

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS



**“RELACIÓN Z-R PARA EL RADAR DOPPLER UBICADO EN EL
ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN HIDROMETEOROLOGÍA

PRESENTA

LIC. EN METEOROLOGÍA ADRIAN MIRÓ GONZÁLEZ

DIRECTOR:

MTRA. ALMA DELIA ORTIZ BAÑUELOS

CODIRECTOR:

DR. FAUSTINO OMAR GARCÍA CONCEPCIÓN

GUADALAJARA, JALISCO

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a toda mi familia por apoyarme durante todo este periodo de tiempo lleno de retos personales y profesionales

A mi esposa Yailen y mi niña por acompañarme y soportar mis majaderías estos casi tres años de maestría.

A mi mamá y mi hermano por ser mi soporte desde Cuba y la retaguardia desde allá que siempre me impulsaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A la Maestra Alma y el Doctor Omar por todos los comentario, correcciones y críticas a lo largo de esta investigación, que no hubiera sido posible sin sus valiosos aportes.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo para la realización de esta maestría.

A La Universidad de Guadalajara, el CUCEI, y en particular a la Doctora Iryna Tereshchenko por darme la confianza y aceptarme en este gran post-grado.

Al Maestro Víctor Cornejo, Maestro Boris Comí González y el Maestro Magdiel Carrasco por proporcionarme datos e información sin la cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo.



DEDICATORIA

“A mi papá Andrés y mi abuela Charo, que desde donde estén se

sientan orgullosos de mí,

A mi mamá Rebeca y mi hija Adriana“



RESUMEN

El siguiente trabajo de tesis tiene como objetivo principal encontrar la conexión entre la precipitación que se registra en las estaciones meteorológicas y la reflectividad que es obtenida por el radar meteorológico ubicado en el Área Metropolitana de Guadalajara. Este vínculo es conocido como relación Z-R y se obtiene determinando una ecuación que vincule ambas variables, con el fin de obtener una relación más precisa y mejorar el pronóstico cuantitativo de la lluvia, debido a que cada temporada somos afectados por el fenómeno de las inundaciones en diferentes sectores de la ciudad. Se analizaron los datos de la precipitación registrada en diez estaciones meteorológicas y la información de reflectividad obtenida por el radar doppler enclavado en la ciudad de Guadalajara durante el periodo de lluvias de los años 2019 y 2020.

En el desarrollo de la investigación, se examinaron diversos ajustes: el polinómico, exponencial, logarítmico y potencial. Consecutivamente, para saber cuál es el que mejor describe la relación entre la precipitación y la reflectividad, se usó el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el error absoluto medio (MAE), el nivel de significación mínimo no arbitrario (P-Value) y una prueba para evaluar la capacidad explicativa (F-Statistic). La investigación concluye que la mejor curva que se obtuvo para optimizar dicha relación para este radar es la curva potencial con la forma $Z=AR^b$, donde $A= 27.3810$ y $b= 0.2862$.

Posteriormente, se efectuó una validación de la relación obtenida con una muestra independiente donde se obtuvieron resultados satisfactorios.

La metodología obtenida se recomienda para encontrar las relaciones Z-R de diferentes radares que tengan características similares que se incorporen a la red meteorológica nacional.



TABLA DE CONTENIDO

Resumen	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Tabla de Contenido	iv
	Página
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Hipótesis.....	5
Objetivo General y Objetivos Específicos.....	6
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
El radar meteorológico y sus características.....	7
Descripción del radar doppler del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG).....	9
Relación entre la reflectividad y la precipitación (Relación Z-R).....	12
Errores asociados a la estimación de lluvia con el radar.....	17
Análisis estadístico.....	20
Capítulo 3. MATERIALES Y MÉTODO.....	25
Área de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas.....	25
Datos de precipitación.....	29
Datos de reflectividad.....	30
Graficado y herramientas estadísticas.....	33

Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
Anillo de 10 Km.....	43
Anillo entre 10 y 20 Km.....	44
Relación Z-R del radar doppler ubicado en Área Metropolitana de Guadalajara (AMG).....	46
Validación de los resultados.....	51
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
 BIBLIOGRAFÍA.....	57
 APÉNDICE 1 Script de Matlab para leer los archivos en .mat del radar doppler y obtener los valores de reflectividad.....	62
APÉNDICE 2 Script para encontrar el nodo más cercano a la estación de interés.....	64
APÉNDICE 3 Script para obtener la reflectividad en el nodo seleccionado.....	68
APÉNDICE 4 Programa en R para analizar estadísticamente los ajustes estudiados.....	70
APÉNDICE 5 Características del radar doppler del estado de Jalisco.....	80



INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta las lluvias extremas son reconocidas como causa de enormes pérdidas materiales y de vidas humanas. Estos fenómenos hidrometeorológicos extremos generan deslizamientos de tierras e inundaciones súbitas que en gran medida resultan complejas de predecir y por tanto limitan la capacidad de respuesta de la población y las autoridades para minimizar los daños asociados a tales eventos.

A pesar del gran desarrollo científico que se ha experimentado en las últimas tres décadas, en ocasiones los pronósticos quedan algo distantes de la realidad, específicamente con el pronóstico inmediato (now-casting). En este sentido, el radar meteorológico, es una de las herramientas principales a la hora de elaborar un pronóstico más preciso, pues con éste se pueden identificar diferentes características de las tormentas, que le permiten al especialista, determinar entre otros aspectos, la intensidad de la lluvia, el grado de severidad o no (caída de granizo, nieve, vientos fuertes), además de la velocidad de traslación de la tormenta. También se pueden identificar patrones de circulación, tipo de nubosidad, entre muchos otros factores que dan un sin fin de conocimientos e información al meteorólogo, para su trabajo como pronosticador.

Según Erena, et al (2012) el manejo de la estimación cuantitativa en tiempo real de la precipitación en una escala local, es de gran importancia para la conducción de los riegos y para el seguimiento de fenómenos meteorológicos adversos, así como para otras muchas aplicaciones.

Cuando se combinan las observaciones del radar meteorológico y una red de pluviómetros se obtiene una mejor estimación de la situación meteorológica que la que se puede lograr con uno de ellos por sí solo, producto a la diferencia espacial y temporal que presentan.

En el año 1995 Rosengaus planteó que uno de los propósitos de los radares meteorológicos es la evaluación cuantitativa de lluvia, ésta se mide en mm/hr. Bajo una calibración cuidadosa, los radares sirven para establecer las tasas de precipitación con errores de más menos veinte por ciento (Rosengaus, 1995).

Por lo antes expuesto y en consecuencia con la importancia de los radares meteorológicos, la precisión de estos equipos y su correcta calibración para un buen funcionamiento, juegan un papel primario, pues de ello depende la veracidad de la información que se recibe y con la cual se elaboran los diferentes informes y a su vez para realizar la predicción del tiempo.

En este orden las principales calibraciones que se le realizan a un radar meteorológico son dos.

1. Mantener estabilidad en la energía transmitida y en la sensibilidad de los equipos de recepción. Trabajo que realiza el técnico electrónico especialista en radares.
2. Relación Z-R, ya que el radar no mide directamente la lluvia y para su estimación utiliza la relación entre la reflectividad Z medida a partir de la potencia recibida y la intensidad de la lluvia R medida en los pluviógrafos (Méndez-Antonio et al., 2006).

Diversos autores disertan sobre la terminología de calibración o relación Z-R en los radares meteorológicos. Autores como Koistinen y Puhakka (1986) plantean que la calibración es un procedimiento eléctrico aplicado al equipo del radar, lo que las observaciones en pluviómetros no pueden hacer.

Por otro lado Wood et al., (2000) plantearon que se pueden utilizar esta definición de calibración en los casos de ajustes meteorológicos del radar. Lo que se complementó con la definición de ajuste meteorológico realizada por Joe y Smith (2001) que proyectaron "...Ajuste es una modificación de la cantidad medida de radar para igualar una cantidad externa. La modificación es dependiente de la aplicación (cuestiones temporales y espaciales abundan aquí)..."

Gómez-Vargas (2015) planteó que la estimación de la lluvia por parte del radar es uno de los usos cuantitativos más importantes y puede venir en una variedad de intensidades, desde llovizna ligera hasta los chubascos en las tormentas intensas.

Son muchos los aspectos que están propiamente asociados a las mediciones del radar (problemas en la calibración del sistema de observación (antena, receptor, transmisor), la variabilidad espacial y temporal de las medidas y la misma microfísica de la precipitación) y que indiscutiblemente inciden en los datos y por ende afectan significativamente uno de los productos finales “la estimación de la precipitación”, es decir, hacen que las estimaciones de lluvia obtenidas presenten un cierto grado de incertidumbre introducida por las fuentes antes mencionadas. Por lo cual, para disminuir esos errores es necesario realizar una correcta calibración.

Planteamiento del problema

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) está constituida por varios municipios entre los que se destacan por su densidad poblacional, Tlaquepaque, Zapopan, Tonalá y el propio municipio de Guadalajara. Presenta una población de poco más de cinco millones de habitantes según el Instituto de Información Estadística y Geografía de Jalisco, 2020, y precisamente por esto, es más vulnerable, frente a fenómenos meteorológico y la afectación que causan a la sociedad.

Otros factores que la hacen endeble son la topografía, la infraestructura y los asentamientos irregulares, que favorecen a las frecuentes inundaciones en cada temporal de lluvia, generando daños materiales, económicos y en ocasiones hasta de vidas humanas. En la figura 1 se presenta un mapa de los principales sitios del estado de Jalisco donde ocurren frecuentemente inundaciones producto de las fuertes precipitaciones.

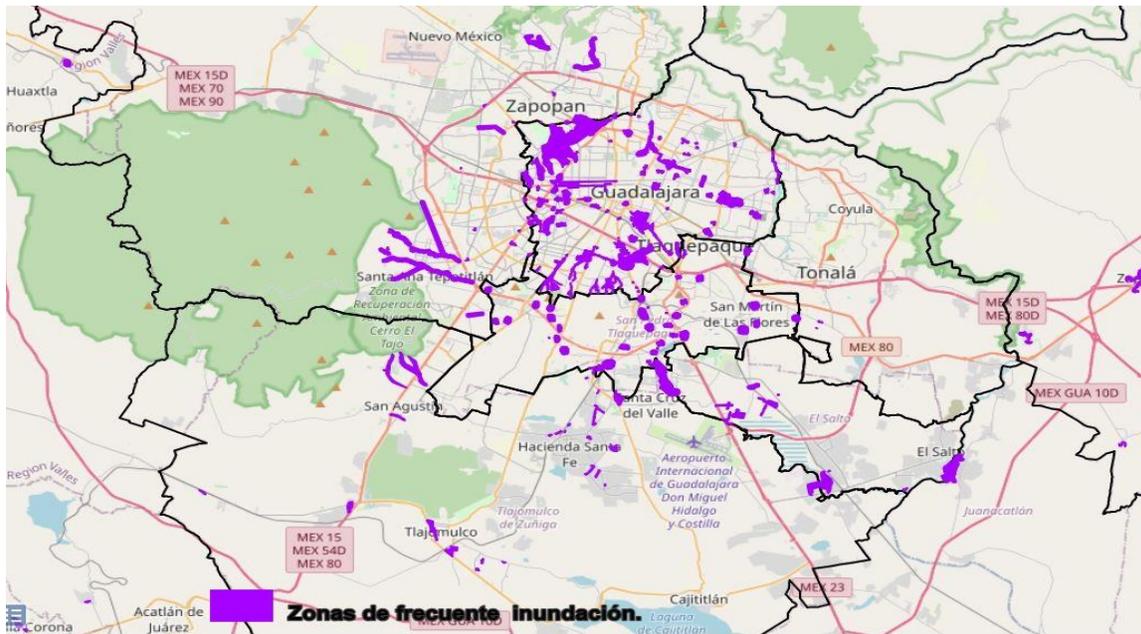


Figura 1. Mapa de sitios recurrentes de inundaciones del estado de Jalisco.

Cortesía Protección Civil del Estado (2021).

Por otra parte, en la tabla 1 se muestra la cantidad de sitios recurrentes a inundaciones por municipios del estado de Jalisco, destacándose entre ellos los municipios de Zapopan y Guadalajara.

Tabla 1. Cantidad de sitio de inundaciones del estado de Jalisco por municipios.

Cortesía Protección Civil del Estado (2021)

Resumen de sitios recurrentes				
Total de sitios con recurrencia de inundación				
N.	Municipio	Total de sitios por tipo de inundación		
		Nuevo	Recurrente	Total
1	Guadalajara	2	62	64
2	San Pedro Tlaquepaque	4	20	24
3	Tlajomulco de Zúñiga	7	30	37
4	Juanacatlán	S/D	4	4
5	Zapopan	S/D	154	154
6	Zapotlanejo	1	2	3
7	Ixtlahuacán de los Membrillos	S/D	8	8
8	El Salto	1	6	7
9	Tonalá	S/D	15	15
Total:		15	301	316

La fiable información meteorológica y una correcta elaboración del pronóstico del tiempo, es fundamental en la vida de todas estas personas que planifican día a día sus actividades en función del tiempo meteorológico que afecta el AMG. Es por ello que tener una relación Z-R lo más precisa posible ayudaría en esta compleja labor, además de servir como herramienta para la modelación hidrológica, debido a su excelente resolución espacial comparada con las estaciones meteorológicas.

Por lo antes expresado en este trabajo se hace uso de los datos del radar ubicado en el AMG, al cual le aplicaremos el ajuste Z-R con la precipitación de las estaciones meteorológicas automáticas que se tienen disponibles para la zona de estudio.

Hipótesis

La hipótesis de este trabajo plantea que obtener una relación Z-R propia del radar doppler ubicado en el AMG permitirá al área de meteorología del Instituto de Astronomía y Meteorología (IAM) brindar a los interesados (aseguradoras, ayuntamiento, medios de comunicación, sector privado, etc.) una estimación

cuantificable de la precipitación que permita tomar decisiones estado ante cualquier situación hidrometeorológica que al estado de Jalisco.

Objetivo general

Obtener la relación Z-R propia del radar doppler para el AMG.

Objetivos específicos

- Recolección, filtrado y procesamiento de datos de las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas.
- Recolección, filtrado y procesamiento de datos del Radar Doppler ubicado en el AMG.
- Obtención del mejor ajuste entre los datos de precipitación y de reflectividad.
- Comprobación y Análisis de resultados.

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

A lo largo de la historia se han realizado diferentes investigaciones relacionando los radares y las estaciones meteorológicas, todo a partir de que en la Segunda Guerra Mundial los radares de guerra comenzaron a sufrir interferencias por las nubes y los meteoros existentes. Así se comienza a desarrollar la meteorología de radar y con ella el adelanto acelerado de la teledetección y las investigaciones en todo el planeta.

Investigadores como Marshal, Langille y Palmer (1947) fueron pioneros en la temática de obtener la relación entre la cantidad de precipitación y la reflectividad del radar con su investigación titulada “Measurement of Rainfall by radar”. El radar del AMG ha sido de gran importancia en el seguimiento de tormentas como herramienta fundamental, y de conjunto con las publicaciones de alerta y la necesidad de ser cada día mejor en este prestigioso instituto (IAM), inspiraron al autor a desarrollar este tópico en la metrópoli jalisciense.

El radar meteorológico y sus características

El radar, acrónimo de (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging) es un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos. El principio de operación de un radar es relativamente simple: un transmisor emite un pulso de energía electromagnética, el cual se propaga a partir de una antena móvil. Esa señal viaja a la velocidad de la luz y, al encontrar un objeto es parcialmente reflejado retornando a través de la misma antena y encaminado por un conmutador automático para un receptor (figura 2).

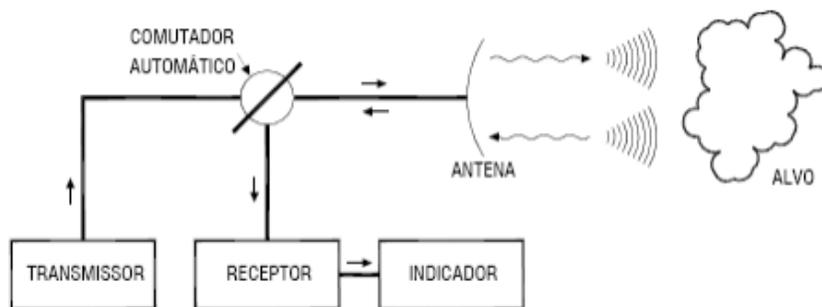


Figura 2. Esquema de funcionamiento del radar meteorológico. Fuente: Calheiros y Zawadski (1982)

Las medidas de precipitación con un radar doppler consisten en la cantidad de energía reflejada por las gotas de lluvia y por los cristales de hielo o granizo, sobre los cuales incidió la radiación electromagnética emitida a través de la antena parabólica. Los radares transmiten periódicamente un pulso de radiación de microonda con duración de unos pocos microsegundos.

Cuando el pulso de energía choca con un blanco, una parte de la energía incidente es reflejada de vuelta siendo recibida por la antena, donde es detectada y de inmediato enviada a procesamiento. El intervalo de tiempo transcurrido entre la transmisión y la recepción de la parte reflejada, determina la distancia entre el radar y el blanco.

