



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA
AVANZADA

ESTUDIO DE VIABILIDAD EN EL ALMACENAMIENTO
DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN EL ESTADO DE
QUERÉTARO USANDO DATOS DEL RADAR
METEOROLÓGICO, UBICADO EN EL CERRO DE LA
RONCHERA, Y DATOS DEL CONSUMO PROMEDIO DE
AGUA REGISTRADO POR LA COMISIÓN ESTATAL DE
AGUAS DE QUERÉTARO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN TECNOLOGÍA

P R E S E N T A :

ARIEL CERÓN GONZÁLEZ

TUTOR

DR. ADOLFO MAGALDI HERMOSILLO
QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Y si ya tengo el agua que me da la lluvia
Si conozco lo grande que me da el cielo
Si puedo vivir con lo que cae al suelo
Si no me falta la esperanza es gracias a la mañana
Yo no necesito poder

María Rodríguez Garrido

RESUMEN

Los beneficios del desarrollo humano son tantos como las implicaciones que día con día son más evidentes. En esta tesis se presenta un estudio exploratorio sobre la precipitación pluvial en el estado de Querétaro, para cuantificar la capacidad hídrica con el fin de mitigar las problemáticas de la falta de agua potable. En el capítulo dos se presenta una descripción general del estado de Querétaro, su economía, el clima y algunas características hídricas. En el capítulo tres, se presentan algunas definiciones sobre el fenómeno de la precipitación y entender mejor que información es adquirida por los radares meteorológicos. En el capítulo cuatro, se explica el funcionamiento de los radares meteorológicos su aplicación en los fenómenos de precipitación y la forma de procesar la información. Por último en el capítulo cinco se aborda la historia de los sistemas de almacenamiento, se plantean los componentes básicos para un sistema de almacenamiento y algunas ecuaciones para aproximar el agua aprovechable. Los resultados son mostrados en el capítulo siete, se presentan mapas de distribución de precipitación, los regímenes hídricos y las temporadas de mayor presencia de lluvia, la de precipitación acumulada y la precipitación aprovechable. También se presenta el consumo hídrico promedio de la población queretána y los porcentajes de uso por sector. Para finalizar se presenta una discusión de resultados en lo que se analiza la diferencia entre el consumo hídrico y el aprovechamiento pluvial calculado, **concluyendo que para la mayor parte del estado la captación de agua de lluvia podría ser una alternativa para beneficiarse del agua en temporada de lluvias.**

Palabras clave: Precipitación. Querétaro. Radar meteorológico. Almacenamiento.

The advantages from human developemnt are as evident as its disadvantage that day by day are more notable. This thesis is an analysis about pluvial precipitation over the state of Queretaro to know how much water can be used from precipitation to decrease the lack of safe water. Begining in chapter two with a general description of the state of Quere-taro about their economy, geography, climate and water characteristics. In chapter three, its given some definitions to understand rainfall and the data obtained by the weather radars. In chapter four its shown how meteorological radars work and their application on measure the presentation. For chapter five its about captation systems and some ecuations to measure the available precipitation that we can use. The results are shown in chapter seven: precipitation distribution maps, water regimes and the seasons with the greatest presence of rain, accumulated precipitation and usable precipitation are addressed. Also it shows the average water consumption of the Queretaro population and the percentages of

use by sector. Finally, a discussion about the difference between water consumption and calculated rainwater available is presented,, concluding that most of the state rainwater harvesting could be an alternative to benefit from safe water in rainy seasonn

Dedicatoria ...

A mis padres Belen y Edgar, que me han cuidado.

A mi hermano Axel, que esta a mi lado.

A mis amigos Antonio, Aleatoria, Diego, Diana², Fernanda², Jarr, Jesús, Isa, Kathia, Misa, Mariana, Paco, Pablo, Saúl, Sebastianⁿ, Vane y a todos los que me aceptaron.

A mis abuelos Estela, Gabriel y Malena, los que lucharon.

Y a mis profesores, los que me enseñaron

Agradecimientos

A mi tutor, Adolfo, quien nunca me abandonó, a la Universidad Nacional Autónoma de México y a Fernanda que me ayudo a terminar.

Notación

ha Hectárea

hm Hectómetros

km Kilometros

kW Kilowatt

m Metros

msnm Metros sobre el nivel de mar

mm Milímetros

mm/h Milímetros por hora

W Watt

Índice general

Agradecimientos	v
Notación	vi
Índice de figuras	x
1 Introducción	1
§1.1 Hipótesis	3
§1.2 Objetivos	3
§1.2.1 Objetivo general	3
§1.2.2 Objetivos particulares	3
§1.3 Justificación	3
§1.4 Antecedentes	5
2 Área de estudio	7
§2.1 Querétaro.	7
§2.2 Clima.	8
§2.3 Hidrología.	10
§2.4 Migración	14
3 Precipitación pluvial	17
§3.1 Proceso de precipitación.	18
§3.1.1 Nubes.	19
§3.1.2 Precipitación.	19
§3.2 Métodos de medición.	20

§3.2.1	Pluviómetros.	21
§3.2.2	Radares.	22
4	Radar meteorológico	23
§4.1	Ecuación del radar	25
§4.2	Relación $Z - R$	26
§4.2.1	Los datos de radar	26
5	Sistemas de almacenamiento	28
§5.1	SCALLs en México	28
§5.2	Ecuaciones	29
6	Materiales y métodos	31
§6.1	Datos de radar	32
§6.2	Cadena de procesamiento	33
§6.2.1	Estructura de datos	33
§6.2.2	Acumulados	35
§6.3	Datos de consumo	36
7	Resultados.	37
§7.1	Radar atmosférico	37
§7.1.1	Cadena de procesamiento	37
§7.1.2	Acumulados	40
§7.1.3	Regiones particulares	51
§7.2	Consumo estatal	54
8	Discusión	57
§8.1	Cadena de procesamiento	57
§8.2	Acumulados	58
§8.3	Consumo hídrico estatal	58
§8.4	Precipitación aprovechable	59
§8.4.1	Zonas residenciales	59

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IX
§8.4.2 Zonas industriales	60
§8.4.3 Zonas ganaderas	60
9 Conclusiones.	61

Índice de figuras

2.1	Ubicación geográfica del estado de Querétaro. Creación propia usando Qgis.	7
2.2	Climas del estado. Obtenido del Anuario del estado.	9
2.3	Evolución climática de Querétaro	10
2.4	Cuerpos de agua. Obtenido del Anuario del estado.	12
2.5	Consumo total anual en el estado de Querétaro	13
2.6	Distribución media mensual de la precipitación en el estado de Querétaro	13
2.7	Evolución de la población en el estado de Querétaro (1990-2020)	14
2.8	Porcentaje de población por municipio	15
2.9	Registro poblacional de INEGI. Periodo 2000 a 2020	16
3.1	Precipitación pluvial. Tomada de Pixabay	17
3.2	Ciclo hidrológico. Tomado de Pixabay.	18
3.3	Una nube. Tomada de Pixabay	19
3.4	Tipos de nubes. Tomada de cienciorama.	20
4.1	Pulso de radar. MUR es la distancia máxima no ambigua. Tomada de Stull y col. 2018	23
4.2	Componentes del sistema de radar. Tomada de unican.	24
4.3	Intensidad de los radares (dBZ). Tomada de Stull y col. 2018	26
6.1	Cadena de operaciones	32
6.2	En azul la ubicación del radar y su área de cobertura	32
6.3	Cadena de procesamiento de datos	34
7.1	Reflectividad equivalente, usando pyart	37

7.2	Reflectividad equivalente, usando wradlib	37
7.3	Representación habitual del resultado binario del filtro Gabella	38
7.4	Aplicación del filtro Gabella a los datos en crudo.	38
7.5	Rayo del barrido seleccionado.	39
7.6	Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Hitschfeld y Bordan	39
7.7	Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Harrison	39
7.8	Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Kreamer	39
7.9	Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Kreamer modificado	39
7.10	Aplicación del filtro de atenuación sobre un rayo.	39
7.11	Transformación de reflectividad equivalente a precipitación equivalente	40
7.12	Acumulados del primer trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017	40
7.13	Acumulados del primer trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017	41
7.14	Acumulados del segundo trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017	41
7.15	Acumulados del segundo trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017	42
7.16	Acumulados del tercer trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017	42
7.17	Acumulados del tercer trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017	43
7.18	Acumulados del cuarto trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017	43
7.19	Acumulados del cuarto trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017	44
7.20	Acumulados anuales de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017	44
7.21	Acumulados anuales de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017 sobre el área de estudio, respectivamente	45
7.22	Precipitación numérica del acumulada anual	45

7.23 Primera aproximación, un rectángulo sobre el estado.	46
7.24 Segunda aproximación, seis segmentaciones en el estado	46
7.25 Tercera aproximación, ocho segmentaciones en el estado.	46
7.26 Diferentes segmentaciones al estado.	46
7.27 Acumulación trimestral para 2015	47
7.28 Acumulación trimestral para 2016	47
7.29 Acumulación trimestral para 2017	47
7.30 Acumulación mensual para 2015	48
7.31 Acumulación mensual para 2016	48
7.32 Acumulación mensual para 2017	48
7.33 Acumulación mensual para 2015 (aproximación 1)	49
7.34 Acumulación mensual para 2016 (aproximación 1)	49
7.35 Acumulación mensual para 2017 (aproximación 1)	49
7.36 Acumulación mensual para 2015 (aproximación 12)	50
7.37 Acumulación mensual para 2016 (aproximación 2)	50
7.38 Acumulación mensual para 2017 (aproximación 2)	50
7.39 Acumulación mensual para 2016 (aproximación 3)	51
7.40 Acumulación mensual para 2016 (aproximación 3)	51
7.41 Acumulación mensual para 2017 (aproximación 3)	51
7.42 Parques industriales en el estado de Querétaro	52
7.43 Zonas agrícolas en el estado de Querétaro	52
7.44 Zonas residenciales en el estado de Querétaro	52
7.45 Precipitación anual acumulada para zonas agrícolas 2015	53
7.46 Precipitación anual acumulada para zonas agrícolas 2016	53
7.47 Precipitación anual acumulada para zonas agrícolas 2017	53
7.48 Precipitación anual acumulada para zonas residenciales 2015	53
7.49 Precipitación anual acumulada para zonas residenciales 2016	53
7.50 Precipitación anual acumulada para zonas residenciales 2017	53
7.51 Precipitación anual acumulada para zonas industriales 2015	53
7.52 Precipitación anual acumulada para zonas industriales 2016	53

7.53 Precipitación anual acumulada para zonas industriales 2017	53
7.54 Acumulación anual en zonas particulares	53
7.55 Consumo total.	54
7.56 Consumo estatal separado por categorías.	55
7.57 Consumo mensual.	56
8.1 Densidad de población en el estado de Querétaro.	59

Capítulo 1

Introducción

La actividad económica del estado de Querétaro ha motivado una migración que, a su vez, ha generando un gran crecimiento urbano principalmente en la capital del estado. Las actividades económicas, el crecimiento urbano, el constante cambio de uso de suelo, junto con las características ambientales propias del estado han promovido que el estado presente problemáticas por acceso al agua.

Este trabajo busca promover el uso de Sistemas de Almacenamiento de Agua de Lluvia para generar una independencia hídrica durante los meses de mayor precipitación, analizando la viabilidad de su implementación mediante un análisis estadístico de la precipitación pluvial acumulada en el estado de Querétaro en el periodo de 2015 a 2017.

Para el estudio de la precipitación tradicionalmente se hace uso de instrumentos como los pluviómetros o el radar meteorológico, el cual permite medir la precipitación en tiempo real. Este último, en comparación con las redes de pluviómetros, es capaz de captar con suficiente resolución la variabilidad espacial de la precipitación, lo que permite estimar la lluvia con una excelente resolución espacial.

La principal aportación de esta tesis consiste en el desarrollo de una metodología que utiliza datos de reflectividad estimados con un radar Doppler de banda “C” que opera con un transmisor basado en TWT¹, los datos de este radar fueron pre-procesados para minimizar la incertidumbre y aproximar de forma precisa la precipitación pluvial sobre el estado

¹traveling-wave tube por sus siglas en ingles, es un dispositivo electrónico usado para amplificar señales de radio frecuencia mediante un montaje electrónico

de Querétaro para identificar la viabilidad funcional y de un Sistema de Almacenamiento de Agua de Lluvia (SCALL). Adicionalmente, en regiones con escasa o nula instrumentación pluviográfica se pueden aprovechar los resultados para generar una planeación a desastres ocasionados por la precipitación en zonas pobladas.

El área de estudio se presenta en el capítulo 2, destacando algunos indicadores económicos, la orografía estatal, los climas existentes y los cuerpos de agua de la región, además se aborda la crisis de agua.

En el capítulo 3 se hace un acercamiento al ciclo del agua y se ahonda en el proceso de precipitación, para introducir definiciones usadas en el trabajo, como el de hidrometeoros, además de presentar algunas variables físicas aprovechadas por el radar meteorológico para después, en el capítulo 4, presentar los principios básicos de los radares meteorológicos, conceptos fundamentales de los sistemas de radar, la ecuación del radar, la relación entre reflectividad estimada por el radar Z y la intensidad de la lluvia R (relación $Z-R$).

El capítulo 5 presenta generalidades de los sistemas de almacenamiento de agua, costos de la implementación, una exploración a trabajos similares, consideraciones para especular las diferentes capacidades de almacenamiento en distintos entornos como hogar, industria y zonas productoras.

Los resultados obtenidos de la manipulación de los datos meteorológicos se presentan en los capítulos 6 y 7 en los cuales se describe la cadena de procesamiento y los algoritmos utilizados para extraer la precipitación acumulada. Mediante mapas georeferenciados, se muestra la variabilidad de la precipitación, la distribución de precipitación en diferentes periodos temporales, los acumulados totales y se presenta la información de la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEAQ) sobre el consumo del agua en el estado y con ello se extraen tasas de consumo para los diferentes sectores registrados por la CEAQ.

Finalmente se presentan las principales conclusiones derivadas del desarrollo de este trabajo. En particular se destaca el desarrollo de un procedimiento operativo que permite calcular la escurrentía aprovechable durante diferentes periodos de tiempo estimada a partir de datos de radar en diferentes zonas industriales, urbanas y agrícolas; donde impera la actividad humana.

1.1. Hipótesis

Los datos adquiridos mediante un radar meteorológico estiman con precisión la precipitación que llega a la superficie terrestre, además de proveer información sobre la distribución temporal y espacial. El correcto uso y procesamiento de esos datos permitirá observar la evolución, distribución y el régimen de precipitación en el estado de Querétaro lo cual permitiría evaluar la precipitación aprovechable en sistemas de almacenamiento de agua.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Conocer el comportamiento histórico de la precipitación pluvial registrada con datos del radar meteorológico ubicado en el Cerro de la Ronchera para validar sistemas de recolección y almacenamiento de agua de lluvia.

1.2.2. Objetivos particulares

- Generar mapas hídricos del estado de Querétaro para diferentes zonas y periodos temporales.
- Conocer y pronosticar la demanda hídrica del estado de Querétaro.

1.3. Justificación

El agua dulce es un recurso estratégico para el desarrollo social y económico, su disponibilidad condiciona la posibilidad de desarrollo y su calidad es factor determinante para la salud y bienestar de la población, México tiene muchos retos en torno a este tema como el aumento en la demanda del recurso derivado del crecimiento poblacional e industrial. La desigual distribución de la precipitación en el tiempo y espacio, aunado a la contaminación de las aguas y el uso ineficiente del agua en diferentes sectores. Estos retos están más presentes en estados como Querétaro cuya disponibilidad media anual de agua sub-

terránea toma valores negativos (SUBTERRÁNEAS s.f.) por lo que el acceso al agua se ha visto comprometido. El desarrollo de información y metodologías que aprovechen la información del radar meteorológico sirve para evaluar Sistemas de Almacenamiento de Agua de Lluvia.

1.4. Antecedentes

La distribución y suministro de agua potable es un problema persistente en México. En el artículo de Avelar Roblero y col. 2019 analiza este problema desde la distribución, infraestructura y continuidad del servicio hídrico en el municipio de San Luis Acatlán, en el estado de Guerrero. Se propone un sistema de captación de agua de lluvia que satisfaga las necesidades hídricas de 11 familias de la comunidad. Con los datos de precipitación del estado se obtiene un potencial de aprovechamiento de 46.99 m³ por año, volumen suficiente para cubrir las necesidades hídricas básicas durante los meses de mayor intensidad de precipitación, además de forma experimental y, usando los techos de las viviendas como área de captación, se verificó la viabilidad en los meses de mayor intensidad, al observar una captación máxima del sistema. De forma similar, Ramírez y col. 2018 presentan un análisis de viabilidad de un sistema de captación de agua de lluvia para la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato (ENMSGTO), que cubra los requerimientos del departamento psicopedagógico, con un área de captación de 110 m², se calculó un promedio de captación máximo de 10.75 m³ y un consumo promedio de 3.80 m³. Al igual que en el trabajo de Avelar Roblero y col. 2019, que mediante datos del Servicio Meteorológico Nacional concluye, que durante los meses de mayor intensidad de precipitación la demanda del recurso es cubierta y, en algunos casos, hay un excedente que puede ser almacenado y aprovechado los meses próximos.

Otras investigaciones como la de López y col. 2016 se evalúan en climas áridos, como lo es la Zona Metropolitana de Monterrey (SMM), la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia en pequeña escala realizando un análisis espacial en las áreas residenciales de la ZMM para determinar la capacidad de captación, concluyendo que la implementación de los SCALL tendría impactos mínimos pero que, a gran escala, podría tener mayor beneficio.

Desde un punto de vista económico en el trabajo de Tania Isabel Arroyo-Za 2013 presenta un análisis del costo-beneficio de un proyecto de colecta de agua pluvial en la ciudad de Morelia Michoacán, en este trabajo verifica la viabilidad económica de un sistema ya instalado y, al considerar los costos de instalación y producción, presenta una tasa de

retorno de 8 años.

Por último en el trabajo de Belmonte 2014 aprovecha la información de los radares meteorológicos para planificar las actividades agropecuarias en función de la distribución espacial y temporal de las precipitación, desarrollando información cartográfica y una metodología para el estudio de indicadores útiles que sirvan como herramienta en procesos de toma de decisiones.

Hay que notar que la mayor parte de los estudios presentados obtienen su información de estaciones meteorológicas, acto que limita el análisis espacial, lo cuál es importante al momento de realizar estudios hídricos, pues la orografía del territorio modifica el comportamiento del clima haciendo que en ciertas zonas exista una diferencia resaltable de la capacidad hídrica, ejemplo de ello se muestra en la tesis de López y col. 2016 la cual considera variables espaciales obteniendo resultados de aprovechamiento muy bajos. La simpleza y escalabilidad de los SCALL hace necesario tener una herramienta que permita calcular de forma eficiente y precisa la viabilidad económica y funcional, considerando las necesidades del usuario y la distribución espacial de la precipitación.

Los radares meteorológicos ofrecen información espacial, lo cual hace al radar una alternativa a las estimaciones hechas con los datos pluviómetros. Además, los avances computacionales permiten aplicar técnicas que hacen más precisas las estimaciones de precipitación obtenidas mediante el radar meteorológico.

Capítulo 2

Área de estudio

2.1. Querétaro.



Figura 2.1: Ubicación geográfica del estado de Querétaro. Creación propia usando Qgis.

El estado de Querétaro se ubica en el centro del territorio nacional, colinda con los estados de: México, San Luis Potosí, Michoacán, Hidalgo y Guanajuato. Cuenta con una extensión territorial de 11,690.50 km² lo que representa el 0.6% de la superficie total del país, se administra en 18 municipios, y su capital es el municipio de Santiago de Querétaro,

el cual además es el municipio más poblado del estado. Se ubica en el área de influencia de tres provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico Mexicano, la Mesa del Centro y la Sierra Madre Oriental.

