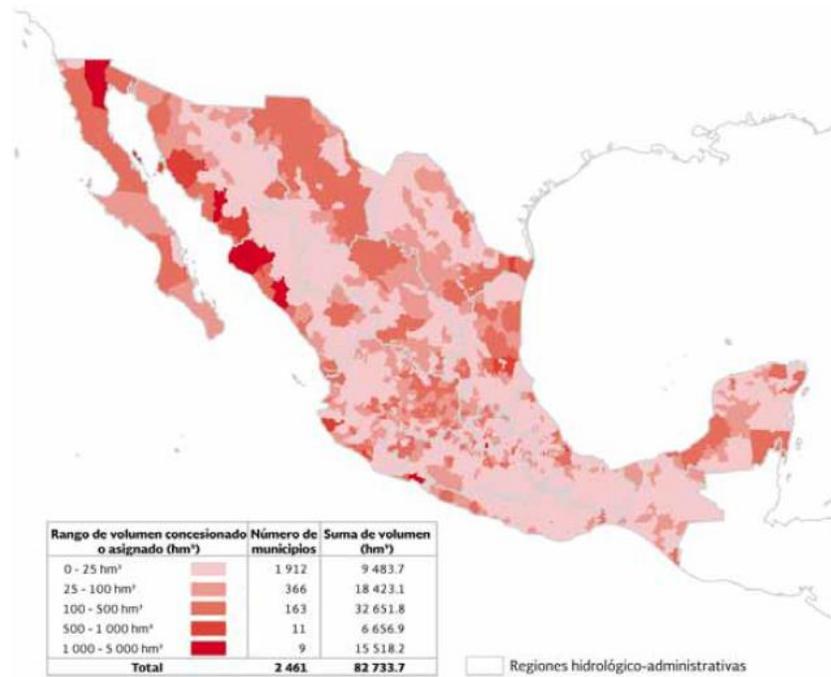


Figura 3. 22 Intensidad de usos consuntivos (2012)

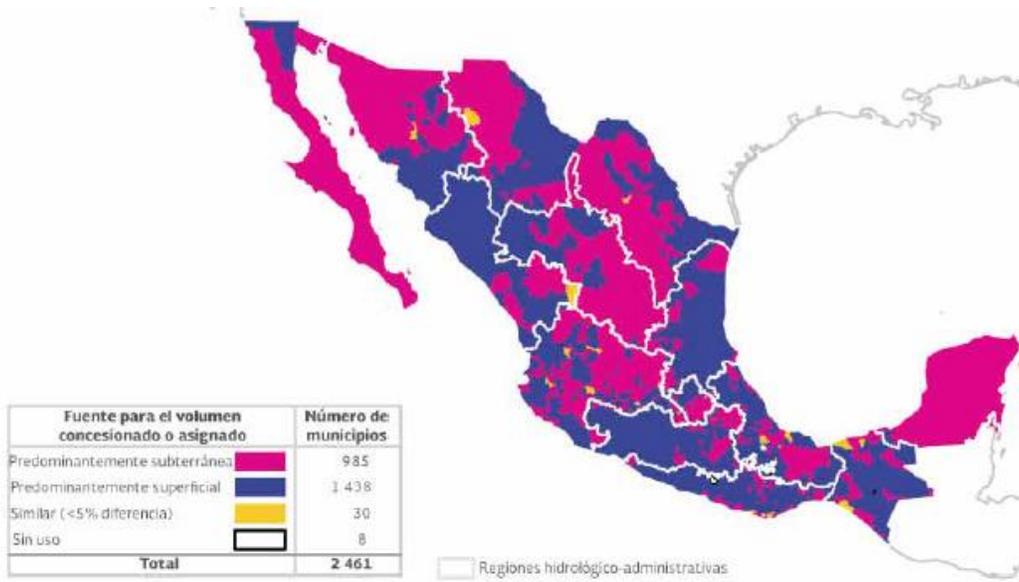


Figura 3. 23 Fuente predominante para usos consuntivos (2012)

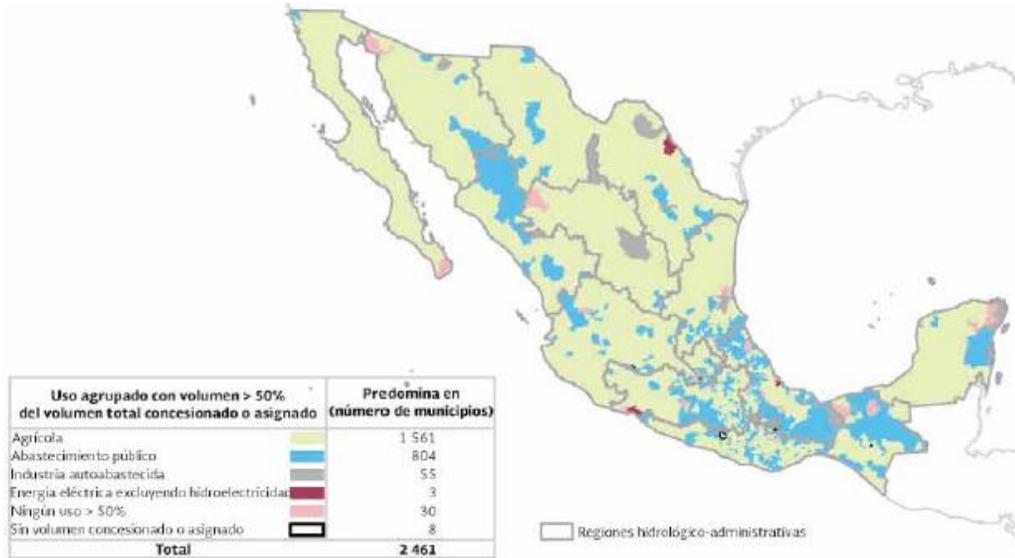
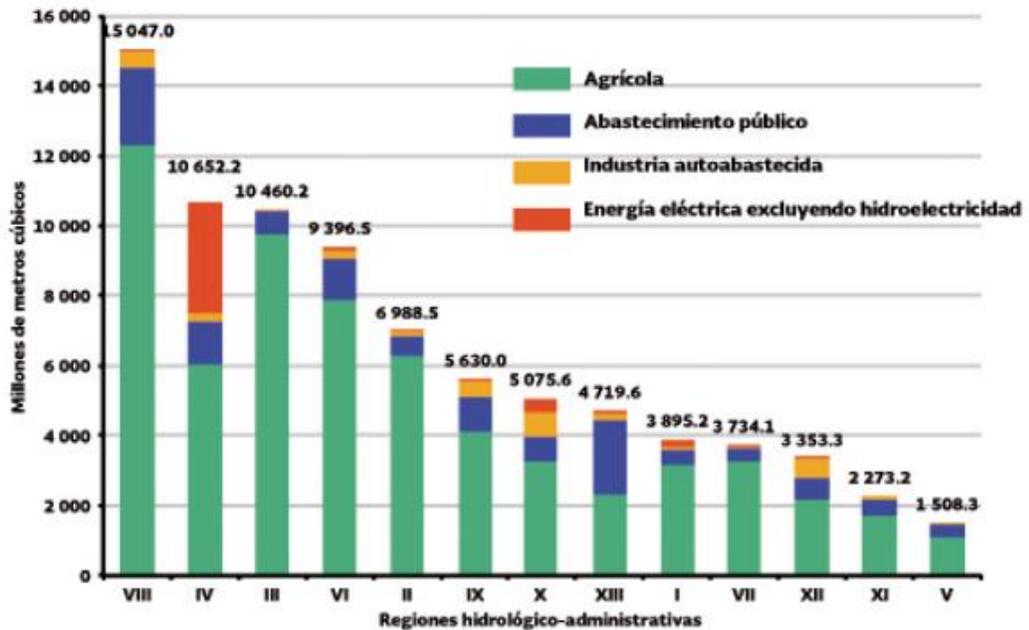


Figura 3. 24 Uso agrupado consuntivo predominante (2012)

Como se puede observar, la distribución de los usos varía a lo largo del territorio nacional. En la mayoría de los municipios de México predomina el uso agrícola, seguido por el abastecimiento público.

La siguiente gráfica (*Gráfica 3.2*) muestra la forma en la que se han concesionado los volúmenes de agua para usos agrupados consuntivos en el país.

Gráfica 3. 2 Volúmenes concesionados para usos consuntivos agrupados, por RHA (2012)



Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2013, pp. 50.

3.1.5 Intensidad de las lluvias

La intensidad de la precipitación suele medirse en milímetros por hora, es decir, precipitación por unidad de tiempo. Cuando se trata de precipitaciones muy intensas se pueden medir en milímetros por minuto.

Si se analizan las precipitaciones que han existido en un período largo, resulta que las dos de mayor intensidad son las más breves, las mayores intensidades sólo se dan durante un período de tiempo muy corto, a medida que el tiempo va siendo mayor, la intensidad media de la precipitación va disminuyendo.

3.1.6 Precipitaciones en México

La precipitación normal del país en el periodo de 1971-2000 fue de 760 [mm]. Los valores normales, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) corresponden a los promedios calculados para un periodo climatológico uniforme y largo, el cual debe tener como mínimo 30 años de recabar información.

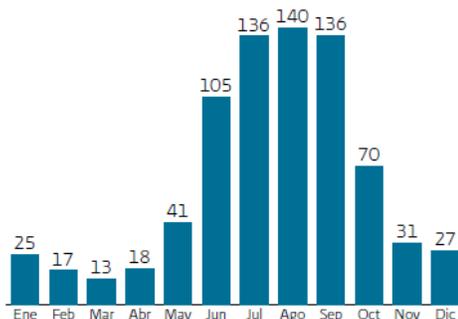
La siguiente tabla (*Tabla 3.3*) presenta la precipitación normal por RHA en el periodo de 1971 a 2000. En México, el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre Junio y Septiembre (*Gráfica 3.3*).

Tabla 3.3 Precipitación pluvial normal mensual por RHA, 1971-2000 (milímetros)

RHA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
I Península de Baja California	23	22	17	4	1	1	9	23	24	12	12	21	169
II Noroeste	25	23	13	5	5	18	111	107	56	28	20	33	445
III Pacífico Norte	27	12	5	5	8	62	188	193	136	54	29	28	747
IV Balsas	15	5	6	14	52	186	198	192	189	83	16	7	963
V Pacífico Sur	9	8	8	20	78	244	205	225	249	111	21	9	1 187
VI Río Bravo	16	12	10	16	31	50	75	81	81	36	15	17	438
VII Cuencas Centrales del Norte	16	6	5	12	27	59	87	86	72	32	13	15	430
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	22	6	3	6	23	131	201	185	150	59	18	12	816
IX Golfo Norte	27	17	21	40	76	142	145	130	176	82	30	29	914
X Golfo Centro	45	34	30	41	85	226	255	253	281	161	88	61	1 558
XI Frontera Sur	60	52	38	52	135	278	219	266	332	222	114	77	1 846
XII Península de Yucatán	48	31	29	38	83	172	158	173	212	147	76	52	1 218
XIII Aguas del Valle de México	10	8	13	28	56	105	115	104	98	50	13	7	606
Total	25	17	13	18	41	105	136	140	136	70	31	27	760

Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2011, pp. 22.

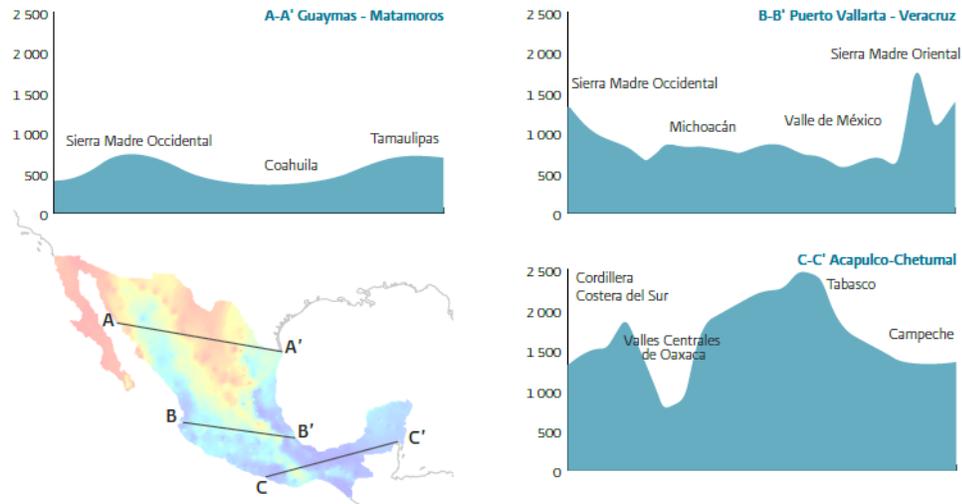
Gráfica 3.3 Precipitación pluvial normal mensual en México



Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2011, pp. 22.

Recordando la distribución de la precipitación anual en México, las siguientes gráficas (*Gráfica 3.4*) muestran en azul el perfil de la variación regional de la precipitación pluvial normal en el periodo 1971-2000.

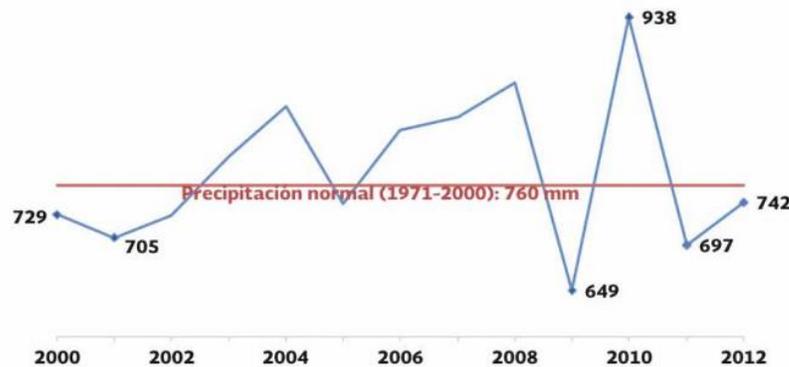
Gráfica 3. 4 Perfiles de precipitación (milímetros)



Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2011, pp. 23.

La precipitación acumulada ocurrida en la República Mexicana del 1° de Enero al 31 de Diciembre del año 2012 alcanzó una lámina de 742 mm, lo cual fue 2.3% inferior a la normal del periodo 1971 a 2000 (*Gráfica 3.5*).

Gráfica 3. 5 Precipitación pluvial anual, 2000-2012 (mm)



Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2013, pp. 20.

3.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Tabla 3.4 Estaciones climatológicas e hidrométricas

T2.1 Número de estaciones climatológicas e hidrométricas en México	
Tipo de estación	Número de estaciones
Climatológica	3 332
Hidrométrica	717
Total	4 049

Nota: De un total de 5 459 estaciones climatológicas, 3 332 están en operación al cierre de esta edición.

Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2013, pp. 15.

La CONAGUA cuenta con 3,332 estaciones en operación para medir las variables climatológicas, como son la temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento. Se cuenta con 1,064 estaciones de referencia, estas miden las variables climatológicas e hidrométricas que se registran en el país (*Tabla 3.4*).

3.2.1 Base de datos meteorológicos

A finales de los 90's diversas bases de datos relacionadas con el clima se hicieron disponibles en el país, la mayoría de ellas en disco compacto (ERIC I, ERIC III, Dat322, etc.). Por su fácil distribución, estos datos fueron utilizados de manera intensiva por la comunidad, como fuente de información climática.

En los años 2004 y 2005 el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con la participación de las Gerencias Estatales de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la colaboración de otras agencias, realizó un esfuerzo importante en materia de rescate de información y digitalización de datos climáticos. Durante este esfuerzo se capturaron y actualizaron datos de la red de estaciones climatológicas convencionales en la mayoría de los estados del país con la finalidad de reducir al mínimo el número de valores "no disponibles" en la base de datos nacional.

Por otra parte, se tiene registro de diversos esfuerzos, que han sido encaminados a resolver aspectos relacionados con el manejo y uso eficiente de las bases de datos del clima en México. Si bien es cierto que se cuenta con una red de estaciones hidrometeorológicas automáticas cuyos datos están disponibles en tiempo real, esta red tiene un periodo corto de registro y su densidad es baja.

La base de datos del clima con carácter oficial en el país es la operada por el SMN en el Climate Computing (CLICOM). Esta base de datos contiene la información registrada en la red de estaciones climatológicas convencionales.

3.2.2 Estaciones meteorológicas diarias

Una estación meteorológica puede tener diferentes fines, dependiendo de los propósitos para los cuales fue instalada, porque la información se utiliza en varias aplicaciones o porque observaciones adicionales le dan otras características.

Las estaciones meteorológicas diarias o climatológicas obtienen datos meteorológicos con una consistencia, homogeneidad y duración tales, que permiten describir el clima de una región o explicarlo.

Es el área que cuenta con el equipo tecnológico (*Tabla 3.5*) adecuado colocado a la intemperie, para registrar datos que tienen que ver con el estado de tiempo y diversos fenómenos meteorológicos que se registran día con día colocados en sitios estratégicos representativos dentro de una región.

Tabla 3. 5 Conjunto de instrumentos

Evento climático	Instrumento de medición	Imagen
<i>Precipitación</i>	<i>Pluviómetro o pluviógrafo</i>	

<i>Temperatura</i>	<i>Termómetro tipo "Six"</i>	
<i>Evaporación</i>	<i>Tanque evaporímetro</i>	
<i>Viento</i>	<i>Veleta o anemoscopio</i>	

3.2.3 Estaciones meteorológicas horarias

Las estaciones meteorológicas horarias son aquellas en las cuales se obtienen datos meteorológicos que permiten, conocer, en una amplia región, el estado de la atmósfera en un momento determinado y hacer pronóstico sobre su evolución y comportamiento.

3.2.3.1 Estación meteorológica automática (EMA)

Es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática.

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 (la hora que se utiliza para registrar los datos es el horario TUC o UTC), esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 o 3 horas por estación.

El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso. Los sensores que integran la estación son:

- ◆ Velocidad del viento
- ◆ Dirección del viento
- ◆ Presión atmosférica

- ◆ Temperatura y humedad relativa
- ◆ Radiación solar
- ◆ Precipitación

Existen dos tipos de estructuras donde van montadas las estaciones, la estructura de tipo andamio (Figura 3.25) y la de torre triangular (Figura 3.26).

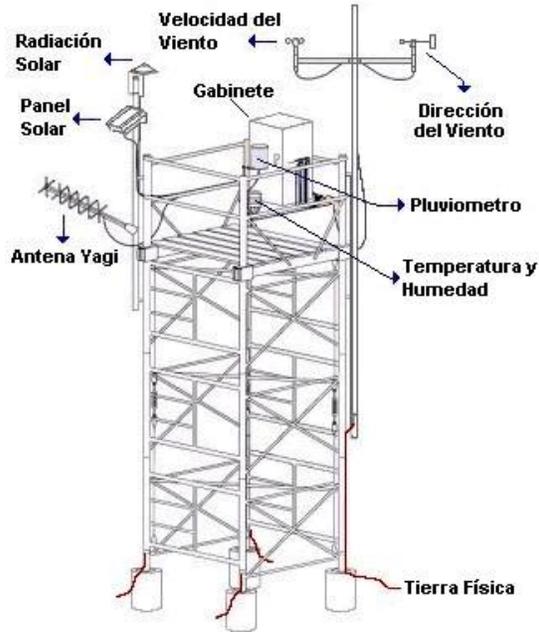


Figura 3.25 Estructura de tipo andamio

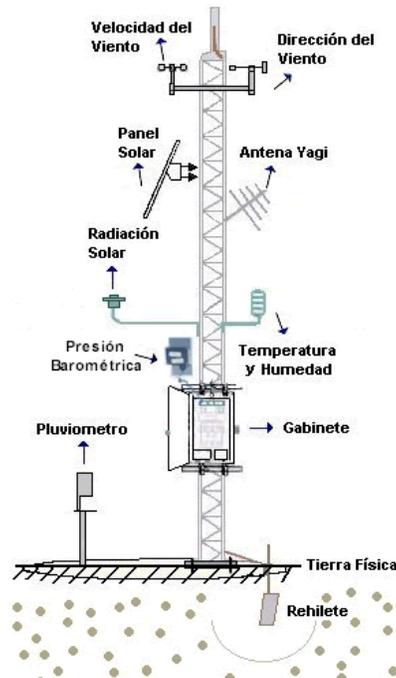


Figura 3.26 Estación de tipo torre triangular

3.2.3.2 Estación sinóptica meteorológica automática (ESIME)

Una estación sinóptica meteorológica es un conjunto de dispositivos eléctricos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática. Generan una base de datos y un mensaje sinóptico (los mensajes sinópticos se rigen por UTC), dichos mensajes son reportes que se generan simultáneamente gracias a un software que permite hacer los cálculos correspondientes de las variables que se reportan en todos los observatorios cada tres horas y presentan información meteorológica de tiempo presente y pasado de manera codificada.

Las estaciones sinópticas meteorológicas se encuentran ubicadas exclusivamente en los observatorios meteorológicos. Actualmente la Red Nacional de Estaciones Sinópticas Meteorológicas cuenta con 30 sitios.

El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso.