Según Pardo y Martínez (2012), el conocimiento real de la distribución de precipitación sobre determinada región es fundamental donde el control del escurrimiento superficial del agua se hace necesario para el manejo del caudal en cuencas hidrográficas sujetas a inundaciones y para lo cual el radar meteorológico desempeña un importante papel, funcionando como un tele-pluviómetro electrónico en tiempo real.

Descripción del radar doppler del Área Metropolitana de Guadalajara

El radar doppler meteorológico que resguarda la Universidad de Guadalajara permite localizar en tiempo real la precipitación en alguna parte de la zona central del estado de Jalisco (figura 3), esto dentro de un radio de alcance de 150 kilómetros respecto la ubicación del radar, localizado en los $20^{\circ} 40' 12''$ de latitud norte y los $103^{\circ} 22' 48''$ de longitud oeste. De tal manera que, con ayuda complementaria de los satélites, facilita la vigilancia y predicción a muy corto plazo de fenómenos meso escalares. En el apéndice 4 se muestran más detalles sobre la configuración y características del radar.

La topografía del Estado es complicada (figura 3) y limita el área de cobertura del radar, por lo que bajo las condiciones actuales no es posible tener un radio de visibilidad de mayor alcance, debido a la obstrucción de la Sierra Madre y la Barrera Montañosa del eje transvolcánico.

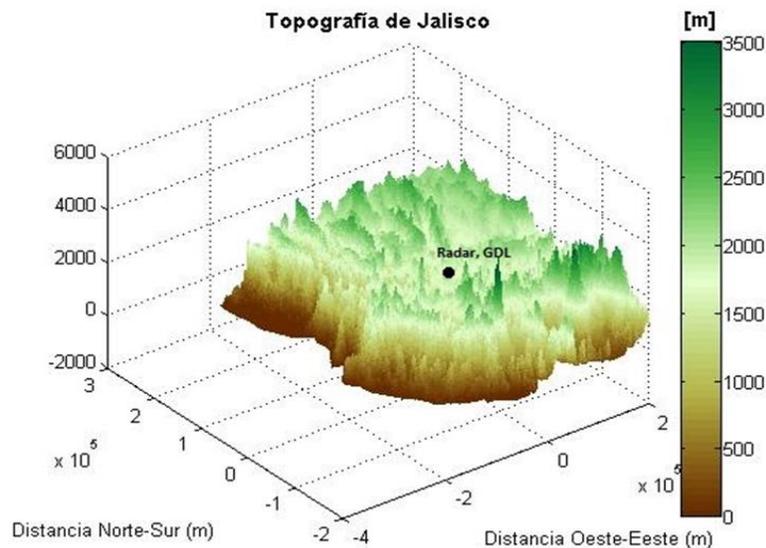


Figura 3. Topografía de la región centro y costa del estado de Jalisco. Los tonos verdes indican las zonas montañosas, café el nivel del mar. El punto negro nos señala la ubicación del radar doppler.

El crecimiento urbano vertical (edificios y antenas de telecomunicaciones entre otros) cerca del radar es otro elemento que nos acota el área de monitoreo del radar, al igual que antenas de transmisión en frecuencias que generan interferencia y bloquean la señal del haz, a estas áreas no cubiertas por el radar se les conoce como zonas de apantallamiento, razón por la cual, el haz a ángulos bajos puede tener un alcance muy corto. El apantallamiento en el AMG se observa en la figura 4.

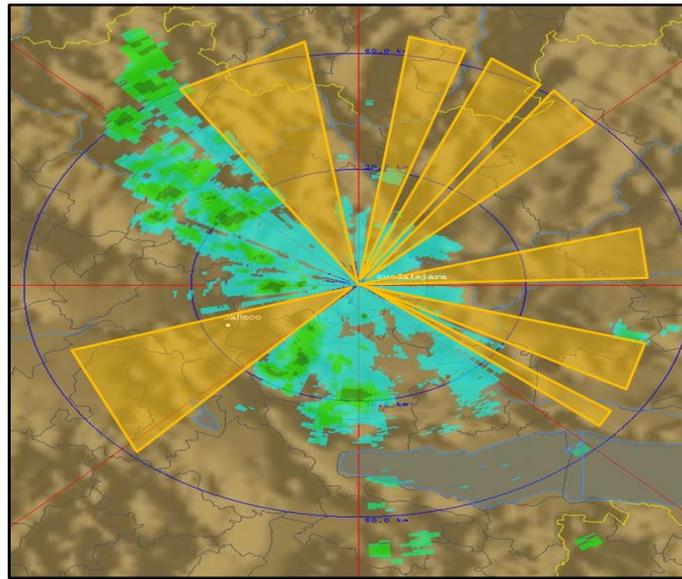


Figura 4. Imagen de reflectividad del radar, donde los triángulos amarillos muestran las zonas de apantallamiento del AMG.

Debido a la baja altura en la que se instaló el radar doppler, los cerros más cercanos reciben la radiación del radar y la reflejan, emitiendo así radiación constante a la antena. Esta reflectividad en pantalla se conoce como ecos fijos y se identifica por reflectividad constante en la imagen del radar (figura 5).

Cabe mencionar que lo anterior no perjudica al objetivo inicial para lo cual fue adquirido el radar, que es vigilar el AMG para alertar a corto plazo y en tiempo real a los tomadores de decisiones y a la población en general sobre los fenómenos meteorológicos que acontecen, debido a que el área que cubre el radar es suficiente para el monitoreo de lluvias en la ciudad.

El radar doppler del AMG es banda C, con longitud de onda 5.36 cm. Dichas características son las más comunes en radares ubicados en zonas de orografía compleja.



Figura 5. Imagen de reflectividad del radar, los círculos muestran los cerros dentro del AMG que producen ecos fijos (los cerros nos reflejan la radiación recibida de manera constante, reflectividad constante).

Desde su instalación, el radar doppler cuenta con personal (operadores) que monitorean este equipo con el fin de informar a la población mediante la página web: <http://astro.iam.udg.mx/radar/iam> y además mediante las redes sociales.

Sus alertas indican donde está lloviendo, la intensidad de la lluvia y hacia dónde se dirige. Dicha información es actualizada cada 2, 5 o 30 minutos, según sea necesario. Las alertas se brindan las 24 horas del día durante el temporal de lluvia (junio a noviembre) y solo 16 horas en temporada de estiaje.

Después de cada mantenimiento al radar los operadores del radar en los primeros días de lluvia, relacionan los valores de reflectividad con las observaciones de cada tormenta en diferentes municipios del AMG, para obtener una relación empírica entre la intensidad de lluvia y la reflectividad.

En base a la constante validación de las mediciones del radar con las observaciones, se crea una escala de aproximación de la reflectividad a la intensidad de lluvia (figura 6 a y b). Hasta el momento, este método empírico de aproximación de la estimación de la intensidad de lluvia se ha utilizado para proveer a la población e incluso para peritajes.

Figura 6. a) Escala de colores asociados a Z (dBZ).

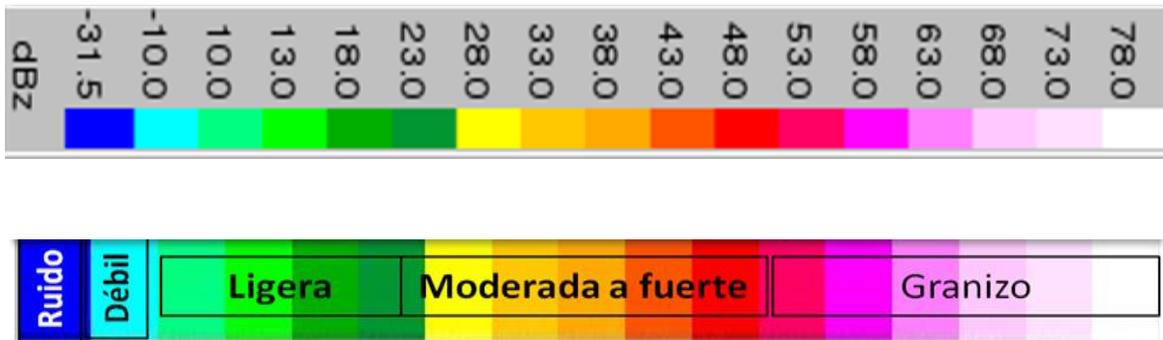


Figura 6. b) Escala de aproximación de colores al tipo de lluvia.

Sin embargo, es de suma importancia realizar la estimación precisa y rigurosa de la relación Z-R para poder tener una mejor representación de la cantidad de lluvia e intensidad de esta, así como una base de datos numérica también podría ser de utilidad para futuras investigaciones.

Relación entre la reflectividad y la precipitación. Relación Z-R

El factor de reflectividad es la radiación reflejada por la nube, la cual incluye el término de la constante del radar y es proporcional a la concentración total de número de gotas dentro de un volumen escaneado por el radar. Por conveniencia el factor de reflectividad es llamado comúnmente reflectividad y está definido de la siguiente manera (Zhang et al. 2001):

$$Z_{H,V} = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \langle n |F_{hh,vv}(\pi)|^2 \rangle, \quad [mm^6 m^{-3}] \quad (1)$$

Donde:

- $Z_{H,V}$: Factor de reflectividad horizontal (H), vertical (V)
- λ : Longitud de onda
- n : Concentración de número de gotas.
- $F_{hh,vv}$: Amplitud de la dispersión compleja de una partícula en direcciones horizontal y vertical.
- $|K|^2$: Término dieléctrico.

Por otra parte, según Doviak, et al (1993) plantean que el factor de reflectividad se define como la suma de la sexta potencia de los diámetros de todos los hidrometeoros que dispersan la energía transmitida por el radar en la unidad de volumen muestreada. En términos de la función de distribución de tamaño de gotas de lluvia, $N(D)$, puede escribirse de la siguiente manera:

$$Z = M_6 = \int_{Dmin}^{Dmax} D^6(D) dD, [mm^6 m^{-3}] \quad (2)$$

Donde:

- Z : Factor de reflectividad.
- M_6 : Sexto momento partiendo de la función de distribución de tamaño gotas de lluvia.
- D : Diámetro equivalente de la gota de lluvia.
- (D) : Función de distribución de tamaño de gotas de lluvia.
- dD : Diferencial del diámetro.
- $Dmax$: Diámetro máximo de gota de lluvia.
- $Dmin$: Diámetro mínimo de gota de lluvia.

Respecto a la precipitación, una forma sencilla de definirla sería la cantidad de agua, en cualquiera de sus estados, que cae en una región determinada y cuya unidad de medida universal es milímetros (mm) de precipitación. Para entenderlo mejor entonces, la cantidad de milímetros de altura que alcanza la precipitación en un área de un metro por un metro. Un milímetro de lluvia equivale a un litro del líquido.

Por otra parte tenemos que la tasa de lluvia o intensidad de precipitación es el flujo de precipitación que pasa a través de una superficie horizontal, que es medida en términos de volumen de flujo de agua. Según Yau & Roger (1996) la intensidad de lluvia puede escribirse en función de la distribución de tamaño de gotas de lluvia, $N(D)$, como se muestra a continuación:

$$R = 6 * 10^{-4} \pi \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^3(d)N(D)dD, [mm \text{ hr}^{-1}] \quad (3)$$

Donde:

- R : Intensidad de lluvia
- d : Función de distribución de tamaño de gotas de lluvia.
- D : Diámetro equivalente de la gota de lluvia.
- v : Velocidad terminal de caída de las gotas de lluvia
- D_{max} : Diámetro máximo de gota de lluvia.
- D_{min} : Diámetro mínimo de gota de lluvia.

El radar doppler ubicado en el AMG no es de última generación, ni es polarimétrico, sin embargo, cumple con su cometido y continúa siendo de gran utilidad durante cada evento meteorológico que se presenta. Con él, se obtienen útiles resultados meteorológicamente hablando en cuestión de brindar información para la toma de decisiones, siendo imprescindible hacerle referencia cuándo del tiempo y el clima se habla en el Estado de Jalisco.

El vincular los datos de reflectividad del radar y de precipitación permite establecer sistemas de alerta temprana contra inundaciones en los que el tiempo de

anticipación a tales inundaciones puede ser significativamente mayor (Pardo (2011)).

Mientras que Vidal, et al. (2011) aseveran que es necesario determinar el tipo de relación asociado a cada tipo de precipitación, ya sea estratiforme o bien convectiva, o una mezcla de ambas, a partir de medidas de la distribución de gotas. Ese estudio debería hacerse de manera que las relaciones encontradas representarán las características de la lluvia en el área donde se localiza el radar.

También Suzana, et al. (2018) contribuyeron calculando la relación Z-R cada 50 kilómetros de radio hasta el alcance máximo del radar, observándose las diferencias a medida que nos alejamos de la ubicación del radar, fundamentalmente en los coeficientes de las ecuaciones.

La ventaja de trabajar en anillos de distancia radica en corroborar que el radar mantenga la misma ecuación de aproximación entre la precipitación y la reflectividad en todo su alcance, por lo que similar a estos autores, en el presente trabajo se separó el área de estudio dos anillos de distancia uno de 10 y uno de 20 km para poder comparar ambos resultados y ver las similitudes y diferencias entre ellas.

Diferentes estudios abordan la estimación de la precipitación con datos del radar meteorológico. Según Méndez-Antonio (2006), se han obtenido diferentes relaciones Z-R, específicamente del tipo $Z=AR^b$; siendo las más conocidas en la literatura para diferentes tipos de lluvia las siguientes:

- Lluvias estratiformes $Z = 200R^{1.6}$
- Lluvias orográficas $Z = 31R^{1.71}$
- Lluvias convectivas $Z = 486R^{1.37}$

En todos los casos, nótese que, la forma de la ecuación es la misma ($Z=AR^b$), variando los valores de A y b según sea el caso. Dichos autores además plantean tres métodos para obtener la relación Z-R. El primero denominada relación puntual,

donde se relacionan los pares de puntos Z- R de las tormentas seleccionadas, de manera que:

$$Z_{i,t} = AR_{i,t}^b \quad (4)$$

Donde t es el intervalo de tiempo; i, la localización espacial de la celda del radar, que corresponde con las del pluviógrafo i de coordenadas X_i , Y_i ; A y b, parámetros de calibración; Z, la reflectividad del radar en mm^6/m^3 ; R la intensidad de lluvia registrada en el pluviógrafo.

El segundo es la calibración en la vecindad, en este caso, la intensidad R forma pares con los valores de reflectividad Z (en mm^6/m^3):

$$Z_{i,t} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^9 Z_{i,t} \quad (5)$$

Donde n es el número de celdas promediadas en una matriz de celdas de 3x3 y $Z_{i,t}$ es la reflectividad promedio en las nueve celdas de la matriz, en el intervalo de tiempo t, en mm^6/m^3 . El tercero y último método se basa en el criterio de relación con retraso, el que toma en cuenta el retraso existente desde que el radar detecta las gotas en la atmósfera hasta que caen sobre el terreno y las registran los pluviógrafos:

$$Z_{i,t} = AR_{i,t+\Delta t}^b \quad (6)$$

Donde Δt es la diferencia entre el tiempo t cuando el radar registra en la atmósfera los hidrometeoros, y el tiempo (t + Δt) cuando los registran los pluviógrafos.

Por otra parte, Díaz-Viera et al. (2009) realizaron estimaciones conjuntas de precipitación de pluviógrafos y radar meteorológico, consideraron dos casos: El primero teniendo en cuenta los datos de lluvia de pluviógrafos y todos los datos de la imagen de radar y el segundo caso en el cual incluyen en la estimación todos los datos de lluvia de pluviógrafos y sólo el valor de radar que coincide con el punto de la malla de datos del radar. Asegurando que el segundo método es

computacionalmente más eficiente y sugieren su uso para sistemas de estimación en tiempo real.

En este trabajo de tesis se determinó utilizar el primero de los métodos propuestos por Méndez-Antonio y colaboradores (2006), combinándolo con el segundo de los casos analizados por Díaz-Viera et al. (2009) debido a las características del radar y buscando la mayor exactitud posible en la relación Z-R.

Los otros métodos no se tomaron en consideración porque promediando los valores de reflectividad se pierden principalmente el mínimo y el máximo de los valores, siendo este último de vital importancia para la investigación.

En el caso particular del método que tiene en cuenta el retraso temporal, se descartó porque las características del radar la compensan, pues hace barridos cada 1 minuto lo que da un mínimo de dilación entre el momento en que se registra la precipitación en el pluviógrafo y el pico de reflectividad correspondiente a la coordenada de dicho instrumento.

Otros autores como Tepach (2015) han realizado estudios de la relación Z-R para el radar meteorológico, dicha autora analizó esta relación en el radar meteorológico de Alvarado, Veracruz, México, con el fin de estimar la lluvia en la zona conurbada de Veracruz-Boca del Río. Allí no se obtuvo una buena relación ya que las mejores aproximaciones obtenidas (lineales y polinomiales) no obtuvieron un R^2 suficiente para cumplir con el objetivo del trabajo ya que dicho índice obtenido no superó el valor de 0,40.