Gracias a la localización estratégica en el centro del país donde la cercanía a la Ciudad de México y la presencia de vialidades que conectan al centro con el norte de la república se han construido atributos fundamentales para la establecer a la industria.

El estado en 2019 contaba un total de 115 mil 532 empresas, de las cuales 92% se identificaban como micro-empresas. En el mismo año el Producto Interno Bruto (PIB) fue superior a \$ 403,905.22 millones de pesos, lo que representa el 2.2% del PIB del país y sostuvo un crecimiento económico positivo en diferentes actividades económicas. La actividad económica que más aportó al PIB es la terciaria con 54.9%, le sigue la secundaria con 43.8% y finalmente la primaria con el 2.3% restante.

El estado cuenta con más de 40 parques industriales (Estrella 2017) que albergan a más de 1,600 empresas, teniendo la mayor concertación de empresas en los municipios de Querétaro y El Marqués. Además de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística e Información Geográfica (INEGI), el estado de Querétaro tienen 672 mil 203 *ha* de zonas agrícolas y/o ganaderas.

2.2. Clima.

Porcentaje de la superficie estatal por tipo de clima	
Tipos subtipo de clima	Porcentaje
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	2.9
Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano	0.9
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	21.5
Templado húmedo con abundantes lluvias en verano	0.8
Templado subhúmedo con lluvias en verano	23.2
Semiseco muy cálido y cálido	0.4
Semiseco semicálido	9.1
Semiseco templado	37.3
Seco semicálido	4.1
Total	100.0

Tabla 2.1: Perfil climático

En el estado de Querétaro hay tres áreas climáticas: la primera corresponde a la porción que comprende parte del Eje Neovolcánico Mexicano, la segunda suma al mismo eje

algunas zonas de la Sierra Madre Oriental y la Mesa del Centro y, la tercera pertenece exclusivamente a una porción de la Sierra Madre Oriental.

La fisiografía estatal está estrechamente ligada a los tres grandes grupos de climas existentes. Al sur del estado predominan climas templados subhúmedos; en la región central son preponderantes los climas secos y semisecos; finalmente, en la región noreste, los climas dominantes son cálidos y semicálidos subhúmedos.

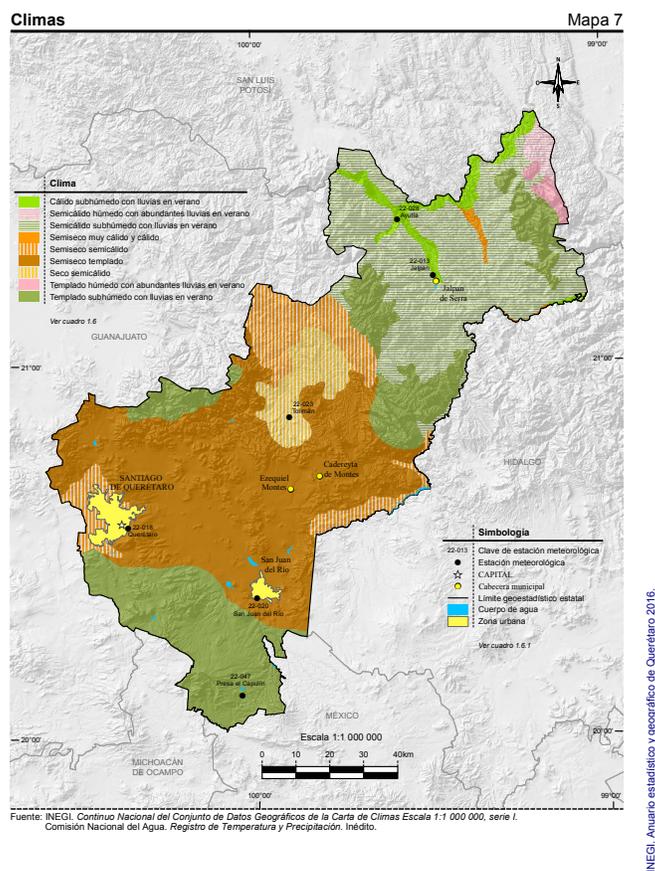


Figura 2.2: Climas del estado. Obtenido del Anuario del estado.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) registra el volumen de las precipitaciones pluviales y la temperatura en el estado de Querétaro, en seis estaciones meteorológicas. En la tabla 2.2 se muestra la temperatura promedio por periodo disponible de cada estación, cabe resaltar que las dos estaciones faltantes no registraron datos para ese año.

Temperatura media anual del estado de Querétaro, 2020			
Estación	Temperatura promedio	Temperatura más fría del año	Temperatura más calurosa del año
Ayutla	24.7°C	7°C	41°C
Presa El Capulín	15.8°C	0°C	31°C
Querétaro	20.6°C	3.5°C	34.8°C
San Juan del Río	21.7°C	2°C	37.5°C

Tabla 2.2: Temperaturas medias.

En la Figura 2.3 se muestra la evolución en la precipitación y clima promedio del estado, observar que existe una tendencia positiva en la temperatura del estado y una varianza alta en la precipitación.

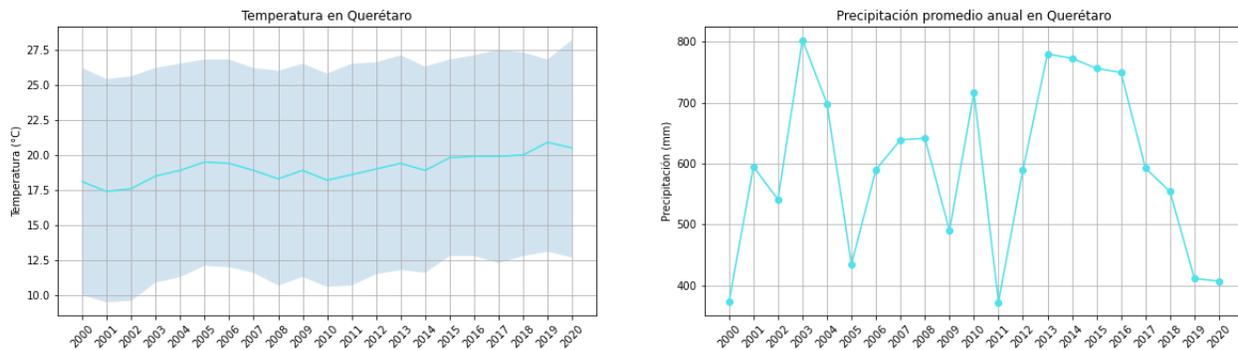


Figura 2.3: Evolución climática de Querétaro

2.3. Hidrología.

CONAGUA coloca al territorio estatal en la confluencia de 12 acuíferos (Figura 2.4): 11 en Querétaro y uno más que se comparte con el estado de San Luis Potosí. Cada acuífero muestra recargas medias variables entre sí, siendo la más alta la de Valle de San Juan del Río con 191.5 hm³ al año, seguida del Valle de Tequisquiapan con 108.1 hm³.

El estado también se encuentra ubicado en las cuencas: Lerma-Santiago, vertiente del Océano Pacífico; y Pánuco, vertiente del Golfo de México. La cuenca Lerma-Santiago está integrada por las cuencas de los ríos Lerma-Toluca y Laja, las cuales representan 1.8% y 19.4% respectivamente de la superficie total del estado. Cuenta con un volumen medio

anual de escurrimiento¹ natural de 13,061.6 hm³ y una disponibilidad² media anual de 9,503.8 hm³.

Acuíferos en el estado de Querétaro				
Acuífero	Recarga media (m ³ /año)	Descarga natural (m ³ /año)	Volumen de extracción de aguas subterráneas	Disponibilidad y/o déficit
Valle de Querétaro	70.00	4.00	129.72	-63.72
Valle de Amazcala	34.00	2.80	54.45	-23.25
Valle de San Juan del Río	191.50	0.00	327.76	-136.26
Valle de Buena Vista	11.00	0.10	23.34	-12.44
Valle de Tequisquiapan	108.10	2.60	108.07	-2.57
Valle de Cadereyta de Montes	4.10	0.00	4.14	-0.04
Tolimán	8.40	2.90	9.46	-3.96
Valle de Huimilpan	20.00	2.00	21.91	-3.91
Valle de amecalco de Bonfil	22.50	0.80	20.84	0.86
Moctezuma	50.00	6.50	0.07	43.43
Tampaón (zona sierra)	49.00	13.60	2.39	33.01

Tabla 2.3: Acuíferos en el estado de Querétaro. Las cifras están expresadas en millones de metros cúbicos anuales

La región Pánuco se compone por las cuencas de los ríos Moctezuma y Tamuín. Cubre aproximadamente el 78.8% del territorio queretano y posee como corrientes principales los ríos Ayutla, Concá, Extoraz, Escanela, Moctezuma, San Juan, Santa María y Tolimán. Cuenta con un volumen medio anual de escurrimientos naturales de 20,223.6 hm³ y una disponibilidad media anual de 49,069.6 hm³.

¹El escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores.

²La disponibilidad natural del agua depende fundamentalmente del balance entre el agua que entra al sistema por medio de la precipitación y de lo que se pierde por la evaporación en los cuerpos de agua y por la evapotranspiración vegetal

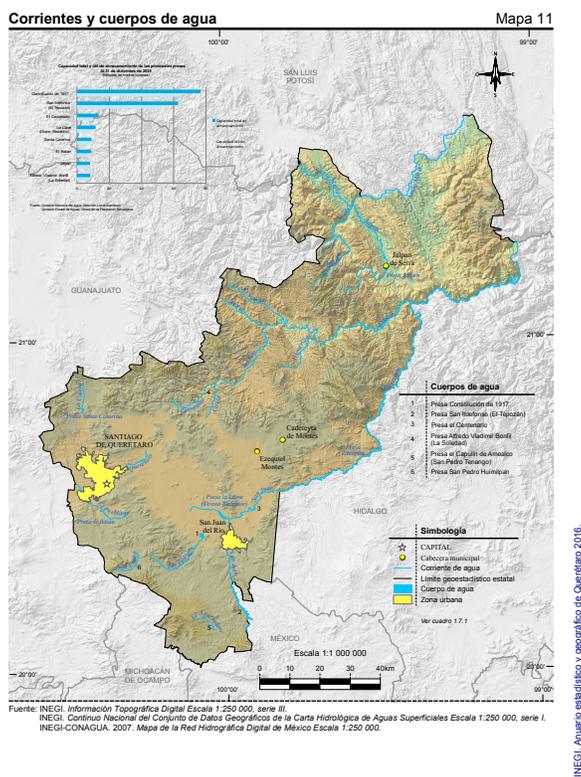


Figura 2.4: Cuerpos de agua. Obtenido del Anuario del estado.

Querétaro trata el 87.8% del total de sus aguas residuales gracias a 40 plantas de tratamiento operadas por la CEAQ con una capacidad de 1,706.85 litros por segundo. Con un volumen anual tratado de más de 41,853,302.88 m³. Además, la CONAGUA tiene registro de 51 plantas públicas y 176 plantas privadas distribuidas en los municipios del estado.

En la Figura 2.5 se muestra su registro³ de la CEAQ del consumo total de agua del estado en el periodo 2014 a 2020, la cual muestra un consumo máximo en 2017 de 79,515,839 m³ de agua.

³Información dada por la Unidad de Transparencia con el expediente No UTCEA-0014/2021, oficio No. UT-0081/2021 y folio de seguimiento: SCG-2987-21

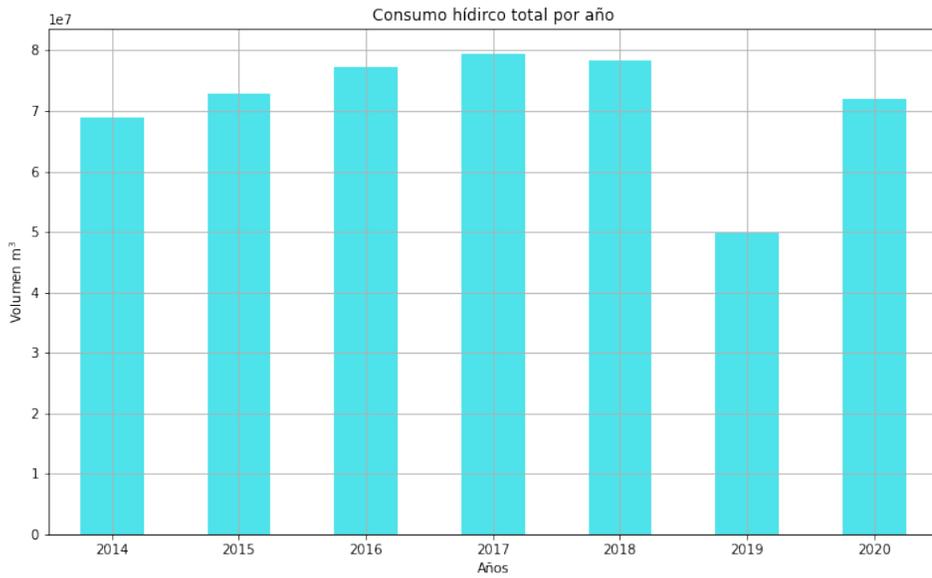


Figura 2.5: Consumo total anual en el estado de Querétaro

El régimen hídrico mensual (Figura 2.6) muestra el periodo de mayor precipitación. No olvidar la existencia de múltiples climas (tabla 2.2), y la predominancia de climas semi-áridos y áridos, ello genera una variación significativa en la distribución de precipitación en el estado.

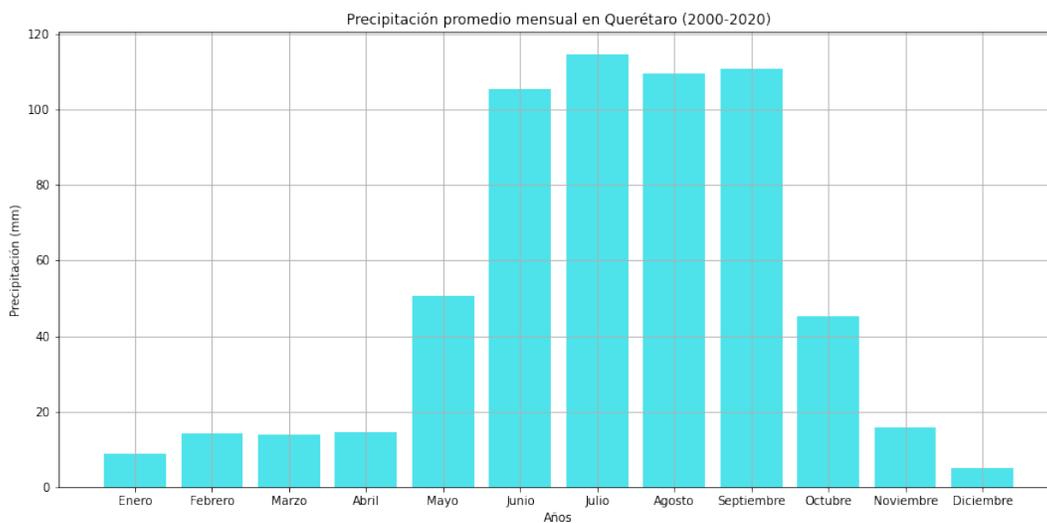


Figura 2.6: Distribución media mensual de la precipitación en el estado de Querétaro

La Secretaría de Desarrollo Sustentable del estado de Querétaro cuenta con una red de monitoreo atmosférico que realiza la medición de parámetros meteorológicos como presión, radiación solar, temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa y precipitación pluvial.

Precipitación en el estado de Querétaro				
Estación	Periodo	Precipitación promedio (mm)	Precipitación del año más seco (mm)	Precipitación del año más lluvioso (mm)
Ayutla	1980-2020	661.7	272.5	1,322.5
Jalpan	1980-2020	819.2	447.6	1,350.5
Presa El Capulín	1980-2020	803.6	514.9	1,274.1
Querétaro	1980-2020	569.0	187.7	935.4
San Juan del Río	1980-2020	488.6	226.3	695.3
Tolimán	1980-2020	313.7	186.0	877.6

Tabla 2.4: Precipitación promedio.

En 2020 seis estaciones meteorológicas estuvieron encargadas del registro de la precipitación en la entidad. El mayor promedio de precipitación total anual en el estado lo tiene la estación de Jalpan con 819.2 mm y el menor Tolimán con 313.7 mm, esto conforme a los periodos de registro.

2.4. Migración

Según datos de Censo de Población y Vivienda 2020, la población asciende a 2,368,467 habitantes en la entidad, cantidad que representa un crecimiento de 29.6 % respecto a 2010.

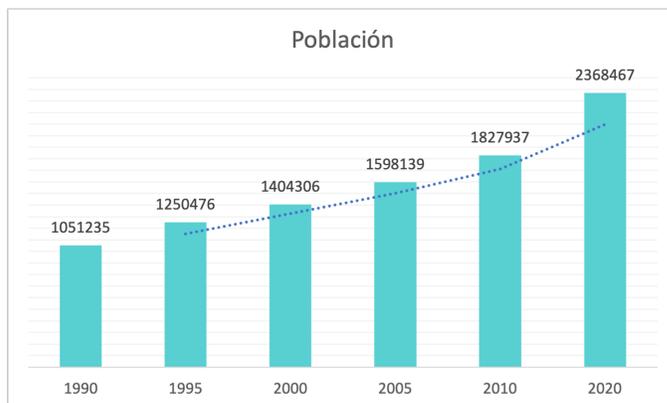


Figura 2.7: Evolución de la población en el estado de Querétaro (1990-2020)

Del total de la población 1,049,777 habitan en el municipio de Querétaro (44.3%), 297,804 en el municipio de San Juan del Río (12.6%) el segundo municipio más poblado, 212,567 en el municipio de Corregidora (9%), 231,668 en el municipio de El Marqués (9.8%) y, 36,808 en el municipio de Humilpan (1.6%). El resto de la población se encuentra en los municipios de San Joaquín (0.4%), Arroyo Seco (0.6%) y Landa de Matamoros (0.8%).

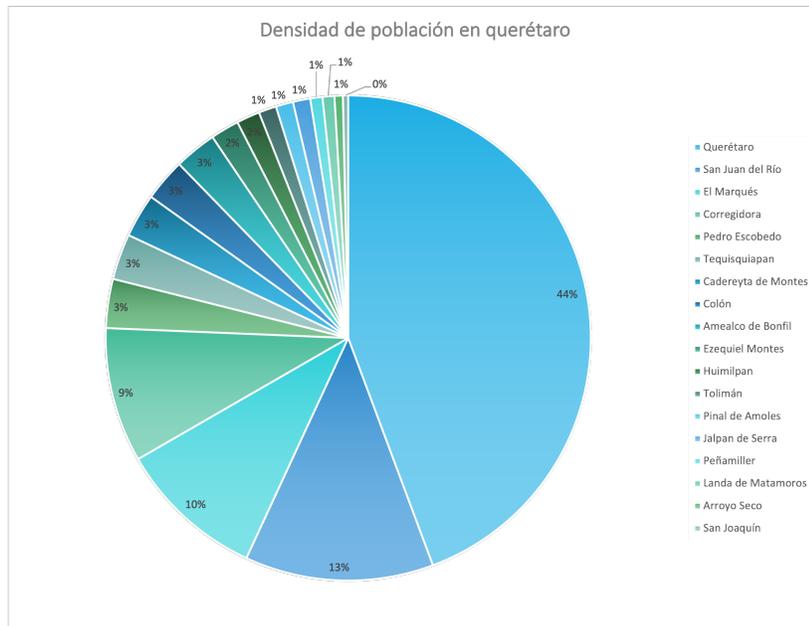


Figura 2.8: Porcentaje de población por municipio

Gran parte de la población actual es debida a la migración (nacional y extranjera) que afectan la dinámica de crecimiento y composición por sexo y edad. Fruto de los beneficios económicos de la entidad. Los municipios con mayor porcentaje de población nacida en otra entidad o en el extranjero son Corregidora y Querétaro seguidos de El Marqués y San Juan del Río.