Los sensores de las ESIME's son:



Temperatura y humedad relativa



Radiación solar



Presión atmosférica



Precipitación



Dirección y velocidad del viento



Visibilidad



Sensor de temperatura mínima a la interperie (a 10 cm de la superficie)

La estructura de una estación sinóptica meteorológica es (Figura 3.27):

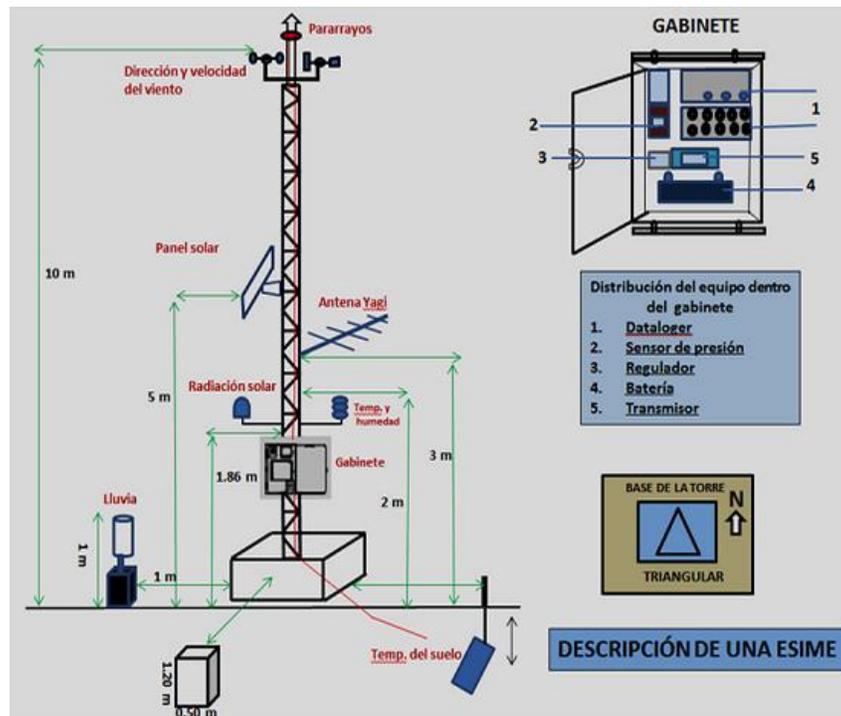


Figura 3.27 Estructura de una ESIME

3.3 PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Quizá una de las herramientas que más ha fortalecido el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica ha sido la Percepción Remota, ésta última es una técnica que ha ido evolucionando aceleradamente durante las últimas décadas con el advenimiento de la tecnología satelital. Hoy en día, las definiciones de teledetección se utilizan para describir las actividades que realizan los satélites, transbordadores espaciales o determinado tipo de aviones.

3.3.1 Definición de percepción remota

La percepción remota o teledetección, es un conjunto de técnicas que permiten medir y registrar la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra, relacionando tales mediciones con su naturaleza y distribución.

Las fotografías aéreas fueron durante muchos años uno de los productos de la percepción remota más utilizados. Sin embargo, con la tecnología satelital en la exploración de los recursos naturales y el desarrollo de equipos de cómputo, las imágenes digitales de satélite se convirtieron en una de las opciones más adecuadas para trabajar grandes áreas de manera rápida y a bajo costo.

En un sentido amplio, la percepción remota no sólo engloba los procesos que permiten obtener imágenes, sino también su posterior tratamiento, operación e interpretación.

3.3.2 Fundamentos de la observación remota

Se define a la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción.

Los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección son: sensor, objeto observado y el flujo energético que permite poner a ambos en relación. Por otra parte, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto son: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión.

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera que dispersa y absorbe parte de la señal original.

El flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro-magnética, la energía térmica se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción y radiación.

Las propiedades de la radiación electro-magnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio y aquella la considera como una sucesión de unidades discretas de energía.

Según la teoría ondulatoria, la energía electro-magnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F). Ambos elementos están inversamente relacionados, de tal manera que a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa (*Figura 3.28*). Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas.

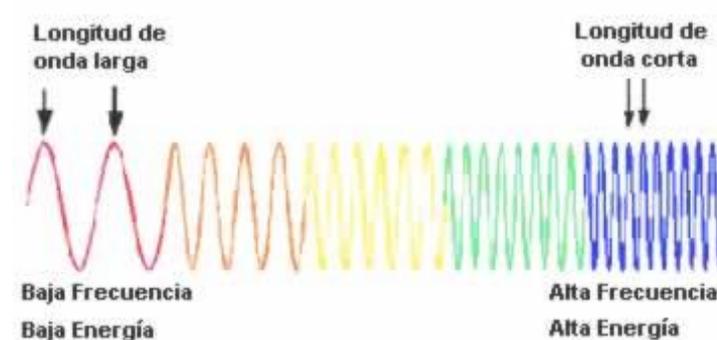


Figura 3. 28 Longitud de onda y frecuencia

La aplicación de la percepción remota a los ámbitos del tiempo y clima es posible gracias a la variedad de formas en que la atmósfera y los demás sistemas terrestres interactúan con el **espectro electromagnético**.

Se puede describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda se denomina espectro electromagnético (Figura 3.29).

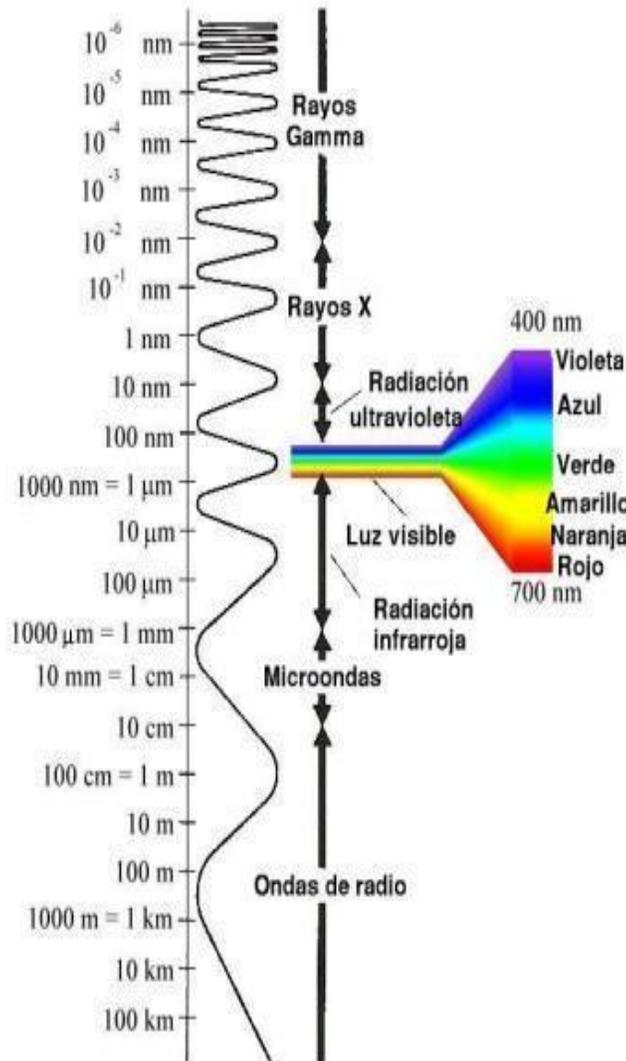


Figura 3.29 Espectro Electromagnético

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales:

- ◆ *Rayos Gamma (a partir de 0.01 nm):* Se producen por transiciones nucleares y explosiones atómicas. De forma natural los materiales radioactivos emiten este tipo de radiación.

- ◆ *Rayos X (10 nm a 0.01 nm):* Se dividen en blandos y duros. El análisis de la radiación X proporciona información de procesos de elevada energía.

- ◆ *Ultravioleta (400 nm a 10 nm):* Se suele dividir en cercano, medio y lejano. El sol, las estrellas y otros objetos calientes emiten rayos UV.

- ◆ *Espectro visible (0.4 a 0.7 μm):* Llamado así por ser la única radiación que puede percibir nuestros ojos. Se compone de tres bandas elementales: azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm).

- ◆ *Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 μm):* A veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales.
- ◆ *Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm):* Es donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- ◆ *Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm):* Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.

- ◆ *Micro-ondas (a partir de 1 mm):* Con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

Las porciones del espectro electromagnético donde la absorción de la atmósfera es leve se conocen como "ventanas" y se usan para observar las propiedades de superficie. La atmósfera es más transparente en las regiones del visible y de microondas del espectro, y es opaca en el infrarrojo, a excepción de una pequeña ventana cerca de 10 μm . Los sensores satelitales miden la energía de longitudes de onda específicas que se denominan "canales" y se numeran en orden ascendente desde la longitud de onda más corta hasta la más larga. En meteorología se utiliza principalmente las longitudes de onda visible, infrarroja y de microondas.

Las unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección (Tabla 3.6), con objeto de ser más rigurosos a la hora de abordar posteriormente los procesos de adquisición, se muestran a continuación:

Tabla 3.6 Magnitudes radiométricas utilizadas en Teledetección

Concepto	Símbolo	Fórmula	Unidad de Medida
Energía radiante	Q	--	julios (J)
Densidad radiante	W	$\delta Q/\delta v$	J / m ³
Flujo radiante	ϕ	$\delta Q/\delta t$	vatios (W)
Emitancia radiante	M	$\delta\phi/\delta A$	W / m ²
Irradiancia	E	$\delta\phi/\delta A$	W / m ²
Intensidad radiante	I	$\delta\phi/\delta\Omega$	W / sr
Radiancia	L	$\frac{\delta I \cos \theta}{\delta A}$	W / m ² sr
Radiancia espectral	L_λ	$\delta L/\delta\lambda$	W / m ² sr μm
Emisividad	ϵ	M/M_n	
Reflectividad	ρ	ϕ_r/ϕ_i	
Absortividad	α	ϕ_a/ϕ_i	
Transmisividad	τ	ϕ_t/ϕ_i	

sr, estereo-radian, medida del ángulo sólido
 μm , micrómetro o micra (10⁻⁶ metros)
 M_n , Emitancia de un cuerpo negro
 ϕ_i , flujo incidente
 ϕ_r , flujo reflejado
 ϕ_a , flujo absorbido
 ϕ_t , flujo transmitido
 θ , ángulo formado por la superficie y la dirección normal

Fuente: Fundamentos de Teledetección Espacial, Emilio Chuvieco, Ediciones RIALP, S. A., Segunda Edición, Madrid, España, 1995, pp. 51.

También estas magnitudes son dependientes de la longitud de onda, por lo que conviene complementarlas con el calificativo de espectral, para referirse a su comportamiento en una banda determinada del espectro.

3.3.3 Sensores y satélites utilizados en la percepción remota

Los sensores acoplados en satélites meteorológicos realizan las lecturas en cinco bandas del espectro electromagnético para estimar la lluvia con diversas técnicas que están en constante avance.

Los sensores normalmente constan de cuatro componentes: los colectores, los detectores, los procesadores de señales y las unidades registradoras. Hay varias formas de clasificarlos:

- a) Sistema de encuadre, que comprenden varios tipos de cámaras fotográficas que registran instantáneamente una imagen completa.
- b) Sistemas de rastreo, que tienen un detector (sensor electrónico) que barre una superficie en una serie de líneas paralelas recogiendo datos para registrar una imagen.

La *resolución de un sistema sensor* como su habilidad para registrar implica, al menos, cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

Resolución espacial: Tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen, pues designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la misma. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen. Se mide en unidades de longitud (mm sobre la foto, o m sobre el terreno) y dependen de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie. La resolución espacial de los sensores de observación terrestre en funcionamiento recoge un rango bastante amplio.

Resolución espectral: Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. La resolución Multi-espectral, registra simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro. En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione.

La elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye el sensor está estrechamente relacionada con los objetivos de su diseño. Para un sensor dedicado a fines meteorológicos, basta situar una sola banda en el visible, puesto que no existen diferencias cromáticas en las nubes. Por el contrario, será conveniente que incluya una o dos bandas en el térmico (que permita conocer la temperatura de dichas nubes), y otra en el infrarrojo medio, en donde puede observarse el contenido de humedad de la atmósfera.

Resolución radiométrica: Hace mención a la sensibilidad del sensor, esto es, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Al igual que en los otros tipos de resolución, cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podrá interpretarse la imagen.

Resolución temporal: Este concepto alude a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de apertura.

Conviene aclarar que estos cuatro aspectos de la resolución están íntimamente relacionados. A mayor resolución espacial, disminuye habitualmente

la temporal, y es previsible que se reduzca también la espectral y radiométrica, en consecuencia, habrá de subrayarse aquel tipo de resolución más conveniente a sus fines, por ejemplo, si está orientado a la detección de fenómenos efímeros en el tiempo, deberá realizarse su cobertura temporal, aun a costa de perder resolución espacial, como ocurre con los satélites meteorológicos.

Conviene clasificar los satélites de telepercepción ambiental en dos categorías principales: los geoestacionarios y los de órbita cuasipolar.

Los *Satélites Geoestacionarios* son satélites que se lanzan a una órbita altamente geosincrónica, a unos 35,900 km sobre el ecuador, es decir a una altitud en que su velocidad corresponde exactamente a la velocidad de rotación de la tierra. Esta altura limita bastante los usos a los que se pueden destinar, se emplean, por ejemplo, para transmitir señales de telecomunicaciones o para el pronóstico de tiempo. El hecho de permanecer estacionarios les permite alcanzar una alta resolución temporal, pero la gran altitud hace que su resolución espacial sólo sea normalmente de entre 2 y 5 km, según la longitud de onda. Pueden captar la superficie terrestre entre las latitudes 80°N y 80°S, y tienen la capacidad de adquirir y transmitir imágenes y datos de toda su superficie observable cada 30 o 15 minutos.

Los satélites más conocidos son: GOES “Geostationary Operational Environmental Satellite”, lanzados por los Estados Unidos y administrados por la NOAA “National Oceanic and Atmospheric Administration”; METEOSAT, lanzados por la Unión Europea y administrados por EUMETSAT “European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites”; y GMS “Geosynchronous Meteorological Satellite”, lanzados por Japón.

Las estimaciones más aproximadas de la precipitación mundial desde el espacio se obtienen combinando las mediciones de satélites TRMM y los antes mencionados.

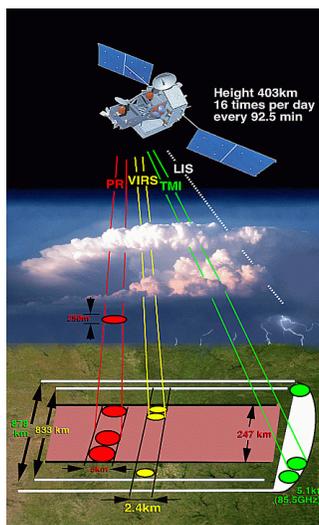


Figura 3.30 Satélite TRMM

El satélite TRMM “Tropical Rainfall Measuring Mission” (Figura 3.30) entra en órbita el 27 de noviembre de 1997 y es una misión espacial entre la NASA (USA) y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) para monitorear y estudiar lluvias tropicales.

Su órbita circular, no sol – sincrónica tiene una inclinación de 35° con respecto al ecuador y cuenta con una altitud de 403 km.

El satélite TRMM está dotado de un radar que transmite en una longitud de onda de 2.2 cm (microondas activas) y de radiómetros de microondas (de 19 a 90 GHz). La resolución de estos instrumentos va desde aproximadamente 1 km para los radiómetros en el

espectro visible e infrarrojo, hasta unos 10 km para los radiómetros de microondas y 250 m en el caso del radar.

La Organización Meteorológica Mundial en 2011 indicó que la órbita de baja inclinación utilizada por el TRMM permite obtener muestras a lo largo de una serie completa de horas de paso por el Ecuador en períodos de 24 horas en el transcurso de un mes.

A continuación se describen los instrumentos del satélite TRMM (*Figura 3.31 y Tabla 3.7*):

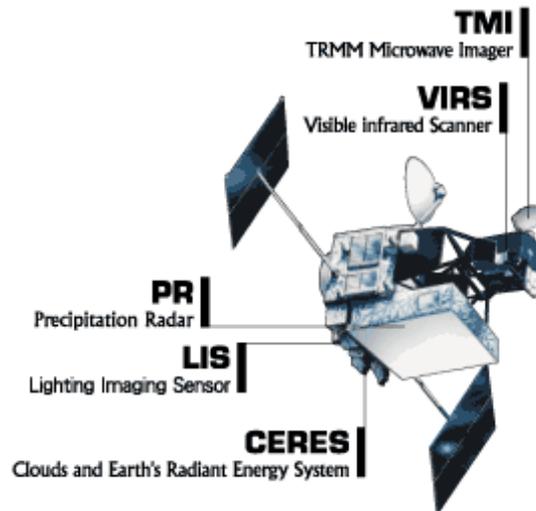


Figura 3.31 Instrumentos satélite TRMM

Tabla 3.7 Descripción de los instrumentos del satélite TRMM

Instrumento	Descripción
VIRS (Visible Infrared Radiometer)	El VIRS es uno de cinco canales, proporciona observaciones de alta resolución en la cobertura de nubes, tipo de nubes y las nubes de temperaturas altas.
TMI (TRMM Microwave Imager)	La TMI es un radiómetro multicanal de microondas pasivas que opera a cinco frecuencias, proporciona información sobre precipitación, el agua líquida en las nubes, nubes de hielo, la intensidad de la lluvia y los tipos de precipitaciones.
PR (Precipitation radar)	El PR, el primero de su tipo en el espacio, es un radar de escaneo electrónico, que mide la distribución de las precipitaciones en 3 – D sobre la tierra y el océano, y define la profundidad de la capa de precipitación.

Fuente: GES DISC (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/TRMM>)

Los *Satélites de Órbita Cuasipolar* dan vuelta alrededor de la tierra con una inclinación de casi 90 grados respecto del ecuador, es decir, de manera que su órbita casi cruza los polos norte y sur. La altura varía entre 270 y 1,600 km, y la órbita suele ser heliosincrónica, lo que significa que cruza el ecuador a la misma hora solar todos los días. Por tener este tipo de órbita, el satélite sobrevuela cualquier punto de la tierra a la misma hora local. Para completar una vuelta alrededor de la tierra necesita entre 95 y 115 minutos (según la altura). La inclinación exacta de la trayectoria de vuelo determina el tiempo que tarda en

volver a pasar por un mismo lugar, pero normalmente es 16 a 20 días. Estos satélites tienen una vida útil prevista de cuatro años aproximadamente.

Varios programas de satélites ambientales se pusieron en marcha a mediados de los años sesenta. Algunos de ellos aún están funcionando, mientras que otros se han suspendido.

El programa Landsat surge a finales de la década de los 60's, gracias a los brillantes resultados que proporcionaron las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial norteamericana diseñó el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres.

Esta familia de satélites Landsat ha constituido, sin duda, el proyecto más fructífero de teledetección espacial desarrollado. La buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de la observación que realizan y su buena comercialización, explican su empleo en muy variados campos en todo el mundo.



Figura 3.32 Satélite Landsat

El primer satélite Landsat fue lanzado el 23 de julio de 1972, el último de la serie el Landsat 8 (Figura 3.32) lanzado el 11 de febrero del 2013 cuenta con sensores OLI y TIRS, tiene una altitud de 705 km y una inclinación de 98.2°, es el futuro de los satélites Landsat. Actualmente está recogiendo valiosos datos e imágenes que se utilizan en la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y el gobierno.

El programa Landsat ofrece alta resolución de los datos multiespectrales de la superficie de la tierra sobre una base global. Los datos del satélite constituyen el registro más largo de la superficie continental de la tierra vista desde el espacio.

Uno de los proyectos de teledetección espacial más novedoso, ha sido el proyecto SPOT, desarrollado por franceses, con la colaboración de Suecia y Bélgica. El sistema SPOT es una fuente permanente de información geográfica. Se encuentra en operación desde 1986. Actualmente el SPOT 5 (Figura 3.33) se encuentra en órbita y cuenta con el cubrimiento de los cinco continentes y genera modelos digitales de elevación, aunque se prevé el término de su vida útil en el año 2015.



Figura 3.33 Satélite SPOT 5

Las imágenes SPOT permiten observar vastas extensiones de la superficie terrestre, a una escala muy precisa, son útiles para estudios de cartografía, defensa, agricultura, planificación urbana y telecomunicaciones.

La familia de satélites Tiros – NOAA, constituye uno de los múltiples programas diseñados para enviar información meteorológica a la superficie terrestre, y se desarrollaron a partir de 1960 con el lanzamiento del satélite TIROS – 1.

NOAA opera dos tipos de sistemas de satélite para los Estados Unidos, los satélites geoestacionarios y satélites de órbita polar. Los satélites geoestacionarios constantemente monitorean el Hemisferio Occidental de alrededor de 35,800 km por encima de la tierra y los satélites en órbita polar alrededor de la tierra y proporcionan información mundial desde 870 km sobre la tierra.



Figura 3.34 NOAA

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de este programa es facilitar información sobre el estado presente de la atmósfera, el satélite NOAA se diseñó para ofrecer un ciclo de cobertura muy corto, este ciclo se mejor gracias a la sincronización entre los dos satélites que operan simultáneamente.

El sensor más interesante se denomina AVHRR, diseñado para proporcionar imágenes con una resolución de 1.1 km, en 5 bandas del espectro.

Gracias a su buena cobertura temporal y bajo costo, el sensor ha ganado un creciente interés para abordar estudios medio ambientales de pequeña escala.

La NOAA (Figura 3.34) es una agencia que enriquece la vida a través de la ciencia, su alcance va desde la superficie del sol hasta las profundidades del mar, mientras que trabajan para mantener a los ciudadanos informados de los cambios del entorno que les rodea.

3.3.4 Definición de sistemas de información geográfica

“Cualquier cosa que funciona como un mapa, al comunicar geográficamente la información solicitada por los usuarios del sistema” (Michael Dacey)

Los Sistemas de Información Geográficas (SIG) son una herramienta interdisciplinaria y han sido siempre utilizados para la resolución de problemas socio-espaciales.