Errores asociados a la estimación de la precipitación por radar

En muchas ocasiones los errores a la hora de estimar la precipitación por radar son más comunes de lo que se pudiera predecir, ya que hasta las características y la forma de nuestro planeta y del área de estudio influyen de manera directa en el pronóstico cuantitativo de la lluvia.

El cálculo de la precipitación a partir de las mediciones de radar tiene errores aleatorios o sistemáticos, lo que degrada la calidad de las estimaciones. Estos errores pueden ser producto, del mal funcionamiento del equipo del radar, bloqueo orográfico, ecos falsos, propagación anómala, atenuación, evaporación de la lluvia antes de llegar al suelo, llenado parcial del haz de radar y su altura sobre el terreno, y la diversidad de tormentas (Wilson y Brandes (1979)).

Según Rosengaus (1999) la resolución a través del despliegue cartesiano es sólo comparable a la resolución real del radar a distancias radiales de menos de 60 km (figura 8). Por este motivo hablar de una relación Z-R más allá de esta medida y no tener en cuenta este detalle de resoluciones es totalmente erróneo. En la figura 8 se distingue la ampliación de la resolución de la malla del radar como explicamos previamente.

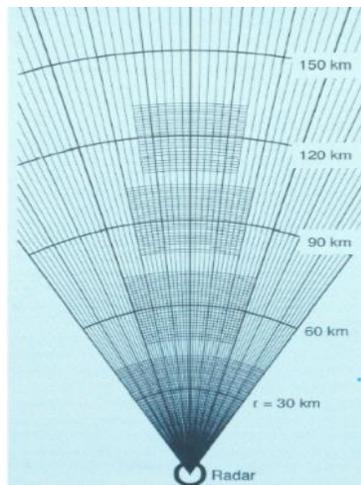


Figura 8. Porción de la malla de medición de un radar. Rosengaus (1999).

El autor antes citado, también realizó una compilación de varios de los factores que afectan la estimación de la lluvia utilizando los radares meteorológicos:

- La curvatura de la Tierra y el bloqueo orográfico producen un muestreo de las tormentas a niveles tales que se puede subestimar severamente la precipitación, siendo esto, más crítico en regiones de actividad convectiva poco profunda.

- Las máximas intensidades de lluvia siempre son suavizados y subestimados por el radar, aumentando este efecto con la distancia radial.
- La definición de la estructura de la tormenta siempre se degrada al aumentar la distancia al radar.

Determinando que la conveniencia de contar con una relación Z-R localmente diseñada, comparando directamente la reflectividad al nivel más bajo disponible con las mediciones de lluvia en superficie, puede contrarrestar algunos de los efectos que disminuyen la habilidad de los radares meteorológicos para estimar con exactitud la precipitación.

Por su parte Fattorelli, et al (1996), agregan a estos factores de error otros como la atenuación y las propagaciones anómalas. El primero depende de la longitud de onda (λ), del diámetro de la partícula D (se asume que es esférica) y de la constante dieléctrica de las partículas (agua líquida o nieve). El segundo por su parte está determinado fundamentalmente por inversiones de temperaturas que cambian la refracción del haz generado y que lo canalizan hacia la superficie terrestre o, por el contrario, hacia el espacio.

Otros errores que pueden existir a la hora de obtener la relación entre la reflectividad y la precipitación en superficie son: la evaporación, difracción, la formación de lluvia a bajas altitudes, la presencia de granizo y el desvío por el viento, aseveró Machado, (2006).

Al mismo tiempo cabe señalar que no solo la obtención de la reflectividad se puede ver afectada, sino también la determinación del valor de precipitación que se registra en el pluviómetro puede presentar errores, entre los que tenemos la inclinación de instalación del equipo, desperfectos mecánicos y la presencia de vientos fuertes a la altura de la captación de la lluvia.

Considerando las observaciones de los trabajos anteriores, la red de estaciones y las características del equipo de medición (radar y pluviógrafos), así como los datos que se tienen, en el presente estudio se tomarán los datos de las estaciones meteorológicas automáticas y se comparará con los máximos de reflectividad del

intervalo de tiempo donde ocurrió la precipitación con el fin de mejorar la relación Z-R.

Análisis estadístico

Los métodos usualmente utilizados en diversos estudios para evaluar el desempeño de los modelos de simulación según Soto-Bravo y González-Lutz (2019), están basados en dos áreas: (1) en el análisis de diferencias y (2) en el análisis de regresión, entre valores medidos y simulados:

- (1) Los índices estadísticos comúnmente utilizados son la raíz cuadrada del error medio estándar (RMSE) y el error medio absoluto (MAE) principalmente,
- (2) Se utiliza el intercepto, el coeficiente de regresión lineal y el coeficiente de determinación.

Los autores antes mencionados concluyeron además que el análisis de regresión, utilizado correctamente, es el método más adecuado para evaluar el desempeño de un modelo de simulación en agricultura, sin embargo, debe considerarse conjuntamente con el R^2 , el RMSE, los valores y la significancia del coeficiente de regresión, entre otros criterios

Por su parte Fox (1981) en sus estudios estadísticos propone enfocarse en el análisis de diferencias (1), a la hora de validar un modelo de predicción, proponiendo comparar el valor calculado y el valor de los promedios observados. Análisis que es ratificado por Willmott (1982) sugiriendo además que las mejores medidas para determinar el desempeño de estos modelos son el Error Cuadrático Medio (RMSE) el Error Absoluto Medio (MAE) ya que resumen las diferencias entre lo calculado por el modelo y lo que ocurre en la realidad.

RMSE

El RMSE es la métrica más común para los problemas de regresión y se representa con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (7)$$

Que no es más que la raíz cuadrada de la distancia cuadrada promedio entre el valor real (Y_i) y el valor pronosticado por el modelo (\hat{Y}_i). Este índice nos indica entonces cuan cerca están los puntos de los datos observados de los valores predichos por el modelo. También pudiera interpretarse como la desviación estándar de la varianza inexplicada. A valores más bajos de RMSE indican un mejor ajuste del modelo.

MAE

En el caso del MAE nos proporciona la medida de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados como se aprecia en la ecuación (8).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (8)$$

De igual manera que en el RMSE en la ecuación para determinar el MAE (Y_i) representa el valor real y (\hat{Y}_i) el valor pronosticado por el modelo. Cabe señalar que el MAE es un puntaje lineal, lo que significa que todas las diferencias individuales se ponderan por igual en el promedio.

R²

Por último, el índice (R²) conocido también como coeficiente de determinación, el cual es la medida más importante en la bondad del ajuste, definiéndolo como el porcentaje de la variabilidad total de la variable dependiente que es explicada por el modelo.

Entre sus principales características R² es una cantidad adimensional que toma valores entre 0 y 1. De esta manera si el ajuste es bueno R² será cercano a 1 y mayor será la fuerza de asociación entre las variables.

El valor de R² se determina conforme a la fórmula (9), donde (Y_i) representa el valor real y (Ŷ_i) el valor pronosticado. Este índice se utiliza en disímiles ocasiones con fines descriptivos y muestra que las variables independientes seleccionadas explican la variabilidad de las variables dependientes Laguna (2006).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (9)$$

Una de las dificultades de R² es que aumenta a medida que se aumentan predictores al modelo de regresión. Este aumento es artificial cuando los predictores no mejoran el ajuste del modelo.

R² ajustado

Para mejorar esta deficiencia comúnmente se utiliza el índice R² ajustado el cual incluye los grados de libertad y que a pesar de que se aumenten predictores al modelo, si estos no lo mejoran el R² ajustado disminuirá, mientras que aumentará si se agregan predictores que si incrementen el ajuste del modelo. Además, el R² ajustado siempre se debe usar con más de una variable de predicción según el sitio <https://aprendeia.com/evaluando-el-error-en-los-modelos-de-regresion/>.

Hay que resaltar además que una mala interpretación de este índice puede conducir a graves errores y a una aplicación completamente equivocada de un determinado modelo validado únicamente con el coeficiente de determinación. Muestra de ello lo da Martínez (2005) cuando plantea que en el análisis de regresión el objetivo no es obtener un R^2 elevado sino obtener estimadores precisos de los verdaderos coeficientes de regresión.

Dicha autora también explica que un valor alto de R^2 no es evidencia suficiente a favor del modelo ni que los valores pequeños indican absolutamente que el modelo es malo y por ende es necesario tener en cuenta otros índices estadísticos y otras relevancias lógicas y teóricas sobre las variables implicadas.

Dentro del software R en específico se trabajó con la función LM (Linear Model) la que además de determinar los índices antes descritos brinda otros indicadores estadísticos como el F-Statistic y el P-Value.

F-Statistic

El F-Statistic es un test que se utiliza para evaluar la capacidad explicativa que tiene la variable independiente sobre la variación de la variable dependiente. De esta manera se pretende determinar si la variable independiente tiene la capacidad de explicar una parte significativa de la variación de la variable dependiente. A medida que aumenta el valor de este índice mejor será nuestro modelo en cuestión.

P-Value

Por su parte el P-Value da la medida de cuan significativo es la ecuación y los coeficientes que acompañan a las variables. El mismo se define como la probabilidad de que un valor estadístico calculado sea posible dada una hipótesis nula cierta. En términos simples, el valor p ayuda a diferenciar resultados que son producto del azar del muestreo, de resultados que son estadísticamente significativos.

Este índice presenta un valor crítico igual a 0.05, y partiendo de ahí si el P-Value es mayor, menos significación tendrán los coeficientes de nuestro modelo. Si por el

contrario el P-Value es menor a 0.05 quiere decir que los coeficientes de nuestra ecuación tienen un gran peso en los resultados que se obtendrán. Sin embargo, en el año 2020 Niz-Ramos recomendó sustituir el umbral de 0.05 por 0.005 y calcular e informar lo más preciso posible los p values.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas

Para realizar un trabajo homogéneo y organizado, y teniendo en cuenta las experiencias de anteriores estudios se determinó realizar la relación Z-R del rada doppler del AMG utilizando los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas y de reflectividad del radar, de los años 2019 y 2020. Se eligieron estos años, porque es cuando el radar tuvo una mayor estabilidad en cuanto a elevación, intensidad del haz y recepción de la señal.

Las estaciones meteorológicas utilizadas pertenecen al departamento de Protección Civil del AMG, distribuidas principalmente en los municipios de Zapopan y Guadalajara, donde ocurre más frecuentemente el fenómeno de inundaciones por precipitación.

Dichas estaciones presentan las coordenadas como se describe en la tabla 2 y para una mejor visualización, se distribuyeron geográficamente en un mapa de la zona de estudio como se aprecia en la figura 9. Este mapa fue confeccionado utilizando la herramienta de Google Earth.

Tabla 2. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas

Estación	Latitud	Longitud	Estación	Latitud	Longitud
Plaza del Sol	20 39' 05" °N	103 24' 07" °W	PC Zapopan	20 45' 00" °N	103 22' 12" °W
UAG	20 41' 17" °N	103 25' 18" °W	Cañadas	20 45' 59" °N	103 22' 30" °W
Prepa20	20 37' 43" °N	103° 28' 37" °W	La Primavera	20 43' 27" °N	103 33' 47" °W
Tec. Zapopan	20 42' 00" °N	103 28' 22" °W	Molinos	20 49' 17" °N	103 26' 35" °W
La Cima	20 44' 50" °N	103 24' 49" °W	Tec. Park	20 43' 52" °N	103 29' 49" °W

De esta manera tenemos un total de diez estaciones meteorológicas automáticas a diferentes distancias del radar (el que está representado en el mapa por las siglas IAM) las que utilizaremos en la presente investigación, con una base de datos para cada una de las estaciones, que comprende valores de diferentes variables meteorológicas en intervalos de 10 minutos.

Para nuestro estudio se utilizaron los valores de precipitación durante los años 2019 y 2020 de estas diez estaciones meteorológicas. Sin embargo se subdividió la investigación en tres partes, analizando primeramente los datos de las estaciones ubicadas en el anillo de 10 Km (6 estaciones), posteriormente el anillo de distancia entre 10 y 20 Km (4 estaciones) y por último se utilizaron todas las estaciones, independientemente de su distancia, para obtener la relación Z-R general del radar tapatío.

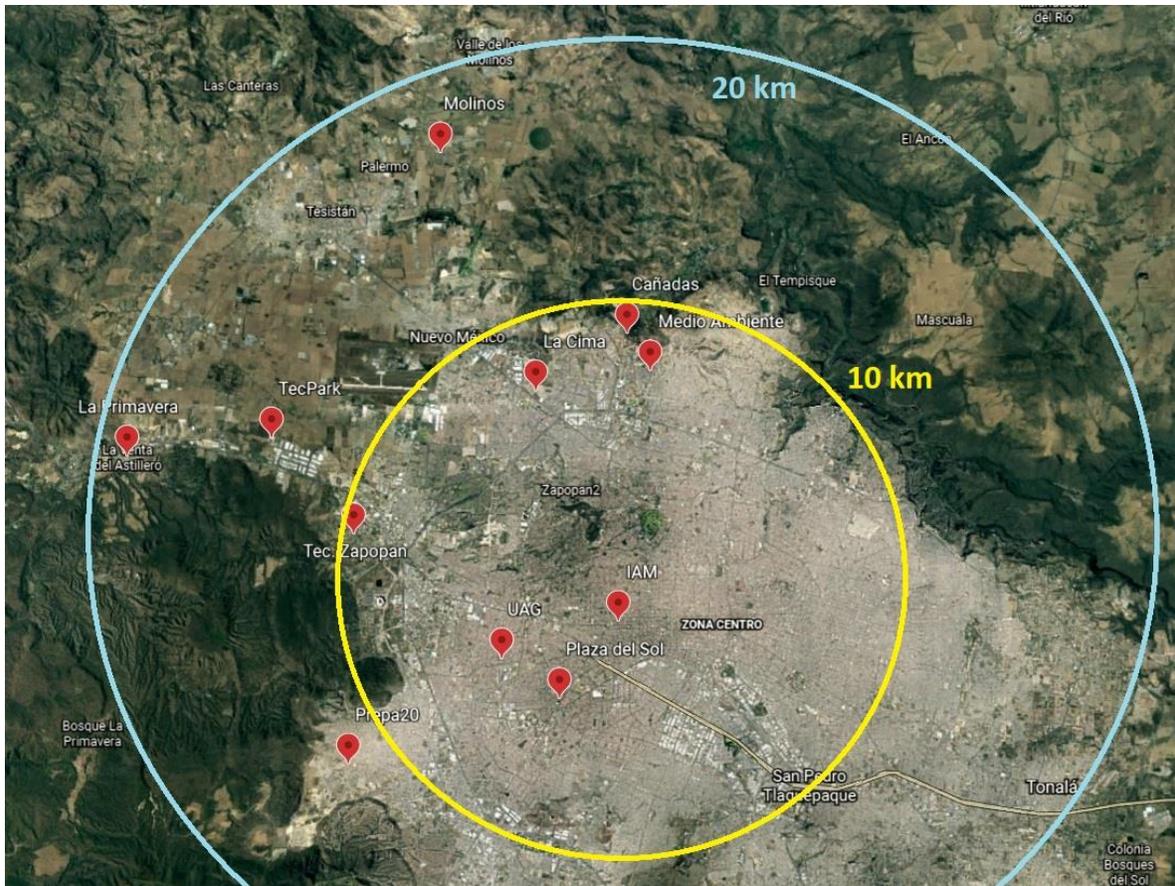


Figura 9. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas y los anillos de distancia de 10 y 20 Km en el AMG.

La secuencia de tareas a seguir resulta sencilla de manera general, ya que fue obtener los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas y emparejarlos con los valores de reflectividad correspondientes para así poder realizar un gráfico de dispersión y analizar los posibles ajustes que pudieran explicar los valores obtenidos.

Los valores de lluvia (R) se tomaron en intervalos de 10 minutos durante los años 2019 y 2020.

Con ese punto de partida el trabajo comenzó a complejizarse ya que había que seleccionar qué tormentas se tomarían en cuenta de la base de datos, si aquellas que habían tenido 30 minutos de duración, 1 hora o más tiempo de duración.