El crecimiento del estado puede rastrearse desde 1950, pero es hasta 1980 que el estado, y en particular el municipio de Querétaro, muestra un auge en migración.

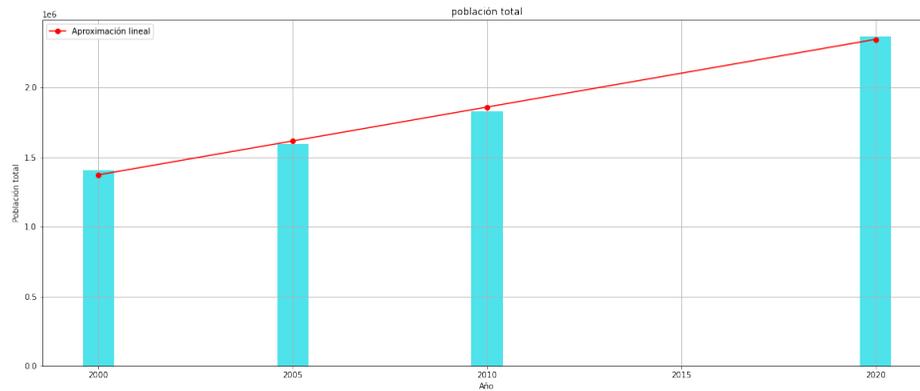


Figura 2.9: Registro poblacional de INEGI. Periodo 2000 a 2020

A pesar del crecimiento poblacional observado, para 1970 la mancha urbana de Querétaro no presentó grandes cambios. Es durante los siguientes 10 años que comienza a integrarse algunas tierras de riego (5,233 *ha*), para 1990 la zona con-urbana alcanzó las 10,153 *ha*. En la actualidad Querétaro representa una de las ciudades con mayor crecimiento a nivel país ya que, de acuerdo con el Sistema Urbano Nacional 2018 (SEDATU), para el año 2015 fue la décima área urbana más poblada en México.

Muchos artículos locales como el de Estrella 2021a, Estrella 2021b y Grieta 2021 destacan la deficiencia de agua en ciertas delegaciones del municipio de Querétaro, situación que se repite en otras entidades del estado y que el estado no ha podido solucionar, aún con los enormes proyectos como el **Acueducto II**.

Capítulo 3

Precipitación pluvial

La precipitación pluvial la entendemos como el fenómeno descrito por la caída de hidrometeoros en forma sólida o líquida desde la atmósfera¹ (usualmente desde la troposfera) hacia la superficie terrestre. La precipitación pluvial toma parte del ciclo del agua (o ciclo hidrológico)



Figura 3.1: Precipitación pluvial. Tomada de Pixabay

El ciclo hidrológico es el movimiento general del agua en la hidrosfera y la atmósfera, desde la evaporación, la precipitación y escorrentía que, a su vez, se divide en diferentes caminos dependiendo del ambiente. De lo anterior:

1. La escorrentía subterránea es mucho más lenta que la superficial. La lentitud (a veces inmovilidad) de la escorrentía subterránea confiere al ciclo algunas características

¹La atmósfera es un fluido complejo en el cual suceden múltiples interacciones

fundamentales, como que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones

2. Las aguas subterráneas no son mas que una de las fases o etapas del ciclo del agua. A veces se olvida esta obviedad y se explotan las aguas de una región como si nada tuvieran que ver con las precipitaciones o la esorrentía superficial, con resultados indeseables.

La precipitación trae múltiples beneficios a la vida en la tierra como regulador del sistema climático mediante la liberación de calor latente (humedad) en la atmósfera o regulador de la salinidad oceánica además de ser la principal fuente de agua potable para el sector agrícola y algunas actividades humanas.

3.1. Proceso de precipitación.



Figura 3.2: Ciclo hidrológico. Tomado de Pixabay.

La precipitación, como ya se dijo, hace referencia a la caída de hidrometeoros a la superficie terrestre. Los hidrometeoros son pequeñas gotas de agua o cristales de hielo agrupadas al rededor de aerosoles y, cuando alcanzan un gran tamaño, caen al suelo. Una vez en la superficie terrestre el agua puede agruparse en cuerpos de agua, ser absorbida por la tierra, llegar al drenaje público o consumido por algún ser vivo. Cuando el agua se encuentra en forma líquida y sobre ella existe una energía incidente (usualmente energía

solar) esta llega a evaporarse, ascendiendo a la atmósfera donde se agrupan al rededor de aerosoles para formar hidrometeoros, y así, repetir el ciclo.

3.1.1. Nubes.

Las nubes son porciones saturadas² de la atmósfera donde hidrometeoros se mueven a velocidades tan bajas que parecen suspendidas en el aire (Stull y col. 2018).



Figura 3.3: Una nube. Tomada de Pixabay

3.1.2. Precipitación.

Los hidrometeoros tienen una gran variedad de tamaños, que van desde pequeñas gotas, o cristales, de agua hasta grandes bolas de granizo. La precipitación ocurre cuando los hidrometeoros son tan grandes y lo suficientemente pesados que su velocidad aumenta haciéndolas descender con mayor velocidad a la superficie terrestre.

Uno de los parámetros de interés en la medición de la precipitación está relacionado con la tasa o intensidad a la que ésta cae. Se denomina intensidad de precipitación (R) [mm/h] al flujo de masa de precipitación colectada en una unidad de área por unidad de tiempo. Puede ser entendida como la cantidad de agua líquida que cae en un cierto intervalo de tiempo, si la intensidad de la lluvia fuera constante sobre en el tiempo.

De acuerdo con Houze (Houze Jr 2014), la precipitación ocurre en dos modos o regímenes claramente distinguibles: estratiforme y convectiva. La primera cae de nubes de tipo nimbostratus y la segunda cae desde densas nubes cumulus y cumulonimbus.

²ocurrida por adición de humedad o cambios en la temperatura y/o humedad.

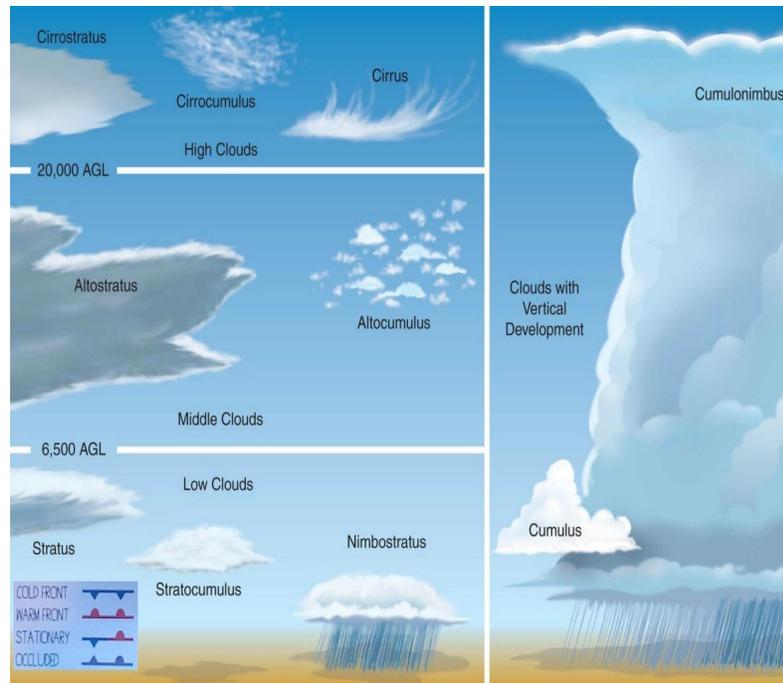


Figura 3.4: Tipos de nubes. Tomada de cienciorama.

La lluvia estratiforme es bastante homogénea y se caracteriza por desarrollarse en ambientes que presentan corrientes ascendentes débiles, limitando el crecimiento de los hidrometeoros, los cuales crecen principalmente por difusión de vapor en la parte superior de las nubes y por agregación y acreción en las regiones más cercanas a la base de la nube produciendo, por tanto, lloviznas o lluvias débiles. En cambio, la lluvia convectiva presenta fuertes corrientes ascendentes, incluso dentro de la nube, lo que permite que estas corrientes condensen rápidamente el vapor de agua circundante, generando un alto contenido de agua líquida, al cual es llevado hacia las partes altas de la nube, favoreciendo su crecimiento, el cual es mayormente por agregación o colección del agua líquida en la nube por gotas más grandes o partículas de hielo, seguido de colisiones lo que da origen a lluvias intensas.

3.2. Métodos de medición.

Se pueden distinguir dos tipos de instrumentos para medir la precipitación *in situ* y de percepción remota. Ambos miden la cantidad de precipitación que cae a la superficie terrestre y ambos métodos tienen ventajas bien descritas en diferentes proyectos además de

contar con métodos que permiten desarrollar ciertas aplicaciones hídricas como prevención o predicción.

3.2.1. Pluviómetros.

Dentro de la instrumentación *in situ* pueden considerarse dos categorías: instrumentos que miden y cuentan gotas individuales y aquellos que no. Los instrumentos que miden y cuentan las gotas son llamados disdrómetros; en cambio los que no, suelen medir el volumen de la suma de un conjunto de gotas y son llamados **pluviómetros**.

Los pluviómetros son instrumentos relativamente simples que se encargan de medir acumulaciones e intensidades de precipitación. Las mediciones con pluviómetros continúan siendo la base principal para numerosas aplicaciones en la investigación y fines operacionales al obtener mediciones cuantitativas de la cantidad de lluvia acumulada, lo cual resulta útil en ámbitos como la agricultura, monitoreo del recurso hídrico, calibraciones y la evaluación de estimaciones de lluvia por satélite. El pluviómetro de tipo balancín (de registro) es de los más utilizados, contiene un embudo que canaliza el agua hacia un par de contenedores que están sobre un eje horizontal inestable, mismo que permite la decantación de estos contenedores al acumularse una cantidad de agua pre-especificada. Este movimiento activa un interruptor electrónico que, a través de pulsos, realiza una medición relacionando estos pulsos con una acumulación de la lluvia.

Una de las desventajas de este tipo de pluviómetros es que necesita acumular cierto *peso* en su contenedor para realizar el registro, lo cual significa que intensidades de precipitación bajas, lluvias muy ligeras o lloviznas pueden pasar inadvertidas. Otras fuentes de error para los diversos tipos de pluviómetros son por efectos del viento, principalmente en la horizontal debido al arrastre de las gotas por las ráfagas, lo cual impide muchas veces que caiga en el colector; pérdidas por evaporación mientras es acumulada en el contenedor, salpicaduras o errores de calibración, entre otros.

3.2.2. Radares.

El **radar** meteorológico es uno de los principales exponentes de los instrumentos de percepción remota, funciona al emitir un pulso de onda que viajará en el espacio hasta impactar con un blanco, parte de la energía restante se dispersa del blanco hacia el radar que registra esta energía. Por las cualidades que posee el radar y la disponibilidad de uno en el estado, se eligió como fuente principal de información para el desarrollo de esta tesis.

Capítulo 4

Radar meteorológico

El radar (RAdio Detection And Ranging) es un sensor activo, particularmente valioso en la detección, rastreo y pronóstico de tormentas, tornados o huracanes. Además, ya que el radar puede medir precipitaciones sobre grandes áreas, se ha convertido en una herramienta muy útil para los hidrometeorólogos e hidrólogos.

Fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial para detectar y rastrear aeronaves y barcos, mediante pulsos intensos de microondas (250-1000 kW) transmitidos en intervalos de entre 0.5 a 10 μ s de duración llegando a emitir de 50 a 2000 pulsos por segundo para después ser reflectados en una antena parabólica. Esta antena puede rotar e inclinarse para medir en cualquier azimut¹ y elevación.

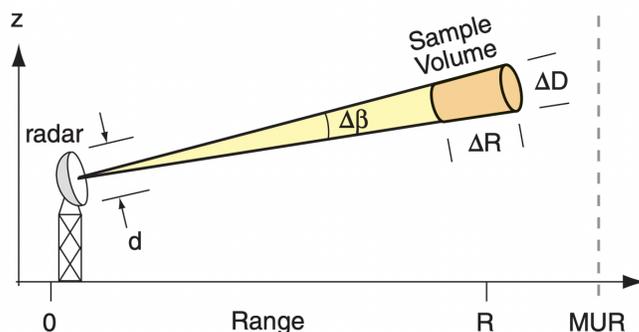


Figura 4.1: Pulso de radar. MUR es la distancia máxima no ambigua. Tomada de Stull y col. 2018

Algunos radares realizan un cambio de frecuencia entre la señal recibida en el instante

¹Se refiere a un ángulo de la orientación sobre la superficie de una esfera real o virtual.

t y la recibida en el instante $t + 1$ que depende de la velocidad con la que se mueve un objeto lo cual permite determinar las velocidades radiales de los vientos y de caída de las partículas. Este efecto se conoce como Doppler y a los radares que son capaces de emplear este modo se les llama radares Doppler.

Un radar no es un instrumento, sino un conjunto de dispositivos que trabajan como un todo y en su conjuntose le da el nombre de sistema de radar o simplemente radar. El sistema de radar esta compuesto por el transmisor el cual produce un pulso con una potencia y una frecuencia definida por el radar; la antena que irradia la señal e intercepta la señal reflejada; el receptor que detecta, amplifica y transforma la señal recibida y la envía a la pantalla de despliegue; una guía de onda por donde viaja la señal desde que el transmisor hasta el cuerno alimentador y la antena; un switch transmisor/receptor que cierra la señal del transmisor cuando el receptor está operando y lo protege de las altas potencias enviadas por el transmisor y de la misma forma se cierra a la señal del receptor cuando el radar está en modo de transmisión, un esquema del funcionamiento se muestra en la figura 4.1.

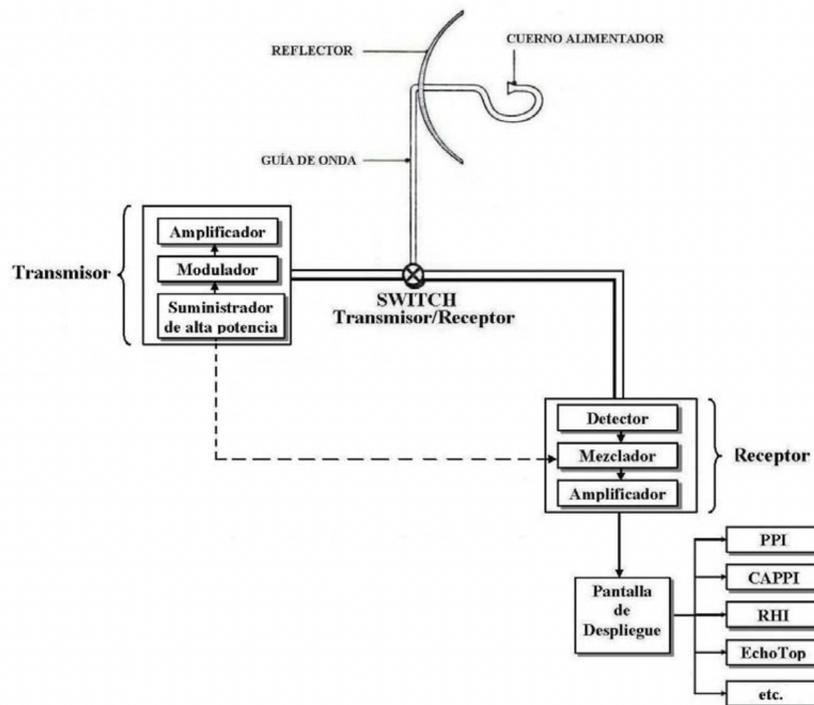


Figura 4.2: Componentes del sistema de radar. Tomada de unican.

4.1. Ecuación del radar

Un radar emite un pulso intenso de microondas con poder energético² P_T . Las partículas en la atmósfera dispersan una minúscula cantidad de energía P_R en dirección al radar. La relación entre el poder recibido y el transmitido puede modelarse con la **ecuación del radar**

$$\frac{P_R}{P_T} = [b] \frac{|K| R_1 Z}{L_a R Z_1} \quad (4.1)$$

Cuyo resultado es adimensional. Con $|K|$ el índice dieléctrico, R [km] la distancia entre el radar y el objetivo y Z [mm^6m^{-3}] el factor de reflectividad el cual se define como el factor de la suma de los diámetros de gotas de gran diámetro en un volumen dado (ecuación 4.2).

$$Z = \frac{\sum^N D^6}{Vol} \quad (4.2)$$

Z_1 [mm^6m^{-3}] el factor unidad de la reflectividad, R_1 es un factor de la distancia, L_a es un factor atmosférico de atenuación y b es un factor del radar.

Para los meteorólogos el factor de reflectividad Z es la variable de mayor interés ya que un factor grande en Z se relación una una precipitación intensa. Este factor varia en un gran rango de valores, por lo que se usa una escala logarítmica denominada decibeles de Z (**dBZ**) y puede ser calculado en función de la relación P_R/P_T calculando el logaritmo de la ecuación de radar (**ecuación 4.3**)

$$dBZ = 10[\log(\frac{P_R}{P_T}) + 2\log(\frac{R}{R_1}) - 2\log(|\frac{K}{L_a}|) - \log(b)] \quad (4.3)$$

En la siguiente tabla se muestran algunos rangos típicos de reflectividad presentes en imágenes de radar

dBZ (rango)		Sensación
-28		Niebla
-12		Insectos en el aire
25	30	Lluvia ligera
40	50	Lluvia
75 +		Lluvia intensa

²Algunos radares como los WSR-88D tienen poder energético de 750 kW

4.2. Relación $Z - R$

Aunque el factor de la reflectividad es un valor útil no puede ser utilizado de forma directa en aplicaciones hídricas. Una relación entre la precipitación y la reflectividad que se describe en la ecuación 4.4.

Los valores a y b son constantes empíricas que permiten mejorar los resultados de aplicar esta relación por la afección de la velocidad de las gotas de lluvia, la evaporación parcial de las gotas mientras caen entre otros factores.

$$Z = aR^b \quad (4.4)$$

Por simplicidad la información presentada de forma pública es catalogada en categorías que representan la intensidad de las precipitaciones y se muestra en la figura 4.3

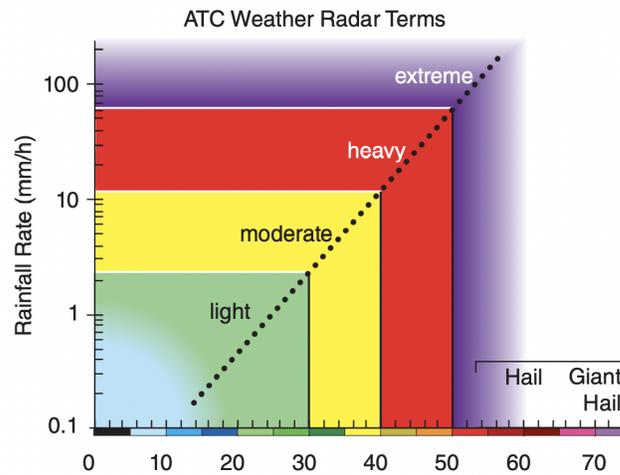


Figura 4.3: Intensidad de los radares (dBZ). Tomada de Stull y col. 2018

4.2.1. Los datos de radar

La información almacenada por un radar varía en función del fabricante, en general un bloque de información es el resultado de un barrido del radar. La información generada es codificada junto con otros metadatos que ayudan al meteorólogo a caracterizar el radar.

La decodificación de los bloques de información es realizado por software especializado, usualmente establecido en la estación meteorológica, por lo que su uso fuera de las esta-

ciones es altamente complicado. Ello ha motivado el desarrollo bibliotecas que permiten decodificar información de radar para lograr su manipulación fuera de las estaciones.

Los datos de radar (sin procesar) pueden ser aprovechados para representar de forma visual la distribución espacial de los campos de precipitación. No obstante, si se desea usar la información para estudios cuantitativos, se deben procesar los datos para disminuir errores típicos como: ecos de edificios, aves u otros cuerpos, atenuación de la señal o incertidumbre en la relación Z/R.