El espacio geográfico puede ser representado a través de dos grandes componentes. Por un lado las entidades que se encuentran distribuidas con localizaciones espaciales específicas y por el otro lado los atributos que estas entidades tienen.

A nivel computacional esta situación se resuelve mediante la creación de bases de datos gráficas (contienen entidades) y bases de datos alfanuméricos (contienen atributos medidos en estas entidades). Los SIG ingresaron en este panorama informático para actuar de nexo entre ambos.

La finalidad de un SIG, entonces, fue la de combinar las bases de datos gráficas (cartográfica digital con la localización de cada unidad espacial) con las bases de datos alfanuméricos (atributos textuales numéricos medidos en cada unidad

espacial) para representarlos dentro de un sistema de coordenadas geográficas y realizar un tratamiento espacial de los datos a fin de obtener información significativa.

Considerando la primera definición dada por el geógrafo canadiense Michael Dacey, si miramos un mapa topográfico en papel podemos ver que este cuenta con todos los elementos necesarios de un SIG: hay datos gráficos, hay atributos y hay un sistema de coordenadas con la que puede ubicarse espacialmente cada entidad. Por otra parte, la computación produjo un cambio al ambiente desde el papel al formato digital, un cambio fundamental que ha revolucionado el manejo de los datos geográficos y entre ellos la cartografía.

La automatización digital permite ver al SIG de cuatro formas diferentes:

1. Orientación al entorno de trabajo como sistema que se basa en el uso de computadoras para el tratamiento de datos espaciales.
2. Orientación hacia su funcionalidad como un sistema que permite la obtención, el almacenamiento, el tratamiento y el reporte de datos espaciales.
3. Orientación hacia su contenido como base de datos que contienen información referenciada espacialmente.
4. Orientación hacia su propósito como sistema que sirve de apoyo al proceso de toma de decisiones en materia de gestión y planificación territorial.

Por su parte, en un trabajo que analiza exclusivamente las diferentes definiciones (Teixeira et al, 1995: 24) las combinan intentando realizar la definición más completa y consideran que un SIG es:

“Un conjunto de programas, equipamientos, metodologías, datos y personas (usuarios), perfectamente integrados, de manera que hace posible la recolección de datos, almacenamiento, procesamiento y análisis de datos georreferenciados, así como la producción de información derivada de su aplicación.”

Finalmente, ante la integración lograda y sus grandes posibilidades interdisciplinarias, el SIG es el paso más importante para el tratamiento de la información geográfica.

Los *componentes* computacionales se clasifican bajo las definiciones de software y hardware. Ambos combinados acertadamente posibilitan tener un alto porcentaje de éxito en la aplicación estrictamente técnica.

El *concepto de software* se refiere a los programas de aplicación que se utilizan para el tratamiento de datos y la búsqueda de resultados. Una aplicación SIG generalmente estará compuesta por diferentes tipos de software que posibilitan un funcionamiento combinado de sus subsistemas para el tratamiento de datos geográficos.

Los subsistemas de un SIG son:

- ◆ Almacenamiento y organización de datos espaciales gráficos: Diferentes modos de digitalización como el procesamiento manual (p. ej. Tableta digitalizadora), procesamiento automático (p. ej. Scanner) o archivos provenientes directamente de los sensores incorporados en los satélites artificiales de uso medioambiental.
 - ◆ Almacenamiento y organización de datos de atributos: Con localización espacial definida por la digitalización se organizan en archivos computacionales para ser eficientemente recuperados con la finalidad de análisis, ampliación, modificación, tratamiento estadístico o de ser asociados a la cartografía digital.
 - ◆ Tratamiento de datos: Utilización de las herramientas para manipular el contenido y realizar con ellos diversos procedimientos de análisis espacial.
 - ◆ Presentación de resultados: Despliega los resultados obtenidos a través de los periféricos de salida.
- Estos subsistemas del SIG son los que permiten definirlo en una orientación hacia su funcionalidad, pero no todos los componentes deben estar presentes para que un SIG cumpla con su objetivo técnico.

El *concepto hardware* hace referencia a los componentes materiales o tangibles, es decir, a los elementos físicos de una computadora. Todos ellos son componentes generales que para el tratamiento de datos geográficos se combinan con otros más específicos.

Por otra parte, son dos los modelos utilizados computacionalmente para representar la información obtenida de las diferentes unidades espaciales.

El modelo **raster** (Figura 3.35) divide el espacio geográfico mediante una matriz cuadriculada en donde cada celda contiene información correspondiente a la característica dominante en ella. Cada celda es una localización, técnicamente se denomina pixel (picture element) y es la unidad mínima de representación espacial.

Referencia	1	1	3	3	3	3	4
1. Unidad espacial A	1	1	1	3	3	4	4
2. Unidad espacial B	1	1	2	3	3	4	4
3. Unidad espacial C	2	2	2	2	4	4	4
4. Unidad espacial D	2	2	2	2	4	4	4

Figura 3.35 Mapa raster de unidades espaciales areales (cuatro polígonos)

Los primeros SIG fueron raster y actualmente es una tecnología que ha evolucionado notablemente, tanto manteniendo su capacidad para la incorporación de imágenes satelitales que se generan directamente en este formato como para la realización de diversos procedimientos de análisis espacial.

Las características sobresalientes de este modelo son:

- ◆ Es una estructura simple y fue la primera utilizada porque se combinaba fácilmente con los iniciales sistemas de visualización (display) y de impresión (impresoras matriciales).
- ◆ Permite realizar fácilmente procedimientos de análisis espacial por superposición temática de variables.
- ◆ Es un formato que tiene compatibilidad directa con las imágenes satelitales que se han transformado en una importante fuente de datos actualizados.

El modelo **vectorial** (Figura 3.36) organiza los datos geográficos en base a la perspectiva de bases de datos relacionadas y a partir de esto permite trabajar digitalmente utilizando las tres entidades gráficas que se usan para la confección de mapas: puntos, líneas y áreas (polígonos). A partir de aquí, las bases de datos alfanuméricas asociadas a estas entidades geográficas son bases de datos alfanuméricos puntuales, lineales y areales (poligonales).

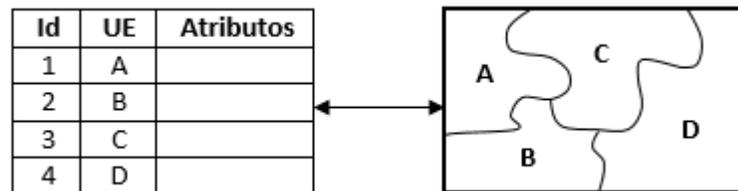


Figura 3.36 Mapa vectorial de unidades espaciales areales (cuatro polígonos)

Las características sobresalientes de este modelo son:

- ◆ Es una estructura que genera diseños más reales del espacio geográfico al representar sus entidades a través de puntos, líneas y áreas.
- ◆ Permite realizar operaciones en la base de datos alfanumérica y representarlas en el mapa. Su característica de inventario es inagotable.
- ◆ Los diseños cartográficos son de excelente calidad y permiten aplicar claramente los conceptos de la cartografía temática.

Cabe destacar que actualmente la mayoría de los sistemas, y esta es la tendencia, incorporan posibilidades conjuntas raster – vectorial o vectorial – raster en la consideración de que cada modelo se orienta hacia una mayor eficiencia en diferentes procedimientos para el tratamiento de datos geográficos.

La perspectiva vectorial se basa en la visión del espacio geográfico definido por objetos, los cuales pueden representarse cartográficamente a través de ser incorporados a una figura geométrica particular: punto, línea o área (polígono).

El equipamiento colectivo en una ciudad (escuelas, hospitales) puede estar representado a través de puntos, estructuras de circulación (calles) por líneas, y divisiones administrativas (departamentos, provincias) por áreas.

Lógicamente la base de datos (*Figura 3.37*) se organiza por capas temáticas correspondientes a cada uno de los mapas que representa una variable o tema específico en el área de estudio. Estas capas temáticas tendrán la misma extensión, proyección y escala para poder superponerse perfectamente.

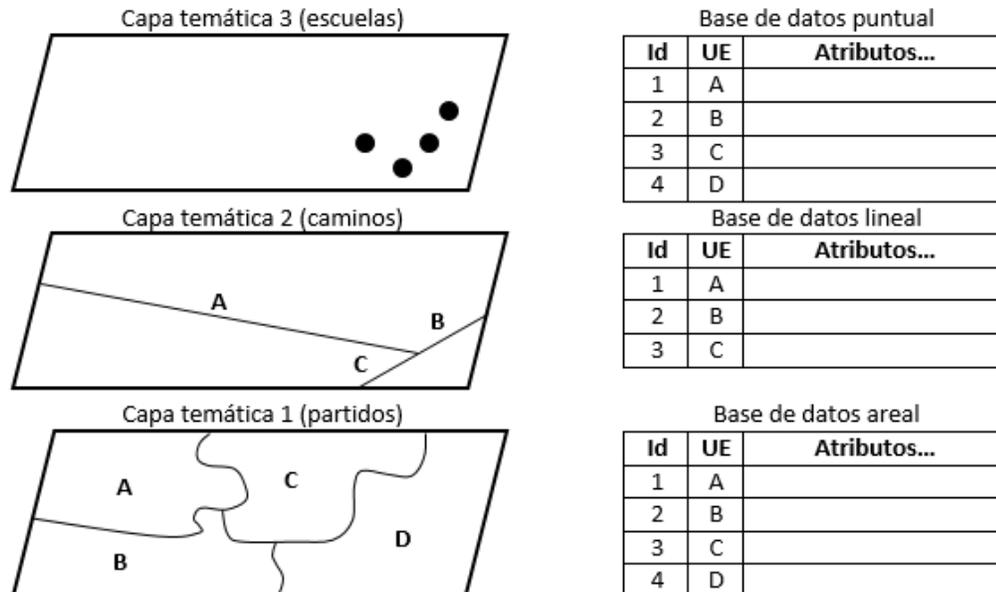


Figura 3.37 Base de datos vectorial (tres capas temáticas)

El análisis vectorial en principio se realiza por la visualización de capas temáticas, luego se producen consultas tomando la vinculación existente entre las bases de datos gráficas y alfanuméricas, y finalmente por procedimientos que permiten la asociación entre capas temáticas diferentes.

Clasificación de las funciones de los SIG

- A) Introducción y codificación de los datos:
 - i) Adquisición de datos.
 - ii) Validación y edición de datos.
 - iii) Estructuración y almacenamiento de datos.

- B) Manipulación de los datos:
 - i) Conversión de estructura, por ejemplo de vectores a cuadrículas.
 - ii) Conversión geométrica: superposición de mapas, cambios de escala, diversas transformaciones, cambios de proyección cartográfica, etc.
 - iii) Generalización y clasificación: reclasificación de datos, agregación o desglose de datos, etc.
 - iv) Integración, por ejemplo combinación de estratos de diferentes superficies.
 - v) Mejoras, como la acentuación de contornos de la imagen.
 - vi) Cálculos abstractos, por ejemplo de los centroides de las áreas y de polígonos de Thiessen.

- C) Recuperación de los datos:
 - i) Recuperación selectiva de información sobre la base de temas o criterios definidos por los usuarios, incluidos servicios de consulta rápida.
- D) Análisis de los datos:
 - i) Análisis espacial.
 - ii) Análisis estadístico.
 - iii) Mediciones.
- E) Presentación visual de los datos:
 - i) Representación gráfica.
 - ii) Presentación descriptiva, como informes escritos o cuadros.
- F) Gestión de la base de datos:
 - i) Apoyo y vigilancia del acceso multiusuario a la base de datos.
 - ii) Arreglo de los fallos del sistema.
 - iii) Enlaces de comunicación con otros sistemas.
 - iv) Actualización de las base de datos.
 - v) Organización de la base de datos para un almacenamiento y recuperación eficientes.
 - vi) Mantenimiento de la seguridad e integridad de la base de datos.
 - vii)Provisión de una visión de la base de datos “independiente de los datos”.

Caso de estudio: Cuenca del Río Atoyac (RH19A)

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

Las cuencas son unidades naturales del terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas debida a la conformación del relieve. La CONAGUA ha definido 731 cuencas hidrológicas, que se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas y a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA).

La cuenca RH19A (*Figura 4.1 Cuenca "R. Atoyac y otros"*) que lleva por nombre "Río Atoyac y otros" pertenece a la Región Hidrológica número 19 llamada Costa Grande de Guerrero, tiene una extensión de 5390.08 [km²] y un perímetro de 504.73 [km].



Figura 4. 1 Cuenca "R. Atoyac y otros"

Los municipios que forman parte de la cuenca, aunque a algunos de ellos no los cubra en su totalidad son: Acapulco de Juárez, Coyuca de Benítez, Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Técpan de Galeana.

Presenta un clima cálido subhúmedo, con una temperatura media anual de 25 °C donde la mínima promedio es de 18 °C y la máxima de 32 °C. Las lluvias se presentan en verano, en los meses de junio a septiembre, la precipitación media del estado de Guerrero es de 1200 [mm] anuales, aunque en el municipio de Acapulco varía de 1500 a 2000 [mm].

Las principales corrientes que se encuentran dentro de la cuenca son las de los ríos La Sabana, Coyuca, Atoyac y Técpan, mientras que los cuerpos de agua son las Lagunas de Mitla, Coyuca y la de Tres Palos (*Figura 4.2 Hidrografía*).

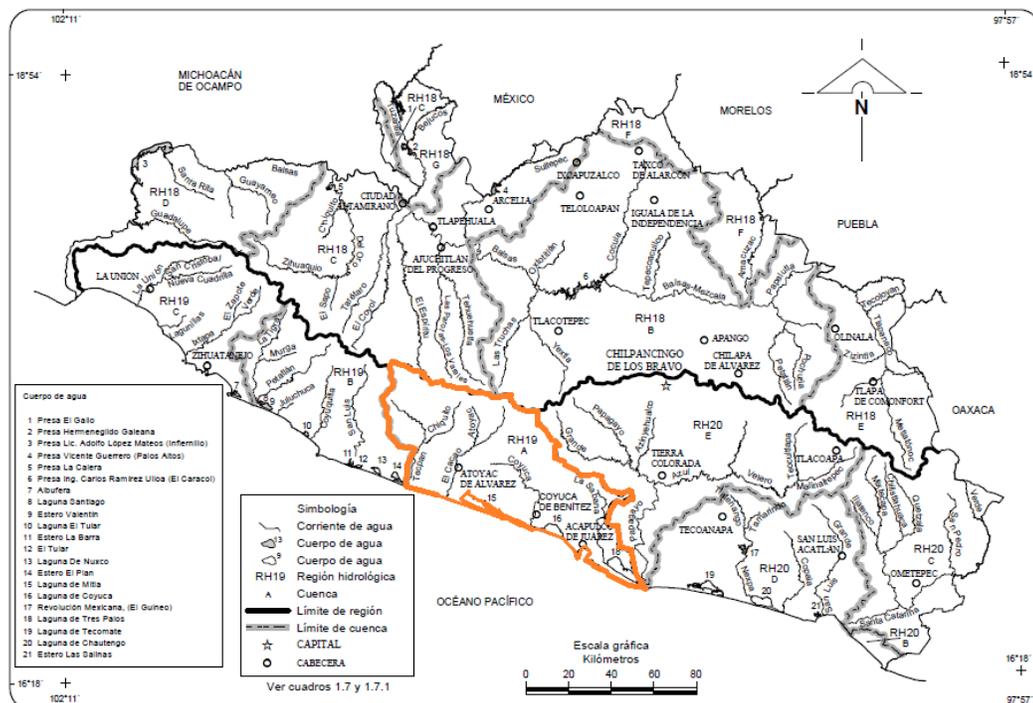


Figura 4. 2 Hidrografía

Con respecto a la vegetación, la predominante es la conocida como selva caducifolia, integrada por diferentes especies, en la serranía se localizan áreas de bosque de pino y encino, además de haber variedad de árboles frutales. En relación a la fauna, existe conejo, iguana, mapache, venado, almejas, camarones, cangrejos, langosta y pulpo, entre otros.

4.2 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS DE LA CUENCA

La cuenca RH19A "Río Atoyac y otros" como ya se mencionó anteriormente tiene una extensión de 5390.08 [km²] y un perímetro de 504.73 [km], estos datos fueron obtenidos del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL).

Para el cálculo de las características fisiográficas de la cuenca se utilizó de apoyo para el tratamiento de la información el software ArcGIS, que es una robusta plataforma informática que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelos y mapas.

El cálculo del **centroide** de la cuenca se obtendrá a partir de la información de las ocho subcuencas que la conforman (*Tabla 4.1 Centroide y área de las subcuencas que conforman la RH19A*) y se muestran a continuación:

Tabla 4. 1 Centroide y área de las subcuencas que conforman la RH19A

ID	CVE_SUBCUE	SUBCUENCA	ÁREA [km ²]	PERÍMETRO [km]	x_coord [km]	y_coord [km]
91	RH19Aa	L. de Tres Palos	275.36	94.89	423	1859
107	RH19Ab	R. La Sabana	466.03	165.09	413	1880
104	RH19Ac	B. de Acapulco	429.03	161.65	398	1876
133	RH19Ad	R. Coyuca	1300.77	229.50	383	1903
112	RH19Ae	A. Cacalutla	536.09	122.77	362	1891
136	RH19Af	R. Atoyac	902.70	192.82	357	1918
118	RH19Ag	L. del Tular	141.72	65.53	335	1900
145	RH19Ah	R. Teapan	1338.38	214.91	332	1928
Suma			5390.08			

Utilizando el cálculo de centroides de superficies compuestas obtenemos lo siguiente (*Tabla 4.2 Cálculo del centroide*):

Tabla 4. 2 Cálculo del centroide

CVE_SUBCUE	ÁREA [km ²]	x_coord [km]	y_coord [km]	AREA(x_coord) [km ³]	AREA(y_coord) [km ³]
RH19Aa	275.36	423	1859	116477.28	511894.24
RH19Ab	466.03	413	1880	192470.39	876136.40
RH19Ac	429.03	398	1876	170753.94	804860.28
RH19Ad	1300.77	383	1903	498194.91	2475365.31
RH19Ae	536.09	362	1891	194064.58	1013746.19
RH19Af	902.70	357	1918	322263.90	1731378.60
RH19Ag	141.72	335	1900	47476.20	269268.00
RH19Ah	1338.38	332	1928	444342.16	2580396.64
Suma				1986043.36	10263045.66

El centroide de la cuenca RH19A “R. Atoyac y otros” (*Figura 4.3 Centroide de la cuenca*) se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{x} = \frac{\sum A_i x_i}{\sum A_T} \quad \bar{y} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_T}$$

Para la coordenada en “x”:

$$\bar{x} = \frac{1986043.36 [km^3]}{5390.08 [km^2]} = 368.46 [km]$$

Para la coordenada en "y":

$$\bar{y} = \frac{10263045.66 [km^3]}{5390.08 [km^2]} = 1904.06 [km]$$



Figura 4. 3 Centroide de la cuenca

La **elevación de la cuenca** se obtiene con base al modelo de elevación del estado de Guerrero (Figura 4.4 Modelo de elevación de la cuenca) que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y se presenta a continuación:



Figura 4. 4 Modelo de elevación de la cuenca

La elevación de la cuenca, se determina obteniendo un promedio de la información que pertenece a cada una de las subcuencas (*Tabla 4.3 Elevación de la cuenca*):

Tabla 4. 3 Elevación de la cuenca

CVE_SUBCUE	MIN	MAX	MEAN
	[msnm]		
RH19Aa	-9	430	44.83
RH19Ab	-9	1603	227.07
RH19Ac	-9	2261	491.23
RH19Ad	-9	1383	211.73
RH19Ae	-8	757	96.95
RH19Af	-9	3525	844.58
RH19Ag	-8	3328	910.13
RH19Ah	-8	3041	929.58
Elevación	-9	2041	470

La **red de drenaje**, se consigue a partir de los datos que proporciona la red hídrica de la cuenca RH19A (*Figura 4.5 Red hídrica de la cuenca*):

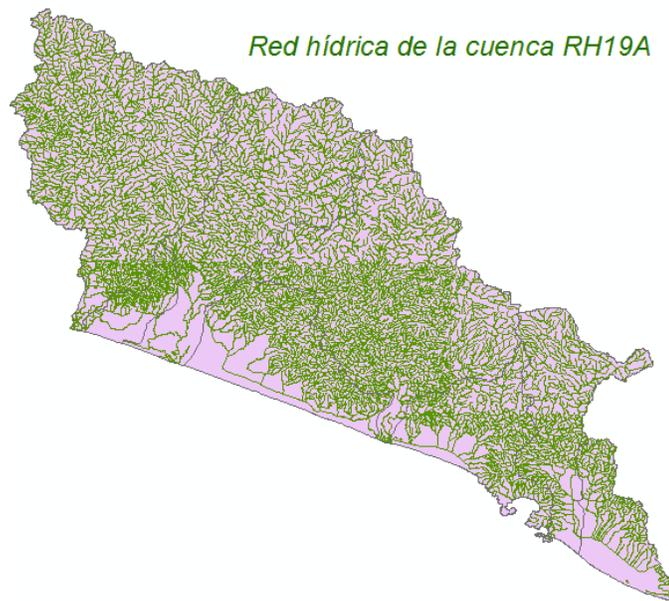


Figura 4. 5 Red hídrica de la cuenca

En los siguientes resultados, se muestra el número total de tributarios y la longitud de los mismos (*Tabla 4.4 Longitud de tributarios*):