Además había que determinar cómo íbamos a obtener los valores de reflectividad del radar que formarían los puntos coordenados (Z, R)

Según Monjo (2008) si queremos estudiar el comportamiento de la lluvia en el tiempo, debemos fijarnos en cómo se distribuye la intensidad a lo largo del mismo. Usualmente se usa el concepto de intensidad para referirnos a valores medios, es decir, a una cierta cantidad de precipitación registrada en un tiempo determinado: una hora, un minuto, etc. La agencia estatal de Meteorología, citada por este autor, clasifica la intensidad de la lluvia se clasifica como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de la lluvia según la intensidad media en una hora.
Agencia Estatal de Meteorología (España)

Intensidad	Acumulación en una hora
DÉBIL	entre 0,1 y 2 mm
MODERADO	entre 2,1 y 15 mm
FUERTE	entre 15,1 y 30 mm
MUY FUERTE	entre 30,1 y 60 mm
TORRENCIAL	más de 60 mm

En México diferentes entidades gubernamentales utilizan alguna clasificación de la lluvia atendiendo a su intensidad. Una de estas entidades es el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) el que trabaja con la clasificación que se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de la lluvia según la intensidad media en una hora.
(CENAPRED)

Clasificación	Intensidad (mm/h)
Lluvias Escasas	Menor de 5 mm
Lluvias Ligeras	Entre 5 y 10 mm
Lluvias Moderadas	Entre 10 y 20 mm
Lluvias Fuertes	Entre 20 y 50 mm
Lluvias Muy Fuertes	Entre 50 y 70 mm
Lluvias Intensas	Mayor de 70 mm

Por otro lado, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Secretaría de Marina (SEMAR) la que extienden su clasificación de la lluvia un poco más allá y lo hace de manera distinta para los acumulados inferiores, por lo que presenta diferentes rangos de precipitación y adiciona términos a la clasificación de la lluvia, como se puede distinguir en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de la lluvia según la intensidad media en una hora.
(SMG y SEMAR)

Clasificación	Intensidad (mm/h)
Lluvia	Menor de 25 mm
Lluvia Fuertes	Entre 25 y 50 mm
Lluvia Muy Fuertes	Entre 50 y 75 mm
Lluvia Intensa	Entre 75 y 150 mm
Lluvia Torrencial	Entre 150 y 250 mm
Lluvia Extraordinaria	Mayor de 250 mm

Al analizar las tres tablas de clasificación, y como los datos de precipitación son obtenidos en intervalos de 10 minutos, concluimos que el umbral de 30 mm de precipitación se localiza en todas las clasificaciones antes expuestas y a partir de ahí determinamos que una tormenta donde al menos en 10 minutos precipiten 5 mm ya se considera lluvia fuerte.

Datos de precipitación

Durante el periodo bienal que se consideró para este trabajo de tesis (2019-2020) se reafirmó que la etapa de lluvias en el AMG se concentra entre los meses de junio a octubre. Con anterioridad González (2010) expresaron que la temporada de lluvias se presenta durante el verano y parte del otoño, con más del 80% de la precipitación total anual.

Los datos de precipitación en una primera instancia se obtuvieron directamente de la estación meteorológica en formato *.txt, después la información se trasladó a Microsoft Excel para trabajarla cómodamente, obteniendo así los datos de las estaciones de Plaza del Sol, UAG y Prepa20 durante el año 2019.

El resto de las estaciones meteorológicas y los datos de todo el año 2020 lo tuvimos que trabajar con el software Weatherlink donde cargamos un fichero *.wlk con las mediciones de estas estaciones meteorológicas y una vez cargadas en el programa pudimos descargar esta información en tablas en formato *.txt y posteriormente traspasarlas a Microsoft Excel.

Ya conformada y organizada la matriz de datos se eligieron que tormentas se tendrían en cuenta para utilizar los datos de precipitación. Para esto se usó el criterio explicado con anterioridad con la peculiaridad de que las mediciones de precipitación estaban registradas en intervalos de 10 minutos.

De esta manera, como para que se clasificara como lluvia fuerte debían precipitar cerca de los 30 mm de lluvia, y para garantizar que la tormenta fuera de esta categoría, se eligió todas las tormentas donde al menos uno de los intervalos de 10 minutos tuviera una precipitación mayor o igual a 5 mm de lluvia.

Datos de reflectividad

Para la recolección y filtrado de los datos del radar la labor fue un poco más compleja. Los datos del radar del año 2019 están filtrados preliminarmente en formato *.mat, pero el volumen de información hace el trabajo más tardado y muy complejo, ya que incluye trabajo de cómputo algo pesado.

Al continuar con la recopilación de los datos del radar, los archivos del año 2020 tenían formato *.vol, el cual únicamente puede trabajarse con el software EDGE

instalado en la computadora que administra los datos del radar en el Instituto de Astronomía y Meteorología (IAM),

Con estos percances para nuestro avance en la investigación, se dividió la labor en dos etapas, una que consistía en correr un algoritmo en Matlab para lograr un cotejo entre los datos de precipitación de las estaciones y la reflectividad correspondiente, mientras que en la segunda etapa para obtener los datos se realizó de manera manual en el programa Edge antes mencionado con la salida del Plan Position Indicator (**PPI** por sus siglas en inglés) tal y como se observa en la figura 10.

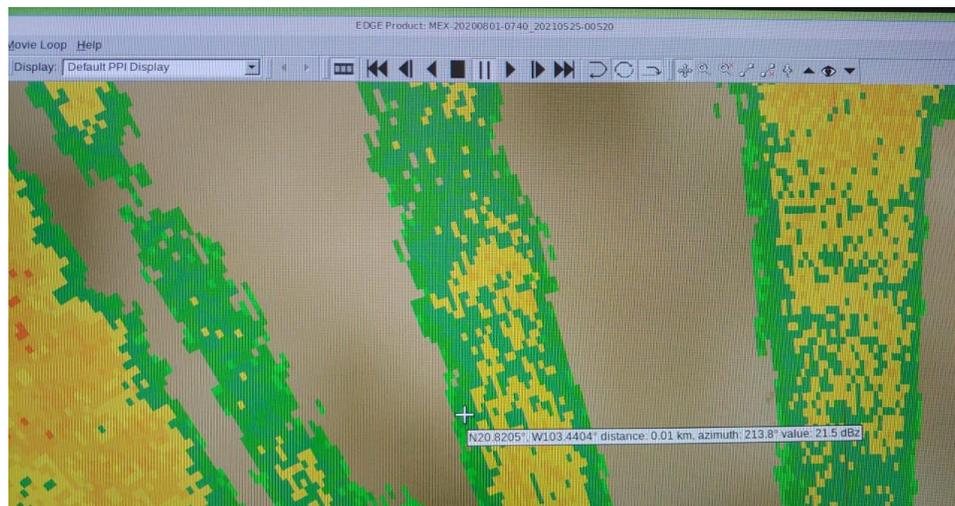


Figura 10. Obtención de los datos de reflectividad de forma manual, directamente del PPI en el software Edge.

En dicho software, solo desplazamos el cursor sobre el plano cartesiano con coordenadas de latitud y longitud y así obtenemos los valores de reflectividad de dichas coordenadas (Figura 9), que por supuesto coinciden con la posición de las estaciones meteorológicas vinculadas a esta investigación.

En el caso de la reflectividad del año 2019, se diseñaron en Matlab algoritmos matemáticos (véase apéndices 1, 2 y 3) que extraen los datos de reflectividad, latitud y longitud del radar del archivo netcdf y se elige únicamente los valores de reflectividad correspondientes a la ubicación de la estación en la fecha y hora donde ocurrió la precipitación en cuestión. En caso de no tener datos exactamente en dicha

ubicación, el programa selecciona el nodo de la malla del radar más cercana a dicha posición y así obtiene los primeros valores de reflectividad que utilizamos en esta tesis de grado, tal y como se aprecia en la figura 11.

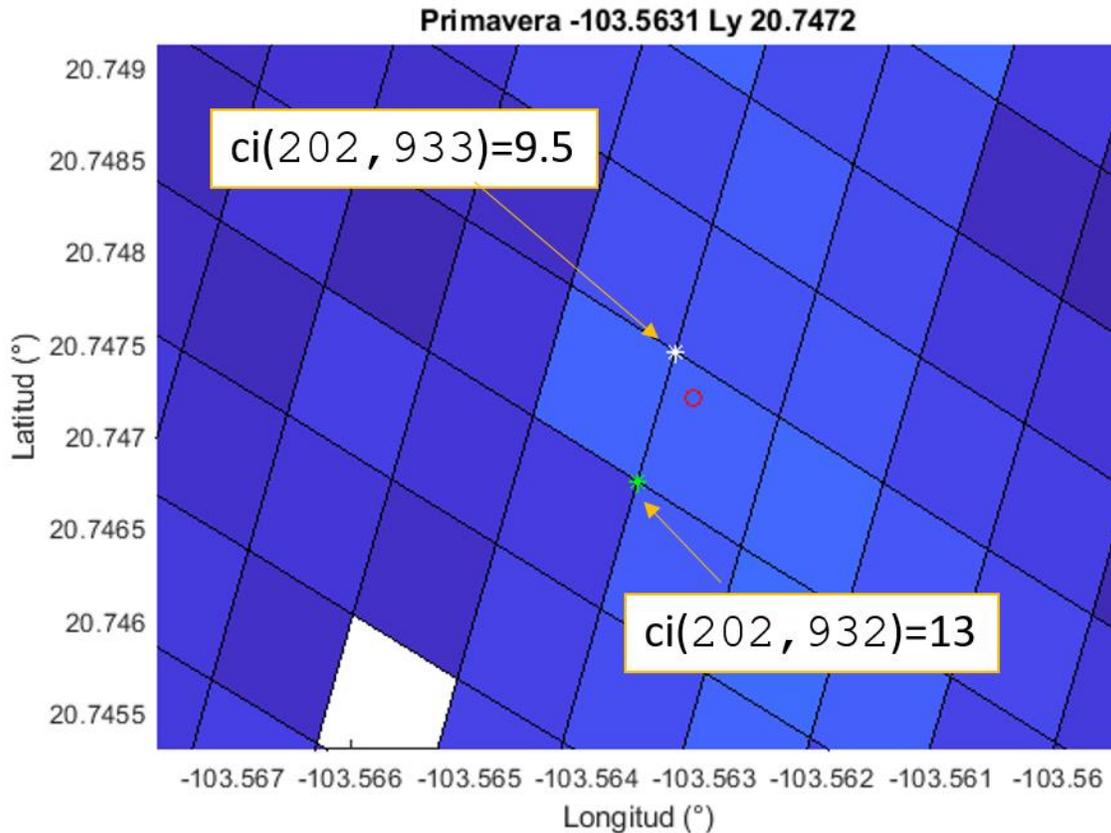


Figura 11. Selección de nodo más cercano a la estación meteorológica.

Hay que tener en cuenta también que dicha malla varía de resolución, a medida que nos alejamos del punto donde está enclavado el radar disminuye su resolución haciendo que el espacio entre nodo y nodo sea cada vez mayor.

Según Rosengaus (1999) la resolución a través del despliegue cartesiano es sólo comparable a la resolución real del radar a distancias radiales cortas (menos de 60 km). Esto valida nuestro trabajo ya que los valores de precipitación con los que trabajaremos se encuentran distribuidos en un radio espacial de solo 20 km.

Otra de las cuestiones que valoramos, en aras de lograr una mayor exactitud para nuestro objetivo final, fue elegir correctamente los valores de reflectividad ya que el

radar doppler del Área Metropolitana de Guadalajara realiza barridos entre 1 y 3 minutos aproximadamente, por lo que presenta mayor frecuencia de salvar los datos de reflectividad, que la frecuencia con que las estaciones meteorológicas utilizadas archivan los datos (10 minutos), en este caso la precipitación.

Como la lluvia medida es un acumulado en el intervalo de tiempo, determinamos tomar como valor de reflectividad el mayor valor registrado en los 10 minutos donde se acumuló la precipitación. No promediamos los valores de reflectividad puesto que se pierde gran información con los valores extremos, fundamentalmente el máximo, que es el que a nuestro criterio resulta de mayor importancia a la hora de cumplir con nuestros objetivos.

Así se emparejaron los valores de precipitación (R) y los valores máximos de reflectividad (Z) en el intervalo. El detalle aquí recae que en el caso de las estaciones meteorológicas los datos eran guardados con horario local, mientras que los datos del radar son guardados en hora UTC, por lo que hubo que convertir la hora local para que hubiera una coincidencia de horarios.

Graficado y herramientas estadísticas

Para el graficado de los valores y para su posterior análisis se utilizó como herramienta inicial Microsoft Excel, de la paquetería de Office, la que brinda una amplia gama de métodos estadísticas para el trabajo y manejo de los datos. Dichos datos están separados por dos anillos de distancia, con el fin de ver las diferencias que pudiera existir en la relación Z-R a diferentes distancias dentro del radio de acción del radar.

Las Tablas 6, 7 y 8 muestran los datos correspondientes a las variables de estudio en el anillo de 10 kilómetros, 20 kilómetros y general, respectivamente.

Tabla 6. Datos de reflectividad y lluvia en el Anillo de 10 kilómetros de distancia

Lluvia (R) mm/10 min	Reflec tividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflecti vidad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflec tivida d (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflecti vidad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflecti vidad (Z) dBZ
1.0	35.0	0.5	20.0	0.8	34.0	1.5	26.5	0.5	23.5
5.1	48.0	9.4	52.0	5.1	48.0	0.3	15.0	0.5	24.0
0.5	24.0	1.0	32.0	9.9	62.0	8.6	56.5	0.5	24.0
0.5	22.0	0.3	18.0	9.7	60.5	7.6	45.5	0.5	24.0
0.5	22.0	2.8	48.5	6.4	52.0	2.8	29.0	0.5	23.5
7.9	55.5	5.6	44.5	0.3	18.0	0.3	24.5	0.5	23.5
11.9	75.0	1.8	34.0	0.5	10.5	0.3	18.0	0.3	15.0
7.1	55.0	0.5	19.0	6.6	49.5	2.8	37.5	0.5	16.5
3.3	43.0	0.3	15.5	3.1	48.0	16.0	52.5	6.9	53.0
0.5	23.5	9.4	52.0	2.5	39.0	12.5	50.0	9.4	60.5
0.5	23.0	17.3	44.5	1.0	34.5	6.4	46.5	1.8	37.5
0.3	18.0	6.4	42.0	0.3	16.0	2.8	31.0	0.5	24.0
0.3	17.5	2.5	38.5	0.8	18.0	1.0	26.0	0.5	23.5
0.5	24.0	1.8	34.5	1.8	27.8	0.5	18.5	0.3	14.0
0.5	24.0	1.0	32.0	6.1	51.5	0.5	15.5	0.3	16.0
0.5	24.0	0.5	19.5	3.3	43.5	6.4	42.5	6.6	51.5
0.5	23.5	2.8	44.5	2.0	37.0	7.4	49.5	13.5	59.5
0.5	23.5	6.4	49.0	1.0	30.5	0.5	23.5	2.3	36.0
6.4	51.5	6.9	49.0	0.3	14.0	4.3	43.0	0.8	26.0
3.3	35.0	9.4	52.0	3.6	25.5	2.3	27.5	0.3	15.5
1.0	27.0	4.6	40.0	10.7	26.0	0.3	12.0	0.5	22.0
2.0	35.0	1.3	25.5	15.8	31.0	12.7	47.0	0.5	24.5
2.3	38.5	0.3	18.0	11.7	30.5	5.3	34.5	6.6	49.5
1.5	36.0	2.5	44.0	2.3	27.0	0.3	22.5	0.5	22.0
0.5	22.0	6.1	54.0	0.5	22.0	10.2	51.5	0.3	16.0
0.5	20.5	1.5	30.0	0.3	18.5	13.5	46.0	6.4	53.5
0.8	28.0	0.3	18.0	0.3	22.5	3.3	38.5	7.6	59.5
0.5	22.0	4.3	31.0	2.5	40.5	3.1	35.5	5.1	48.0
0.3	15.0	10.9	52.5	3.1	47.0	1.8	28.5	2.3	38.0
0.3	16.0	5.8	38.5	1.0	35.5	2.3	32.0	1.5	35.5
0.3	15.0	6.1	41.0	1.3	31.5	0.3	20.0	0.5	22.0
0.3	15.0	0.8	23.5	5.1	44.5	0.3	18.5	0.3	16.0
0.3	16.0	5.8	30.5	0.8	28.0	0.3	20.5	0.5	24.0
0.8	29.5	3.1	25.5	1.3	30.5	0.3	16.0	0.3	15.0

Tabla 6. Datos de reflectividad y lluvia en el Anillo de 10 kilómetros de distancia. Continuación

Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ
6.1	52.0	0.8	10.0	0.5	22.0	0.8	19.5	0.5	22.0
2.0	36.0	1.3	15.5	0.3	18.8	5.1	48.0	0.5	23.0
0.5	23.0	4.1	38.5	4.1	36.5	1.0	35.0	0.5	22.0
0.3	18.0	1.3	13.0	4.6	41.0	0.8	28.0	1.0	28.0
0.3	20.0	1.5	30.0	4.3	35.0	0.5	24.0	0.8	28.0
0.8	28.0	4.6	42.5	3.6	33.0	0.3	15.5	1.0	30.0
15.7	65.5	7.6	45.5	2.0	36.5	0.3	15.0	0.8	26.5
15.5	65.0	9.4	38.0	1.3	31.0	2.0	37.0	0.8	28.0
8.6	56.0	9.4	47.5	0.8	28.5	6.9	53.5	0.5	24.0
1.5	35.0	5.6	43.0	0.5	30.5	5.3	48.5	0.5	25.0
0.3	20.0	5.8	45.5	0.3	13.5	4.1	44.5	0.5	25.0
0.3	18.0	3.3	41.5	0.3	16.5	3.6	43.0	0.5	24.0
7.1	55.0	1.0	32.0	0.3	21.0	1.8	33.5	0.5	24.0
3.8	43.5	0.5	20.0	6.1	44.5	0.8	28.0	0.5	25.5
0.8	30.0	0.3	19.5	5.1	42.0	0.8	28.5	0.5	22.0
0.5	24.0	7.6	50.0	10.7	48.5	0.5	24.5	0.3	16.0
0.5	22.0	6.6	45.5	10.4	49.0	0.8	28.0	0.5	23.0
0.5	23.0	0.8	30.5	7.1	47.0	0.5	24.0	0.5	22.0
0.5	24.0	0.3	18.0	8.9	48.5	0.5	23.5	0.3	16.5
0.5	22.0	5.6	43.0	3.1	34.5	0.8	28.0	0.5	24.0
0.5	22.5	13.7	58.5	0.5	18.0	0.8	27.5	0.3	15.0
0.3	16.0	7.6	50.0	0.3	16.0	1.0	34.0	2.3	38.5
1.3	30.0	0.5	34.0	0.3	14.5	1.5	36.0	6.6	51.5
3.3	35.0	1.3	25.5	0.5	21.0	1.0	34.0	2.8	36.0
5.3	45.0	1.5	30.0	10.7	46.5	1.0	34.5	0.5	24.0
3.6	36.0	1.3	25.0	13.2	48.0	0.8	27.5	0.8	38.0
5.8	48.5	1.0	32.0	12.5	52.5	1.0	36.0	0.5	22.0
2.3	38.5	0.3	18.0	8.1	40.5	1.0	35.0	0.5	22.0
0.5	23.0	3.0	35.0	1.5	36.0	3.8	40.0	0.3	19.5
0.5	22.0	7.6	56.5	0.5	22.0	7.1	49.0	0.3	20.5
5.8	50.5	3.0	34.0	0.5	22.5	0.5	22.0	0.3	14.0
3.8	38.5								

Tabla 7. Datos de reflectividad y lluvia en el Anillo de 20 kilómetros de distancia

Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ
3.6	38.0	1.3	33.0	0.3	16.0	0.5	25.0	0.8	25.5
3.0	36.0	0.5	26.5	1.0	32.0	0.3	16.0	0.3	15.0
0.8	28.0	0.3	27.5	9.7	62.0	3.6	38.5	0.5	24.0
6.6	52.0	14.0	52.5	2.3	38.5	3.1	38.0	0.3	15.0
3.3	36.0	6.4	42.0	3.3	39.0	6.6	40.5	0.5	24.0
0.3	16.0	7.1	47.0	4.1	41.5	3.8	40.0	0.3	15.5
0.8	28.0	1.0	45.0	3.0	38.0	0.8	27.0	0.8	13.5
2.3	36.0	0.5	24.5	0.8	27.0	2.3	32.5	3.6	36.5
2.3	35.0	0.5	28.0	0.5	24.0	12.7	49.0	7.4	48.0
4.8	42.0	0.3	26.5	1.3	33.5	1.0	34.0	4.3	39.5
5.8	46.5	5.1	41.0	1.8	34.0	0.3	23.5	1.5	35.2
0.5	24.0	7.6	48.5	0.8	28.5	0.3	20.0	0.8	28.0
1.0	30.0	13.0	50.5	0.5	24.0	0.3	19.5	0.3	16.0
0.5	23.5	5.3	43.0	4.3	44.0	2.3	33.0	0.3	15.0
1.8	33.5	4.6	40.0	6.4	51.0	7.4	44.5	1.0	34.0
8.6	58.0	1.0	35.0	7.9	55.5	6.6	40.5	8.1	59.0
4.1	44.5	1.5	36.5	2.3	38.5	1.8	37.5	5.3	48.0
1.3	34.0	3.8	39.0	0.3	18.0	0.8	27.0	2.5	29.5
0.3	18.0	0.8	26.5	0.3	16.0	0.3	19.5	10.7	62.5
4.1	36.5	3.1	37.5	0.3	16.0	0.3	19.5	3.0	38.5
5.3	40.5	8.1	51.0	0.3	15.0	0.3	20.0	3.3	39.0
1.3	18.8	2.0	40.5	6.4	50.0	7.4	44.5	1.0	35.0
1.0	14.0	0.5	29.0	6.4	52.5	1.5	37.0	3.3	35.0
0.8	12.0	0.3	26.0	6.1	51.0	0.5	22.0	5.3	48.0
0.3	8.5	0.3	22.0	1.5	42.0	0.3	20.0	4.3	44.0
2.0	38.0	0.5	30.0	3.3	35.0	0.8	27.0	4.3	42.0
9.7	40.5	0.8	28.5	4.1	37.0	5.3	42.5	2.0	35.0
4.6	42.0	0.3	20.0	5.6	48.0	7.1	44.5	0.5	24.0
1.0	29.5	0.3	18.0	4.6	46.0	0.3	20.0	0.5	24.0
0.3	29.0	0.8	27.0	6.1	50.5	0.3	28.0	0.5	22.0
0.5	28.0	1.0	32.0	3.6	36.0	10.9	65.0	0.5	24.0
13.2	53.5	4.8	46.0	1.5	36.0	5.1	47.5	3.0	45.0
4.1	42.5	5.3	49.5	0.5	24.0	5.6	49.0	5.1	43.5
1.0	22.0	1.5	33.5	0.5	22.0	0.8	29.0	2.3	36.0
0.3	18.5	0.5	22.0	0.5	22.0	0.5	22.0	5.6	49.0

Tabla 7. Datos de reflectividad y lluvia en el Anillo de 20 kilómetros de distancia. Continuación

Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ
0.3	15.5	0.3	20.5	0.5	24.0	0.5	33.0	0.3	16.0
0.3	15.0	0.3	18.0	0.3	16.0	0.3	22.0	5.1	44.5
5.1	43.0	0.5	24.0	0.8	28.0	0.3	15.5		

Tabla 8. Datos de reflectividad y lluvia general

Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ
1.0	35.0	0.5	20.0	0.8	34.0	1.5	26.5	0.5	23.5
5.1	48.0	9.4	52.0	5.1	48.0	0.3	15.0	0.5	24.0
0.5	24.0	1.0	32.0	9.9	62.0	8.6	56.5	0.5	24.0
0.5	22.0	0.3	18.0	9.7	60.5	7.6	45.5	0.5	24.0
0.5	22.0	2.8	48.5	6.4	52.0	2.8	29.0	0.5	23.5
7.9	55.5	5.6	44.5	0.3	18.0	0.3	24.5	0.5	23.5
11.9	75.0	1.8	34.0	0.5	10.5	0.3	18.0	0.3	15.0
7.1	55.0	0.5	19.0	6.6	49.5	2.8	37.5	0.5	16.5
3.3	43.0	0.3	15.5	3.1	48.0	16.0	52.5	6.9	53.0
0.5	23.5	9.4	52.0	2.5	39.0	12.5	50.0	9.4	60.5
0.5	23.0	17.3	44.5	1.0	34.5	6.4	46.5	1.8	37.5
0.3	18.0	6.4	42.0	0.3	16.0	2.8	31.0	0.5	24.0
0.3	17.5	2.5	38.5	0.8	18.0	1.0	26.0	0.5	23.5
0.5	24.0	1.8	34.5	1.8	27.8	0.5	18.5	0.3	14.0
0.5	24.0	1.0	32.0	6.1	51.5	0.5	15.5	0.3	16.0
0.5	24.0	0.5	19.5	3.3	43.5	6.4	42.5	6.6	51.5
0.5	23.5	2.8	44.5	2.0	37.0	7.4	49.5	13.5	59.5
0.5	23.5	6.4	49.0	1.0	30.5	0.5	23.5	2.3	36.0
6.4	51.5	6.9	49.0	0.3	14.0	4.3	43.0	0.8	26.0
3.3	35.0	9.4	52.0	3.6	25.5	2.3	27.5	0.3	15.5
1.0	27.0	4.6	40.0	10.7	26.0	0.3	12.0	0.5	22.0
2.0	35.0	1.3	25.5	15.8	31.0	12.7	47.0	0.5	24.5
2.3	38.5	0.3	18.0	11.7	30.5	5.3	34.5	6.6	49.5
1.5	36.0	2.5	44.0	2.3	27.0	0.3	22.5	0.5	22.0

Tabla 8. Datos de reflectividad y lluvia general. Continuación

Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ
2.0	35.0	1.3	25.5	15.8	31.0	12.7	47.0	0.5	24.5
2.3	38.5	0.3	18.0	11.7	30.5	5.3	34.5	6.6	49.5
1.5	36.0	2.5	44.0	2.3	27.0	0.3	22.5	0.5	22.0
0.5	22.0	6.1	54.0	0.5	22.0	10.2	51.5	0.3	16.0
0.5	20.5	1.5	30.0	0.3	18.5	13.5	46.0	6.4	53.5
0.8	28.0	0.3	18.0	0.3	22.5	3.3	38.5	7.6	59.5
0.5	22.0	4.3	31.0	2.5	40.5	3.1	35.5	5.1	48.0
0.3	15.0	10.9	52.5	3.1	47.0	1.8	28.5	2.3	38.0
0.3	16.0	5.8	38.5	1.0	35.5	2.3	32.0	1.5	35.5
0.3	15.0	6.1	41.0	1.3	31.5	0.3	20.0	0.5	22.0
0.3	15.0	0.8	23.5	5.1	44.5	0.3	18.5	0.3	16.0
0.3	16.0	5.8	30.5	0.8	28.0	0.3	20.5	0.5	24.0
0.8	29.5	3.1	25.5	1.3	30.5	0.3	16.0	0.3	15.0
6.1	52.0	0.8	10.0	0.5	22.0	0.8	19.5	0.5	22.0
2.0	36.0	1.3	15.5	0.3	18.8	5.1	48.0	0.5	23.0
0.5	23.0	4.1	38.5	4.1	36.5	1.0	35.0	0.5	22.0
0.3	18.0	1.3	13.0	4.6	41.0	0.8	28.0	1.0	28.0
0.3	20.0	1.5	30.0	4.3	35.0	0.5	24.0	0.8	28.0
0.8	28.0	4.6	42.5	3.6	33.0	0.3	15.5	1.0	30.0
15.7	65.5	7.6	45.5	2.0	36.5	0.3	15.0	0.8	26.5
15.5	65.0	9.4	38.0	1.3	31.0	2.0	37.0	0.8	28.0
8.6	56.0	9.4	47.5	0.8	28.5	6.9	53.5	0.5	24.0
1.5	35.0	5.6	43.0	0.5	30.5	5.3	48.5	0.5	25.0
0.3	20.0	5.8	45.5	0.3	13.5	4.1	44.5	0.5	25.0
0.3	18.0	3.3	41.5	0.3	16.5	3.6	43.0	0.5	24.0
7.1	55.0	1.0	32.0	0.3	21.0	1.8	33.5	0.5	24.0
3.8	43.5	0.5	20.0	6.1	44.5	0.8	28.0	0.5	25.5
0.8	30.0	0.3	19.5	5.1	42.0	0.8	28.5	0.5	22.0
0.5	24.0	7.6	50.0	10.7	48.5	0.5	24.5	0.3	16.0
0.5	22.0	6.6	45.5	10.4	49.0	0.8	28.0	0.5	23.0
0.5	23.0	0.8	30.5	7.1	47.0	0.5	24.0	0.5	22.0
0.5	24.0	0.3	18.0	8.9	48.5	0.5	23.5	0.3	16.5
0.5	22.0	5.6	43.0	3.1	34.5	0.8	28.0	0.5	24.0
0.5	22.5	13.7	58.5	0.5	18.0	0.8	27.5	0.3	15.0

Tabla 8. Datos de reflectividad y lluvia general. Continuación

Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ	Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ
0.3	16.0	7.6	50.0	0.3	16.0	1.0	34.0	2.3	38.5
1.3	30.0	0.5	34.0	0.3	14.5	1.5	36.0	6.6	51.5
3.3	35.0	1.3	25.5	0.5	21.0	1.0	34.0	2.8	36.0
5.3	45.0	1.5	30.0	10.7	46.5	1.0	34.5	0.5	24.0
3.6	36.0	1.3	25.0	13.2	48.0	0.8	27.5	0.8	38.0
5.8	48.5	1.0	32.0	12.5	52.5	1.0	36.0	0.5	22.0
2.3	38.5	0.3	18.0	8.1	40.5	1.0	35.0	0.5	22.0
0.5	23.0	3.0	35.0	1.5	36.0	3.8	40.0	0.3	19.5
0.5	22.0	7.6	56.5	0.5	22.0	7.1	49.0	0.3	20.5
5.8	50.5	3.0	34.0	0.5	22.5	0.5	22.0	0.3	14.0
3.8	38.5	5.1	43.0	0.5	24.0	0.8	28.0	0.3	15.5
3.6	38.0	1.3	33.0	0.3	16.0	0.5	25.0	0.8	25.5
3.0	36.0	0.5	26.5	1.0	32.0	0.3	16.0	0.3	15.0
0.8	28.0	0.3	27.5	9.7	62.0	3.6	38.5	0.5	24.0
6.6	52.0	14.0	52.5	2.3	38.5	3.1	38.0	0.3	15.0
3.3	36.0	6.4	42.0	3.3	39.0	6.6	40.5	0.5	24.0
0.3	16.0	7.1	47.0	4.1	41.5	3.8	40.0	0.3	15.5
0.8	28.0	1.0	45.0	3.0	38.0	0.8	27.0	0.8	13.5
2.3	36.0	0.5	24.5	0.8	27.0	2.3	32.5	3.6	36.5
2.3	35.0	0.5	28.0	0.5	24.0	12.7	49.0	7.4	48.0
4.8	42.0	0.3	26.5	1.3	33.5	1.0	34.0	4.3	39.5
5.8	46.5	5.1	41.0	1.8	34.0	0.3	23.5	1.5	35.2
0.5	24.0	7.6	48.5	0.8	28.5	0.3	20.0	0.8	28.0
1.0	30.0	13.0	50.5	0.5	24.0	0.3	19.5	0.3	16.0
0.5	23.5	5.3	43.0	4.3	44.0	2.3	33.0	0.3	15.0
1.8	33.5	4.6	40.0	6.4	51.0	7.4	44.5	1.0	34.0
8.6	58.0	1.0	35.0	7.9	55.5	6.6	40.5	8.1	59.0
4.1	44.5	1.5	36.5	2.3	38.5	1.8	37.5	5.3	48.0
1.3	34.0	3.8	39.0	0.3	18.0	0.8	27.0	2.5	29.5
0.3	18.0	0.8	26.5	0.3	16.0	0.3	19.5	10.7	62.5
4.1	36.5	3.1	37.5	0.3	16.0	0.3	19.5	3.0	38.5
5.3	40.5	8.1	51.0	0.3	15.0	0.3	20.0	3.3	39.0
1.3	18.8	2.0	40.5	6.4	50.0	7.4	44.5	1.0	35.0
1.0	14.0	0.5	29.0	6.4	52.5	1.5	37.0	3.3	35.0

Tabla 8. Datos de reflectividad y lluvia general. Continuación

Lluvia (R) mm/10 min	Reflectividad (Z) dBZ								
0.8	12.0	0.3	26.0	6.1	51.0	0.5	22.0	5.3	48.0
0.3	8.5	0.3	22.0	1.5	42.0	0.3	20.0	4.3	44.0
2.0	38.0	0.5	30.0	3.3	35.0	0.8	27.0	4.3	42.0
9.7	40.5	0.8	28.5	4.1	37.0	5.3	42.5	2.0	35.0
4.6	42.0	0.3	20.0	5.6	48.0	7.1	44.5	0.5	24.0
1.0	29.5	0.3	18.0	4.6	46.0	0.3	20.0	0.5	24.0
0.3	29.0	0.8	27.0	6.1	50.5	0.3	28.0	0.5	22.0
0.5	28.0	1.0	32.0	3.6	36.0	10.9	65.0	0.5	24.0
13.2	53.5	4.8	46.0	1.5	36.0	5.1	47.5	3.0	45.0
4.1	42.5	5.3	49.5	0.5	24.0	5.6	49.0	5.1	43.5
1.0	22.0	1.5	33.5	0.5	22.0	0.8	29.0	2.3	36.0
0.3	18.5	0.5	22.0	0.5	22.0	0.5	22.0	5.6	49.0
0.3	15.5	0.3	20.5	0.5	24.0	0.5	33.0	0.3	16.0
0.3	15.0	0.3	18.0	0.3	16.0	0.3	22.0	5.1	44.5

Después se elaboraron los gráficos de dispersión para las variables involucradas, para cada uno de los anillos de distancia con respecto al radar y general como se aprecia en la figura 12 (a, b, c).