Para la manipulación y decodificación de la información se usaron las bibliotecas open-source wradlib y pyart; desarrolladas en **Python** un lenguaje de programación de alto nivel fácil de aprender y muy popular en el área científica. Aunque ambas bibliotecas permiten manipular la información, por facilidad se usará wradlib para el pre-procesamiento de la información y pyart para la visualización de los resultados.

Capítulo 5

Sistemas de almacenamiento

Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) constituyen una alternativa para el suministro de agua, principalmente en países con restricción de recursos hídricos.

El empleo de los SCALLs puede ahorrar un 50% del uso de agua en promedio en una casa, ya que el agua captada sin tratamiento de potabilización puede ser utilizada en diversas actividades, como el uso del excusado, el empleo en las lavadoras, la limpieza general y el riego de plantas. Además, el agua de lluvia se encuentra libre de cloro y de manera adicional no cuenta con altas concentraciones de sales. Para aprovechar el agua en el consumo humano, se debe cumplir la normativa NOM-127-SSA1-1994. Esta norma establece que se debe contar con un área de captación limpia y lisa, no albergar mascotas ni ser utilizada como bodega, el agua debe tener una pendiente que permita el libre flujo hacia el punto, o puntos, de recolección; por lo cual, es necesaria una serie de estudios para determinar su calidad o su potencia de empleo y así poder definir un sistema de potabilización, para su consumo y evitar enfermedades causadas por ingesta de agua contaminada.

5.1. SCALLs en México

En México se desarrollan diferentes proyectos que implementan SCALLs. En Chiapas por ejemplo, se cuenta con 33 hoyas de agua con capacidad de 1,000 m³ cada una, ubicadas en 26 localidades indígenas las cuales benefician a 15,300 habitantes, o en la comunidad

de Cherán, en Michoacán, se instaló un sistema de captación pluvial, el cual tiene una capacidad de 20,000 m³, la hoya cuya área de captación es de 16,000 m² abastece a una planta purificadora para envasar garrafones con una capacidad de 1,000 garrafones por día. En la Ciudad de México, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) colabora con el gobierno de la ciudad para dotar de agua potable a la ciudadanía con SCALLs. El mandatario de la ciudad (en 2016) señaló que se instalaron 479 SCALLs. El secretario general de la UNAM indicó que este modelo ya es replicado en ocho municipios de Oaxaca, Puebla y Tlaxcala (Roa 2017). De forma federal el gobierno tiene un programa llamado *Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales* (PROCAPTAR), cuyo objetivo es dotar de agua a la población rural de México.

5.2. Ecuaciones

La cantidad de agua disponible en una determinada región depende principalmente del régimen de precipitación incidente. El régimen de precipitación puede traer consigo diferentes problemas si es considerado como el promedio en las observaciones, aún con muchos años de observación, el promedio es un valor de referencia poco efectivo pues la precipitación real que ocurre cada año tiene un excedente el 50 % de las veces y un déficit el porcentaje restante.

Una forma de calcular el volumen de agua cosechable en una superficie es multiplicando el coeficiente de captación por el producto de la superficie de captación por los milímetros de lluvia que caen en la región (**ecuación 5.1**).

$$VAC = coef * [mm] * S[m^2] \quad (5.1)$$

La ecuación de volumen anual promedio se obtiene de la ecuación 5.2

$$\bar{V} = \frac{\bar{p} * A * k}{1000} \quad (5.2)$$

Donde A es el área de la sección transversal de las instalaciones de captación [m²], \bar{p} es el promedio de precipitación anual y k es el coeficiente de escurrimiento de acuerdo al

material de las instalaciones.

Para la obtención de la demanda de agua mensual de una vivienda se utiliza la ecuación

5.3

$$D_m = \frac{C_a * H * d}{1000} \quad (5.3)$$

Donde D_m es la demanda de agua mensual de la vivienda [m^3/mes], C_a es el consumo de agua en el mes, H el número de habitantes y d días del mes.

Capítulo 6

Materiales y métodos

La información usada en este trabajo proviene de dos fuentes de información. La primera es el conjunto de datos de radar de efecto Doppler de banda “C” de la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro (CEAQ), ubicado en el cerro de la Ronchera en Querétaro, con coordenadas (20.78017009 N, -100.55042993 E) a 2724 msnm y una cobertura radial de 240 km (ver Figura 6.2). Por otro lado, por medio de la Unidad de Transparencia se solicitaron los datos de consumo registrados por la CEAQ para el periodo de 2014 a 2020 con número de expediente **UTCEA-0014/2021**.

Los datos de radar son del periodo de marzo de 2015 a abril de 2017. El primer paso fue aplicar un pre-procesamiento de los datos para disminuir la incertidumbre. La información pre-procesada fue utilizada para generar nuevos archivos de radar con acumulados semanales, mensuales y anuales, con los cuales se graficaron mapas de tipo indicador de posición (PPI) de toda la zona de cobertura y de la zona de interés, a saber del estado de Querétaro.

Los datos de la Unidad de Transparencia fueron recibidos en formato PDF¹ por lo que se tuvo que realizar una captura de la información a un formato CSV² que facilita su lectura. Estos datos fueron ordenados y organizados para calcular diferentes variables como los consumos totales, consumos promedios, además de conocer las necesidades hídricas registradas por la CEAQ.

¹Documento de formato portátil

²Valores separados por coma

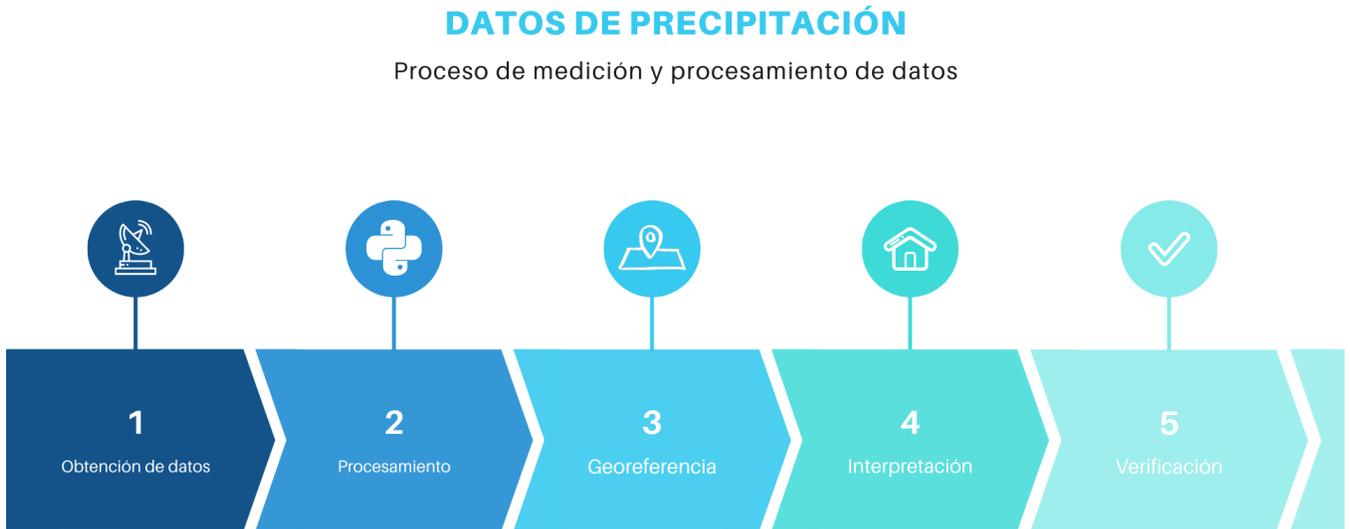


Figura 6.1: Cadena de operaciones

6.1. Datos de radar

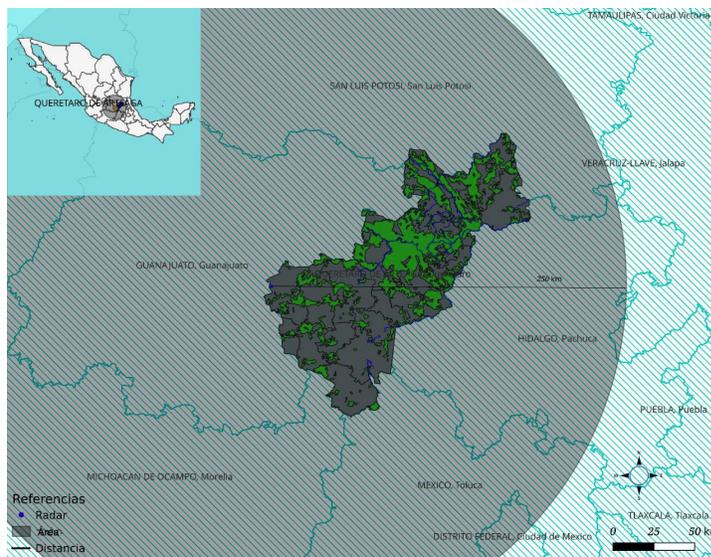


Figura 6.2: En azul la ubicación del radar y su área de cobertura

El radar modelo EXTOP03 manufacturado por MVC, S.A., con un proceso de compresión de pulsos como parte de la red de operación meteorológica fue instalado en 2005, opera con transmisores basados en TWT³, capaz de emitir una potencia máxima de 8kW y generar pulsos de hasta 40 μ s (O’Hora y col. 2007). Un resumen de la información del radar se muestra en la tabla 6.1

	MCV EXTOP03
Tipo de alimentación de antena	Offset
Ancho de pulso de la antena	1.15 μ s
Ganancia de la antena	44 dB
Tipo de transmisor	TWT
Pico de poder del trasmisor	8 kW
Frecuencia de operación	5600 - 5650 MHz
Ancho de pulso	1, 5, 30, 40 μ s
PRF	600, 1000, 1200 Hz

Tabla 6.1: Características del radar.

Se contó con datos para el periodo de marzo de 2015 a abril de 2017, haciendo un total de 139,031 archivos de radar. La frecuencia de barrido varia de 5 a 20 minutos, debido a la programación del del radar, que disminuyen o aumentan dependiendo de la existencia de algún fenómeno de precipitación, esto para optimizar la vida útil del radar.

Los datos de radar fueron pre-procesados siguiendo la cadena de procesamiento mostrada en Pfaff y col. 2012 la cual toma en cuenta las fuentes de error típicas, ecos en la tierra, la atenuación de la señal del radar y las incertidumbres en la relación Z/R, como se muestra en la Figura 6.3

6.2. Cadena de procesamiento

6.2.1. Estructura de datos

El formato en el nombre de los datos toma una formato similar a **RAW_NA_000_236_20160729020609**, donde los últimos dígitos del nombre toman los valores de la fecha del muestreo en el siguiente orden

YYYYMMDDHHMMSS

³Traveling-Wave Tube, una especie de tubo de vacío usado en electrónicos para amplificar señales en el rango de las microondas

Esto se aprovechó para contener las rutas de los archivos en una estructura de datos, en python, de tipo diccionario que sigue la siguiente estructura

$$\{ \text{YYYY: } \{ \text{MM: } \{ \text{DD: } [file_1, file_2, \dots, file_n] \} \} \}$$

La estructura permite realizar los acumulados de forma ordenada agrupando los archivos en tres niveles diferentes, por año, por mes y por día, siendo esta última el acumulado de precipitación más pequeño generado.



Figura 6.3: Cadena de procesamiento de datos

Para la aplicación de la cadena de procesamiento descrita por Pfaff y col. 2012 se uso de la biblioteca wradlib (Heistermann y col. 2013) en una computadora con sistema operativo Pop OS asado en Ubuntu de 64 bits, procesador Intel(R) Core(TM) i9-9900K CPU @ 3.60GHz, con 16 CPUs y 8 núcleos; ubicada en el Laboratorio de Ciencias Atmosféricas de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación del Campus Juriquilla (UNAM).

El procesamiento de la información minimiza los problemas mencionados en el capítulo 4 y resaltados al inicio del capítulo; para ello se aplicaron diferentes filtros a cada archivo de radar. El primer filtro, remueve ecos (Gabella y col. 2002) provenientes de objetos sobre la superficie de la tierra.

El segundo paso fue la corrección de atenuación asigna una ganancia a los datos en situaciones donde hay lluvias intensas. wradlib cuenta con tres implementaciones diferentes (Hitschfeld y col. 1954, Harrison y col. 2000, Krämer y col. 2008) aprovechando el filtro de Kramer (Krämer y col. 2008) por su enfoque a radares de banda “C”, como en nuestro caso.

Después de la combinación de ambos resultados, se obtiene el factor de reflectividad modificado a la cual se le aplica la relación Z/R, que se mostró en la **ecuación 4.4**. Almacenado, en periodos de un día, en estructuras de tipo diccionario, que después fueron almacenadas en estructuras de tipo radar que aprovechan los metadatos de los datos originales pero con la información de los acumulados diarios y cuya construcción facilita la representación visual de la información.

6.2.2. Acumulados

Los acumulados son la suma de la intensidad de precipitación generada después de pasar por la cadena de procesamiento, la forma en que se trabajo fue construyendo acumulados de un día y con ellos se generaron acumulados mensuales, trimestrales y anuales. El archivo de tipo radar mantiene una relación geográfica que permite la manipulación y extracción de la información. Para conocer el acumulado total del estado se realizaron tres configuraciones diferentes, en la primera se construye una malla de 14 x 14, a cada una se le calcula su centro al calcular las mediatrices y se considera el acumulado de ese centro; para las dos restantes se realizó una construcción de diferentes paralelepípedos inscritos en las fronteras políticas del estado.

La aplicación de la cadena de procesamiento no logra eliminar toda la incertidumbre de los datos y en los resultados de precipitación equivalente deja registro con valores en la escala de $\times 10^5$ para periodos cortos como un día. Con lo anterior, y siguiendo los datos de precipitación mostrados en la tabla 2.4, se estableció un límite superior para los acumulados diarios, además se reemplazaron los datos nulos con el valor cero.

6.3. Datos de consumo

Los datos de consumo fueron solicitados por escrito a la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Querétaro y a la Comisión de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Querétaro; solicitando los registros hídricos para el periodo de 2010 a 2020. La respuesta a la solicitud indicaba la falta de registros para periodos previos a 2014 y le acompañaba un archivo electrónico en formato PDF⁴ con información para el periodo de 2014 a 2020

Este documento consta de 32 páginas, 29 de las cuales eran tablas de información de consumo hídrico, separada en nueve rublos: doméstico apoyo social, doméstico, económico, doméstico medio, doméstico alto, comercial, industrial, público oficial, público concesionario y beneficencia; sin embargo hubo periodos donde sólo se presentó el consumo total mensual.

Campo	Tipo de dato
Doméstico	Float
Doméstico apoyo social	Float
Doméstico medio	Float
Doméstico alto	Float
Económico	Float
Comercial	Float
Industrial	Float
Público Oficial	Float
Público Concesionario	Float
Beneficencia	Float

Tabla 6.2: Tipo de datos y campos.

La información fue procesada usando la biblioteca Pandas para la lectura y manipulación de la información. Los datos fueron agrupados de acuerdo a su rublo y a la fecha de registro. La combinación de estos resultados fueron presentados usando la biblioteca matplotlib.

⁴Portable Document Format

Capítulo 7

Resultados.

7.1. Radar atmosférico

7.1.1. Cadena de procesamiento

Los datos en crudo son mostrados en las figuras 7.1, 7.2, muestran el factor de reflectividad para el día 20 de junio de 2015. Aunque ambas bibliotecas, pyart y wradlib, permiten graficar imágenes de radar para la generación de figuras, la mayoría de los resultados mostrados son generados con pyart.

'QUERETARO_RADAR' 0.5 Deg. 2015-06-20T06:21:16Z
Equivalent reflectivity factor

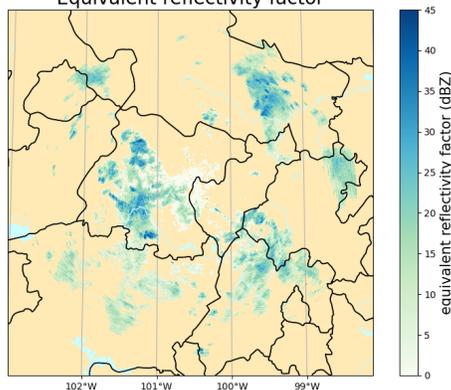


Figura 7.1: Reflectividad equivalente, usando pyart

Reflectividad

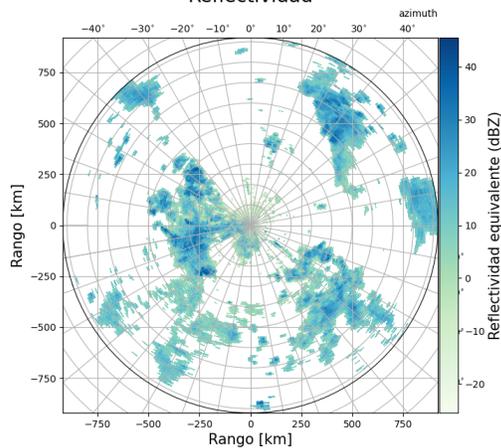


Figura 7.2: Reflectividad equivalente, usando wradlib

La Figura 7.3 muestra el resultado binario (derecha) generada por la aplicación del

filtro Gabella (Gabella y col. 2002) al factor de reflectividad (izquierda).

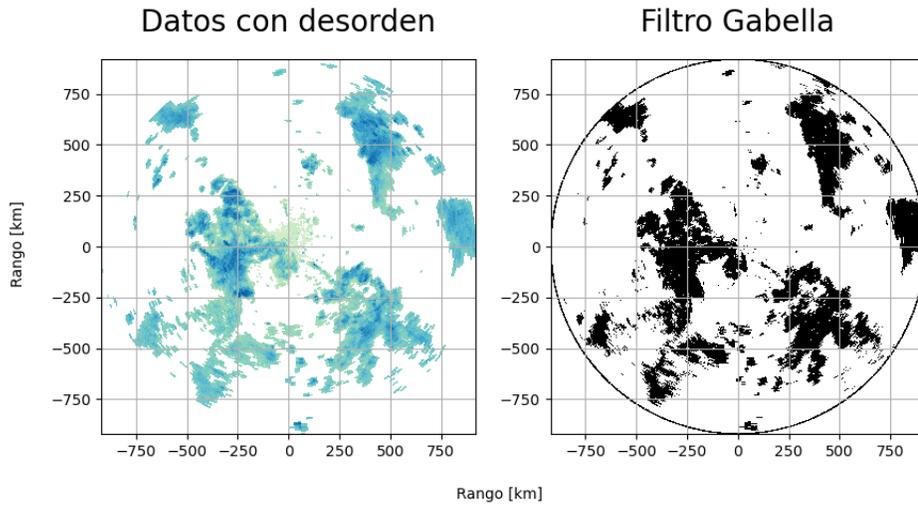


Figura 7.3: Representación habitual del resultado binario del filtro Gabella

Para lograr la remoción de ecos se hace una interpolación de la posición de los ecos a los datos en crudo. El resultado final del filtro se muestra en la Figura 7.4

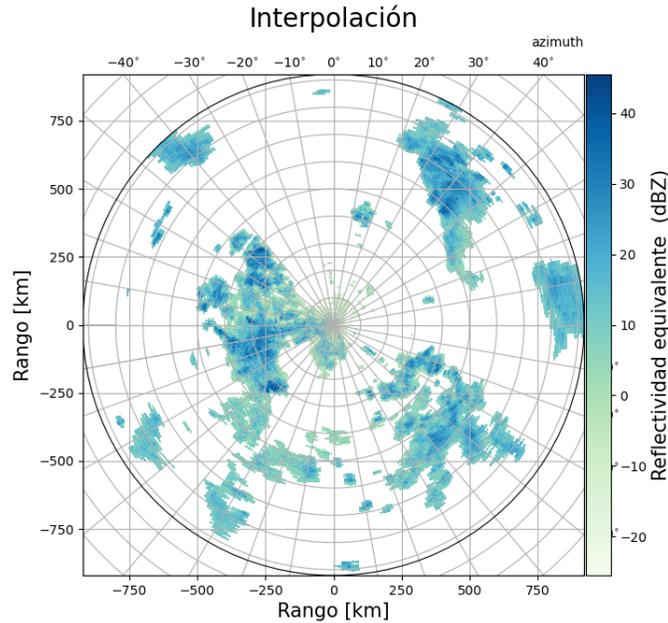


Figura 7.4: Aplicación del filtro Gabella a los datos en crudo.