Tabla 4. 4 Longitud de tributarios

	No. de tributarios	Longitud [m]
	22	11829
	10174	9514262
Suma	10196	9526091

Con base en los datos anteriores, el valor de la densidad de drenaje es:

$$D_d = \frac{L_T}{A}$$
$$D_d = \frac{9526.09 [km]}{5390.08 [km^2]} = 1.7673 [km^{-1}]$$

La densidad de corriente es igual a:

$$D_c = \frac{N_s}{A}$$
$$D_c = \frac{10196}{5390.08 [km^2]} = 1.8916 [km^{-2}]$$

El **número de orden** de la cuenca obtenido a partir de la red hídrica es igual a siete como se observa en la próxima imagen (*Figura 4.6 Número de orden de la cuenca*):

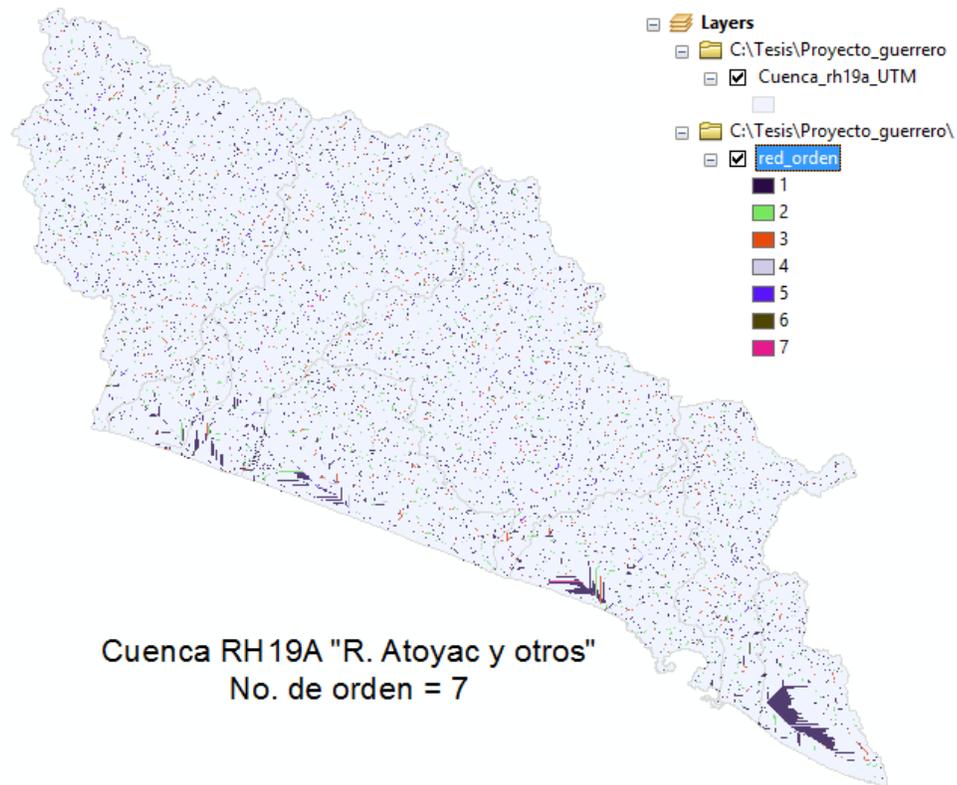


Figura 4. 6 Número de orden de la cuenca

La **pendiente media** de la cuenca (*Figura 4.7 Pendiente media de la cuenca*), se calculó a partir de una reclasificación del raster (*Figura 4.8 Pendiente reclasificada*), para establecer los rangos de la pendiente.

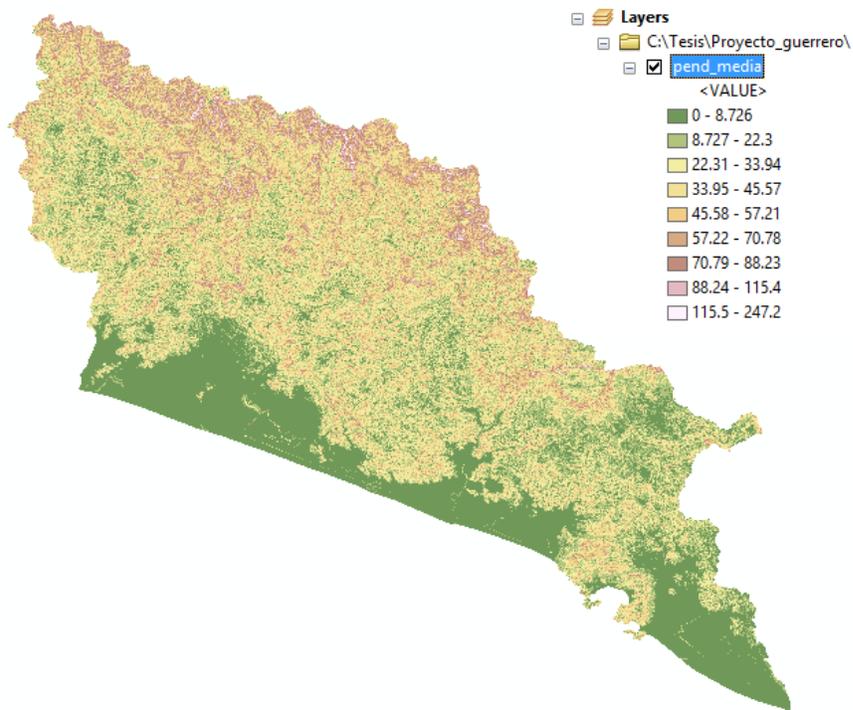


Figura 4. 7 Pendiente media de la cuenca

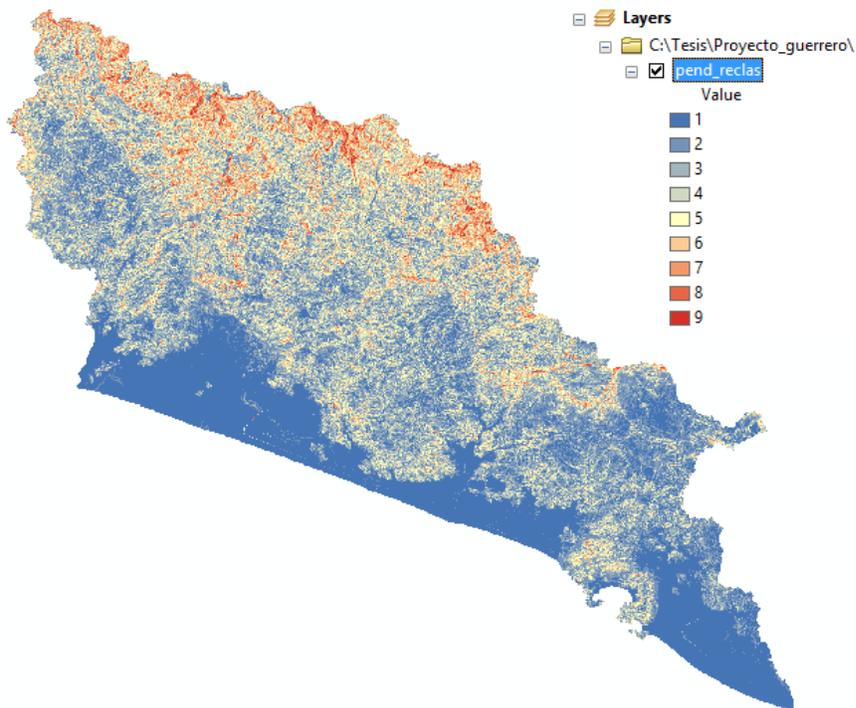


Figura 4. 8 Pendiente reclasificada

Los valores que se proporcionan en la siguiente tabla (*Tabla 4.5 Pendiente media*), son la pendiente media de cada una de las subcuencas que componen la cuenca RH19A "R.

Atoyac y otros”, para obtener el valor de la pendiente de la cuenca en su totalidad se calculó el promedio de las mismas:

Tabla 4. 5 Pendiente media

CVE_SUBCUE	AREA	MEAN
RH19Aa	274422000	1.3918
RH19Ab	427741000	2.2757
RH19Ac	465305000	2.3153
RH19Ad	534852000	2.1647
RH19Ae	141600000	1.7224
RH19Af	1300180000	3.4368
RH19Ag	902109000	3.6256
RH19Ah	1338200000	3.8864
Promedio		2.6023

El valor obtenido de **2.6023** indica en que clase se encuentra la pendiente de la cuenca, redondeando el número a 3 tenemos que el valor de la pendiente está en el intervalo de 22.31 – 33.94 (Figura 4.9 Pendiente media):

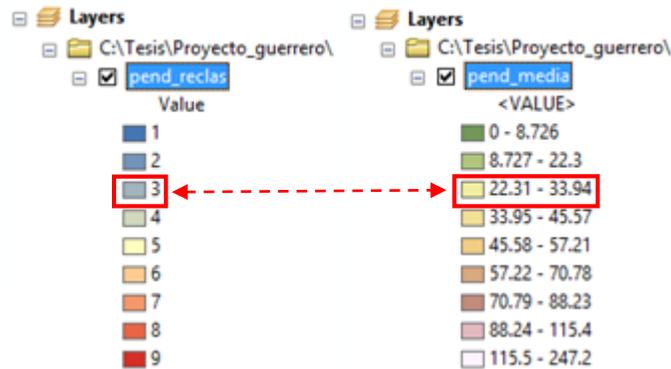


Figura 4. 9 Pendiente media

4.3 INFORMACIÓN DE PRECIPITACIÓN CON BASE EN TIERRA

Para realizar la comparación de la precipitación obtenida por medio satelital con una lectura convencional realizada por las estaciones, se cuenta con la información de seis estaciones meteorológicas (Figura 4.10 Estaciones meteorológicas).

De las anteriores mencionadas, dos son estaciones meteorológicas automáticas (“Acapulco” y “El Veladero”) y dos de ellas estaciones sinópticas meteorológicas (“Acapulco” y “Chilpancingo”). El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de proporcionar la información sobre estas cuatro estaciones, depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que a su vez forma parte de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Por último, las dos estaciones automáticas restantes (“Pto. Vicente” y “L. Cárdenas”) son reguladas por la Secretaría de Marina (SEMAR).

• L. Cárdenas



Figura 4. 10 Estaciones meteorológicas

Antes de proceder a cualquier ajuste de funciones, es necesario realizar pruebas estadísticas que den idea de las características de independencia y homogeneidad de dichos registros.

La independencia significa que el resultado de la precipitación de unos días no depende del valor de precipitación de días anteriores. Existen numerosas técnicas para definir la independencia de los valores que conforman una determinada serie, para este caso en concreto se aplicara la prueba de independencia de Anderson.

Las pruebas de homogeneidad sirven para determinar si las características estadísticas como la media o desviación estándar han sufrido cambios abruptos en sus valores. Para demostrar la homogeneidad de los datos, puede emplearse una o diferentes pruebas. Dichas pruebas permiten determinar si las variables que integran la serie de datos pertenecen a una misma población, la prueba a emplearse es la prueba estadística de Helmert.

4.3.1 Prueba de independencia

Para llevar a cabo el análisis de frecuencias de una serie de datos, es necesario que la muestra sea independiente, es decir, que sean variables aleatorias. Para probar que nuestra información lo es, se aplicó la prueba de Anderson, la cual se basa en la determinación del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos. Cuando se analiza un solo registro $j = 1$, y la ecuación para calcularlo es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (x_i^j - \bar{x}^j)(x_{i+k}^j - \bar{x}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{x}^j)^2}$$

Donde:

j: Muestra de datos analizada

k: Tiempo de retraso

n_j : Número de datos de la muestra j

\bar{x}^j : Media de la muestra j

Los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden obtener con la siguiente ecuación:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - 1}$$

La estación meteorológica automática que lleva por nombre "Acapulco" tiene los siguientes registros de precipitación (*Tabla 4.6 Registro de precipitación "Acapulco"*).

Tabla 4. 6 Registro de precipitación "Acapulco"

Fecha	hp _{acum} [mm]	Fecha	hp _{acum} [mm]
10/09/13	0.00	18/09/13	0.00
11/09/13	1.50	19/09/13	14.68
12/09/13	19.53	20/09/13	0.00
13/09/13	23.81	21/09/13	0.00
14/09/13	190.19	22/09/13	2.52
15/09/13	177.20	23/09/13	0.00
16/09/13	61.41	24/09/13	3.03
17/09/13	9.11	25/09/13	23.08

El cálculo del coeficiente de autocorrelación, incluyendo los límites al 95% de confianza de los datos proporcionados anteriormente se muestra a continuación (*Tabla 4.7 Coeficiente de autocorrelación y límites al 95%*):

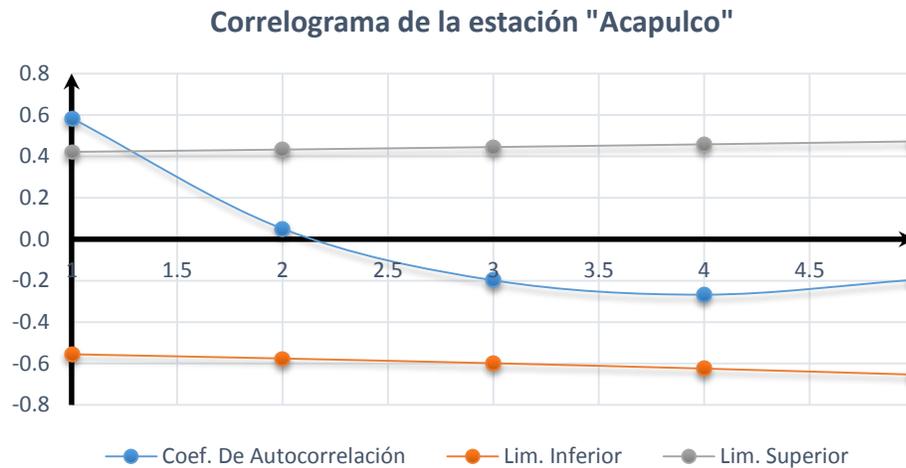
Tabla 4. 7 Coeficiente de autocorrelación y límites al 95%

K	Lim _{inf}	r	Lim _{sup}
1	-0.5556	0.5841	0.4222
2	-0.5762	0.05111	0.4333
3	-0.5992	-0.1979	0.4454
4	-0.6250	-0.2672	0.4584
5	-0.6544	-0.1952	0.4726

Con los valores estimados r_k^j (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas) y los valores correspondientes a los límites de confianza, se elabora una gráfica denominada correlograma de la muestra (*Gráfica 4.1 Correlograma de la estación "Acapulco"*). Los correlogramas y la información del resto de las estaciones se muestran al final de este trabajo en el Anexo A.

Debido a que sólo el 10% de los valores de r_k^j sobrepasan los límites de confianza, se considera que la muestra analizada es independiente y sigue las leyes de la probabilidad.

Gráfica 4. 1 Correlograma de la estación "Acapulco"



4.3.2 Prueba de homogeneidad

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo se dice que ha ocurrido una secuencia (S), en caso contrario ha ocurrido un cambio (C). Para que una serie sea homogénea, la diferencia entre el número de secuencias y cambios debe ser cero, o estar dentro de los límites de un cierto error probable, el cual se calcula con la siguiente ecuación ("n" es el número de eventos o registros de la muestra por analizar):

$$S - C = \pm\sqrt{n - 1}$$

Con los datos de precipitación acumulada del día 15 de Septiembre del 2013, puesto que es uno de los días en que se registró mayor precipitación, de cada una de las estaciones (*Tabla 4.6 Registro de precipitación 15 de Septiembre del 2013*) se llevó a cabo la prueba de homogeneidad:

Tabla 4. 8 Registro de precipitación 15 de Septiembre del 2013

Estación	hp [mm]
Acapulco (EHCA)	177.2
El Veladero, Gro.	315
ESIME Acapulco	183.8
ESIME Chilpancingo	165.2
Pto. Vicente	46.93
L. Cárdenas	195.8
Suma	1083.93

El cálculo del valor medio de la precipitación es:

$$\overline{hp} = \frac{1083.93 [mm]}{6} = 180.66 [mm]$$

Los resultados de las desviaciones de cada evento de la serie respecto a su valor medio se presentan a continuación (*Tabla 4.9 Prueba de homogeneidad*):

Tabla 4. 9 Prueba de homogeneidad

Estación	hp	hp - \bar{hp}	
Acapulco (EHCA)	177.2	-3.455	
El Veladero, Gro.	315	134.345	1
ESIME Acapulco	183.8	3.145	0
ESIME Chilpancingo	165.2	-15.455	1
Pto. Vicente	46.93	-133.725	0
L. Cárdenas	195.8	15.145	1

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 2

Número de cambio (C) = 3

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-1.73 \geq -1 \geq 1.73$$

Con los resultados anteriores se llega a la conclusión de que la serie de datos es homogénea para el día 15 de Septiembre del 2013 en las seis estaciones meteorológicas.

Las pruebas de homogeneidad por estación se hicieron para tres días, dos con precipitación muy significativa y uno de ellos que no registró gran cantidad de lluvia, a continuación se muestran los resultados obtenidos para la estación meteorológica de "Acapulco", los resultados del resto de los días y las estaciones se presentan en el Anexo B al final de este trabajo.

Los registros que proporciono la estación para el día 14 de Septiembre del 2013, se pueden visualizar en la siguiente tabla (*Tabla 4.10 Registros de la estación "Acapulco" 14 de Septiembre del 2013*):

Tabla 4. 10 Registros de la estación "Acapulco" 14 de Septiembre del 2013

Fecha	hp	Fecha	hp
14/09/2013 01:00	0	14/09/2013 13:00	10.41
14/09/2013 02:00	0	14/09/2013 14:00	4.33
14/09/2013 03:00	0.75	14/09/2013 15:00	1.76
14/09/2013 04:00	7.36	14/09/2013 16:00	8.9
14/09/2013 05:00	8.38	14/09/2013 17:00	3.81
14/09/2013 06:00	19.05	14/09/2013 18:00	8.37
14/09/2013 07:00	15.75	14/09/2013 19:00	5.08
14/09/2013 08:00	3.05	14/09/2013 20:00	11.17
14/09/2013 09:00	7.61	14/09/2013 21:00	5.84
14/09/2013 10:00	8.89	14/09/2013 22:00	23.88
14/09/2013 11:00	11.68	14/09/2013 23:00	6.85
14/09/2013 12:00	17.02	15/09/2013 00:00	0.25

Suma	190.19
-------------	--------

El cálculo del valor medio de la precipitación es:

$$\bar{hp} = \frac{190.19 [mm]}{24} = 7.92 [mm]$$

Los resultados de la prueba de homogeneidad se presentan a continuación (*Tabla 4.11 Prueba de homogeneidad estación "Acapulco"*):

Tabla 4. 11 Prueba de homogeneidad estación "Acapulco"

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	Hp	hp - \bar{hp}	
14/09/2013 01:00	0	-7.92		14/09/2013 13:00	10.41	-3.59	1
14/09/2013 02:00	0	-7.17	0	14/09/2013 14:00	4.33	-6.16	0
14/09/2013 03:00	0.75	-0.56	0	14/09/2013 15:00	1.76	0.98	1
14/09/2013 04:00	7.36	0.46	1	14/09/2013 16:00	8.9	-4.11	1
14/09/2013 05:00	8.38	11.13	0	14/09/2013 17:00	3.81	0.45	1
14/09/2013 06:00	19.05	7.83	0	14/09/2013 18:00	8.37	-2.84	1
14/09/2013 07:00	15.75	-4.87	1	14/09/2013 19:00	5.08	3.25	1
14/09/2013 08:00	3.05	-0.31	0	14/09/2013 20:00	11.17	-2.08	1
14/09/2013 09:00	7.61	0.97	1	14/09/2013 21:00	5.84	15.96	1
14/09/2013 10:00	8.89	3.76	0	14/09/2013 22:00	23.88	-1.07	1
14/09/2013 11:00	11.68	9.10	0	14/09/2013 23:00	6.85	-7.67	0
14/09/2013 12:00	17.02	2.49	0	15/09/2013 00:00	0.25	182.27	0
Suma					190.19		

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 11

Número de cambio (C) = 12

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq -1 \geq 4.8$$

El resultado anterior se encuentra dentro de los límites, por lo que se llega a la conclusión de que la muestra es homogénea.

4.4 INFORMACIÓN DE LLUVIA ESTIMADA DE SATÉLITE

Los datos de precipitación conforman una de las variables de entrada más importante en los modelos hidrológicos. La precisión de esta variable se incrementa si se disponen de registros pluviográficos confiables y adecuadamente distribuidos en tiempo y espacio. Las estimaciones de precipitación generadas a partir de información originada en sensores remotos podrían ser utilizadas como modelo predictivo, para minimizar el impacto de la escasa densidad y distribución de las estaciones meteorológicas.

En este trabajo se utilizaron los datos de la lluvia estimada por el algoritmo 3B42 del satélite TRMM, para realizar la comparación con los datos registrados por las estaciones meteorológicas.

El propósito del **algoritmo 3B42** es producir un ajuste entre lo que estima un infrarrojo-combinado como precipitación y los resultados que proporcione la raíz cuadrada media del error de la precipitación estimada.

El algoritmo consta de dos pasos:

- 1) En el primer paso se utilizan los datos de órbita del escáner de las bandas electromagnéticas visible e infrarroja, las imágenes por microondas TRMM (TMI) y los parámetros de calibración mensuales del Instrumento Combinado TRMM/TMI, para producir parámetros de calibración infrarroja mensual.
- 2) El segundo paso utiliza los parámetros de calibración infrarroja mensuales para ajustar los datos de precipitación infrarroja-combinada, que consiste en datos del GMS, GOES-E, GOES-W, Meteosat-7, Meteosat-5 y NOAA-12.