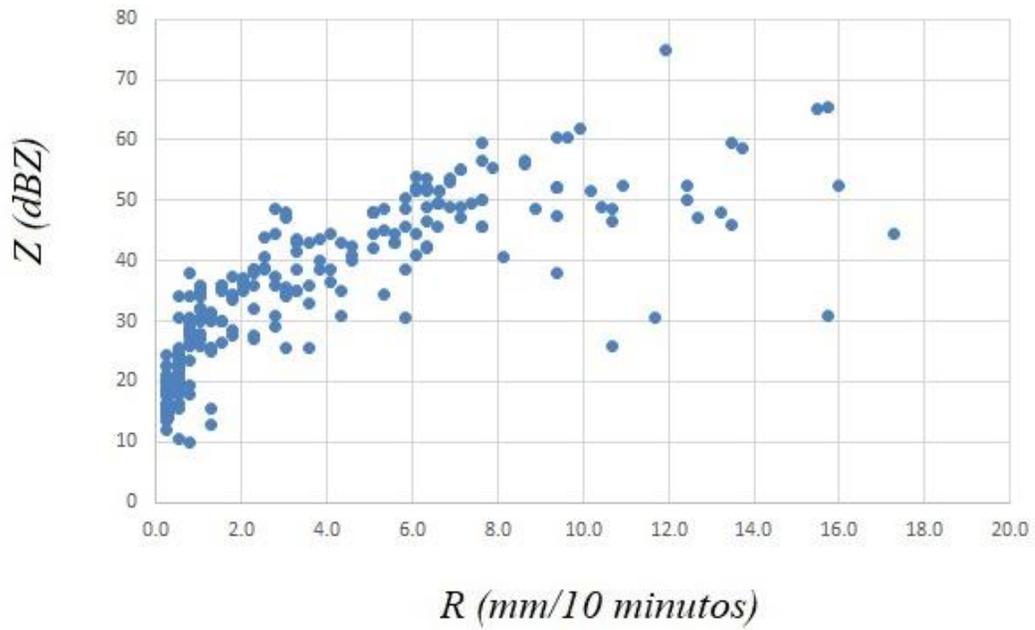


Figura 12. a) Gráfica de dispersión para el anillo de 10 Km

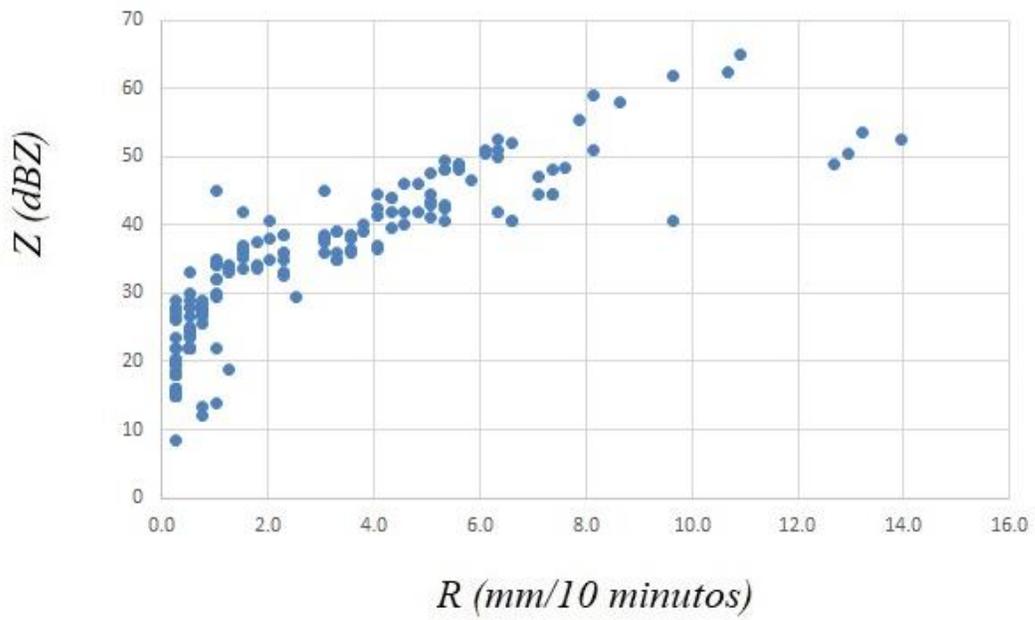


Figura 12. b) Gráfica de dispersión para el anillo entre 10 y 20 Km

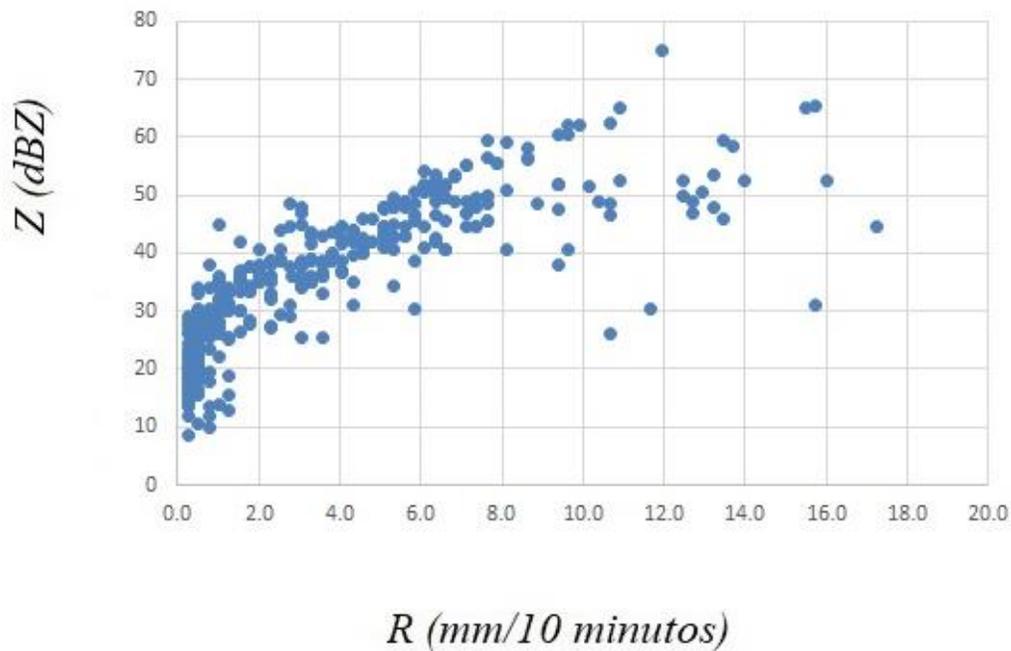


Figura 12. c) Gráfica de dispersión General

Para analizar estadísticamente la distribución de las gráficas de dispersión antes obtenidas, así como los valores de Z y R se utilizó el software R (ver apéndice 5), el cual está especializado en análisis estadístico y donde se obtuvieron las curvas que representan cada uno de los ajustes posibles y la ecuación que la describe.

Para ello se consideraron cinco índices estadísticos (RMSE, R^2 , R^2 ajustado, F-Statistic y el P-Value) que por separado indican cuan eficaz es nuestra relación (ecuación) que se ajusta a los datos para determinar cuál es el mejor modelo que describe la relación entre la reflectividad del radar y la precipitación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas que más se ajustan a los datos son: la polinómica de segundo grado, la curva exponencial, la logarítmica y la curva potencial, como se detalla a continuación para cada uno de los anillos de distancia, así como de manera general.

Anillo de 10 kilómetros

Con la tabla y la figura correspondientes al anillo de 10 Km (tabla 6 y figura 12 a) pasamos a procesar los datos en el software R, donde se obtuvo la figura 13, que muestra los diferentes ajustes posibles con sus ecuaciones correspondientes.

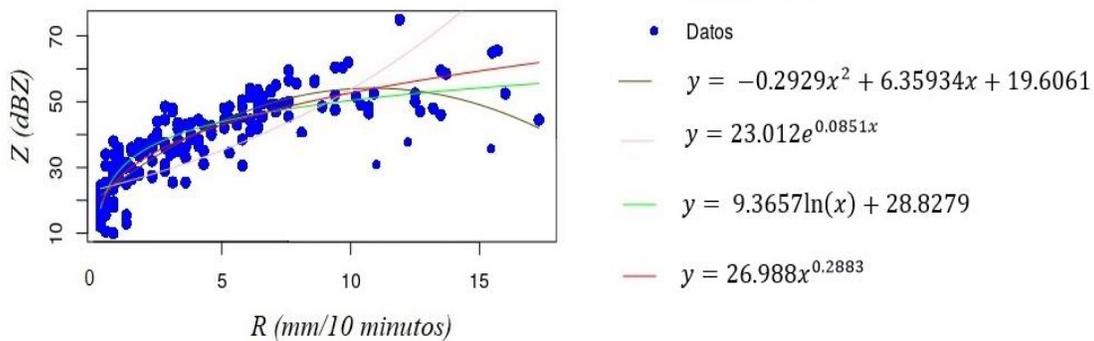


Figura 13. Mejores ajustes para el radio de 10 Km

Con las herramientas estadísticas que brinda este software conformamos la tabla 9 donde se representa cada uno de los ajustes mostrados anteriormente y los coeficientes estadísticos a analizar.

Tabla 9. Índices estadísticos de los diferentes ajustes para el Anillo de 10 Km

Ajuste	RMSE	R ²	F-Statistic	P-Value de coeficientes
Polinómico (2)	5.854	0.7922	615.9	2.2*10 ⁻¹⁶
Exponencial	0.2731	0.5639	418.9	2.2*10 ⁻¹⁶
Logarítmico	5.359	0.8253	1531	2.2*10 ⁻¹⁶
Potencial	0.1809	0.8042	1331	2.2*10 ⁻¹⁶

Anillo entre 10 y 20 kilómetros

Para el anillo de distancia entre 10 y 20 Km se hizo el mismo procedimiento utilizando esta vez los datos correspondientes para dicha sección (tabla 7 y figura 12 b). En esta oportunidad se obtuvo la figura 14, la que representa de igual manera los diferentes ajustes que pudieran obtenerse con sus ecuaciones correspondientes.

Además, la tabla 10 de manera similar a la que realizamos para el anillo de 10 Km, contiene índices estadísticos que posteriormente se comparan para cumplir con nuestros objetivos a esta distancia del radar.

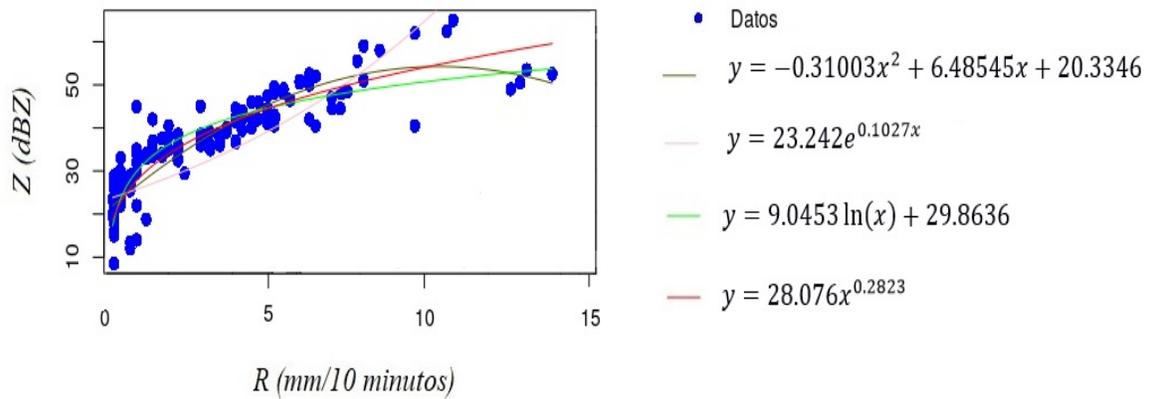


Figura 14. Mejores ajustes para el radio entre 10 y 20 Km

Tabla 10. Índices estadísticos de los diferentes ajustes para el Anillo entre 10 y 20 Km

Ajuste	RMSE	R ²	F-Statistic	P-Value de coeficientes
Polinómico (2)	5.053	0.8226	431.3	2.2*10 ⁻¹⁶
Exponencial	0.2498	0.5992	279.6	2.2*10 ⁻¹⁶
Logarítmico	4.678	0.8472	1036	2.2*10 ⁻¹⁶
Potencial	0.1787	0.7949	724.8	2.2*10 ⁻¹⁶

En los diferentes anillos de distancia del radar, la determinación cuantitativa de la lluvia se puede interpretar principalmente a través de diferentes modelos. Los que mejor describen la relación entre Z y R son los ajustes logarítmico y potencial. El primero de ellos por presentar el mayor R², mientras que el segundo presenta un RSME sustancialmente pequeño en comparación con el resto de las ecuaciones.

Por su parte el F-Statistic es superior en el ajuste logarítmico, a la vez que el P-Value se encuentra por debajo del umbral de los 0.005 en todos los casos por lo que los coeficientes son significativos en todos los ajustes analizados.

También se analizó los valores de R^2 ajustado para estos datos pero al ser muy similares a los de R^2 no los incluimos en estas tablas.

Nuestro objetivo principal es hallar el mejor de todos los ajustes para el radar teniendo en cuenta todos los datos recuperados, lo que detallaremos en el epígrafe siguiente.

Relación Z-R del radar doppler ubicado en el AMG

De la misma forma en que se analizó anteriormente la relación entre la reflectividad del radar y la precipitación para los diferentes anillos de distancia, ahora se analizan todos los datos, los del anillo de 10 Km y los del anillo entre 10 y 20 Km (tabla 8), para encontrar la relación Z-R final.

Hay que tener presente que no se está en la búsqueda de una relación Z-R universal, cada radar presenta su propia relación en dependencia de sus características y su ubicación.

En la figura 15 encontramos los posibles ajustes y en la figura 16, se aprecian las diferentes ecuaciones por separado con la representación gráfica de la curva sobre la dispersión de los datos para una mejor interpretación.

Del análisis estadístico realizado, se obtuvo la tabla 11 que muestra los parámetros tenidos en cuenta en esta investigación y que se detallan a continuación con el fin de elegir finalmente cual es el mejor ajuste para el radar Doppler ubicado en el Área Metropolitana de Guadalajara