La aplicación de los métodos de corrección de atenuación se observa en Figura 7.10, notar que la primera Figura 7.5 muestra el rayo tomado para representar la aplicación de

los métodos.

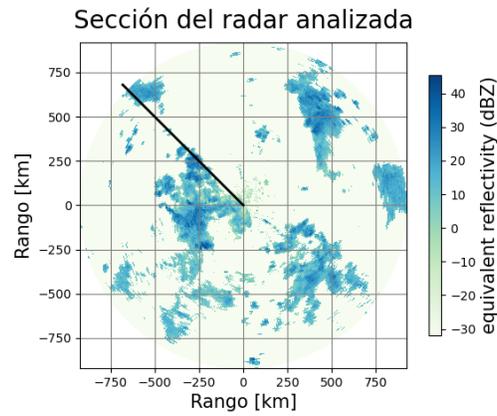


Figura 7.5: Rayo del barrido seleccionado.

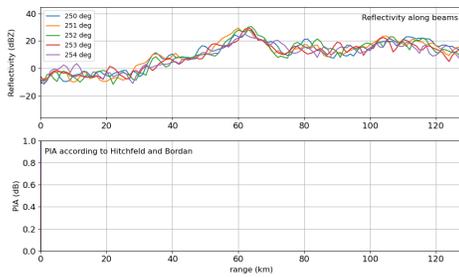


Figura 7.6: Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Hitschfeld y Bordan

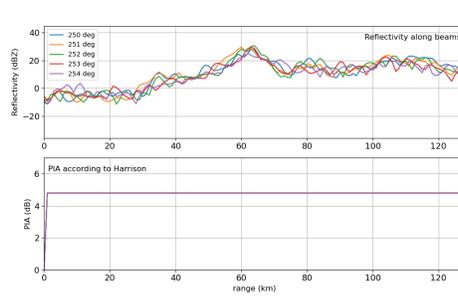


Figura 7.7: Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Harrison

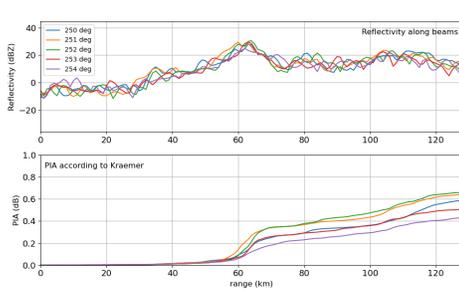


Figura 7.8: Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Kreamer

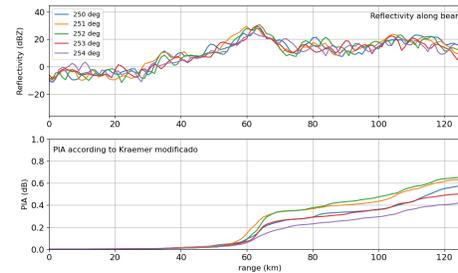


Figura 7.9: Filtro de atenuación siguiendo el algoritmo de Kreamer modificado

Figura 7.10: Aplicación del filtro de atenuación sobre un rayo.

Por último, el resultado de la transformación de reflectividad $[Z]$ a intensidad de lluvia

[R] se observa en la Figura 7.11. ,

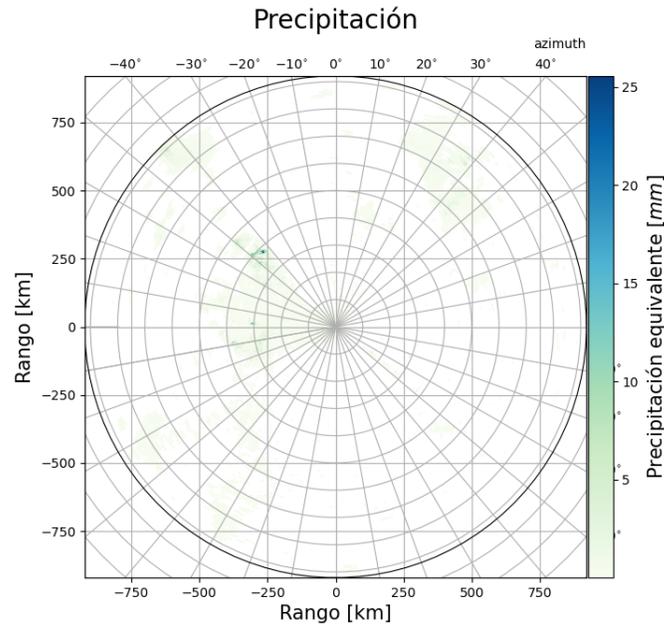


Figura 7.11: Transformación de reflectividad equivalente a precipitación equivalente

7.1.2. Acumulados

Los acumulados generados con los radares de intensidad de precipitación son presentados de forma trimestral y anual; para toda el área de cobertura y para la zona de estudio.

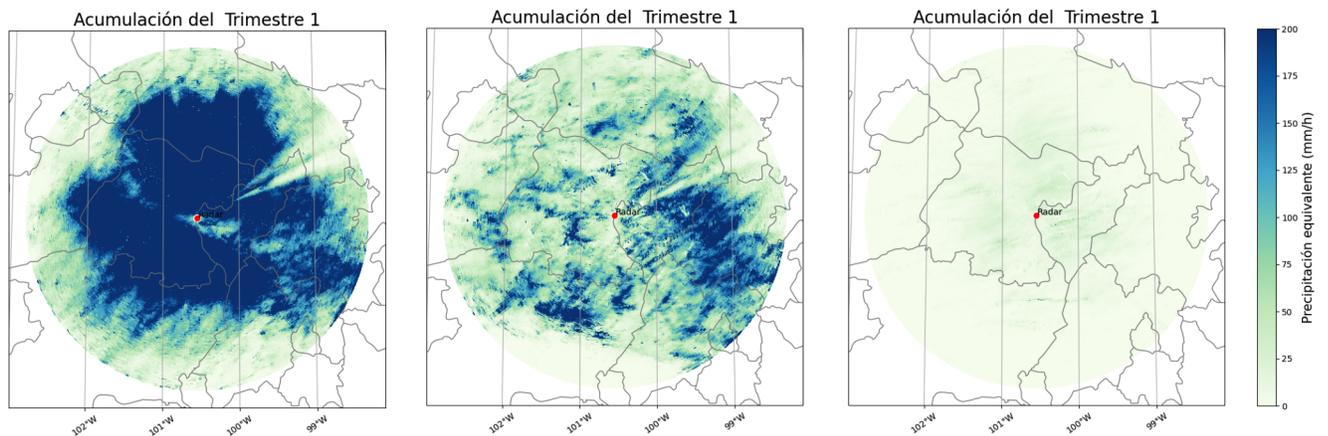


Figura 7.12: Acumulados del primer trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017

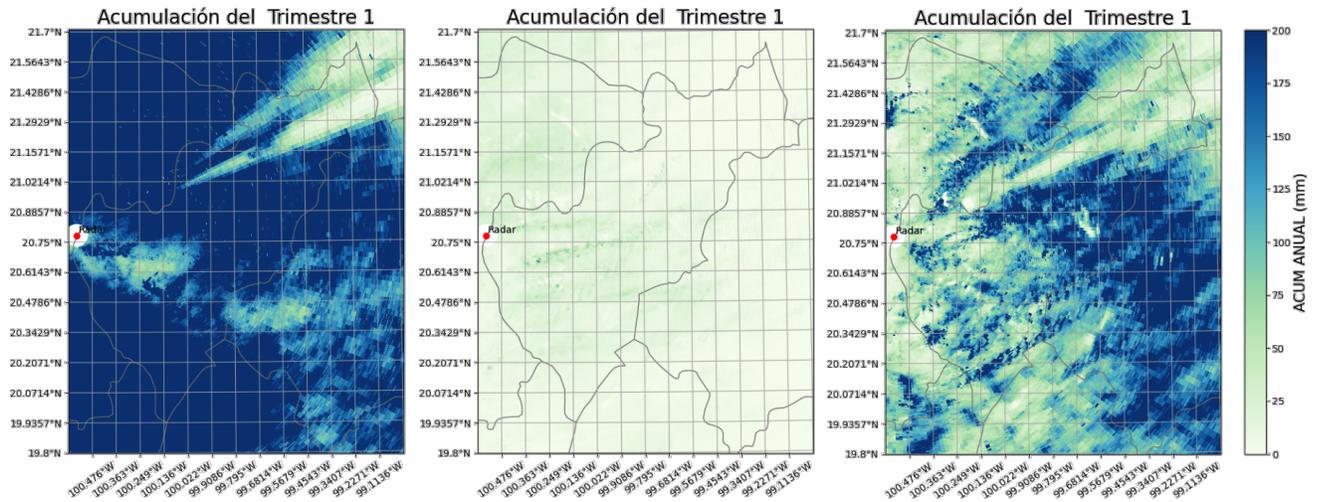


Figura 7.13: Acumulados del primer trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017

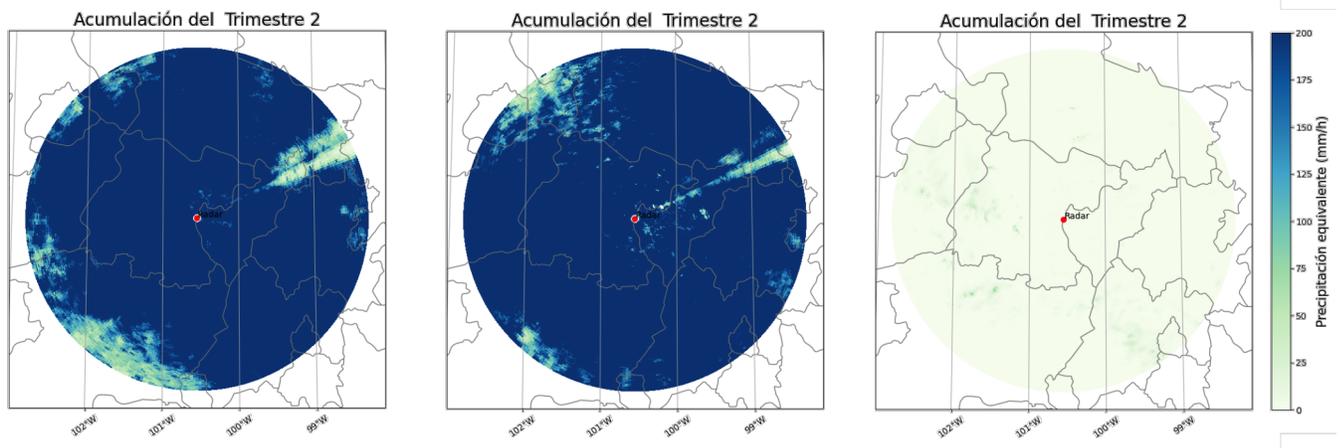


Figura 7.14: Acumulados del segundo trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017

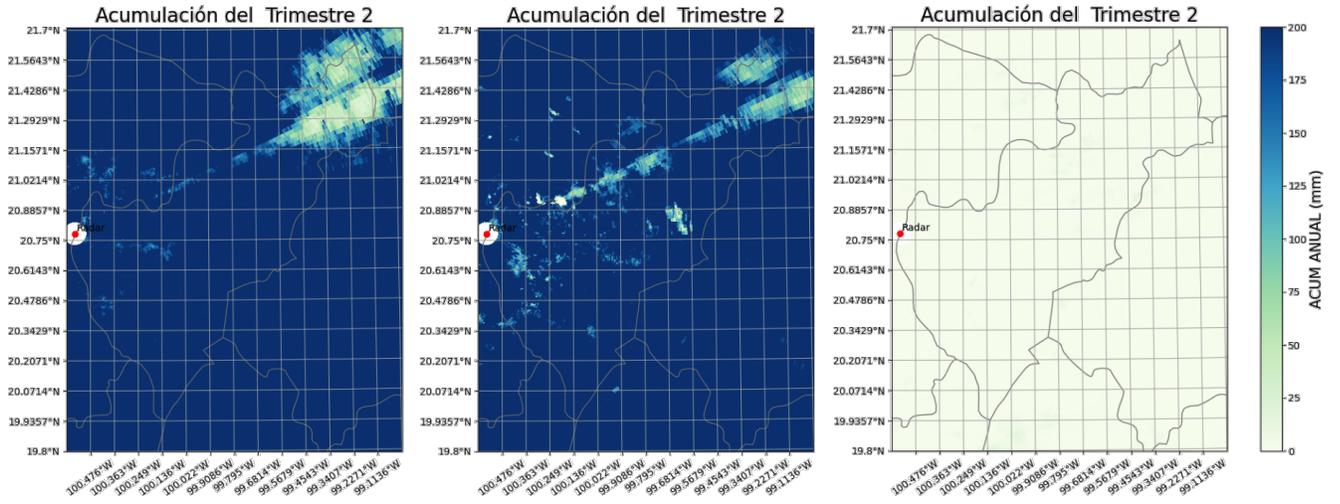


Figura 7.15: Acumulados del segundo trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017

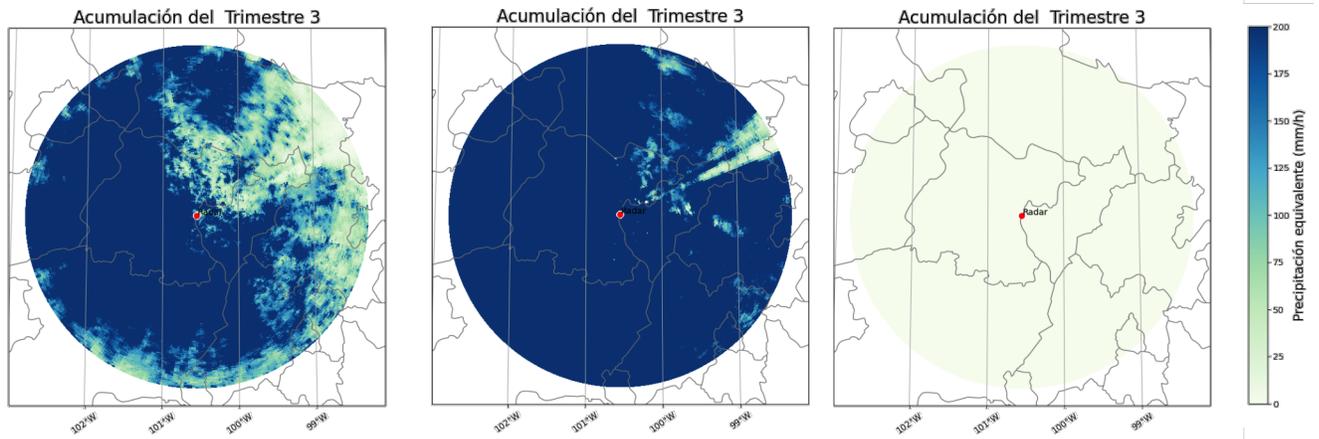


Figura 7.16: Acumulados del tercer trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017

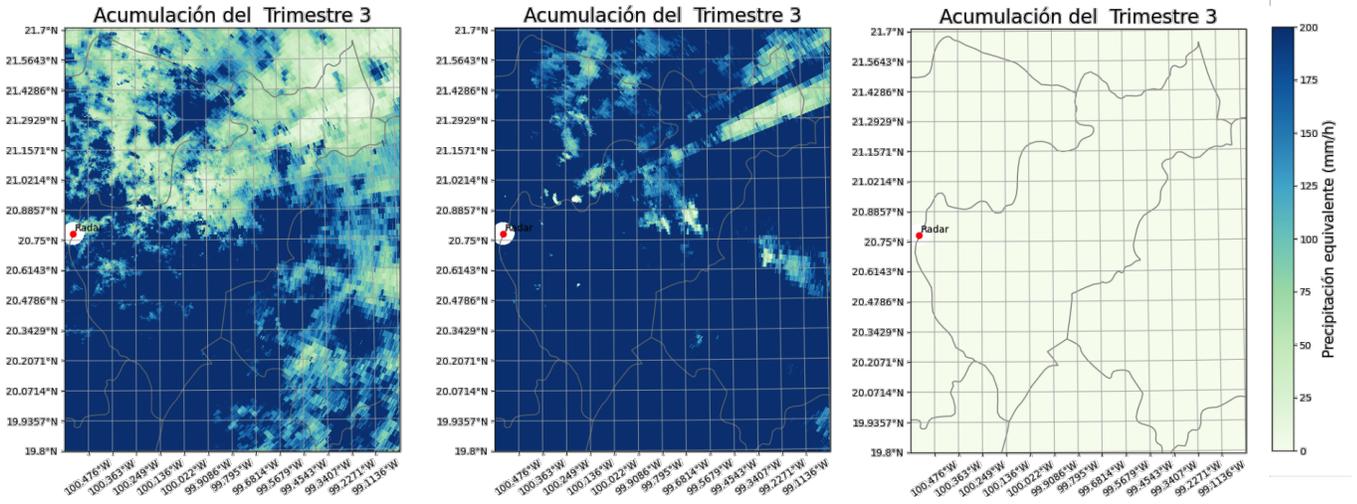


Figura 7.17: Acumulados del tercer trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017

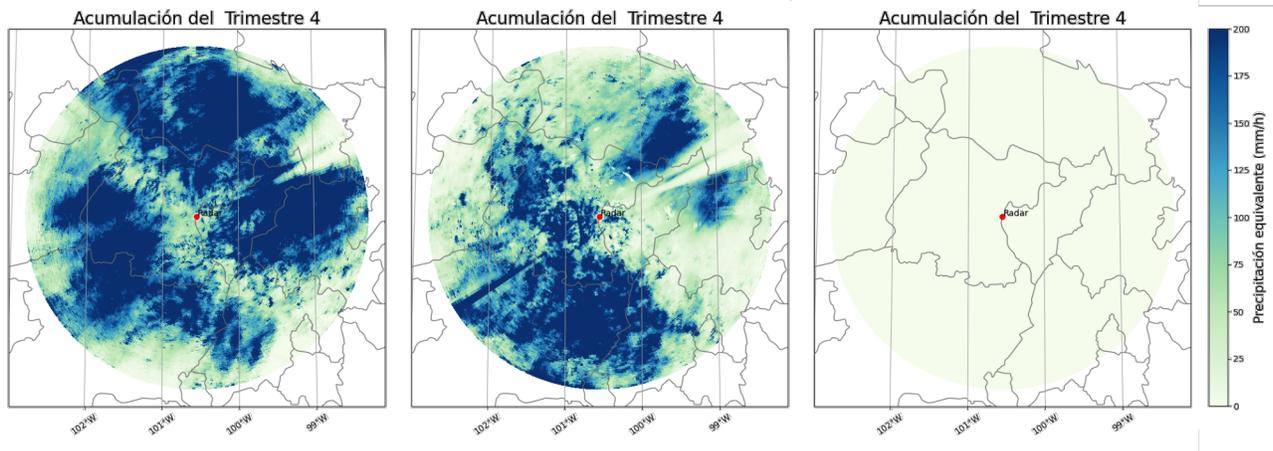


Figura 7.18: Acumulados del cuarto trimestre de la zona de cobertura para los años 2015, 2016 y 2017

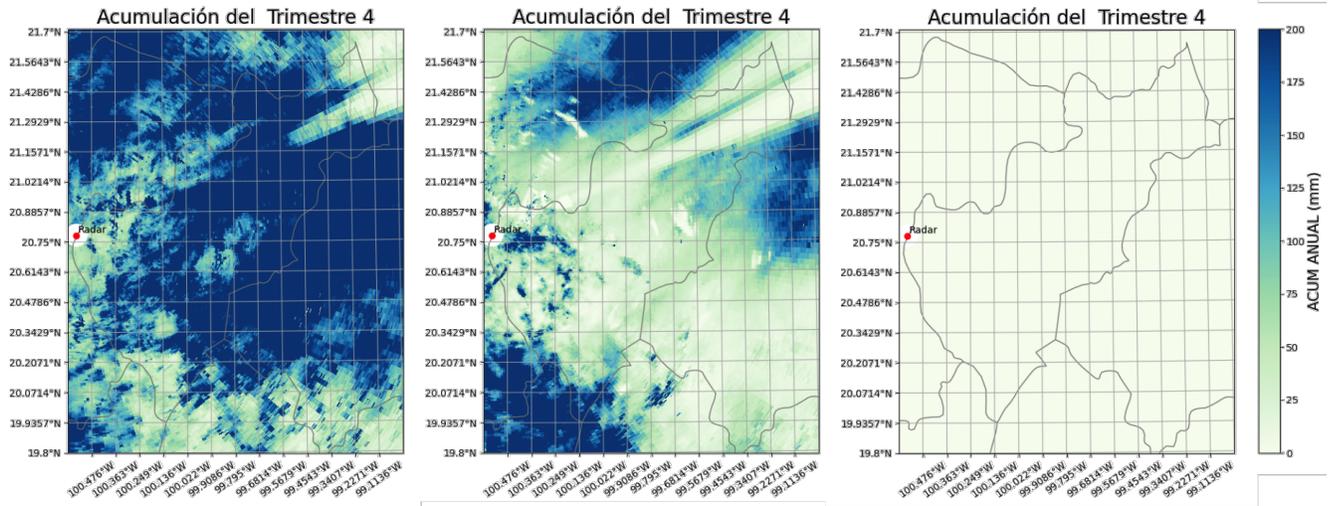


Figura 7.19: Acumulados del cuarto trimestre de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017

En la Figura 7.20 se muestra el acumulado anual, generando los mismos resultados que los mostrados en los acumulados trimestrales.