Para finalizar, se ajusta la precipitación del infrarrojo-combinado y la raíz cuadrada media de los errores de la precipitación estimada. El TRMM 3B42 tiene una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 0.25 x 0.25 grados y su cobertura espacial se extiende desde los 50° sur a los 50° de latitud norte (*Tabla 4.12 Características del TRMM 3B42*).

Tabla 4. 12 Características del TRMM 3B42

Características del TRMM 3B42	
Cobertura temporal	Fecha de inicio: 01/01/1998 – A la fecha
Cobertura geográfica	Latitud: 50° S – 50° N; Longitud: 180° W – 180° E
Resolución temporal	3 horas
Resolución horizontal	0.25° x 0.25°; NLAT = 400, nlon = 1440
Tamaño promedio de archivo	Comprimido: ~ 0.71 Mb, Original: ~ 11 Mb
Tipo de archivo	HDF

4.5 CARACTERIZACIÓN DEL ERROR CON LLUVIA ESTIMADA DE SATÉLITE

Una imagen adquirida desde el espacio presenta menos errores, como consecuencia de la mayor estabilidad y altura de vuelo de la plataforma. Sin embargo, la estimación de lluvia por satélite está sujeta a errores debido a diversos problemas de instrumentación, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas, entre otras variables. Estos errores introducen incertidumbre a los algoritmos, por lo que es necesario validar la información con mediciones de estaciones meteorológicas.

4.5.1 Tratamiento de la información

El sensor explora secuencialmente la superficie terrestre, adquiriendo la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados, la manera con la que el sensor realiza ese muestreo define la resolución espacial del mismo. Este valor medido se

traduce a un valor numérico, denominado nivel digital, por tratarse de un valor que puede traducirse a una intensidad visual o a un nivel de gris.

Las imágenes son adquiridas en formato numérico, gracias a una conversión analógica – digital realizada a bordo del satélite. Se almacenan originalmente en archivos CCT (Director Protected Cast Resource, pertenece a la categoría Archivos de datos); e incluyen un fichero de cabecera, donde se almacenan las condiciones en que se adquirió la imagen y el tipo de correcciones aplicadas por la estación receptora.

Una rigurosa interpretación de imágenes pasa por tener en cuenta los principales rasgos de su adquisición, así como los tratamientos que puedan haber abordado las antenas receptoras. Este tipo de información difiere según el sensor que la adquiere y la organización que la procesa.

Sin embargo, cuál de los dos métodos, digital o visual, resulta más idóneo para explotar adecuadamente el flujo de datos que la teledetección espacial ofrece.

Una de las principales ventajas del **análisis visual** es su capacidad para incorporar a la interpretación de la imagen criterios complejos como son: la textura, estructura, emplazamiento o disposición, muy difíciles de definir en términos digitales. Estos criterios permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral parejo, aunque con un significado temático distinto. Además, el análisis visual no requiere inversiones económicas importantes y puede garantizar un nivel de precisión suficiente para una determinada aplicación.

Por otra parte, el rango de operaciones que ofrece un sistema de **tratamiento digital** de imágenes está en estrecha relación con sus componentes físicos, que se pueden agrupar en tres apartados: entrada de datos, proceso – almacenamiento y salida de datos.

La mejora del contraste, las composiciones coloreadas, los cambios de escala y los filtrajes, son técnicas que tratan de disponer mejor los datos para su análisis visual, de tal forma que sean más evidentes los rasgos de interés.

La clasificación digital supone la fase culminante de tratamiento digital de imágenes, no busca una definición absoluta de cada cubierta, sino más bien una caracterización particular, válida para una determinada imagen y un territorio concreto. Los resultados de la clasificación marcan la calidad final del proyecto desarrollado.

El tratamiento digital requiere una buena base estadística, conocimiento de sistemas informáticos y lenguajes de programación. Garantiza un tratamiento más rápido, económico y certero, pero requiere una inversión inicial, que no sólo se refiere a los equipos informáticos que permiten el tratamiento de las imágenes, sino también al entrenamiento del intérprete. No obstante, la versatilidad, rapidez y exactitud, no son ventajas absolutas, sino muy dependientes de la configuración

del equipo, del entrenamiento del intérprete y de la complejidad del área de estudio.

Concluyendo, ambos métodos de trabajo se complementan, por una parte, el tratamiento digital permite realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles al análisis visual. Por la otra, el análisis visual es una buena alternativa para actualizar cartografía existente o realizar inventarios a escalas medias. Sin embargo, un elemento a tener en cuenta para elegir la interpretación visual o digital, se refiere al tipo y continuidad de las tareas requeridas en el proyecto.

4.5.2 Validación temporal

La observación sistemática de la superficie terrestre es una de las principales ventajas de la teledetección desde el espacio. Las características orbitales del satélite permiten que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones similares de observación, facilitándose así cualquier estudio que requiera una dimensión temporal.

La dimensión temporal puede resultar clave en la interpretación de imágenes. Se pueden dividir las aplicaciones multi – temporales en dos grupos: estudios multi – anuales, empeñados en la detección del cambio entre dos fechas de referencia, y estudios multi – estacionales, en donde se utilizan imágenes de distintas fechas para enriquecer la información espectral.

Cualquier estudio multi – temporal implica una labor previa de corrección, con objeto de combinar adecuadamente las dos o más imágenes que van a intervenir en el análisis. En este sentido, conviene considerar que todas ellas deben registrarse geoméricamente con la debida precisión, poseer una radiometría equiparable y estar libres de los aportes atmosféricos.

La presencia de aerosoles y vapor de agua, dispersa de una forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor. Este efecto introduce modificaciones, en ocasiones muy severas en la radiación original, sin embargo, la mayor parte de estos problemas pueden subsanarse gracias a técnicas digitales.

El principal problema que implica esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y en el tiempo, debido a que éste efecto es dependiente de la longitud de onda, y varía entre imágenes de forma difícil de predecir.

En los métodos propuestos para corregir el aporte de radiancia atmosférica, uno de los más sencillos es el que se denomina corrección del histograma por sus valores mínimos. Se asume que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero.

Un método más avanzado basado sobre éste pero teniendo en cuenta que la dispersión tiende a estar correlacionada entre bandas. Se basa en establecer una banda de referencia, la que se supone más afectada por la dispersión. A partir del valor mínimo de esa banda, se calcula una corrección atmosférica para el resto de

las bandas teniendo en cuenta dos parámetros: los valores de calibración de cada banda y una estimación de las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen.

Otro procedimiento dirigido a suprimir la dispersión atmosférica, se basa en una regresión entre bandas. Se parte de delimitar sobre la imagen unas zonas de baja radiancia.

Las correcciones geométricas incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de la imagen, dichas modificaciones pueden abordarse con dos orientaciones. La primera, parte de la información disponible sobre las características orbitales del sensor. La segunda, parte de una cartografía básica a la que se pretende ajustar la imagen de otra que se considera como referencia.

Normalmente, los centros de distribución de imágenes incluyen una serie de realces y correcciones estándar.

Algunos estudios multi – temporales se han basado en técnicas de composición de color para realzar cambios para una serie de cubiertas que no cambian entre fechas. A partir de esos valores, pueden estimarse unos coeficientes de sesgo y ganancia que permitan corresponder los niveles digitales entre fechas distintas, soslayando el efecto atmosférico.

En los estudios multi – anuales, la mayor parte de los trabajos de clasificación digital abordan cada imagen independientemente, para luego detectar los cambios por comparación de las clasificaciones obtenidas en las distintas fechas.

En los estudios multi – estacionales es más frecuente que se combinen dos o más imágenes, este enfoque proporciona mejores resultados. No obstante, también ofrece importantes problemas, por cuanto es necesario que las imágenes presenten homogeneidad radiométrica y ajuste geométrico.

Las correcciones de la imagen son procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización o en los niveles digitales de los píxeles que la componen. Por corrección se entiende solventar algún defecto en la adquisición, emisión o recepción de la imagen. Sin embargo, algunos de los tratamientos se encaminan más bien a disponerla más adecuadamente para su interpretación.

4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las imágenes obtenidas por el satélite TRMM se encuentran disponibles en la página de una de las doce Misiones Científicas de la NASA que lleva por nombre GES DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center). El GES DISC archiva los datos de precipitación e hidrología, así como los datos de teledetección e información de la composición y dinámica de la atmosfera.

Los formatos netCDF y HDF son los que están disponibles para la descarga de imágenes satelitales, el primero mencionado es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales y fue el que se empleó para la realización de este trabajo.

Los datos de un archivo netCDF se almacenan en conjuntos y para la manipulación de los mismos se utilizaron las herramientas que proporciona el software ArcGIS.

Para utilizar las imágenes en formato netCDF, fue necesario realizar un corte de la misma que cubriera sólo el área de interés, es decir, el área de la cuenca hidrológica RH19A (*Figura 4.11 Imagen del día 15 de Septiembre del 2013 en formato netCDF (13:30 hrs)*).

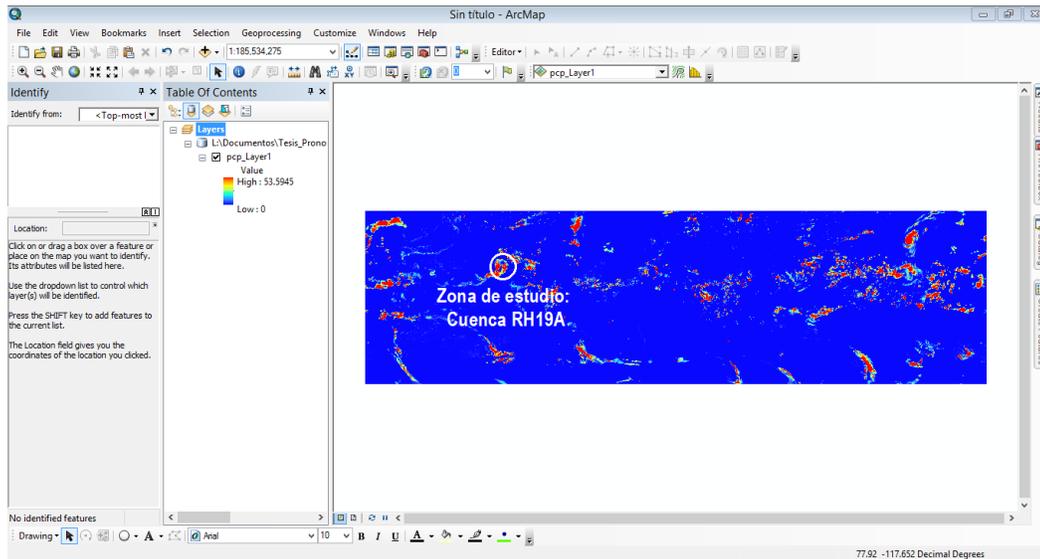


Figura 4. 11 Imagen del día 15 de Septiembre del 2013 (13:30 hrs) en formato netCDF

Por otra parte, la imagen obtenida cuenta con un sistema de georeferencia geográfico, que se convirtió a un sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), la cuenca RH19A se encuentra ubicada en la zona UTM número 14 de dicho sistema (*Figura 4.12 Zonas UTM de México*).

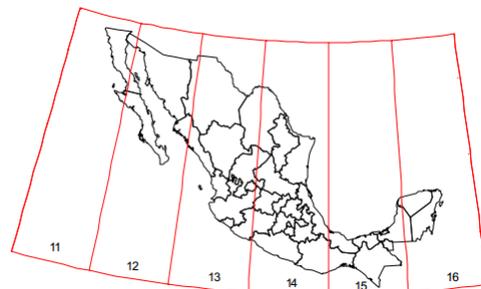


Figura 4. 12 Zonas UTM de México

Lo mencionado anteriormente, es para llegar a la siguiente imagen (*Figura 4.13 Imagen satelital del día 15 de Septiembre del 2013 (13:30 hrs)*), que cuenta con 25 pixeles, donde cada uno de ellos albergan la información de intensidad de precipitación que se estimó durante 3 horas.

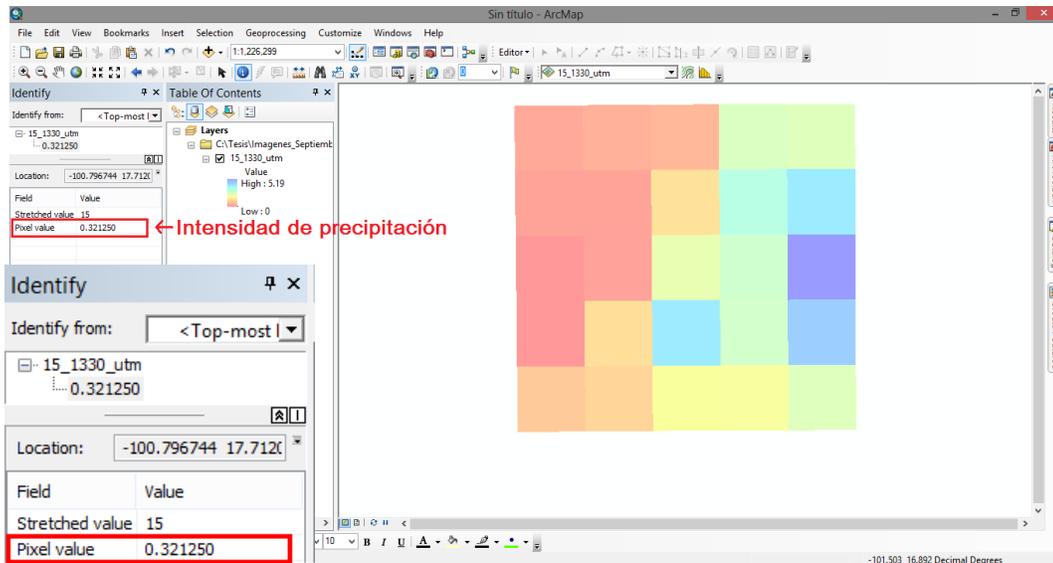


Figura 4. 13 Imagen satelital del día 15 de Septiembre del 2013 (13:30 hrs)

La base de datos de las imágenes satelitales consta de 8 imágenes por cada uno de los días de estudio, tomado el intervalo de tiempo del 10 al 20 de Septiembre del 2013; por otro lado, para cada uno de los días se realizó un acumulado de la intensidad registrada dando por resultado para el día 15 de Septiembre de ese año la imagen que se muestra a continuación (*Figura 4.14 Imagen satelital del día 15 de Septiembre del 2013 (acumulado)*):

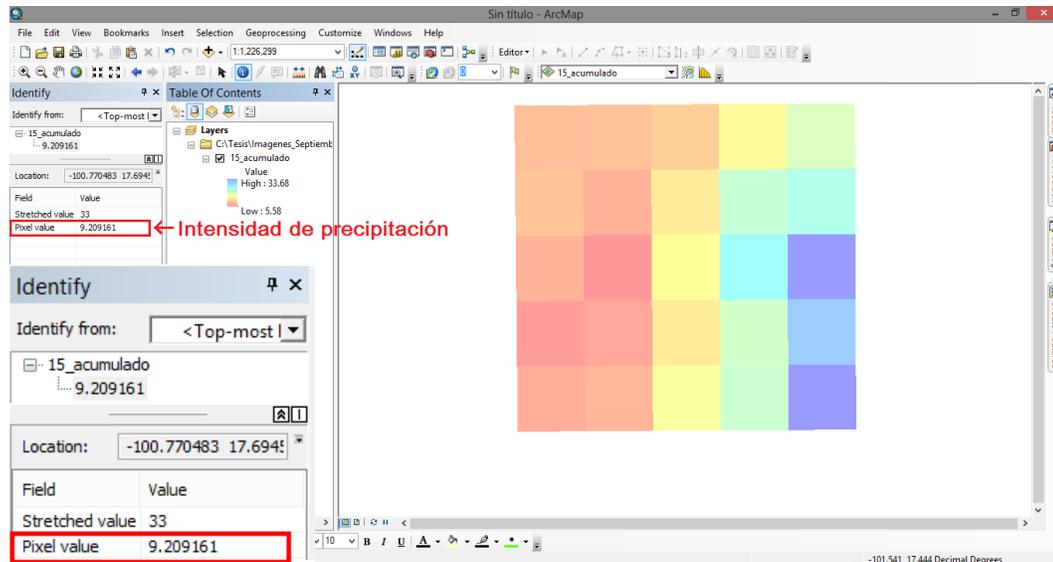


Figura 4. 14 Imagen satelital del día 15 de Septiembre del 2013 (acumulado)

Las imágenes obtenidas para los días más representativos de las base de datos se muestran en el Anexo C, que se encuentra al final de este trabajo.

Para determinar la lámina de precipitación acumulada las 24 horas, se multiplico el valor de la intensidad registrado en cada uno de los pixeles por el intervalo de tiempo

de 3 horas, con estos datos de precipitación se elaboraron las isoyetas para cada uno de los días utilizando la herramienta de “Kriging” en ArcGIS, que es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados, está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrección, es decir, relaciona estadísticamente los puntos medidos, y gracias a esto proporciona alguna medida de precisión de las predicciones.

El método de Kriging pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones, la fórmula general se forma como una suma ponderada de los datos:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

Donde:

Z(S_i): El valor medido en la ubicación i.

λ_i: Una ponderación desconocida (está basada en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, además de la disposición espacial general de los puntos medidos) para el valor medido en la ubicación i.

S₀: La ubicación de la predicción.

N: La cantidad de valores medidos.

Las imágenes que se muestran a continuación son las isoyetas e isolíneas calculadas para el día 15 Septiembre obtenidas con los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas automáticas (*Figura 4.15 Isoyetas e isolíneas (estaciones meteorológicas automáticas) 15/Sep./13*) y las imágenes satelitales (*Figura 4.16 Isoyetas e isolíneas (imágenes) 15/Sep./13*).

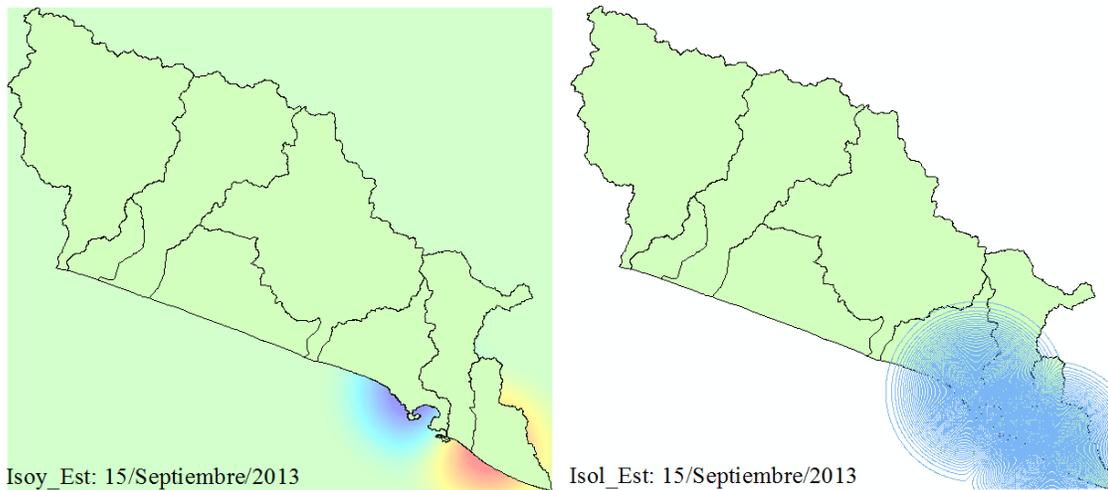


Figura 4. 15 Isoyetas e isolíneas (estaciones meteorológicas automáticas) 15/Sep./13

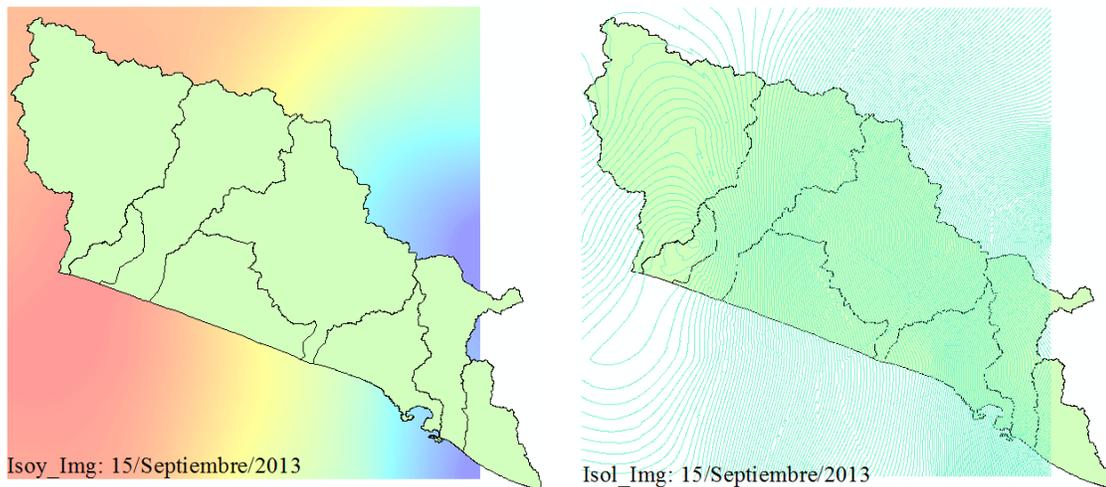


Figura 4. 16 Isoyetas e isolíneas (imágenes) 15/Sep./13

Las isoyetas de los días más representativos se encuentran en el Anexo D que está ubicado al final de este trabajo. Por otro lado, en las imágenes anteriores podemos ver que las precipitaciones más desfavorables se denotan con tonalidades azules, mientras que las lluvias moderadas o nulas se encuentran en las anaranjadas. De lo anterior, se puede observar que las lluvias más intensas tuvieron origen en la Bahía de Acapulco.