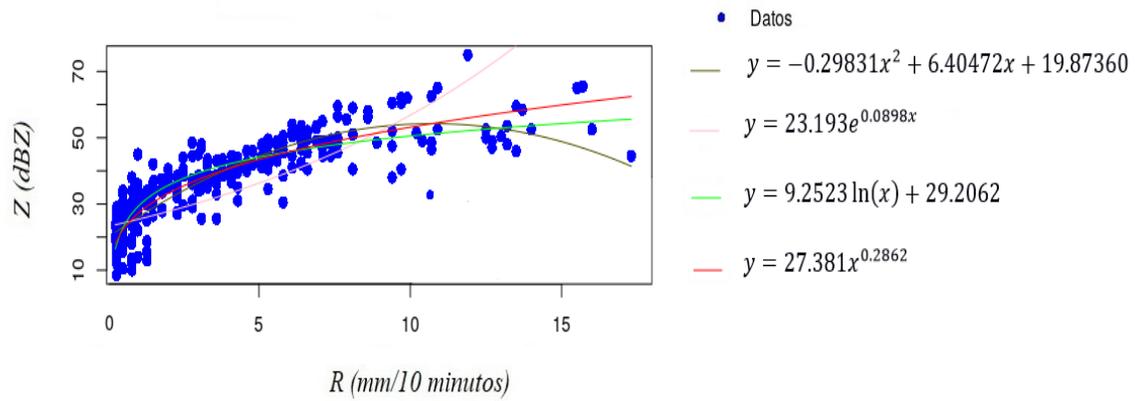


Figura 15. Mejores ajustes para el radar

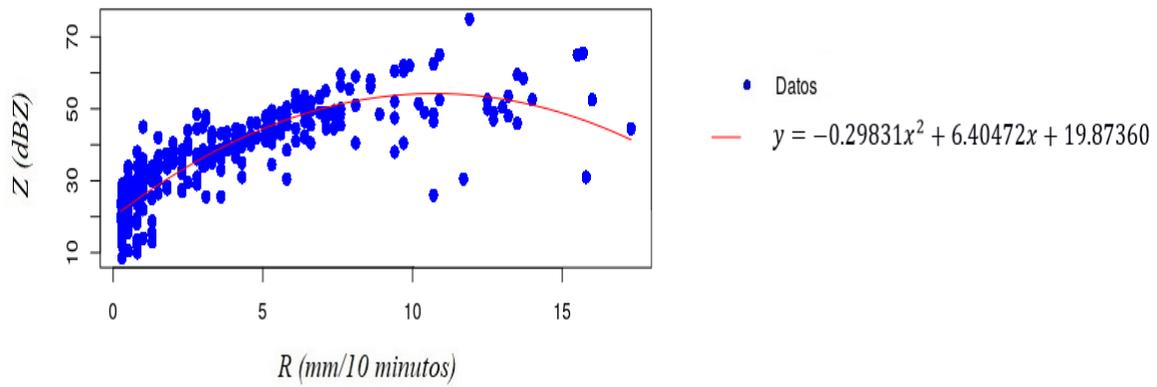


Figura 16. a) Ajuste polinómico para el radar

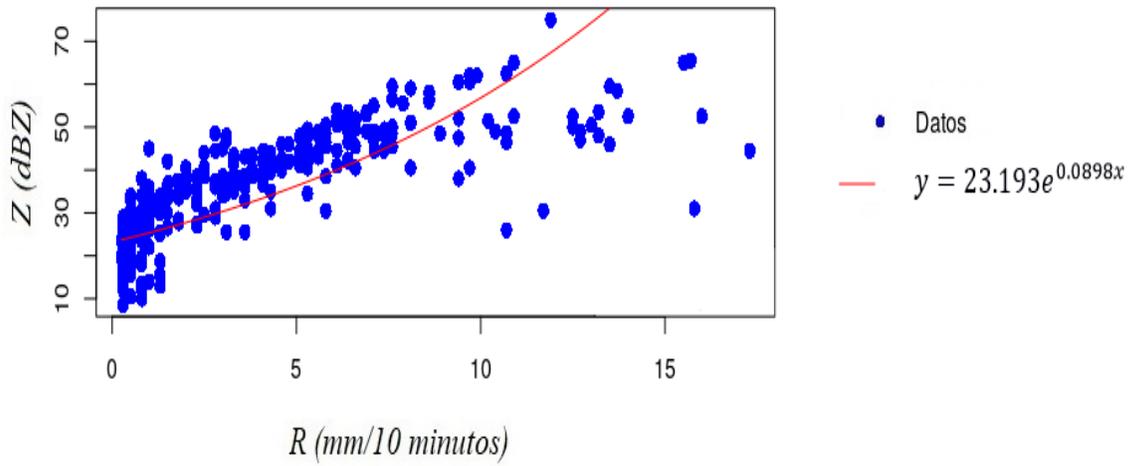


Figura 16. b) Ajuste exponencial para el radar

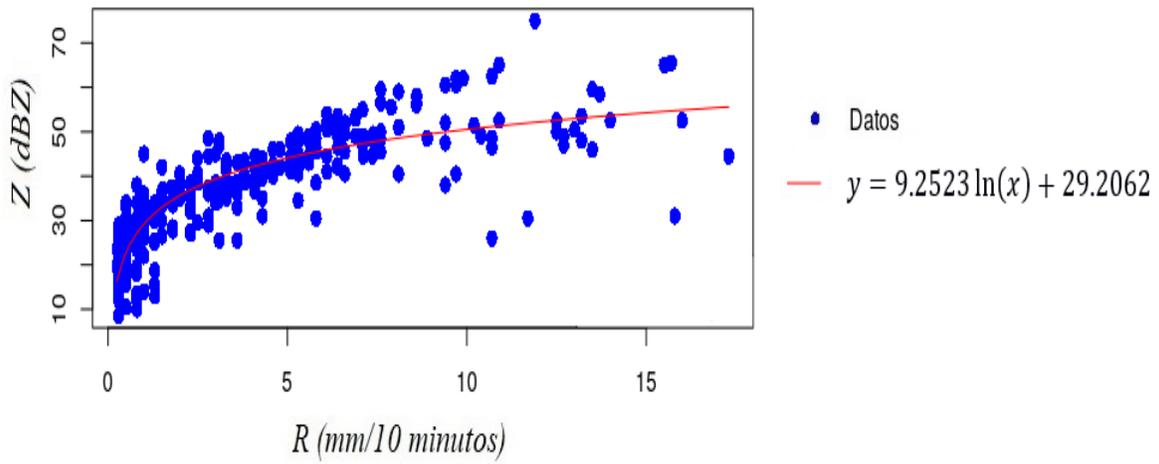


Figura 16. c) Ajuste logarítmico para el radar

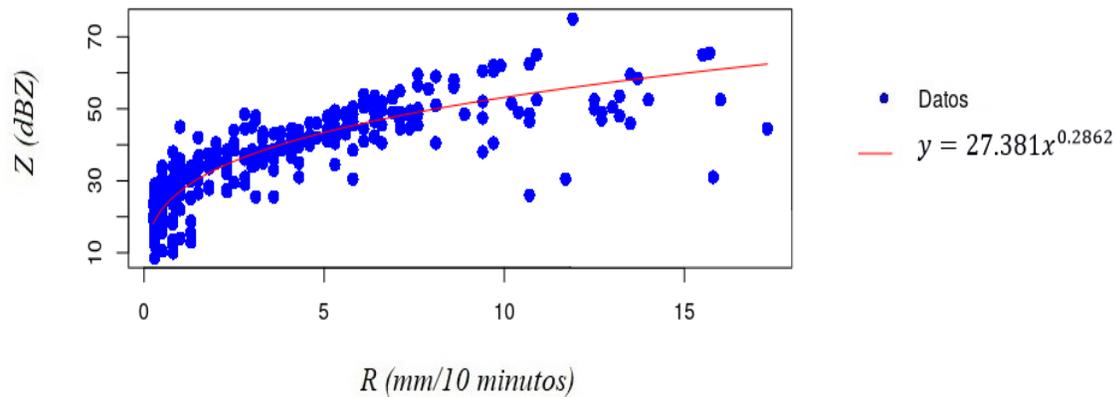


Figura 16. d) Ajuste potencial para el radar

En dicha tabla 11 se aprecian los índices estadísticos que se van a considerar para determinar el mejor modelo para la relación Z-R del radar.

Tabla 11. Índices estadísticos de los diferentes ajustes en generales

Ajuste	RMSE	R ²	R ² Ajustado	F-Statistic	P-Value de coeficientes
Polinómico (2)	5.053	0.8226	0.8009	431.3	2.2*10 ⁻¹⁶
Exponencial	0.2498	0.5992	0.5669	279.6	2.2*10 ⁻¹⁶
Logarítmico	4.678	0.8472	0.831	1036	2.2*10 ⁻¹⁶
Potencial	0.1787	0.7949	0.7989	724.8	2.2*10 ⁻¹⁶

Nos percatamos de inmediato que en todos los modelos los valores del P-Value de los coeficientes de las ecuaciones son mucho menores que el valor crítico de 0.5,

mostrando valores del orden de 10^{-16} lo que indica que todos los coeficientes son relevantes en los modelos planteados. También podemos apreciar de manera general que el comportamiento de R^2 ajustado es muy similar al de R^2 con una diferencia de apenas 1 %.

Detallando cada uno de los modelos propuestos, se concluye rápidamente que el peor de todos los ajustes resulta el de tipo exponencial debido a que, a pesar de presentar el menor de todos los valores de RMSE, gráficamente podemos apreciar (figura 15 y 16 b) como la curva que representa esta ecuación dista considerablemente de un gran volumen de datos de la muestra. Además se puede ver como presenta un valor de R^2 bajo, en comparación con el resto de los modelos propuestos, por lo que se descarta como modelo de ajuste del radar.

En el caso de los ajustes restantes, se aprecian similares valores de R^2 , resultando el más bajo el del ajuste potencial con un valor de 0.7949, muy cercano al valor de 0.8009 obtenido para el ajuste polinómico y del 0.8472 que se señala para el ajuste logarítmico.

Las mayores diferencias entre estos índices se obtienen en una primera instancia en los valores de F-Statistic. Aquí el modelo polinómico apenas presenta un valor de 431.3, mientras que la ecuación potencial y la logarítmica presentan valores de 724.8 y 1036 respectivamente.

En cuanto al RMSE, en el modelo polinomial se obtienen valores de 5.053, ligeramente superior al valor obtenido por el ajuste logarítmico que muestra valores de 0.4679. Sin embargo el modelo potencial brinda un RMSE de 0.1787 muy inferior si se compara con los valores de los otros modelos y teniendo en cuenta que es un valor que expresa cuan cerca están los puntos observados (valores medidos) de los valores predichos del modelo. Por esto se considera que el RMSE es el índice más importante en este análisis.

El otro índice en niveles de importancia es el R^2 ajustado, pero como explicamos con anterioridad la diferencia entre los mejores ajustes (polinómico, logarítmico y

potencia) no es tan significativa, teniendo en cuenta que este índice se expresa en por ciento y la mayor diferencia entre estos ajustes es de apenas el 5%.

De esta manera consideramos que la mejor curva de ajuste para el radar Doppler ubicado en el AMG es la curva potencial, debido a que la diferencia es más notable entre los índices RMSE de ambas ecuaciones que la diferencia entre sus R^2 , teniendo en cuenta que el R^2 es un expresado en por ciento y que las diferencias entre ellos no alcanzan ni el 5%. Además gráficamente, el primero de estos dos índices, nos expresa cuan cerca de nuestra curva están los datos reales lo que se ajusta mejor al concepto de hallar un modelo que relacione la precipitación y la reflectividad.

La ecuación del modelo seleccionado tendría la siguiente expresión:

$$\underline{Z = 27.3810R^{0.2862}} \quad (10)$$

Validación de los resultados

La validación de los datos, se basó en la metodología Creutin (1988), con los datos de los pluviómetros de Tlajomulco de Zúñiga, donde gracias a la colaboración del Maestro Magdiel Carrasco, de protección Civil del estado de Jalisco, se obtuvieron los datos correspondientes al día 13 de julio del 2021.

Las estaciones se localizan en Santa Cruz del Valle y en San Miguel, Cuyutlán. En la tabla 12 se describe la posición geográfica de estas estaciones, así como la distancia a la que se encuentran del radar, mientras que en la figura 17 tenemos un mapeo de las mismas estaciones.

Tabla 12. Posición y distancia del radar de las estaciones de Tlajomulco de Zúñiga.

Estación	Latitud	Longitud	Distancia del radar
Santa Cruz del Valle	20° 32' 50" N	103° 20' 10" W	14.6 Km
San Miguel Cuyutlán	20° 25' 2" N	103° 23' 34 W	28.5 Km

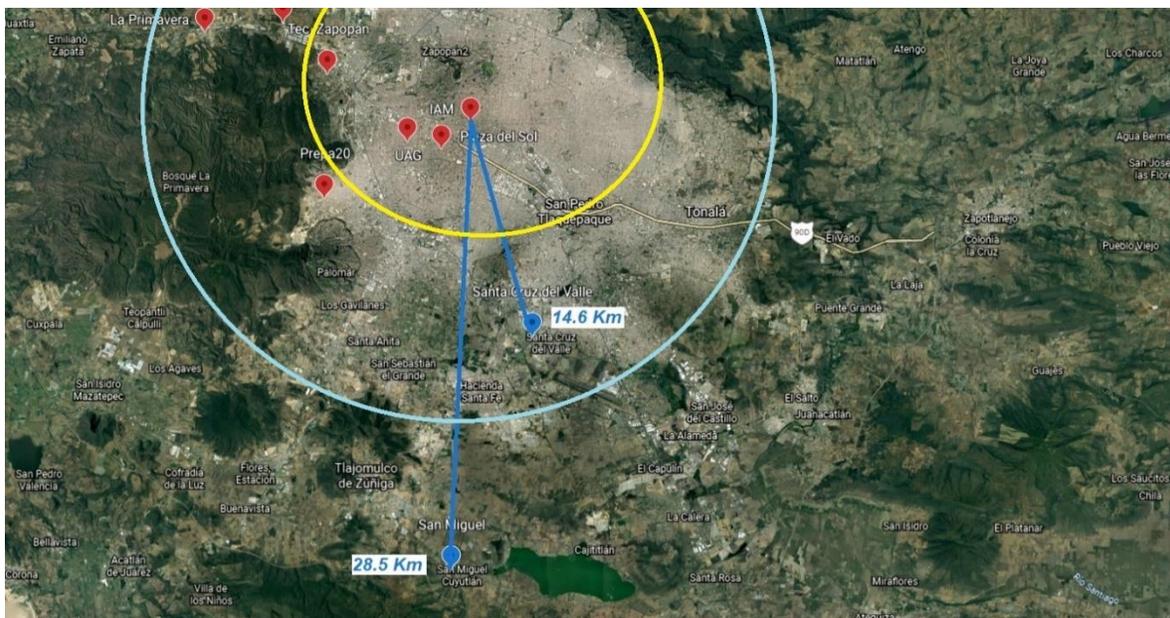


Figura 17. Ubicación y distancia de las estaciones meteorológicas de validación con respecto al radar

Con los datos de precipitación de las estaciones de Tlajomulco, los datos de reflectividad obtenidos del radar y la ecuación 10 se calculó los valores de R con la ecuación del modelo propuesto y posteriormente se graficaron para ver cuán semejantes eran los valores de la precipitación en ambos casos.

En las tablas 13 y 14 se muestran los datos antes mencionados, y con ellos se elaboró la gráfica 1 para poder visualizar de manera gráfica dicha comparación

entre los valores de R obtenidos por el modelo y los que realmente registró cada una de las estaciones meteorológicas.

Tabla 13. Valores de Z, R calculados por nuestro modelo y R registrado en la estación de San Miguel Cuyutlán.

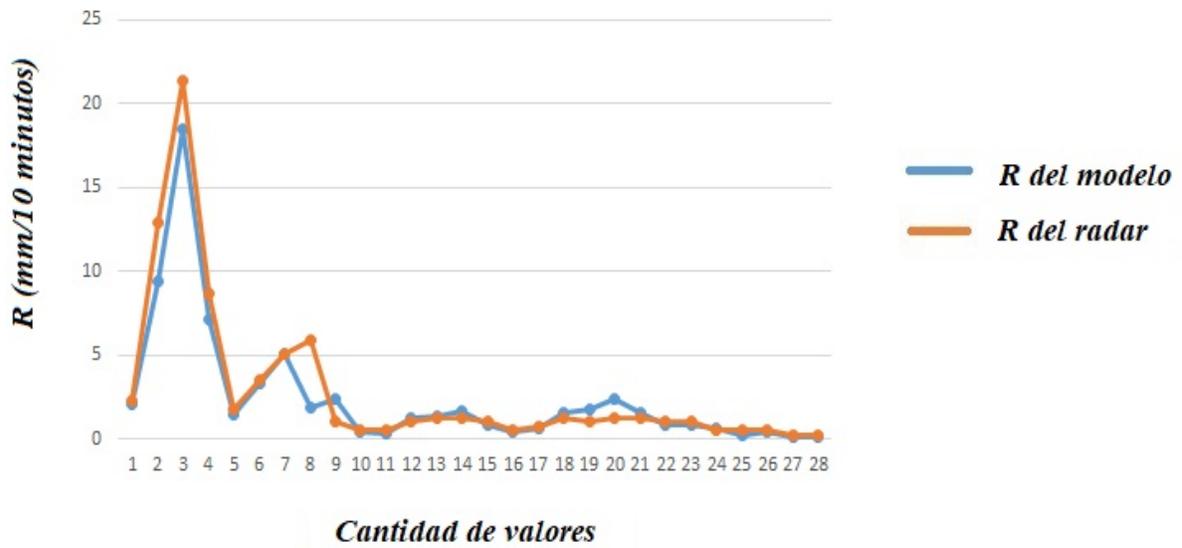
Z del radar (dBZ)	R del Modelo (mm/10 min)	R de la estación (mm/10 min)
33.5	2.0	2.3
52	9.4	13.0
63	18.5	21.3
48	7.1	8.7
30.5	1.5	1.8
38.5	3.3	3.6
43.5	5.1	5.1
32.5	1.8	5.8
35	2.4	1.0
22	0.5	0.5
19.5	0.3	0.5
28.8	1.2	1.0
30	1.4	1.3
31.5	1.6	1.3
26	0.8	1.0
22	0.5	0.5
24	0.6	0.8
31	1.5	1.3
32	1.7	1.0
35	2.4	1.3
31	1.5	1.3
26	0.8	1.0
26	0.8	1.0
24	0.6	0.5
18	0.2	0.5
22	0.5	0.5
16	0.2	0.3
14	0.1	0.3

Tabla 14. Valores de Z, R calculados por nuestro modelo y R registrado en la estación de Santa Cruz del Valle.

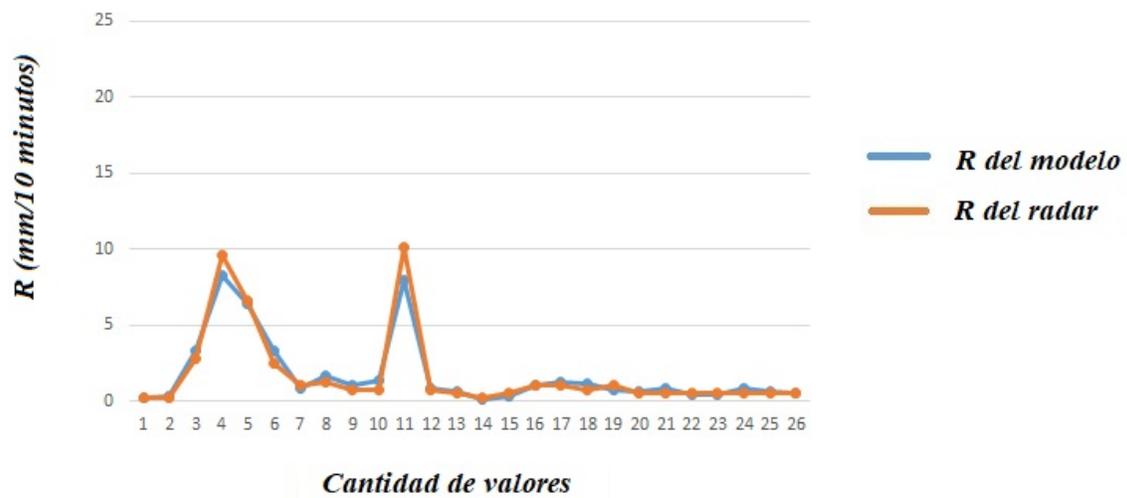
Z del radar (dBZ)	R del Modelo (mm/10 min)	R de la estación (mm/10 min)
0.3	18.4	18.0
0.3	18.4	20.0
2.8	36.7	38.5
9.7	52.4	48.0
6.6	47.0	46.5
2.5	35.7	38.5
1.0	27.5	26.0
1.3	29.3	31.5
0.8	25.3	28.0
0.8	25.3	30.0
10.1	53.1	49.5
0.8	25.3	26.0
0.5	22.5	24.0
0.3	18.4	16.0
0.5	22.5	19.5
1.0	27.5	28.0
1.0	27.5	29.0
0.8	25.3	28.5
1.0	27.5	24.5
0.5	22.5	24.0
0.5	22.5	26.0
0.5	22.5	22.0
0.5	22.5	22.0
0.5	22.5	26.0
0.5	22.5	24.0
0.5	22.5	22.5

La gráfica 1 expone que en ambas estaciones de análisis las curvas se encuentran muy próximas una de otra, validando la pequeña diferencia que existen entre los valores reales y los estimados y corroborando que nuestro modelo en cuestión es efectivo también en la práctica.