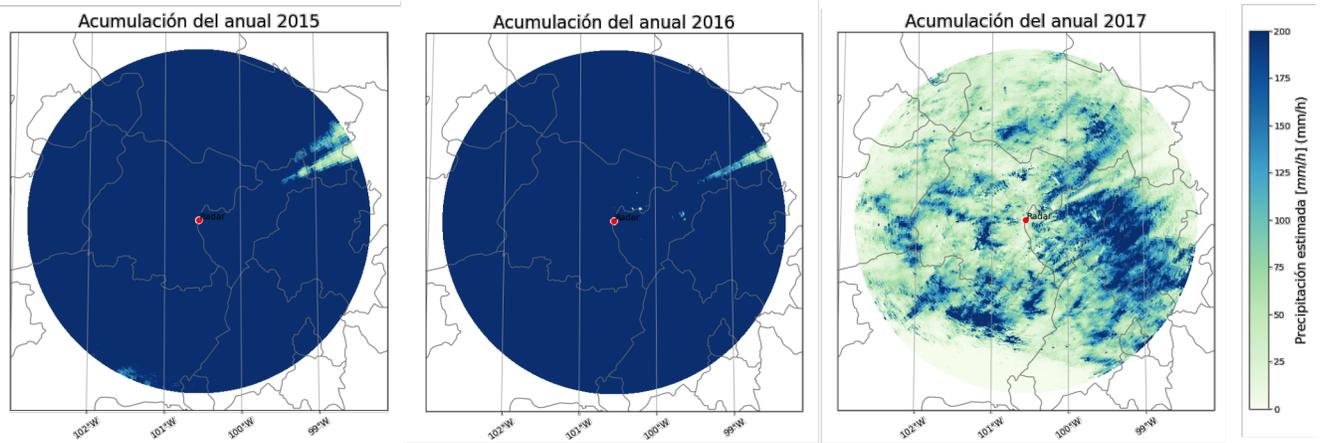


Figura 7.20: Acumulados anuales de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017

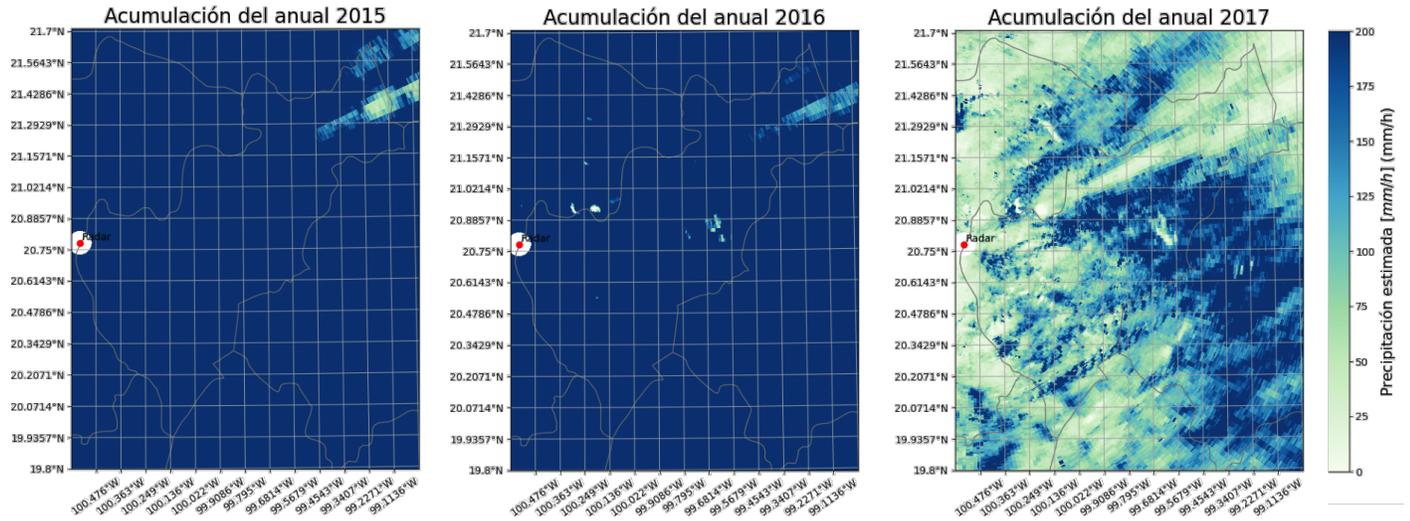


Figura 7.21: Acumulados anuales de la zona de interés para los años 2015, 2016 y 2017 sobre el área de estudio, respectivamente

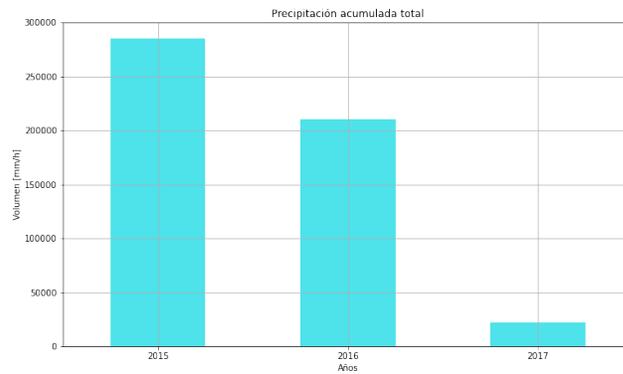


Figura 7.22: Precipitación numérica del acumulada anual

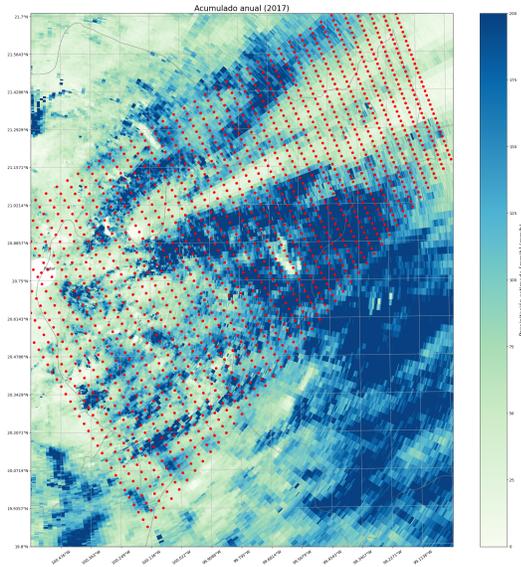


Figura 7.23: Primera aproximación, un rectángulo sobre el estado.

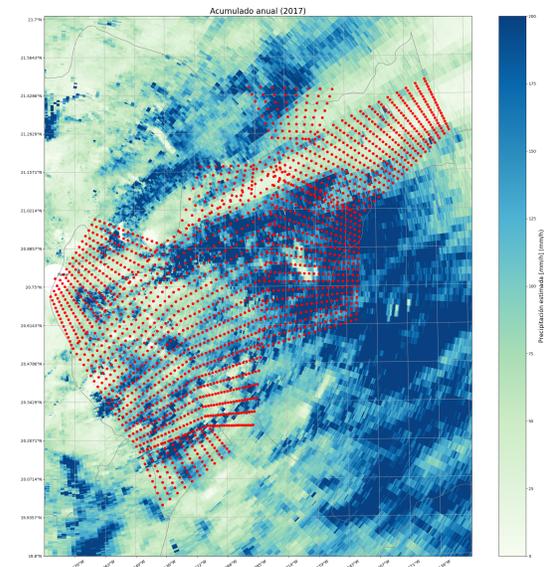


Figura 7.24: Segunda aproximación, seis segmentaciones en el estado

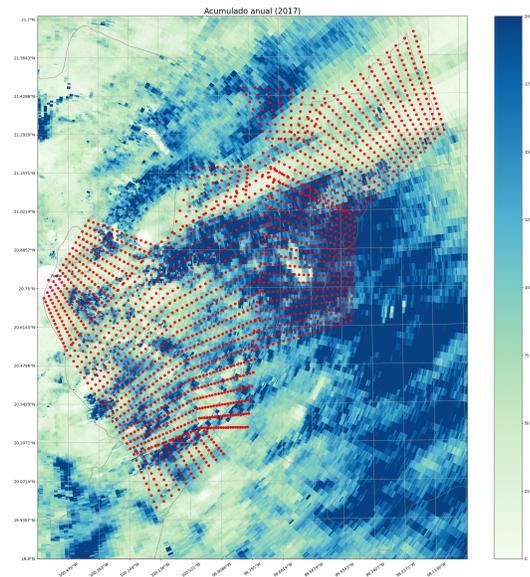


Figura 7.25: Tercera aproximación, ocho segmentaciones en el estado.

Figura 7.26: Diferentes segmentaciones al estado.

Los resultados numéricos son introducidos en las siguientes figuras

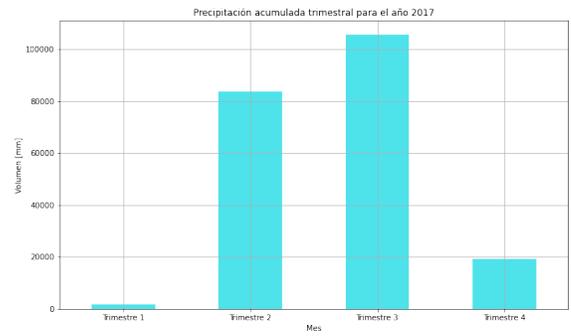
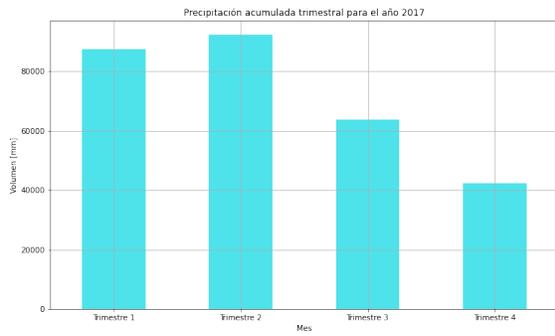


Figura 7.27: Acumulación trimestral para 2015 Figura 7.28: Acumulación trimestral para 2016

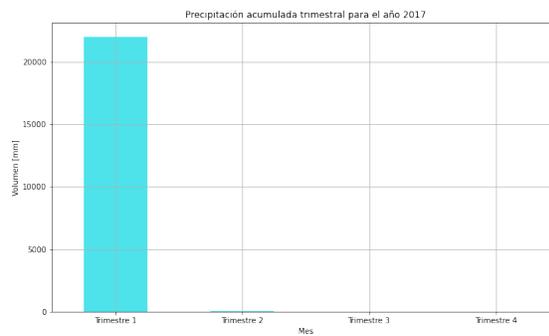


Figura 7.29: Acumulación trimestral para 2017

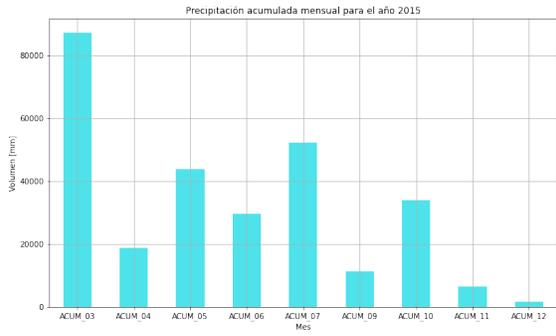


Figura 7.30: Acumulación mensual para 2015

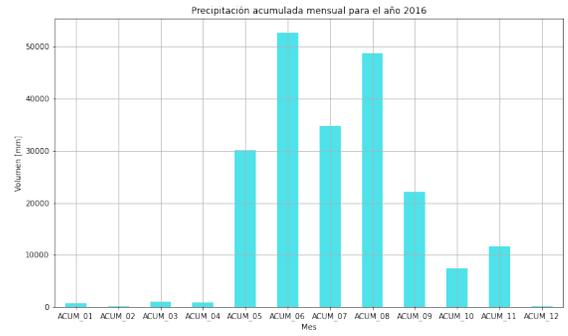


Figura 7.31: Acumulación mensual para 2016

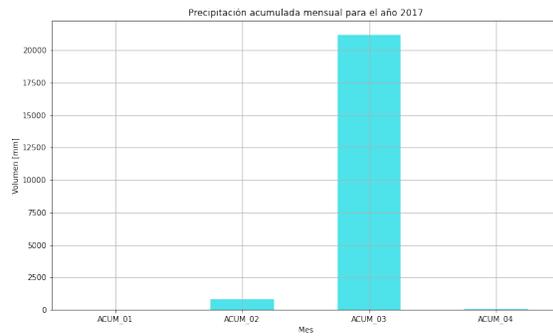


Figura 7.32: Acumulación mensual para 2017

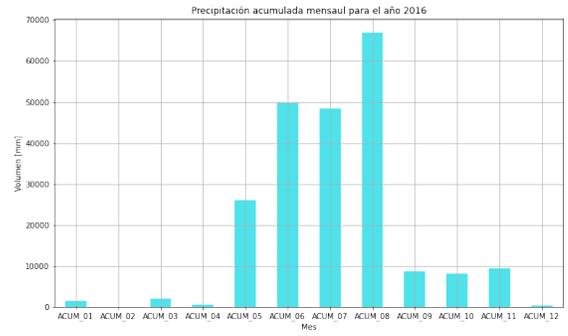
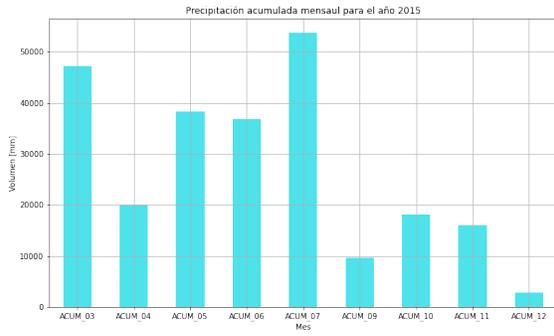


Figura 7.33: Acumulación mensual para 2015 (aproximación 1)

Figura 7.34: Acumulación mensual para 2016 (aproximación 1)



Figura 7.35: Acumulación mensual para 2017 (aproximación 1)

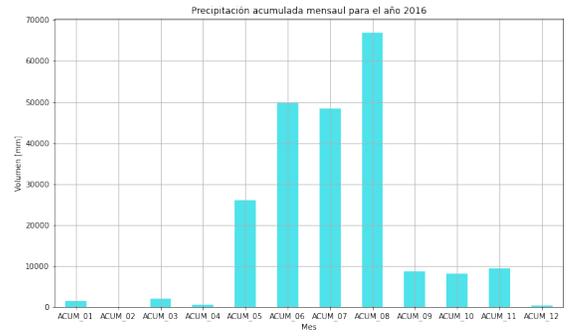
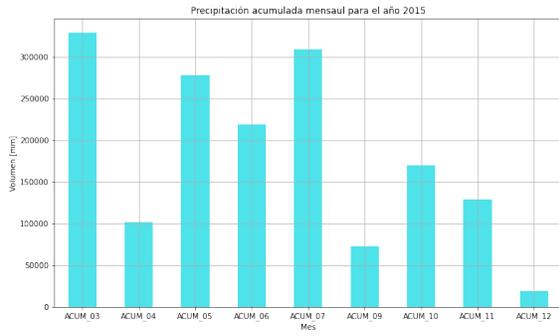


Figura 7.36: Acumulación mensual para 2015 (aproximación 12)

Figura 7.37: Acumulación mensual para 2016 (aproximación 2)

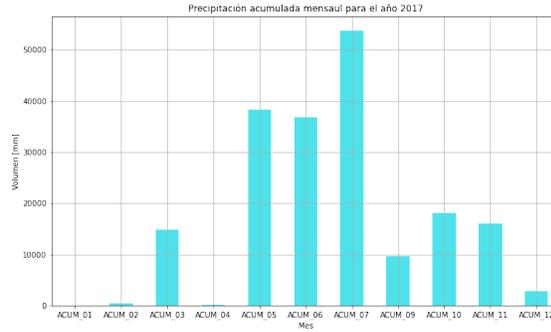


Figura 7.38: Acumulación mensual para 2017 (aproximación 2)

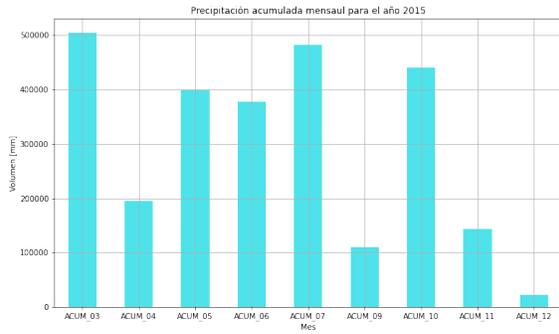


Figura 7.39: Acumulación mensual para 2016 (aproximación 3)

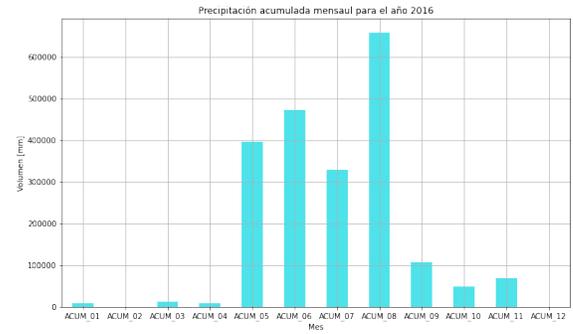


Figura 7.40: Acumulación mensual para 2016 (aproximación 3)

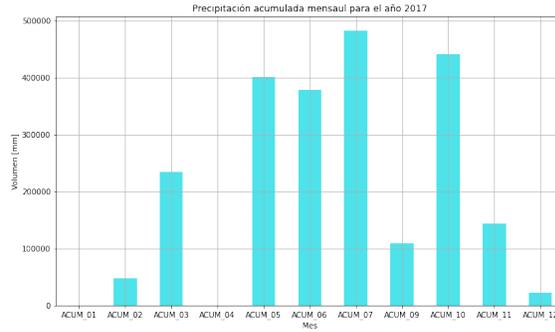


Figura 7.41: Acumulación mensual para 2017 (aproximación 3)