El siguiente paso a realizar fue elaborar un análisis temporal y posteriormente un análisis espacial con los resultados obtenidos anteriormente de las estaciones meteorológicas automatizadas y las imágenes de satélite TRMM.

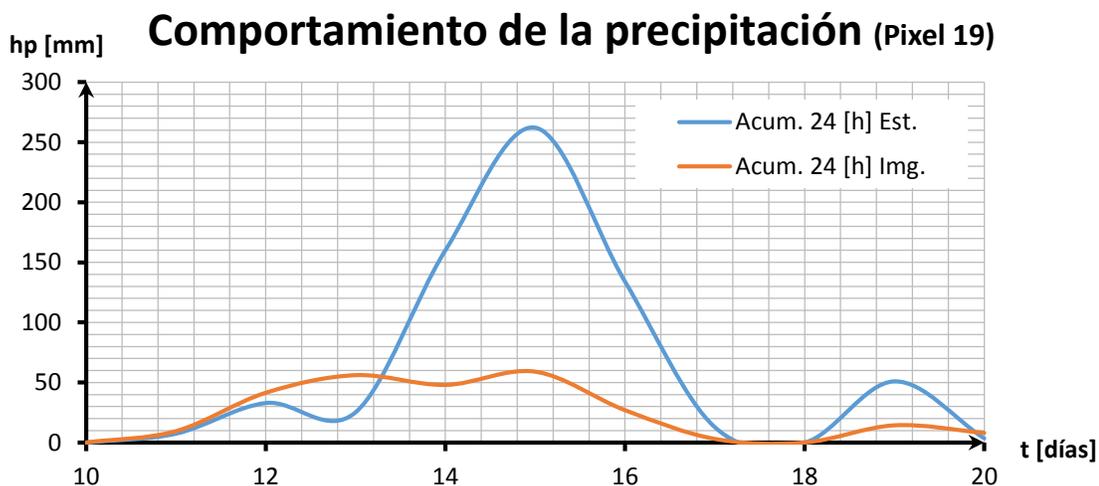
Las tablas que sirvieron de apoyo para realizar los gráficos que se muestran a continuación se encuentran en el Anexo E, también se encuentra ahí una imagen que muestra el orden en que se tomaron los pixeles, en la Tabla 4.13 (*Tabla 4.13 Resumen de datos del pixel No. 19*) sólo se puede observar el resumen de los datos obtenidos en uno de los pixeles (Pixel 19):

Tabla 4. 13 Resumen de datos del pixel No. 19

t	hp _{est}	hp _{TRMM}	e ²
(días)	(mm)	(mm)	
10	0.00	0.15	0.02
11	7.50	9.60	4.41
12	33.00	41.50	72.25
13	25.30	56.10	948.64
14	160.00	48.00	12544.00
15	262.00	59.00	41209.00
16	134.00	27.00	11449.00
17	12.90	3.10	96.04
18	0.00	0.10	0.01
19	51.00	14.40	1339.56
20	3.60	8.10	20.25
			67683.18

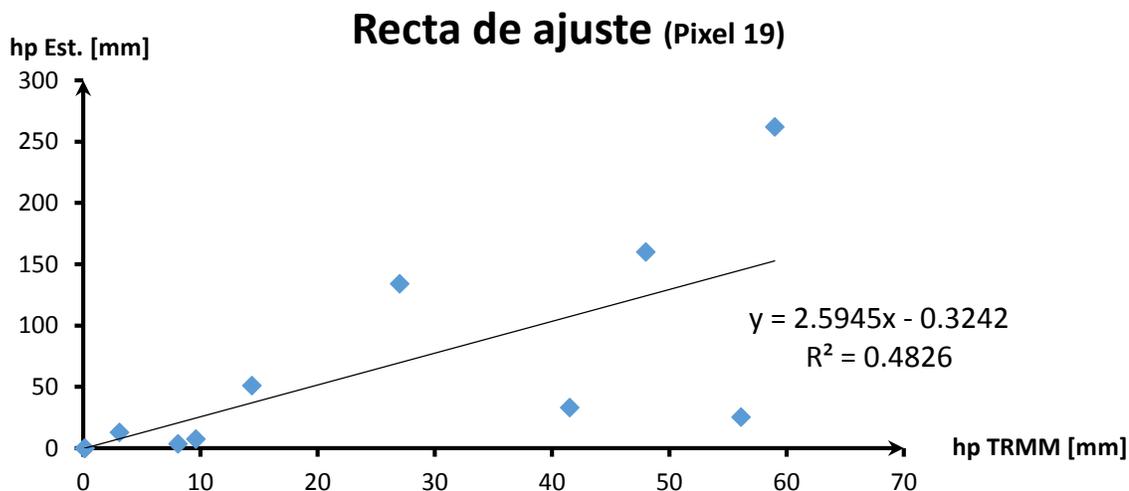
De los datos obtenidos el resultado del análisis temporal se puede observar en la Gráfica 4.2 (*Gráfica 4.2 Comportamiento de la precipitación acumulada (24 hrs.) comparativamente entre estaciones e imágenes*), en la cual se percibe que las imágenes y las estaciones presentan el mismo comportamiento pero varía en escala, un ejemplo de ello se tiene en los días de mayor precipitación ya que reportó valores subestimados:

Gráfica 4. 2 Comportamiento de la precipitación acumulada (24 hrs.) comparativamente entre estaciones e imágenes



En el análisis espacial se compararon los valores de la lluvia del satélite TRMM contra los de las estaciones meteorológicas automatizadas, como se puede observar en el siguiente gráfico (*Gráfica 4.3 Recta de ajuste a los puntos observados en las estaciones e imágenes*):

Gráfica 4. 3 Recta de ajuste a los puntos observados en las estaciones e imágenes



Se obtiene la ecuación que da origen a la recta de mejor ajuste, de ésta se calculó la columna y_{cal} que se muestra en la Tabla 4.14 (*Tabla 4.14 Valores estimados de hp_{TRMM}*)

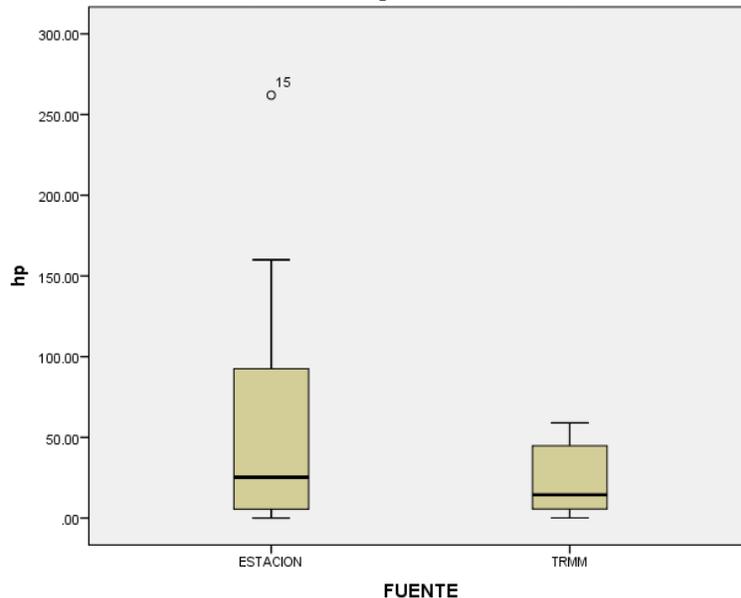
utilizando la recta de ajuste), después se obtuvo nuevamente la sumatoria de errores al cuadrado, donde se puede observar que dicho valor es menor hasta un 50% con respecto al obtenido con los valores medidos:

Tabla 4. 14 Valores estimados de hp_{TRMM} utilizando la recta de ajuste

t (días)	hp_{est} (mm)	hp_{TRMM} (mm)	e^2	y_{cal}	e^2
10	0.00	0.15	0.02	0.06	0.00
11	7.50	9.60	4.41	24.58	291.83
12	33.00	41.50	72.25	107.35	5527.56
13	25.30	56.10	948.64	145.23	14382.55
14	160.00	48.00	12544.00	124.21	1280.80
15	262.00	59.00	41209.00	152.75	11935.28
16	134.00	27.00	11449.00	69.73	4130.98
17	12.90	3.10	96.04	7.72	26.85
18	0.00	0.10	0.01	-0.06	0.00
19	51.00	14.40	1339.56	37.04	194.98
20	3.60	8.10	20.25	20.69	292.11
			67683.18	>	38062.93

La técnica gráfica Box-Plot que se muestra con la Gráfica 4.4 (*Gráfica 4.4 Técnica gráfica "Box-Plot" que representa la correlación entre las estaciones y las imágenes (10-20 de Septiembre del 2013)*) también nos muestra una confrontación de los valores que se obtuvieron para las estaciones y las imágenes del pixel 19 que se utilizó de ejemplo, en dicha representación se aprecia una mayor dispersión de los datos en comparación con los de las imágenes.

Gráfica 4. 4 Técnica gráfica "Box-Plot" que representa la correlación entre las estaciones y las imágenes (10-20 de Septiembre del 2013)



Conclusiones y/o recomendaciones

Recopilando la información de la precipitación obtenida por medio de las imágenes satelitales con las lecturas convencionales de las estaciones meteorológicas, se obtuvieron los patrones espaciales y temporales de la precipitación, como se observó en la *Gráfica 4.2* que se presentó en el capítulo anterior, los resultados indican que al comparar la lluvia estimada a partir del satélite y la lluvia en las estaciones automatizadas presentan diferencias, con tendencia a la subestimación de precipitación acumulada a 24 horas en condiciones extremas. Lo que nos lleva a concluir que lo que se planteó en un inicio acerca de que las mediciones por satélite, asociadas a precipitaciones de gran magnitud, proporcionarían una sobreestimación del registro obtenido a nivel terrestre no es correcto.

Sin embargo, debido a que la utilización de los datos provenientes de imágenes satelitales tiene la desventaja de realizar estimaciones indirectas, se presentan valores menores en la época lluviosa, mientras que en la época clasificada como húmeda se pudo apreciar una tendencia a la subestimación de los datos TRMM con relación a las estaciones; en la época de transición se observa una tendencia a la uniformidad de datos de las estaciones automáticas y los datos TRMM y en la época seca tenemos una sobrestimación entre aceptable y moderada de los datos.

Los resultados anteriores son para tener en consideración que la medición a través de plataformas satelitales permite tener en tiempo real estimaciones de precipitación, que en muchos casos nos permite combinar con estaciones convencionales, o utilizar en cuencas no instrumentadas, también se debe buscar tener la capacidad de predecir el tiempo en diferentes escalas, teniendo en cuenta que los ciclones tropicales tienen un grado de peligrosidad.

Se recomienda contemplar el estudio con otros satélites que manejen diferente resolución, así como realizarlo en otra época que no represente evento hidrometeorológico extremo, para entender mejor las fuentes de error en la lluvia estimada por satélite. Asimismo, se aconseja también incluir estaciones pluviométricas o pluviográficas convencionales (no automatizadas) para enriquecer el estudio.

Otro elemento a tener en consideración es la aplicación de un factor de corrección, que como se mencionó en el capítulo 4.5.2 busca eliminar cualquier anomalía detectada en la

imagen, debido a lo anterior, se sugiere repetir el procedimiento para evaluar los errores obtenidos nuevamente y observar si se tienen resultados más exactos.

Para concluir, los fenómenos hidro-meteorológicos pueden provocar la pérdida de vidas humanas y ocupan el primer lugar en desastres que afectan económicamente al país, un claro ejemplo de ello fue la tormenta “Manuel” la más destructiva de la temporada 2013, causando 157 muertes, 35 heridos y 18 estados dañados, además de pérdidas millonarias. Por lo que, el procesamiento y entendimiento de datos meteorológicos como los proporcionados por el satélite TRMM podrían implementar acciones preventivas de ser más acertados.

BIBLIOGRAFÍA

- CAMPOS ARANDA, Daniel. Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, 1998.
- LINSLEY, Ray K. Jr., KOHLER, Max A., PAULHUS, Joseph L. H. Hidrología para Ingenieros. 2da. Edición. Mc Graw Hill, 1977.
- MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería. 2da. Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.
- MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005.
- CHUVIECO, Emilio. Fundamentos de Teledetección Espacial. 2da. Edición. Ediciones Rialp, S.A., 1995.
- GÜNTER, D. Roth. Meteorología. Omega, 2003.
- BUZAI, G. D. Sistemas de Información Geográfica (SIG) y cartografía temática. Métodos y técnicas para el trabajo en el aula. Buenos Aires: Lugar Editorial, 2008.
- MEADEN, Geoffrey J., KAPETSKY, James M. Los Sistemas de Información Geográfica y la Telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. Departamento de Pesca de la FAO, 1992.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua; Estadísticas del Agua en México; Edición 2013.
- GUERRA SIERRA, Joaquín J. Tesis Doctoral: Método sinóptico para el pronóstico de intensificación inusual de la lluvia: caso de lluvias torrenciales. Madrid, Universidad Complutense.
- RAMOS FERNÁNDEZ, Lia. Tesis Doctoral: Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- ORTIZ MERAZ, Omar. Tesis de Licenciatura: Propuesta de una metodología para la integración de datos de precipitación: Caso de estudio Cuenca del Usumacinta, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2011.
- Organización Meteorológica Mundial, Guía de prácticas hidrológicas, Volumen I, Hidrología – De la medición a la información hidrológica, OMM – N°168, Sexta edición, 2011.
- MEZA RUIZ, Marilú, CARVAJAL RÍOS, Jesús Abraham, Estimación de precipitaciones para eventos extremos en México a partir de imágenes satelitales; Huracán Ernesto,

Veracruz, México; XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Octubre 2014.

GONZALEZ VILLAREAL, Fernando J., DOMÍNGUEZ MARES, Malinali, ARRIAGA MEDINA, Jorge A., Impactos del huracán “Ingrid” y la tormenta tropical “Manuel” en territorio mexicano, Boletín UNAM, Octubre 2013.

VAZQUEZ GALVEZ, Felipe A., LOBATO SANCHEZ, René, NAVARRO REYNOSO, José E., RUBIO GUTIÉRREZ, Horacio, La Modernización del Servicio Meteorológico Nacional, IC Ingeniería Civil (524), Diciembre 2012.

WEBGRAFÍA

Datos climáticos de la República Mexicana: panorama actual y requerimientos inmediatos, [en línea]. Disponible en:

http://www.csva.gob.mx/foro_medioambiente/MA/pdf/ForoMA%209%20Datos.pdf

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional [en línea]. Disponible en:

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=81

Servicio Meteorológico Nacional, 135 años de historia en México [en línea]. Disponible en:

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/CGSMN-1-12.pdf>

Secretaría de Gobernación (SEGOB), CENAPRED, Subsistema de información sobre riesgos, peligros y vulnerabilidad [en línea]. Disponible en:

<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-hidrometeorologicos/ciclones-tropicales-huracanes>

CNN México, Las cifras del desastre por “Manuel” e “Ingrid” [en línea]. Disponible en:

<http://mexico.cnn.com/nacional/2013/09/24/las-cifras-del-desastre-por-manuel-e-ingrid>

REFERENCIAS DE FIGURAS

Figura 2.1: Huraken

<http://educarseeducarte.blogspot.mx/2010/12/fenomenos-naturales.html>

Figura 2.2: Instituciones que trabajan en materia de observación y pronóstico del tiempo y del clima

<http://www.digaden.edu.mx/escuelas%20de%20formacion/escmedico/index.htm>

<http://www.uat.edu.mx/SitePages/principal.aspx>

<http://www.uv.mx/orizaba/cq/formatos-y-escudos/>

<http://www.cenapred.unam.mx/es/>

<http://ventanaver.mx/portal/?p=15229>

<http://www.energia.org.mx/mensaje-al-nuevo-director-de-cfe/>

<http://www.scielo.org.mx/revistas/atm/eaboutj.htm>

<http://www.inifap-nortecentro.gob.mx/>

Figura 3.1: Núcleos de condensación o de congelamiento

<https://www.meted.ucar.edu>

Figura 3.2: Clasificación de nubes

<http://www.alboxclima.com/meteorologia/clasificacion.htm>

Figura 3.3: Frente frío

<http://meteolab.fis.ucm.es/meteorologia/conveccion-y-tornados/borrasca-o-depresion>

Figura 3.4: Frente cálido

<http://meteolab.fis.ucm.es/meteorologia/conveccion-y-tornados/borrasca-o-depresion>

Figura 3.5: Desarrollo de una precipitación de tipo convectivo

http://www.atmos.umd.edu/~meto200/4_08_03_lecture_files/error.htm

Figura 3.6: Precipitación orográfica

<http://cmapspublic.ihmc.us/rid=1L52KW19G-2257R0J-1VSM/Relieve-Precipitaciones>

Figura 3.7: Pluviómetro ordinario

http://www.infogranja.com.ar/precipitaciones_acuosas.htm

Figura 3.8: Pluviómetro tipo norteamericano

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.9: Pluviómetro tipo Hellman

<http://www.pluviometro.com/>

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.10: Nivómetro

http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/approfondimenti/meteo/strumenti_di_osservazione/descrizione-sensore-nivometro.html

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.11: Totalizador

<http://www.climaynievepirineos.com/d/estmet/pltt/pltt.htm>

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.12: Radar meteorológico

<http://www.diarioinedito.com/Nota/14522>

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.13: Pluviógrafo

<http://www.tiempo.com/ram/1410/instrumentos-meteorologicos-4/>

Figura 3.14: Pluviograma

http://200.129.241.80/desa/gpca/research_project4.html

Figura 3.15: Pluviógrafo sin sifón automático

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.16: Pluviógrafo de flotador con sifón automático tipo Hellman

<http://www.gisiberica.com/pluviografo/pg001.htm>

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.17: Pluviógrafo de balanza

http://www.weathershop.com/davis_accessories.htm

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.18: Pluviógrafo de oscilación

Figura 3.19: Pluviógrafo tipo Nilsson

MADEREY RASCÓN, Laura Elena, con la colaboración de JIMENÉZ ROMAN, Arturo. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. 1ra Edición. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, 2005

Figura 3.20: Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico de México (La precipitación media anual se refiere al periodo 1971 – 2000. Los valores restantes son medidas reportadas al 2009)

Figura 3.21: Distribución de la precipitación anual en México, 1971 – 2000

Figura 3.22: Intensidad de usos consuntivos (2012)

Figura 3.23: Fuente predominante para usos consuntivos (2012)

Figura 3.24: Uso agrupado consuntivo predominante (2012)

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, Edición 2013

Figura 3.25: Estructura de tipo andamio

Figura 3.26: Estación de tipo torre triangular

Figura 3.27: Estructura de una ESIME

<http://smn.cna.gob.mx/emas/>

Figura 3.28: Longitud de onda y frecuencia

<http://varinia.es/blog/2009/07/26/%C2%BFque-es-la-frecuencia-y-la-longitud-de-onda-sonora/>

Figura 3.29: Espectro Electromagnético

<http://comunicabloggav.blogspot.mx/2009/09/medios-de-transmision-de-informacion-no.html>

Figura 3.30: Satélite TRMM

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/trmm>

Figura 3.31: Instrumentos satélite TRMM

<http://pmm.nasa.gov/trmm/trmm-instruments>

Figura 3.32: Satélite Landsat

<http://eros.usgs.gov/featured-sites?page=1>

Figura 3.33: Satélite SPOT 5

[http://en.wikipedia.org/wiki/SPOT_\(satellite\)](http://en.wikipedia.org/wiki/SPOT_(satellite))

Figura 3.34: NOAA

<http://www.clker.com/clipart-noaa.html>

Figura 3.35: Mapa raster de unidades espaciales areales (cuatro polígonos)

Figura 3.36: Mapa vectorial de unidades espaciales areales (cuatro polígonos)

Figura 3.37: Base de datos vectorial (tres capas temáticas)

BUZAI, Gustavo D., Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Cartografía Temática (Métodos y técnicas para el trabajo en el aula), 2008.