7.1.3. Regiones particulares

Las figuras 7.42 a 7.44 muestran zonas habitacionales, industriales y agrícolas presentes en el estado, para esos puntos se extrajo la intensidad de lluvia y se presenta en las figuras 7.45 a 7.53

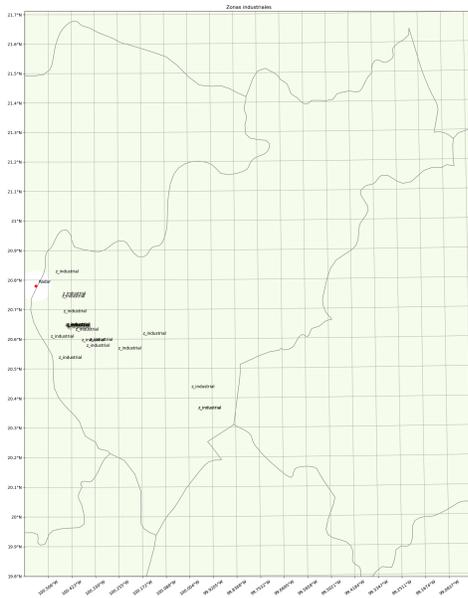


Figura 7.42: Parques industriales en el estado de Querétaro

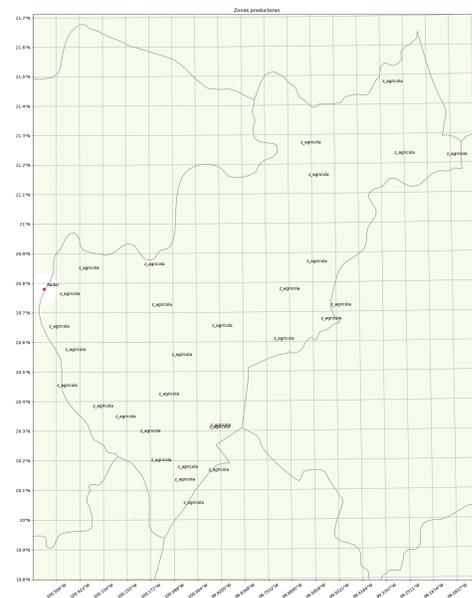


Figura 7.43: Zonas agrícolas en el estado de Querétaro

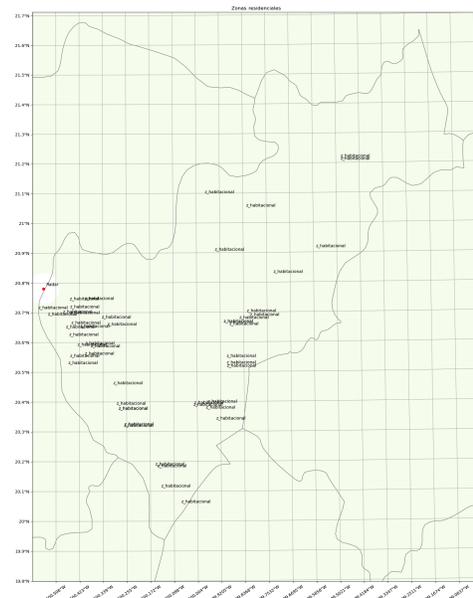


Figura 7.44: Zonas residenciales en el estado de Querétaro

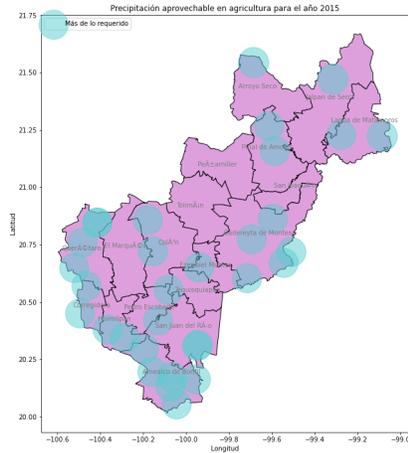


Figura 7.45: Precipitación anual acumulada para zonas agrícolas 2015

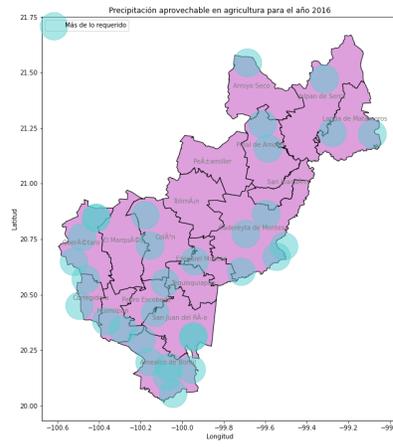


Figura 7.46: Precipitación anual acumulada para zonas agrícolas 2016

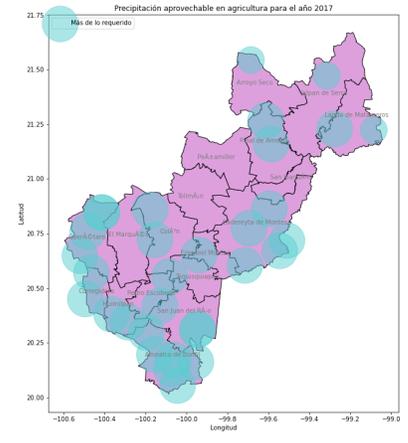


Figura 7.47: Precipitación anual acumulada para zonas agrícolas 2017

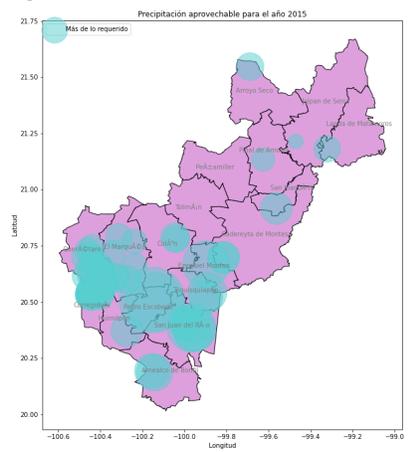


Figura 7.48: Precipitación anual acumulada para zonas residenciales 2015

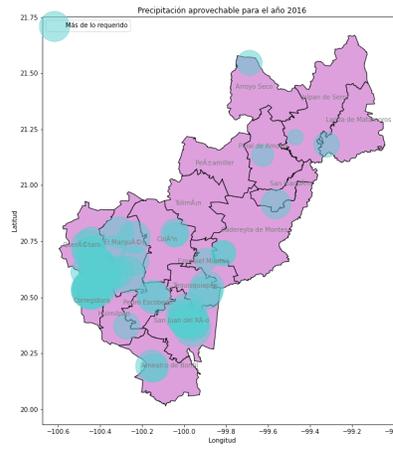


Figura 7.49: Precipitación anual acumulada para zonas residenciales 2016

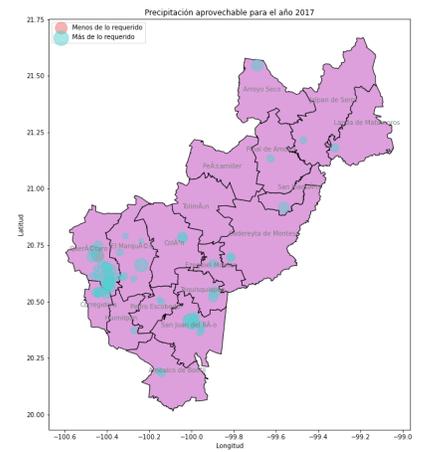


Figura 7.50: Precipitación anual acumulada para zonas residenciales 2017

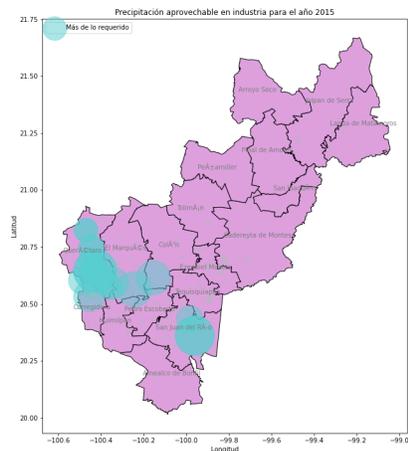


Figura 7.51: Precipitación anual acumulada para zonas industriales 2015

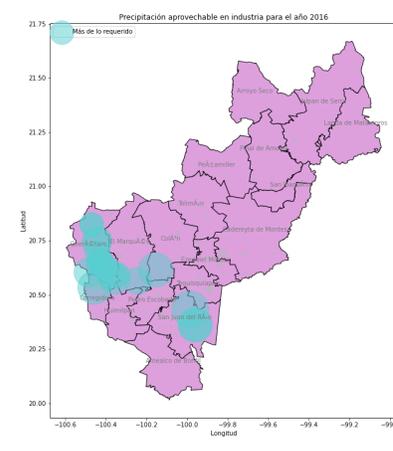


Figura 7.52: Precipitación anual acumulada para zonas industriales 2016

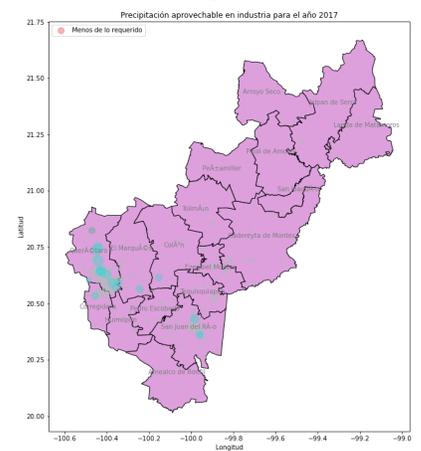


Figura 7.53: Precipitación anual acumulada para zonas industriales 2017

Figura 7.54: Acumulación anual en zonas particulares

CEA

7.2. Consumo estatal

	Doméstico	Comercial	Industrial	Poficial	Pconces	Hidrante	Beneficiencias	Ganadero
count	7.900	79.00	79.00	79.00	79.00	78.00	79.00	78.00
mean	5.58x10 ¹⁰	329391.94	75139.15	220730.40	43968.88	1905.23	53062.18	4855.15
std	1x10 ¹²	40242.16	7150.59	24281.17	45372.24	5045.22	9243.08	2156.44
min	6.44x10 ⁹	74432.00	38076.00	120491.00	36.00	19.00	8746.00	1820.00
25 %	5.35x10 ¹⁰	312837.50	72682.50	210047.50	38036.00	56.25	49473.00	3409.50
50 %	5.65x10 ¹⁰	336195.00	75705.00	225618.00	41331.00	1568.00	54517.00	3682.00
75 %	6.10x10 ¹⁰	354588.50	78454.50	234467.50	43258.00	2231.25	58064.50	6892.50
max	6.93x10 ¹⁰	381731.00	86877.00	269964.00	436446.00	45031.00	65963.00	9450.00

Tabla 7.1: Estadísticos del consumo estatal

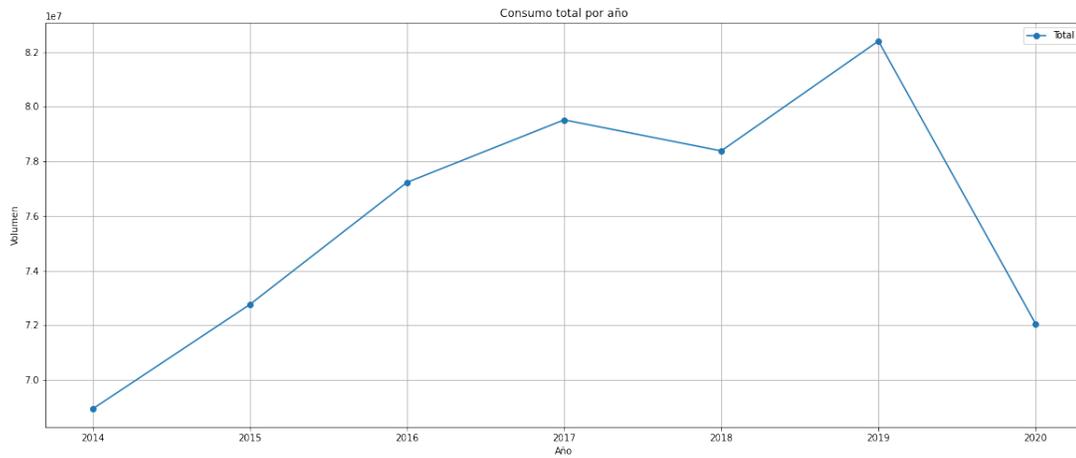


Figura 7.55: Consumo total.

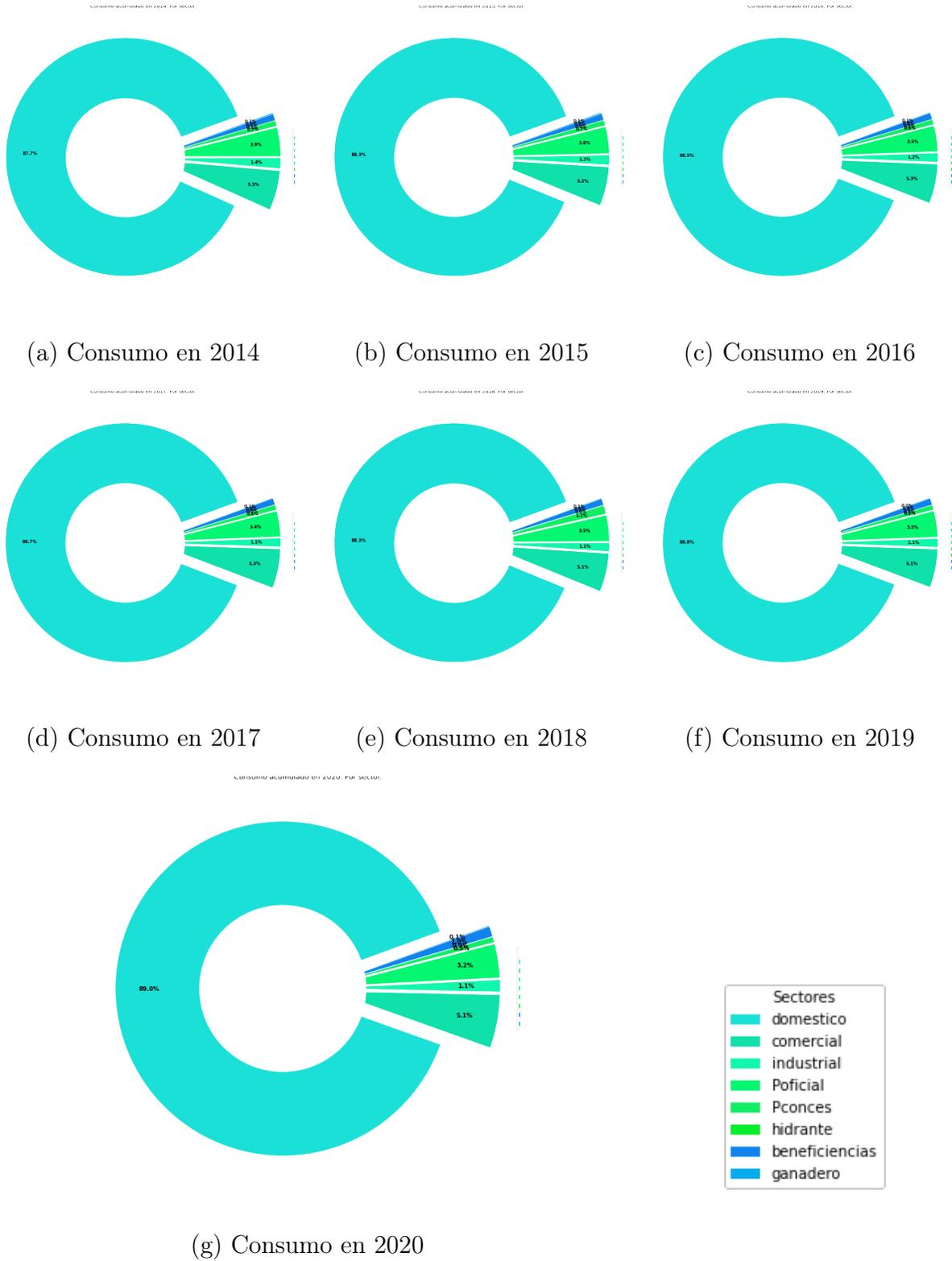
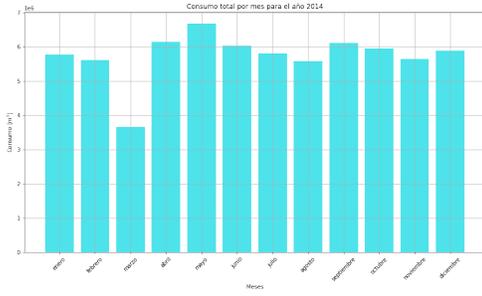
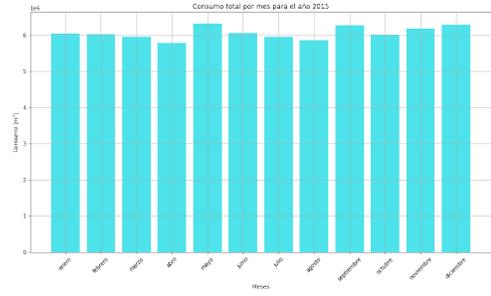


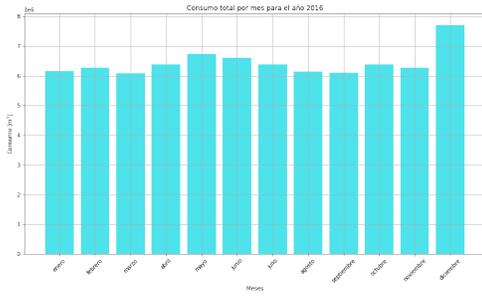
Figura 7.56: Consumo estatal separado por categorías.



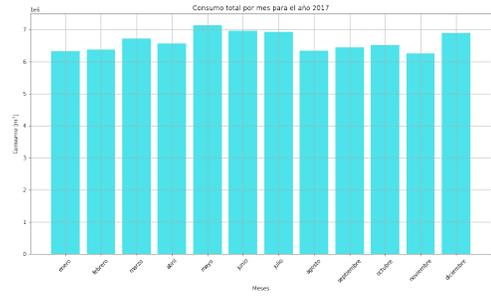
(a) Consumo en 2014



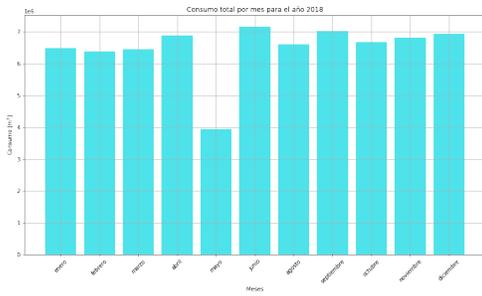
(b) Consumo en 2015



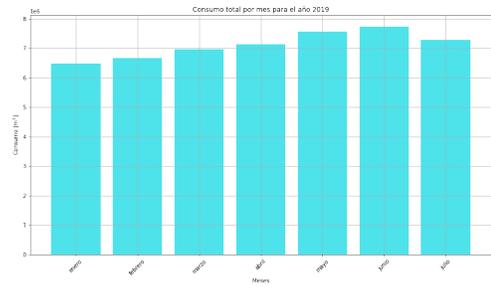
(c) Consumo en 2016



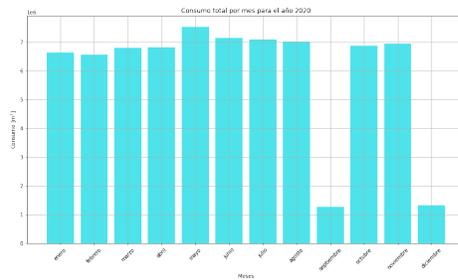
(d) Consumo en 2017



(e) Consumo en 2018



(f) Consumo en 2019



(g) Consumo en 2020

Figura 7.57: Consumo mensual.