En este apartado se encuentran los datos de precipitación de las estaciones automáticas “El Veladero”, “Acapulco ESIME” y “Chilpancingo”, así como sus coeficientes de correlación y límites al 95%, para finalizar con el correlograma de cada una de las estaciones:

Tabla A. 1 Registro de precipitación "El Veladero"

Fecha	hp _{acum} [mm]	Fecha	hp _{acum} [mm]
10/09/2013	0.00	18/09/2013	0.00
11/09/2013	11.80	19/09/2013	74.60
12/09/2013	42.40	20/09/2013	6.00
13/09/2013	26.40	21/09/2013	0.80
14/09/2013	175.80	22/09/2013	6.60
15/09/2013	315.00	23/09/2013	2.40
16/09/2013	181.20	24/09/2013	14.00
17/09/2013	12.80	25/09/2013	16.20

Tabla A. 2 Coeficientes de autocorrelación y límites al 95% “El Veladero”

k	Lim _{inf}	r	Lim _{sup}
0	-0.5369	1.0000	0.412
1	-0.5556	0.5744	0.422
2	-0.5762	0.00233	0.433
3	-0.5992	-0.1366	0.445
4	-0.6250	-0.1472	0.458
5	-0.6544	-0.2355	0.473

Correlograma de la estación "El Veladero"

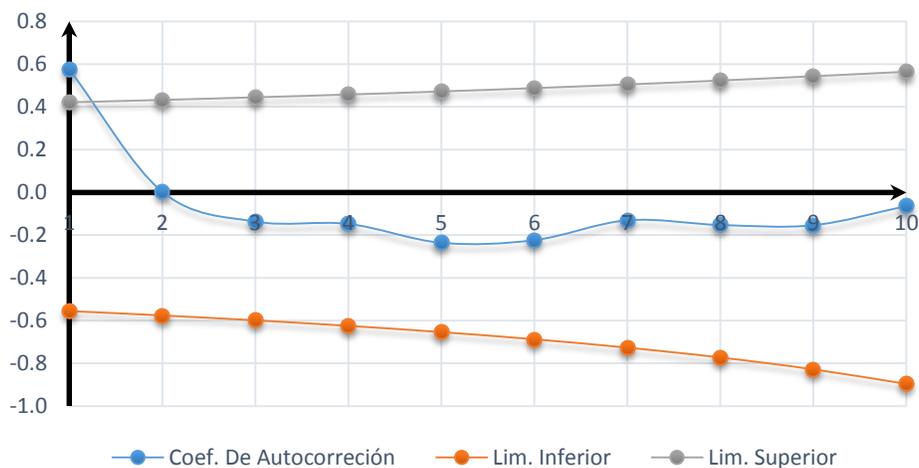


Tabla A. 3 Registro de precipitación "Acapulco ESIME"

Fecha	hp _{acum} [mm]	Fecha	hp _{acum} [mm]
10/09/2013	0.00	18/09/2013	0.20
11/09/2013	0.00	19/09/2013	14.60
12/09/2013	18.00	20/09/2013	0.00
13/09/2013	23.20	21/09/2013	0.00
14/09/2013	148.80	22/09/2013	2.40
15/09/2013	183.80	23/09/2013	0.00
16/09/2013	63.80	24/09/2013	3.00
17/09/2013	9.20	25/09/2013	22.20

Tabla A. 4 Coeficientes de autocorrelación y límites al 95% "Acapulco ESIME"

k	Lim _{inf}	r	Lim _{sup}
0	-0.5369	1.000	0.4119
1	-0.5556	0.6079	0.4222
2	-0.5762	0.04763	0.4333
3	-0.5992	-0.1976	0.4454
4	-0.6250	-0.2680	0.4584
5	-0.6544	-0.2263	0.4726

Correlograma de la estación "Acapulco (ESIME)"

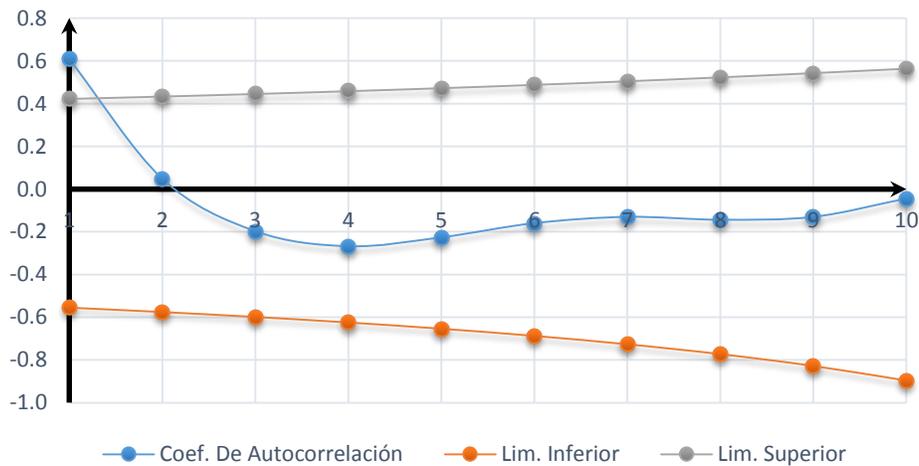


Tabla A. 5 Registro de precipitación "Chilpancingo"

Fecha	hp _{acum} [mm]	Fecha	hp _{acum} [mm]
10/09/2015	1.40	18/09/2015	0.20
11/09/2015	6.00	19/09/2015	1.40
12/09/2015	13.20	20/09/2015	2.00
13/09/2015	9.80	21/09/2015	1.80
14/09/2015	88.00	22/09/2015	13.60
15/09/2015	165.20	23/09/2015	0.60
16/09/2015	61.80	24/09/2015	0.00
17/09/2015	3.40	25/09/2015	16.80

Tabla A. 2 Coeficientes de autocorrelación y límites al 95% "Chilpancingo"

k	Lim _{inf}	r	Lim _{sup}
0	-0.5369	1.000	0.412
1	-0.5556	0.5485	0.422
2	-0.5762	-0.03075	0.433
3	-0.5992	-0.2006	0.445
4	-0.6250	-0.2547	0.458
5	-0.6544	-0.2383	0.473

Correlograma de la estación "Chilpancingo"

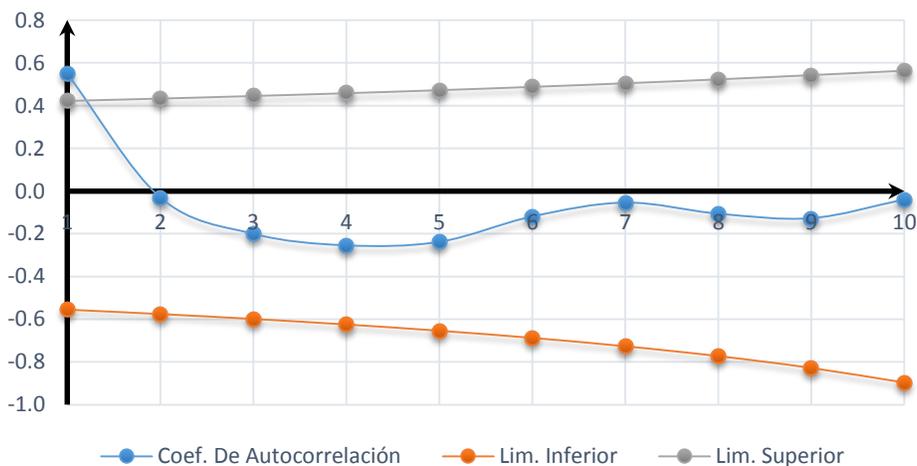


Tabla B. 1 Prueba de homogeneidad estación "Acapulco" 15/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
15/09/2013 01:00	2.79	-4.59		15/09/2013 13:00	14.22	6.84	1
15/09/2013 02:00	11.94	4.56	1	15/09/2013 14:00	9.41	2.03	0
15/09/2013 03:00	2.54	-4.84	1	15/09/2013 15:00	6.09	-1.29	1
15/09/2013 04:00	1.01	-6.37	0	15/09/2013 16:00	13.72	6.34	1
15/09/2013 05:00	3.81	-3.57	0	15/09/2013 17:00	13.2	5.82	0
15/09/2013 06:00	5.58	-1.80	0	15/09/2013 18:00	0.76	-6.62	1
15/09/2013 07:00	13.21	5.83	1	15/09/2013 19:00	19.56	12.18	1
15/09/2013 08:00	6.33	-1.05	1	15/09/2013 20:00	10.41	3.03	0
15/09/2013 09:00	8.63	1.25	1	15/09/2013 21:00	2.52	-4.86	1
15/09/2013 10:00	6.61	-0.77	1	15/09/2013 22:00	1.52	-5.86	0
15/09/2013 11:00	9.4	2.02	1	15/09/2013 23:00	5.59	-1.79	0
15/09/2013 12:00	7.35	-0.03	1	16/09/2013 00:00	1	-6.38	0

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 9

Número de cambio (C) = 14

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq -5 \geq 4.8$$

Tabla B. 2 Prueba de homogeneidad estación "Acapulco" 25/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
25/09/2013 01:00	0	-0.96		25/09/2013 13:00	0	-0.96	0
25/09/2013 02:00	0.25	-0.71	0	25/09/2013 14:00	0	-0.96	0
25/09/2013 03:00	1.78	0.82	1	25/09/2013 15:00	0	-0.96	0
25/09/2013 04:00	5.33	4.37	0	25/09/2013 16:00	0	-0.96	0
25/09/2013 05:00	3.31	2.35	0	25/09/2013 17:00	0	-0.96	0
25/09/2013 06:00	4.32	3.36	0	25/09/2013 18:00	0	-0.96	0
25/09/2013 07:00	1.78	0.82	0	25/09/2013 19:00	0	-0.96	0
25/09/2013 08:00	1.51	0.55	0	25/09/2013 20:00	1.52	0.56	1
25/09/2013 09:00	0	-0.96	1	25/09/2013 21:00	0	-0.96	1
25/09/2013 10:00	0.75	-0.21	0	25/09/2013 22:00	1.27	0.31	1
25/09/2013 11:00	0	-0.96	0	25/09/2013 23:00	0.25	-0.71	1
25/09/2013 12:00	0.25	-0.71	0	26/09/2013 00:00	0.76	-0.20	0

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 9

Número de cambio (C) = 14

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 11 \geq 4.8$$

Tabla B. 3 Prueba de homogeneidad estación "El Veladero" 14/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
14/09/2013 01:00	0.2	-7.13		14/09/2013 13:00	5	-2.33	0
14/09/2013 02:00	0.2	-7.13	0	14/09/2013 14:00	2	-5.33	0
14/09/2013 03:00	0.2	-7.13	0	14/09/2013 15:00	2.6	-4.73	0
14/09/2013 04:00	1.6	-5.73	0	14/09/2013 16:00	1.2	-6.13	0
14/09/2013 05:00	4	-3.33	0	14/09/2013 17:00	3	-4.33	0
14/09/2013 06:00	10.2	2.88	1	14/09/2013 18:00	12.6	5.28	1
14/09/2013 07:00	10	2.68	0	14/09/2013 19:00	3	-4.33	1
14/09/2013 08:00	3	-4.33	1	14/09/2013 20:00	10	2.68	1
14/09/2013 09:00	2.6	-4.73	0	14/09/2013 21:00	29.6	22.28	0
14/09/2013 10:00	3.8	-3.53	0	14/09/2013 22:00	16	8.68	0
14/09/2013 11:00	9.4	2.08	1	14/09/2013 23:00	36.4	29.08	0
14/09/2013 12:00	7.2	-0.13	1	15/09/2013 00:00	2	-5.33	1

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 15

Número de cambio (C) = 8

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 7 \geq 4.8$$

Tabla B. 4 Prueba de homogeneidad estación "El Veladero" 15/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
15/09/2013 01:00	0.4	-12.73		15/09/2013 13:00	33.6	20.48	0
15/09/2013 02:00	9	-4.13	0	15/09/2013 14:00	22.8	9.68	0
15/09/2013 03:00	3.6	-9.53	0	15/09/2013 15:00	15.8	2.68	0
15/09/2013 04:00	3.8	-9.33	0	15/09/2013 16:00	27.8	14.68	0
15/09/2013 05:00	3.4	-9.73	0	15/09/2013 17:00	5.6	-7.53	1
15/09/2013 06:00	3.6	-9.53	0	15/09/2013 18:00	33.4	20.28	1
15/09/2013 07:00	10.4	-2.73	0	15/09/2013 19:00	17.2	4.08	0
15/09/2013 08:00	7	-6.13	0	15/09/2013 20:00	23.2	10.08	0
15/09/2013 09:00	10.4	-2.73	0	15/09/2013 21:00	3.6	-9.53	1
15/09/2013 10:00	4.4	-8.73	0	15/09/2013 22:00	22.6	9.48	1
15/09/2013 11:00	14	0.87	1	15/09/2013 23:00	18.8	5.68	0
15/09/2013 12:00	14.6	1.48	0	16/09/2013 00:00	6	-7.13	1

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 17

Número de cambio (C) = 6

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 11 \geq 4.8$$

Tabla B. 5 Prueba de homogeneidad estación "El Veladero" 25/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
25/09/2013 01:00	0	-0.68		25/09/2013 13:00	0	-0.68	0
25/09/2013 02:00	0.2	-0.48	0	25/09/2013 14:00	0	-0.68	0
25/09/2013 03:00	0	-0.68	0	25/09/2013 15:00	0	-0.68	0
25/09/2013 04:00	1.2	0.53	1	25/09/2013 16:00	0	-0.68	0
25/09/2013 05:00	2.8	2.13	0	25/09/2013 17:00	0	-0.68	0
25/09/2013 06:00	3	2.33	0	25/09/2013 18:00	0	-0.68	0
25/09/2013 07:00	5.2	4.53	0	25/09/2013 19:00	0.2	-0.48	0
25/09/2013 08:00	0.8	0.13	0	25/09/2013 20:00	0.2	-0.48	0
25/09/2013 09:00	0	-0.68	1	25/09/2013 21:00	0.2	-0.48	0
25/09/2013 10:00	0.4	-0.28	0	25/09/2013 22:00	0.2	-0.48	0
25/09/2013 11:00	0.2	-0.48	0	25/09/2013 23:00	0.6	-0.07	0
25/09/2013 12:00	0	-0.68	0	26/09/2013 00:00	1	0.33	1

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 20

Número de cambio (C) = 3

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 17 \geq 4.8$$

Tabla B. 6 Prueba de homogeneidad estación "Acapulco ESIME" 14/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
14/09/2013 01:00	0	-8.03		14/09/2013 13:00	10.8	2.78	0
14/09/2013 02:00	0.2	-7.83	0	14/09/2013 14:00	4	-4.03	1
14/09/2013 03:00	0.6	-7.43	0	14/09/2013 15:00	1.8	-6.23	0
14/09/2013 04:00	7	-1.03	0	14/09/2013 16:00	8.6	0.58	1
14/09/2013 05:00	8.4	0.38	1	14/09/2013 17:00	4	-4.03	1
14/09/2013 06:00	19.2	11.18	0	14/09/2013 18:00	8.2	0.18	1
14/09/2013 07:00	16.2	8.18	0	14/09/2013 19:00	5.2	-2.83	1
14/09/2013 08:00	2.8	-5.23	1	14/09/2013 20:00	11.6	3.58	1
14/09/2013 09:00	7.4	-0.62	0	14/09/2013 21:00	5.8	-2.23	1
14/09/2013 10:00	9.2	1.18	1	14/09/2013 22:00	25.6	17.58	1
14/09/2013 11:00	11.8	3.78	0	14/09/2013 23:00	6.8	-1.23	1
14/09/2013 12:00	17.2	9.18	0	15/09/2013 00:00	0.2	-7.83	0

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 11

Número de cambio (C) = 12

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq -1 \geq 4.8$$

Tabla B. 7 Prueba de homogeneidad estación "Acapulco ESIME" 15/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
15/09/2013 01:00	3.2	-4.46		15/09/2013 13:00	15	7.34	1
15/09/2013 02:00	12.4	4.74	1	15/09/2013 14:00	9.2	1.54	0
15/09/2013 03:00	2.6	-5.06	1	15/09/2013 15:00	6	-1.66	1
15/09/2013 04:00	1	-6.66	0	15/09/2013 16:00	15	7.34	1
15/09/2013 05:00	3.8	-3.86	0	15/09/2013 17:00	13.6	5.94	0
15/09/2013 06:00	5.6	-2.06	0	15/09/2013 18:00	1	-6.66	1
15/09/2013 07:00	13.6	5.94	1	15/09/2013 19:00	21.4	13.74	1
15/09/2013 08:00	6.2	-1.46	1	15/09/2013 20:00	11	3.34	0
15/09/2013 09:00	9	1.34	1	15/09/2013 21:00	2.6	-5.06	1
15/09/2013 10:00	6.4	-1.26	1	15/09/2013 22:00	1.6	-6.06	0
15/09/2013 11:00	9.6	1.94	1	15/09/2013 23:00	5.8	-1.86	0
15/09/2013 12:00	7	-0.66	1	16/09/2013 00:00	1.2	-6.46	0

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 9

Número de cambio (C) = 14

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq -5 \geq 4.8$$

Tabla B. 8 Prueba de homogeneidad estación "Acapulco ESIME" 25/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
25/09/2013 01:00	0	-0.93		25/09/2013 13:00	0	-0.93	0
25/09/2013 02:00	0	-0.93	0	25/09/2013 14:00	0	-0.93	0
25/09/2013 03:00	2	1.08	1	25/09/2013 15:00	0	-0.93	0
25/09/2013 04:00	4.8	3.88	0	25/09/2013 16:00	0	-0.93	0
25/09/2013 05:00	3.4	2.48	0	25/09/2013 17:00	0	-0.93	0
25/09/2013 06:00	4	3.08	0	25/09/2013 18:00	0	-0.93	0
25/09/2013 07:00	1.8	0.88	0	25/09/2013 19:00	0.2	-0.73	0
25/09/2013 08:00	1.4	0.48	0	25/09/2013 20:00	1.2	0.28	1
25/09/2013 09:00	0	-0.93	1	25/09/2013 21:00	0.2	-0.73	1
25/09/2013 10:00	0.6	-0.33	0	25/09/2013 22:00	1.4	0.48	1
25/09/2013 11:00	0	-0.93	0	25/09/2013 23:00	0.4	-0.53	1
25/09/2013 12:00	0	-0.93	0	26/09/2013 00:00	0.8	-0.13	0

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 17

Número de cambio (C) = 6

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 11 \geq 4.8$$

Tabla B. 9 Prueba de homogeneidad estación "Chilpancingo" 14/09/13

Fecha	hp	hp - hp̄		Fecha	hp	hp - hp̄	
14/09/2013 01:00	0	-3.67		14/09/2013 13:00	5	1.33	1
14/09/2013 02:00	0.2	-3.47	0	14/09/2013 14:00	9.2	5.53	0
14/09/2013 03:00	0	-3.67	0	14/09/2013 15:00	10.2	6.53	0
14/09/2013 04:00	0.2	-3.47	0	14/09/2013 16:00	2.6	-1.07	1
14/09/2013 05:00	0	-3.67	0	14/09/2013 17:00	3.8	0.13	1
14/09/2013 06:00	0.2	-3.47	0	14/09/2013 18:00	2.2	-1.47	1
14/09/2013 07:00	1	-2.67	0	14/09/2013 19:00	6.8	3.13	1
14/09/2013 08:00	2	-1.67	0	14/09/2013 20:00	7.2	3.53	0
14/09/2013 09:00	1	-2.67	0	14/09/2013 21:00	6.4	2.73	0
14/09/2013 10:00	0.4	-3.27	0	14/09/2013 22:00	8.6	4.93	0
14/09/2013 11:00	4.2	0.53	1	14/09/2013 23:00	11.2	7.53	0
14/09/2013 12:00	2.6	-1.07	1	15/09/2013 00:00	3	-0.67	1

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 15

Número de cambio (C) = 8

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 7 \geq 4.8$$

Tabla B. 10 Prueba de homogeneidad estación "Chilpancingo" 15/09/13

Fecha	hp	hp - hp̄		Fecha	hp	hp - hp̄	
15/09/2013 01:00	5.2	-1.68		15/09/2013 13:00	11.2	4.32	0
15/09/2013 02:00	3	-3.88	0	15/09/2013 14:00	11.8	4.92	0
15/09/2013 03:00	5.6	-1.28	0	15/09/2013 15:00	8.8	1.92	0
15/09/2013 04:00	8.2	1.32	1	15/09/2013 16:00	6.4	-0.48	1
15/09/2013 05:00	4.4	-2.48	1	15/09/2013 17:00	4.4	-2.48	0
15/09/2013 06:00	6.4	-0.48	0	15/09/2013 18:00	3.4	-3.48	0
15/09/2013 07:00	5.6	-1.28	0	15/09/2013 19:00	4	-2.88	0
15/09/2013 08:00	4.2	-2.68	0	15/09/2013 20:00	7.8	0.92	1
15/09/2013 09:00	8.4	1.52	1	15/09/2013 21:00	10	3.12	0
15/09/2013 10:00	8	1.12	0	15/09/2013 22:00	13.2	6.32	0
15/09/2013 11:00	10	3.12	0	15/09/2013 23:00	3	-3.88	1
15/09/2013 12:00	7.4	0.52	0	16/09/2013 00:00	4.8	-2.08	0

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 17

Número de cambio (C) = 6

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 11 \geq 4.8$$

Tabla B. 11 Prueba de homogeneidad estación "Chilpancingo" 25/09/13

Fecha	hp	hp - \bar{hp}		Fecha	hp	hp - \bar{hp}	
25/09/2013 01:00	0.2	-0.50		25/09/2013 13:00	0	-0.70	0
25/09/2013 02:00	1.4	0.70	1	25/09/2013 14:00	0	-0.70	0
25/09/2013 03:00	0.4	-0.30	1	25/09/2013 15:00	0	-0.70	0
25/09/2013 04:00	0	-0.70	0	25/09/2013 16:00	0	-0.70	0
25/09/2013 05:00	0	-0.70	0	25/09/2013 17:00	0	-0.70	0
25/09/2013 06:00	2	1.30	1	25/09/2013 18:00	0	-0.70	0
25/09/2013 07:00	11.2	10.50	0	25/09/2013 19:00	0	-0.70	0
25/09/2013 08:00	0	-0.70	1	25/09/2013 20:00	0.8	0.10	1
25/09/2013 09:00	0	-0.70	0	25/09/2013 21:00	0.2	-0.50	1
25/09/2013 10:00	0	-0.70	0	25/09/2013 22:00	0.4	-0.30	0
25/09/2013 11:00	0.2	-0.50	0	25/09/2013 23:00	0	-0.70	0
25/09/2013 12:00	0	-0.70	0	26/09/2013 00:00	0	-0.70	0

Por lo tanto:

Número de secuencia (S) = 17

Número de cambio (C) = 6

$$-\sqrt{n-1} \geq S - C \geq \sqrt{n-1}$$

$$-4.8 \geq 11 \geq 4.8$$

ANEXO C

Las imágenes que se muestran a continuación corresponden al período del 14 al 16 de Septiembre del 2013 (recordando que la imagen del día 15 de Septiembre se puede observar en el Capítulo 4, *Figura 4.14*), que son los días más significativos, debido a que es cuando se presentó el evento meteorológico.