Capítulo 8

Discusión

8.1. Cadena de procesamiento

En la Figura 7.1 se observa una representación PPI del volumen de datos para el día 20 de junio de 2015, este día presenta un evento de precipitación que permite exponer mejor el tratamiento aplicado a los datos.

La cadena de procesamiento (Figura 6.3) remueve residuos de ecos generados por objetos presentes en la superficie de la Tierra aplicando el filtro Gabella (o filtro cutter Figura 7.3). El resultado de aplicar el filtro es una matriz binar que al combinar con los datos en crudo (Figura 7.4) se observa una disminución de eventos registrados e identificados como ecos (Figura 7.1).

Para reducir la atenuación dada por eventos como la pérdida de energía o fuertes lluvias, la biblioteca wradlib implementa diferentes algoritmos (Figura 7.10) que reducen los errores por atenuación. Para fines visuales, se aplicó este filtro a un rayo del volumen de datos (Figura 7.5) y para automatizar el procesamiento se eligió el algoritmo de Kreamer (Figura 7.8) que genera mejores resultados a radares de banda “C”, como el de Querétaro, y no muestra una diferencia notable con el filtro de Kreamer modificado (figura 7.9). Podemos observar la participación del filtro en el pico de reflectividad a 60 km del radar, es decir, ahí se identifica la disminución en los valores de reflectividad.

El último paso de la cadena es la transformación a precipitación equivalente (figura 7.11) esta transformación usa la **ecuación 4.4** con valores $a = 200$ y $b = 1.6$, valores

típicos usados en el estado.

8.2. Acumulados

Los acumulados se muestran como mapas de precipitación acumulada en imágenes de radar de tipo Plain Position Indicator (PPI), constituidos por una composición de imágenes diarias, conformadas por volúmenes de información muestreadas en intervalos desde 5 y hasta 30 minutos. Las figuras 7.12, 7.14, 7.16 7.18, que muestran un acumulado trimestral para los años 2015, 2016 y 2017, en ese orden, constituida por una composición de imágenes mensuales. El primer (Figura 7.12) y cuarto trimestre (Figura 7.18) presentan menos precipitación en comparación con el segundo (Figura 7.14) y tercer trimestre (Figura 7.16), lo cual concuerda con que los meses de mayor precipitación (Figura 2.6).

La figura 7.20 se presenta como mapas de precipitación acumulada en imágenes de radar de tipo PPI, constituida por la composición de imágenes trimestrales.

Los estadísticos calculados para los datos integrados anuales de radar superaron a los correspondientes al de los pluviómetros que se presenta en la tabla 2.4. Los acumulados por mes dejan ver máximos en 7000 mm, 7 veces mayor al presentado en la tabla 2.4 y en la figura 2.6

8.3. Consumo hídrico estatal

La Comisión Estatal de Aguas del estado de Querétaro clasifica en 10 campos a los diferentes tipos de usuarios (ver tabla 6.2). Para todos los años que se tuvieron registro se puede observar que el tipo de usuario doméstico (Figura 7.56) es el principal consumidor; y las beneficencias y ganaderas las que menos consumen. En general se observa que el consumo se mantiene constante a lo largo del año, pero se ha visto incrementado el consumo a lo largo del tiempo (Figura 2.5) y se genera un promedio en m^3 para cada tipo de usuario (tabla 7.1)

8.4. Precipitación aprovechable

8.4.1. Zonas residenciales

INEGI presenta en su reporte para 2020 un total de 668,487 viviendas particulares habitadas, y el artículo de Rosas 2021a informa que las casas en Querétaro en promedio cuentan con 210 m² de construcción y 195 m² de terreno; en particular, el 46.40 % cuentan con más de 80 m² de construcción, mientras que el 36.46 % tienen una construcción menor a 80 m²; sólo el 17.14% tienen menos de 60 m² de construcción, además según la nota Rosas 2021b en Querétaro habitan 3.5 individuos, en promedio, por vivienda.

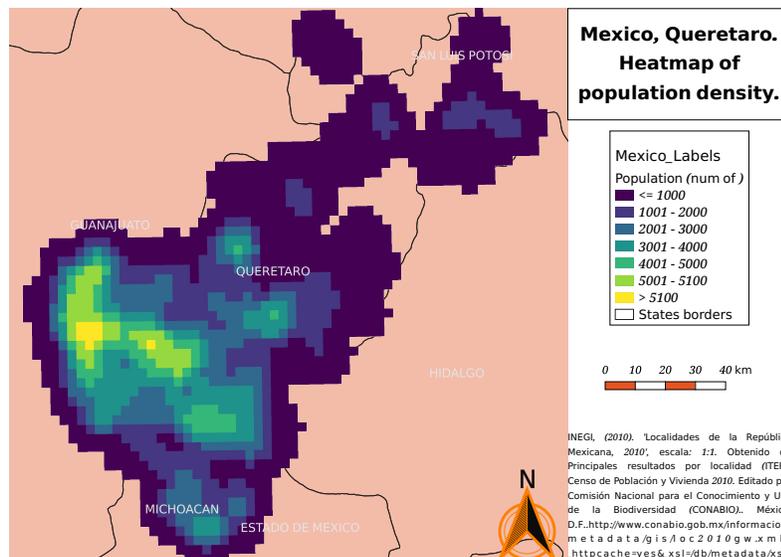


Figura 8.1: Densidad de población en el estado de Querétaro.

En el ámbito doméstico, el consumo se relaciona a la cantidad de personas que viven en una casa y de las necesidades particulares de cada individuo llegando a variar desde los 25 litros por día y hasta los 80 litros por día.

Con estos datos se hizo un análisis para diferentes áreas de captación, desde los 40 m² hasta poco más de 150 m², mostrando algunos resultados en las figuras 7.54 y se consideraron tantos puntos en el estado como porcentaje de población aparece en el anuario del estado Figura 2.8.

Se consideró además que cada casa la habitan 4 personas y considerando los valores de consumo (tabla 7.1) se considerará que cada habitante consume 30 litros por día, lo que

nos deja un consumo mínimo mensual de 3600 litros por vivienda, es decir, para que un sistema sea útil debe dotar de al menos 3600 litros de agua por vivienda

8.4.2. Zonas industriales

Querétaro cuenta actualmente con más de 50,000 empresas tanto locales, nacionales y extranjeras instaladas en 21 parques industriales que se concentran en 5 de los 18 municipios del estado. La Norma Mexicana de Clasificación de Parques Industriales (NMX-R-046-CSFI-2005) considera que un parque industrial debe tener una extensión mínima de 10 hectáreas de superficie urbanizada, con la recomendación de tener otras 10 hectáreas utilizables para ampliaciones a futuro.

Las dimensiones de los parques son perfectos para montar sistemas de almacenamiento sin embargo, no todas las industrias instaladas tienen la misma distribución en su construcción, por ello se considera que en los parques industriales el 10% de su espacio se destine a ser una zona de captación. Tomando como base las 10 he que dispone la norma NMX-R-057-CSFI-2005, consideramos 1000 m² de superficie aprovechable y los resultados se muestran en las figuras, el consumo de agua se considero como lo registra la CEA (7.1), según los cuales cada zona industrial tiene un consumo medio de 40380.90 m²

8.4.3. Zonas ganaderas

No se consiguió un registro fiable de las medidas para las diferentes zonas productoras. Para fines de lograr una medida promedio sobre la capacidad de recolección de precipitación, se seguirá una medida igual que la zonas industriales, es decir de 5 a 10 hectáreas de terreno y generando un área útil de 1000 m².

Capítulo 9

Conclusiones.

La disponibilidad de agua es uno de los factores que deben ser considerados al planear algún desarrollo urbano, industrial o agropecuario, considerar también regímenes hídricos podría ser de ayuda para minimizar estragos producto de fuertes lluvias o, por otro lado, permitiría planear mejor la distribución de drenaje o tener ubicaciones estratégicas para disminuir costos de producción. En consecuencia, resulta fundamental contar con estimaciones precisas del agua aportada por la precipitación, su evolución a lo largo del tiempo y su distribución en el espacio, y de esta manera disponer de una herramienta que permita administrar las actividades de planificación local y regional y minimizar los riesgos relacionados. Se ha sugerido que para poder explicar el 90% de la variabilidad espacial de la lluvia se requiere una medición distanciada cada 5 km radiales. En general las redes de estación pluviométricas se caracterizan por su escasa magnitud con irregular distribución e imposibilitan obtener una fiable representación de la distribución de la lluvia. Las imágenes de radar ofrecen resoluciones espaciales de 1 a 4 km² y temporales de 5-15 minutos, disponibles en tiempo real, aunque abarcan menor escala regional, en un radio aproximado de 250 km con centro en la antena. Para mejorar los resultados obtenidos, es recomendable apoyarse de técnicas que utilizan pluviómetros como medida de referencia para ser comparadas con las mediciones del radar, permitiendo evaluar y corregir el error que afecta a las medidas radáricas de manera global, proceso denominado corrección meteorológica. Los resultados de esta tesis dejan ver la utilidad de los datos de radar para poder explorar de forma visual la distribución de la precipitación en la zona del Bajío y

deja como antecedente una cadena de procesamiento que permitirá de forma rápida hacer un cálculo del volumen de precipitación aprovechable en una región que cuente con datos de radar. Las figuras mostradas en 7.54 muestran una capacidad positiva para los tres sectores analizados, es decir se supera los mínimos supuestos en la discusión de resultados. Lo que significaría una asertiva a los dispositivos de recolección. Una vez al año existe un periodo de meses en que se puede aprovechar en abundancia la precipitación como medio de fuente alterna de agua para uso exterior. Es posible el almacenado de agua de lluvia para viviendas con al menos $50 m^2$ de área disponible para recoger este elemento. Dados los resultados afirmativos, se podrían mejorar los resultados de esta tesis si se contara con valores medidos en estaciones terrestres que permita ajustar los valores de radar que reafirmen estos resultados.

Bibliografía

- [1] S. G. T. G. D. A. SUBTERRÁNEAS, *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE QUERÉTARO (2201), ESTADO DE QUERÉTARO*, Accessed: 5-3-2019.
- [2] J. U. Avelar Roblero y col., «Validación de un prototipo de sistema captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano,» *Idesia (Arica)*, vol. 37, n.º 1, págs. 53-59, 2019.
- [3] M. A. Ramírez y col., «ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN LA ENMSGTO,» *JÓVENES EN LA CIENCIA*, vol. 4, n.º 1, págs. 3144-3148, 2018.
- [4] J. S. López y col., «Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como medio alternativo,» *Ingeniería*, vol. 20, n.º 1, págs. 1-13, 2016.
- [5] b. Tania Isabel Arroyo-Za, «Colecta de agua pluvial como medida para el uso eficiente de la energía y reducción de emisiones de CO_{2e}. Análisis económico y ambiental,» *Facultad de Economía, UNAM*, 2013.
- [6] M. L. Belmonte, «Estimación de precipitación a partir de Radar meteorológico: evaluación y desarrollo de productos para la toma de decisiones en planificación agropecuaria,» Tesis doct., Universidad Nacional del Sur. Departamento de Agronomía, 2014.
- [7] V. Estrella, «Parques industriales, a 93 % de su capacidad en Qro,» nov. de 2017. dirección: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Parques-industriales-a-93-de-su-capacidad-en-Qro-20171115-0036.html>.

- [8] —, «Escasez de agua representa un reto para Querétaro: expertos,» jul. de 2021. dirección: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Escasez-de-agua-representa-un-reto-para-Queretaro-expertos-20210718-0040.html>.
- [9] —, «El crecimiento poblacional de Querétaro presiona el abasto de agua,» mar. de 2021. dirección: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/El-crecimiento-poblacional-de-Queretaro-presiona-el-abasto-de-agua-20210311-0148.html>.
- [10] Grieta, «VECINOS PROTESTAN POR COBROS DE LA CEA DE HASTA 70 MIL PESOS SIN TENER SERVICIO (Querétaro),» ene. de 2021. dirección: <https://www.grieta.org.mx/index.php/2021/01/28/vecinos-protestan-por-cobros-de-la-cea-de-hasta-70-mil-pesos-sin-tener-servicio-queretaro/>.
- [11] R. B. Stull y col., «Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science,» 2018.
- [12] R. A. Houze Jr, «Nimbostratus and the separation of convective and stratiform precipitation,» en *International Geophysics*, vol. 104, Elsevier, 2014, págs. 141-163.
- [13] W. Roa, «UNAM y la CDMX pactan apoyo para captación de agua pluvial,» ene. de 2017. dirección: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/01/11/1139309>.
- [14] F. O’Hora y col., «Improving weather radar observations using pulse-compression techniques,» *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, vol. 14, n.º 4, págs. 389-401, 2007.
- [15] T. Pfaff y col., «wradlib-An open source library for weather radar data processing,» en *Proceedings of ERAD-The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, 2012.
- [16] M. Heistermann y col., *Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib)*, *Hydrology 25 and Earth System Sciences*, 17, 863–871, 2013.
- [17] M. Gabella y col., «Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain,» en *Proceedings of ERAD*, vol. 305, 2002.

- [18] W. Hitschfeld y col., «Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths,» *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 11, n.º 1, págs. 58-67, 1954.
- [19] D. Harrison y col., «Improving precipitation estimates from weather radar using quality control and correction techniques,» *Meteorological Applications*, vol. 7, n.º 2, págs. 135-144, 2000.
- [20] S. Krämer y col., «Improved C-band radar data processing for real time control of urban drainage systems,» en *Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage*, IWA Publ. London, vol. 31, 2008, págs. 1-10.
- [21] S. Rosas, «Hasta 3 millones de pesos, el precio de una vivienda en la capital de Querétaro,» *El Universal Querétaro*, 2021. dirección: <https://www.eluniversalqueretaro.mx/cartera/hasta-3-millones-de-pesos-el-precio-de-una-vivienda-en-la-capital-de-queretaro#:~:text=Las%5C%20casas%5C%20en%5C%20Quer%5C%20en%5C%20metro%5C%20cuadrado%5C%20de%5C%20terreno..>
- [22] —, «Más de 336 mil queretanos viven en condiciones de precariedad,» *El Universal Querétaro*, 2021. dirección: <https://www.eluniversalqueretaro.mx/sociedad/mas-de-336-mil-queretanos-viven-en-condiciones-de-precariedad>.
- [23] M. Rosengaus, «Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda de dos partes),» *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 10, n.º 2, págs. 59-78, 1995.
- [24] E. Gorgucci y col., «Rainfall estimation from polarimetric radars: Algorithms immune to variability in mean raindrop shape,» en *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120)*, IEEE, vol. 4, 2000, págs. 1590-1592.
- [25] N. G. Carrillo y col., «Escenarios para el aprovechamiento sustentable del acuífero del valle de Querétaro,» *Agrociencia*, vol. 36, n.º 1, págs. 1-10, 2002.

- [26] R. Rodríguez y col., «Meteorología y climatología,» *Fundación española para la ciencia y la tecnología*. Villena Artes Gráficas. España, págs. 12-16, 2004.
- [27] C. UNATSABAR, «Guía de diseño para captación del agua de lluvia,» *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. OPS/CEPIS, 2004.
- [28] C. N. del Agua, *El agua en México*, 2006. dirección: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/el-agua-en-mexico.pdf>.
- [29] M. Urquiza Estada, *Uso sostenible del agua en la ciudad de Querétaro*, 2008. dirección: <https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/27S6-P5-Manuel%5C%20UrquizaACC.pdf>.
- [30] R. Queralt, «El agua de lluvia como recurso alternativo en el sector de la edificación: Aqua España presenta la Guía técnica de aprovechamiento de aguas pluviales en edificios,» *Tecnología del agua*, vol. 31, n.º 331, págs. 90-92, 2011.
- [31] J. Van Wambeke, «Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe,» *Santiago de Chile*, 2013.
- [32] OMM, *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos*, 2014.
- [33] *Programa de Manejo Integral de las Aguas Nacionales del Estado de Querétaro Tratamiento de Aguas Residuales 2015*, Congreso Nacional AMICA 2015, 2015.
- [34] A. Contreras, «Querétaro debe invertir para garantizar agua potable en el futuro,» sep. de 2016. dirección: <https://www.elfinanciero.com.mx/bajio/queretaro-debe-invertir-para-garantizar-agua-potable-en-el-futuro/>.
- [35] P. Angeline, «The Climate Data Guide: GPCP (Monthly): Global Precipitation Climatology Project,» *National Center for Atmospheric Research Staff (Eds), Last modified*, vol. 2, 2016.
- [36] C. N. del Agua, «Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda,» *Programa nacional para captación de agua de lluvia y ecotencias en zonas rurales*, 2016.

- [37] G. Federal, «Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Enotecnias en Zonas Rurales,» *Comisión Nacional Del Agua*, 2017. dirección: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-para-captacion-de-agua-de-lluvia-y-ecotecnias-en-zonas-rurales-procaptar>.
- [38] M. B. Nickisch y col., «Sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano, sinónimo de agua segura.,» *Aqua-LAC*, vol. 10, n.º 1, págs. 15-25, 2018.
- [39] A. Gutiérrez-López y col., «Análisis de la variabilidad espacial en la precipitación en la zona metropolitana de Querétaro empleando ecuaciones de anisotropía,» *Investigaciones geográficas*, n.º 99, 2019.
- [40] R. T. Hugues, «La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente,» *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 40, n.º 2, págs. 125-139, 2019.
- [41] O. de Desarrollo Sostenible, «Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y saneamiento para todos,» *Recuperado de: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation*, 2019.
- [42] Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro, «Anuario Económico 2021, Querétaro Competitivo.,» inf. téc. 1, ago. de 2019. dirección: https://sedesu2.queretaro.gob.mx/firma/AEE_2021_QUERETARO%20COMPETITIVO.pdf.
- [43] F. Pérez, «Otro cambio de uso de suelo con Preservación Ecología,» *AM Querétaro*, jul. de 2020. dirección: <https://amqueretaro.com/queretaro/2020/07/13/otro-cambio-de-uso-de-suelo-con-preservacion-ecologia/>.
- [44] Z. López, «Descartan cambio de uso de suelo en Peña Colorada,» feb. de 2020. dirección: <https://www.eluniversalqueretaro.mx/metropoli/descartan-cambio-de-uso-de-suelo-en-pena-colorada>.
- [45] J. Laureles C., «Hay sobreconcesión de derechos del líquido en México, reconoce Conagua,» *La Jornada*, 2021. dirección: <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/02/10/sociedad/hay-sobreconcesion-de-derechos-del-liquido-en-mexico-reconoce-conagua/>.

- [46] A. Barragán Coronel, *Acciones públicas e inversiones relacionadas con la plusvalía del suelo habitacional en la zona conurbada de Querétaro 2009-2019*, feb. de 2021. dirección: <http://132.248.9.195/ptd2021/enero/0806899/Index.html>.
- [47] S. K. González Padrón, *PROCESOS DE CAMBIO HACIA LA SOSTENIBILIDAD: COSECHA DE LLUVIA EN COMUNIDADES INDÍGENAS DE LA SIERRA WIXARIKA, JALISCO, MÉXICO*, mar. de 2021. dirección: <http://132.248.9.195/ptd2021/marzo/0809909/Index.html>.
- [48] Redacción, «Crisis por agua cada vez más cerca,» mayo de 2019. dirección: <https://www.diariodequeretaro.com.mx/local/crisis-por-agua-cada-vez-mas-cerca-3577136.html>.
- [49] L. B. de Querétaro, «Kuri rescatará agua; erigirá cinco plantas,» *Diario de Querétaro | Noticias Locales, Policiacas, de México, Querétaro y el Mundo*, mayo de 2021. dirección: <https://www.diariodequeretaro.com.mx/local/kuri-rescatara-agua-erigira-cinco-plantas-mauricio-kuri-plantas-de-tratamiento-zona-metropolitana-6703386.html>.