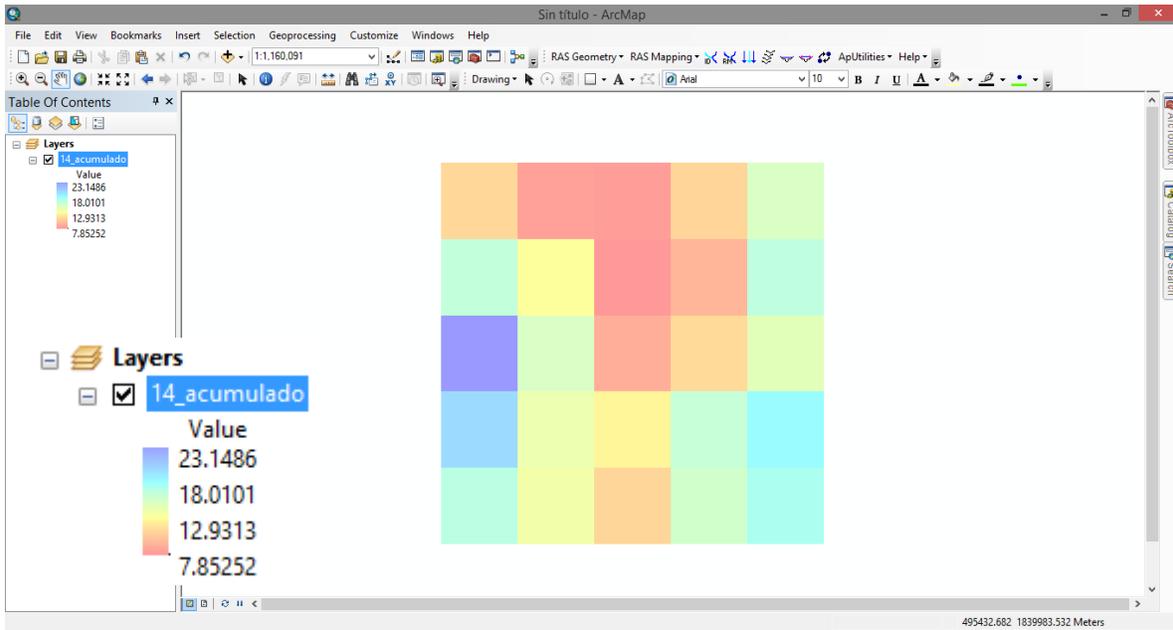


Figura C. 1 Imagen satelital del día 14 de Septiembre del 2013 (acumulado)

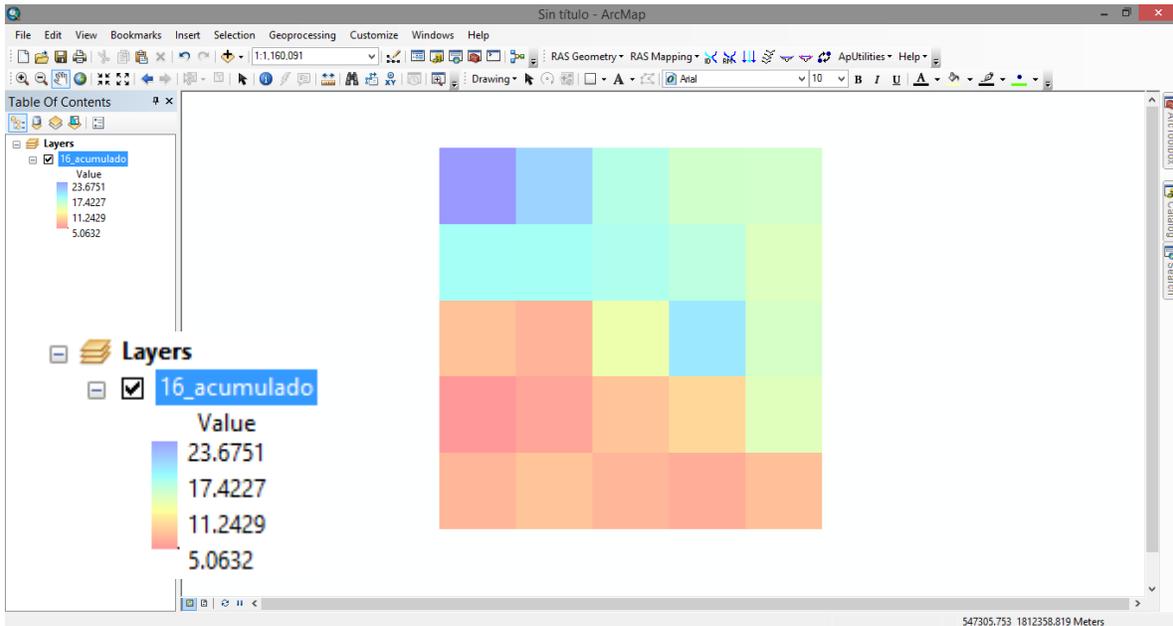


Figura C. 3 Imagen satelital del día 16 de Septiembre del 2013 (acumulado)

ANEXO D

Las imágenes que se muestran a continuación corresponden al período del 14 al 16 de Septiembre del 2013 (recordando que las imágenes del día 15 de Septiembre se puede observar en el Capítulo 4, *Figura 4.15 y 4.16*), que son los días más significativos, debido a que es cuando se presentó el evento meteorológico.

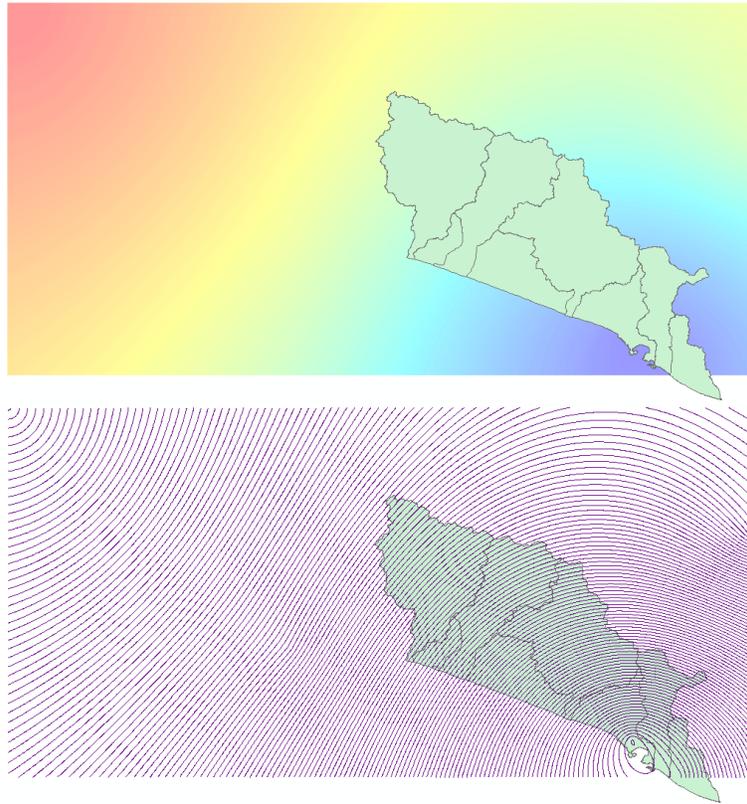


Figura D. 1 Isoyetas e isolíneas (estaciones meteorológicas automáticas) 14/Sep./13

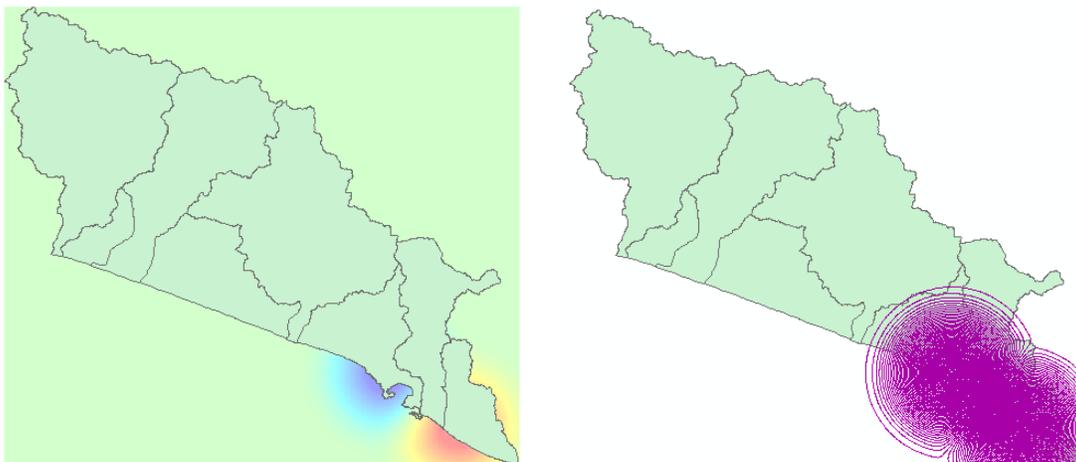


Figura D. 2 Isoyetas e isolíneas (estaciones meteorológicas automáticas) 16/Sep./13

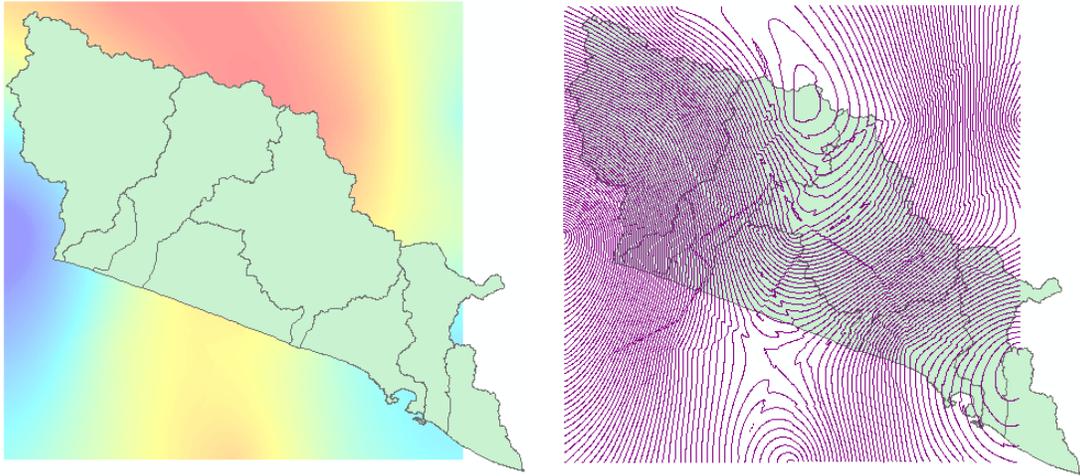


Figura D. 3 Isoyetas e isolíneas (imágenes) 14/Sep./13

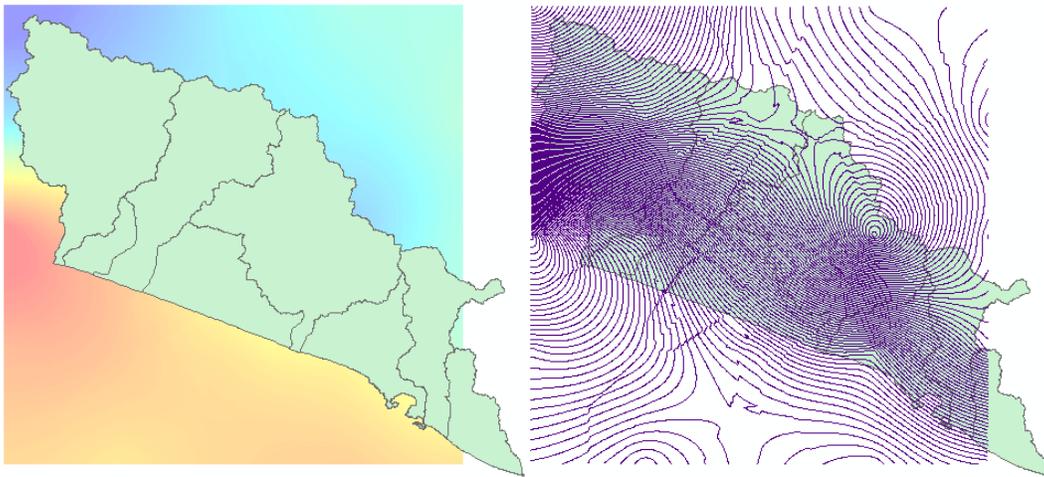


Figura D. 4 Isoyetas e isolíneas (imágenes) 16/Sep./13

En seguida se muestra el orden en que fueron considerados los pixeles, así como su ubicación respecto a la cuenca “RH19A” de los pixeles 19, 20 y 25.

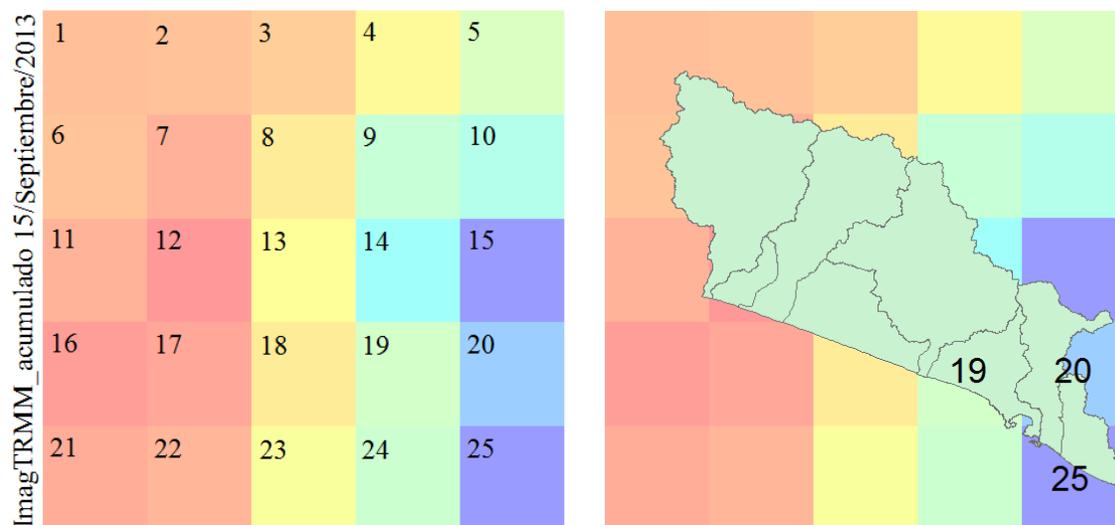
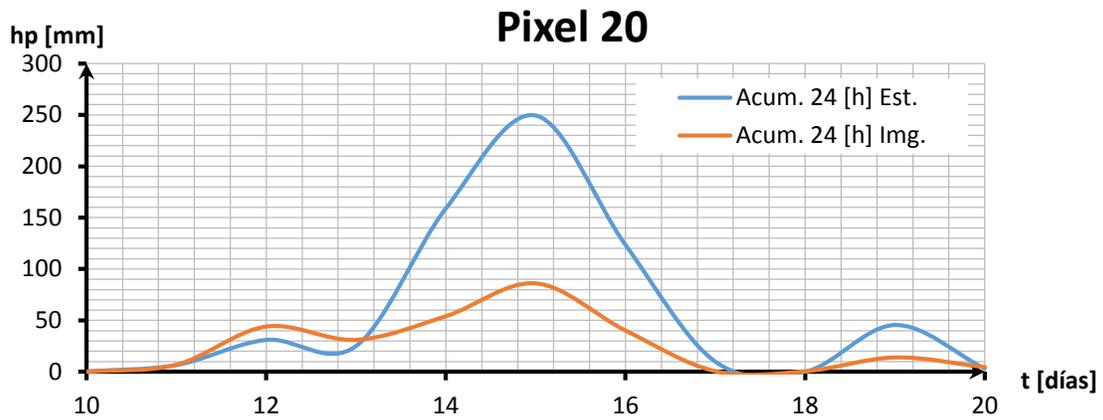


Figura E. 1 Orden del número de pixeles y ubicación del 19, 20 y 25 respecto a la cuenca RH19A

Tabla E. 1 Resumen de datos del pixel No. 20

Pixel 20					
t	hp _{est}	hp _{TRMM}	e ²	y _{cal}	e ²
(días)	(mm)	(mm)			
10	0.20	0.00	0.04	-9.12	86.94
11	6.50	6.80	0.09	9.10	6.74
12	31.00	44.00	169.00	108.77	6047.43
13	25.00	31.00	36.00	73.93	2394.57
14	159.00	54.00	11025.00	135.56	549.52
15	249.50	86.00	26732.25	221.30	795.48
16	123.50	40.10	6955.56	98.32	634.24
17	9.80	0.50	86.49	-7.78	309.21
18	0.00	0.42	0.18	-8.00	63.98
19	45.50	13.90	998.56	28.12	302.12
20	3.10	4.50	1.96	2.93	0.03
			46005.13		11190.24

Gráfica E. 1 Comportamiento de la precipitación (24 hrs.) comparativamente entre estaciones e imágenes



Gráfica E. 2 Recta de ajuste a los puntos observados en las estaciones e imágenes

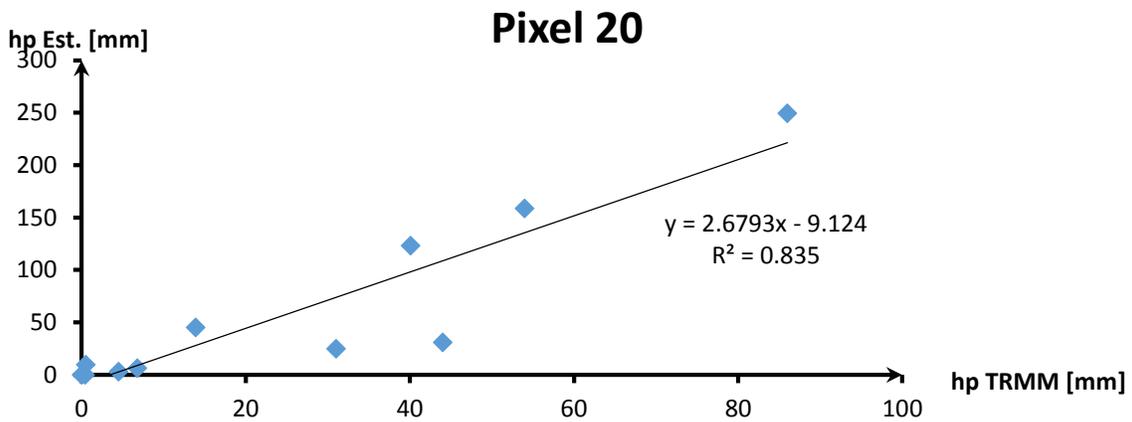
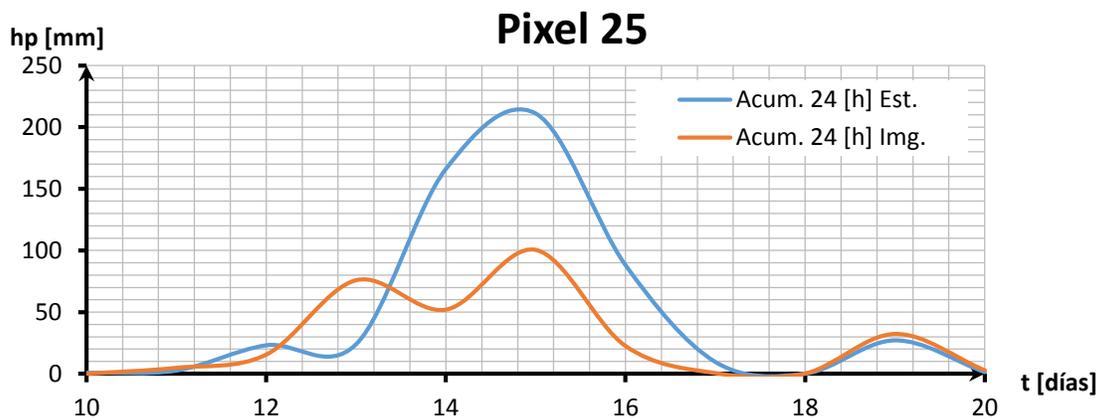


Tabla E. 2 Resumen de datos del pixel No. 25

Pixel 25					
t	hpest	hpTRMM	e2	ycal	e2
(días)	(mm)	(mm)			
10	0.60	0.00	0.36	4.30	13.71
11	2.50	4.80	5.29	12.20	94.15
12	23.00	15.50	56.25	29.81	46.42
13	23.80	75.90	2714.41	129.22	11113.28
14	166.00	52.00	12996	89.88	5793.51
15	211.00	100.50	12210.25	169.71	1705.18
16	88.00	22.50	4290.25	41.33	2177.73
17	9.50	0.50	81	5.13	19.13
18	0.00	0.20	0.04	4.63	21.46
19	27.00	32.30	28.09	57.46	927.97
20	1.20	2.80	2.56	8.91	59.47
			32384.50		21972.01

Gráfica E. 3 Comportamiento de la precipitación (24 hrs.) comparativamente entre estaciones e imágenes



Gráfica E. 4 Recta de ajuste a los puntos observados en las estaciones e imágenes