Grafica 1. Curva que representa los valores de reflectividad obtenidos por el modelo y los que registró el radar.



a) Estación de San Miguel



a) Estación de Santa Cruz del Valle

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología planteada en este estudio cumplió con el objetivo de obtener la relación Z-R para el radar doppler ubicado en el AMG. Se analizaron diversos índices estadísticos para este fin, pero sin lugar a dudas el de mayor peso resultó ser el RMSE, el cual decantó como la mejor curva de ajuste, para el radar doppler ubicado en el AMG, el modelo potencial incluso en los diferentes anillos de distancia.

Tenemos que señalar que al igual que en la gran mayoría de la bibliografía analizada y de muchas de las investigaciones aquí citadas, la relación Z-R del radar enclavado en el AMG es una relación de tipo $Z=AR^b$.

En este caso $Z = 27.3810R^{0.2862}$ recalcando que esta relación se obtuvo con valores de reflectividad que correspondían a casos de lluvias fuertes en la capital jalisciense.

A pesar de los retos que conllevó la pandemia de COVID-19, las afectaciones al servidor del radar y el trabajo a distancia que caracterizó el periodo de la investigación se cumplieron los periodos de tiempos, que se manejaron desde el inicio, para la culminación del trabajo.

Los buenos resultados obtenidos y la validación del modelo resultante, proponen sugerir esta metodología como guía para determinar la relación entre la precipitación y la reflectividad, para otros radares con características similares al de Jalisco.

Además, esta relación Z-R es una herramienta que permitirá poder brindar datos de estimación de precipitación para estudios hidrológicos en áreas donde no se cuente con estaciones meteorológicas y permitirá, operativamente, mejorar los pronósticos cuantitativos de precipitación en todo el radio de alcance del radar.

BIBLIOGRAFÍA

Fuentes electrónicas

- https://es.wikipedia.org/wiki/Radar_meteorol%C3%B3gico_.... (20/10/2020)
- <https://iieg.gob.mx/strategos/alcanza-area-metropolitana-de-guadalajara-los-5-millones-de-habitantes/....> (7/3/2021)
- https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_metropolitana_de_Guadalajara. (18/5/2020)
- https://www.sciencedirect.com/book/9780122214202/doppler-radar-and-weather-observations_.... (26/5/2020)
- https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_determinaci%C3%B3n.... (1/6/2021)
- <https://aprendeia.com/evaluando-el-error-en-los-modelos-de-regresion/....> (7/6/2021)
- https://doi.org/10.24245/gom.v8i8.4534_... (7/6/2021)
- <https://www.uv.es/friasnav/...> (15/6/2021)

Referencias bibliográficas

- Calheiros, R. y Zawadski, I. (1986). Reflectivity - Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil. Journal of climate and applied meteorology, vol. 26: p. 118 – 132
- Creutin, J. D et al., (1988) Rain measurement by rain gage-radar combination: A geostatistical approach. J. Atmos. Oceanic Technol., 5 (1), pp. 102- 115

- Díaz-Viera M. A., et., al (2009). Un modelo de correionalización lineal para la estimación espacial de la precipitación en el valle de la ciudad de México, combinando datos de pluviógrafos con imágenes de radar meteorológico, Revista Ingeniería hidráulica en México, vol. XXIV, núm. 3, julio-septiembre, pp. 63-90.
- Doviak, R. (1993). Doppler Radar and Weather Observations 1ra Edición. San Diego, CA: Harcourt.
- Erena M. et al., (2012) Estimación de precipitación combinada radar-pluviómetros y publicación mediante servicios OGC. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC, 19-21 de Septiembre de 2012.
- Fattorelli S., et al. (1996) Integrating radar and remote sensing techniques of rainfall estimation in hydrological applications for flood hazard mitigation. Comisión Europea, dirección general XII, ciencia, investigación y desarrollo.
- Fox, D.G. 1981. Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 62:599-609.
- Frías Navarro Ma. D. (2009) Métodos y Diseños de Investigación. Universidad de Valencia.
- Gómez-Vargas, E. (2015). Modelo para la estimación cuantitativa de precipitación a partir de datos de radares polarimétricos. Bogotá, Colombia.
- González A., (2010) Características climáticas generales en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Universidad de Guadalajara. Maestría en ciencias en Hidrometeorología.

- Jameson A. R. y Kostinski A. B. (2002). Spurious power-law relations among rainfall and radar parameters, Q. J. R. Meteorol.Soc., 128, pp. 2045-2058.
- Joe, P. y Smith, P. (2001) L. Summary of the Radar Calibration Workshop, Preprints 30th AMS Int. Conf. On Radar Met., AMS, pp. 174-176
- Koistinen J. y Puhakka T. (1986). Can we calibrate radar with rain gauges? Geophysics (Helsinki), 22, pp. 119-129.
- Laguna C. (2006). Correlación y regresión lineal. Diplomado en Salud Pública. Instituto Aragonés de ciencias de la salud, pp. 18. España
- Ladino-Rincón, A. (2017). Características de la microfísica de la precipitación mediante información de disdrómetros y radar polarimétrico para la estimación cuantitativa de la lluvia en el área metropolitana del Valle de Aburrá.
- Machado, I. (2006). Avaliação de métodos de compisição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuidos., Escuela de Ingeniería de San Carlos. Universidad de Sao Paolo: Sao Paolo, Brasil. p. 191.
- Marshal, J. S., R. C. Langille, and W. McK. Palmer (1947) Measurement of rainfall by radar. J. Meteor., 4, 186-192.
- Martínez E., (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario Jurídico y económico Escorialense XXXVIII. 315-332, ISSN: 1133-3677.

- Méndez-Antonio, B. (2006). Calibración hidrológica de radares meteorológicos. *Revista Ingeniería Hidráulica En México*, XXI (4), 43–64.
- Monjo, R. (2008). El índice n de la precipitación intensa. Departamento de Física de la Terra y Termodinámica. Universidad de Valencia. Fundación para la Investigación del Clima.
- Niz-Ramos J. (2020) Las falacias de la p y la significación estadística. *Ginecol Obstet, Mex.*; 88 (8): 536-541.
- Pardo R, (2011) El radar meteorológico y los sistemas de alerta contra inundaciones causadas por intensas lluvias. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXXII, No. 1, Ene-Abr 2011, p. 80-86
- Pardo R. y Martínez J B, (2012). El empleo del radar meteorológico en los sistemas de alerta temprana para la predicción de inundaciones. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. Facultad de Ingeniería Civil. Centro de investigaciones hidráulicas
- Rosengaus, M. (1999). Sobre el error en la estimación de lluvia utilizando radar meteorológico. *Ingeniería Del Agua*, 6(2). doi:10.4995/ia.1999.2785
- ROSENGAUS, M (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. X, Núm. 1, enero-abril de 1995, pp. 55-74.
- Soto-Bravo F. y González-Lutz M.I. (2019) Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Revista Agronomía Mesoamericana Volumen 30(2):517-534*. Mayo-agosto, 2019 e-ISSN 2215-3608, doi:10.15517/am.v30i2.33839

- Tepach, M. (2015). Estimación de la lluvia en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río mediante imágenes PPI del Radar Meteorológico de Alvarado, Veracruz. Universidad Veracruzana.
- Vidal, L., & Et, A. (2011). Uso combinado de datos TRMM/PR y disdrómetros para corrección de reflectividad de radares meteorológicos en Argentina.
- Wardah, T. & Ramli, Suzana & Sazali, O. & Hafiz, A. & Lariyah, M.S. & Sharmy, J. (2018). Radar rainfall calibration for improved quantitative precipitation estimates in Kelantan and Terengganu river basins. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 9. 27-36.
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63:1309-1313. doi:10.1175/1520-0477(1982)0632.0.CO2
- Wilson, J.W. and Brandes, E.A. (1979) Radar Measurement of Rainfall: A Summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60, 1048-1058.
- WOOD, S. J.; JONES, D. A. y MOORE, R. J. (2000) Static and dynamic calibration of radar data for hydrological use, *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, pp. 544-545.
- Yau M. K., & Rogers R. R., (1989) *A Short Course in Cloud Physics*. Editorial Elsevier, Ámsterdam, Holanda, 3, 304. ISBN 0080570941.
- Zhang G., et al., (2001). A Method for Estimating Rain Rate and Drop Size Distribution from Polarimetric Radar Measurements. *IEEE Transactions on geosciences and Remote*, 39(4).

APÉNDICE 1

Script de matlab para leer los archivos en .mat del radar doppler del año 2019 y extrae los valores de reflectividad, longitud, latitud y tiempo del archivo netcdf del radar. Dichos datos son graficados y comparados con los datos kmz que se suben al google earth para probar que este bien referenciado y que sea vea exactamente igual en ambos formatos.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
GENERA IMAGENES DEL RADAR 2019-2020
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all;
close all;
clc;
```

```
addpath 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes\mprogs\algoritmos-
matlab\mios\Algorit_Actuales_imagenes_radar'
cd 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes\mprogs\algoritmos-matlab\mios\mapajalisco';
municipiosZMG
cd 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes\mprogs\algoritmos-
matlab\mios\Algorit_Actuales_imagenes_radar';
load polgrid.mat % cargando matriz de malla en polares
load lonlat_grid.mat
colorwear=load('colorwear.txt'); % barra de colores de velocidad
colornew=load('colornew.txt'); % barra de colores de reflectividad
```

```
for i=29; %
    con=1;
    fecha=['201909' num2str(i)]; % es la fecha de las imagenes
    cd 'E:\RADARDOPPLER\matfiles';
    files=dir(['fecha \'*.mat'']);
```

```
rangr=[-5:0.5:-0.5 -0.5 0.5 0.5:0.5:5]; % vector de rango de velocidad de 22 valores
rangc=[-100 -10:10:100]; % vector de rango de reflectividad de 13 valores
rangR=[0:0.3:2.4 3.6:1.2:3.6 5:1.5:6.5 8.6:9.4:18 54:35:89 127 ]; % vector de rango de rian rate de
17 valores
cd 'E:\RADARDOPPLER\matfiles';
cd(fecha) % 14 31 48 53 56 59 62 65 69 76 188
for k=1:3:size(files,1)
    rr=[];

    nAz=[files(k).name(1:20) '_Az.mat'];
    nCi=[files(k).name(1:20) '_ci.mat'];
    nrv=[files(k).name(1:20) '_rv.mat'];
```

```

% carga el archivo
load(nAz) % Az=1501x1
load(nCi)
load(nrv)

TIME=[files(k).name(14:end-8)]; % genera la fecha del archivo
jm=length(ci(:,1));
im=length(ci(1,:));

ind=find(rv(:)<-50);
rv(ind)=NaN;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ra=[0:jm-1]*75; %es el radio/2 Ra=1x1200;
[az,ra]=meshgrid(Az,Ra); % Az=1501x1;
az=az*pi./180;
[x,y]=pol2cart(az,ra); %az=1200x1501 ra=1200x1501
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

end

cd 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes'
cd sol
save lon
save lat
save ci

end

```

APÉNDICE 2

Busca los nodos más cercanos del radar más cercanos a la estación meteorológica de interés.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Este programa busca los nodos (pixeles) del radar más cercano a la estación
%% de donde se extraerán los decibeles de Ci
clear all
close all
clc
load lon
load lat
load ci

% dcy=20.7664; dcx=103.3749; % Cañadas
% dcy=20.63; dcx=103.48; % Fortin
% dcy=20.7472; dcx=103.4136; % Cima
% dcy=20.7472; dcx=103.5631; % Primavera
% dcy=20.82; dcx=103.44; % Molinos
% dcy=20.7; dcx=103.47; % Tec Zapopan
% dcy=20.73; dcx=103.50; % Tec Park5
% dcy=20.65; dcx=103.40; % Sol

jm=length(lon(:,1)); % renglones de la matriz lon y lat
im=length(lon(1,:)); % columnas de la matriz lon y lat

colx=zeros(1,150000);
coly=zeros(1,150000);
renx=zeros(1,150000);
reny=zeros(1,150000);

ct=1;
for ii=1:im % columna
    for i=1:jm % renglon
        % indi=find(lon(i,ii)<=round(dcx)+.444 && lon(i,ii)>=(round(dcx)-0.442)); % renglones que
        cumplen
    %     indi=find(lon(:,ii)<=round(dcx)+.444 & lon(:,ii)>=(round(dcx)-0.442))
        if(lon(i,ii)<=dcx+0.002 && lon(i,ii)>=dcx-0.002);
            renx(ct)=i; colx(ct)=ii; ct=ct+1;
        end
    end
end

end
% lon(renx(1), colx(1)) en la coordenada de la matriz lon donde hay un
% valor de longitud cercano
```

```

save colx % columnas (coordenada y) de lon que cumplen el requisito
save renx % renglones (coordenada x) de lon donde esta el valor cercano
ct=1;
for ii=1:im; %columna
    for i=1:jm; % renglon
        % if(lat(i,ii)>=round(dcy)-0.5 && lat(i,ii)<=round(dcy))
        if(lat(i,ii)>=dcy-0.0001 && lat(i,ii)<=dcy+0.0001);
            reny(ct)=i; coly(ct)=ii; ct=ct+1; end
        end
    end
end

% lat(reny(1), coly(1)) en la coordenada de la matriz lat donde hay un
% valor de latitud cercano

save coly % columnas (coordenada y) de latitud de y que cumplen el requisito
save reny % renglones (coordenada x) de latitud donde esta el valor cercano

cx=colx(1:500); %primeras 500 columnas que coinciden
cy=coly(1:500); %primeras 500 columnas que coinciden
rx=renx(1:500); %primeros 500 renglones que coinciden
ry=reny(1:500); %primeros 500 renglones que coinciden
lx=lon(renx(1:200),colx(1:200)); %busca las celdas en lon y lat
ly=lat(reny(1:200),coly(1:200));

tam=length(lx);

for i=1:50;
    plot(dcx,dcy,'*r'); hold on; % estacion
    plot(lx(i),ly(i),'*k'); %punto cercano a la estacion
    numx=lx(i); numy=ly(i);
    title(['Primavera', num2str(dcx), ' Ly ', num2str(dcy)])
    grid on
    xlabel('Longitud (°)');
    ylabel('Latitud (°)');
    print('-djpeg', ['C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes\' Primavera_RenglonLx_' num2str(i)
    '_'])
end

%%%%%% Las cañadas es nodo i= 8, lx(i)=-103.3750; ly(i)=20.7664; i es el renglon
%%%%%% El fortin es nodo i= 4, lx(i)=-103.4800; ly(i)=20.6300; i es el renglon
stop
% Aqui podemos empezar a buscar a prueba y error los nodos cerca de este punto
%
% Grafico lo siguiente
close all
figure(3); clf
hold on
load lon

```

```

load lat
load ci
dcy=20.65; dcx=-103.40; %sol
% dcy=20.73; dcx=-103.50; % Tec Park
pcolor(lon,lat,ci)
% axis([-103.402 -103.398 20.648 20.651])
hold on
plot(dcx,dcy,'or') % a esta estacion le corresponden los nodos
% plot(-103.47999,20.62999,'*g'); %punto cercano a la estacion
title(['Plaza del Sol', num2str(dcx), ' Ly ', num2str(dcy)])
xlabel('Longitud (°)');
ylabel('Latitud (°)');

% colormap(colornew);
% shading interp
% y empiezo a probar. lon(1,) y lat(1,1) es el origen
% plot(lon(102,1237),lat(102,1237),'or') % Para la estacion cabañas
% plot(lon(102,1238),lat(102,1238),'ob') % Para el pixel más cercano a la estacion
% plot(lon(111,722),lat(111,722),'ow') % Para la estacion Fortin
% plot(lon(111,722),lat(111,722),'ow') % Para el pixel mas cercano a la estacion
% plot(lon(85,1127),lat(85,1127),'ok') % Para la estacion La Cima
% en grados es lon=-103.4136; lat=20.7469;
% plot(lon(202,933),lat(202,933),'*w') % Primavera
%plot(lon(170,1130),lat(170,1130),'*w') % Molinos
% plot(lon(93,907),lat(93,907),'ok') % TecZapopan
% plot(lon(134,948),lat(134,948),'ob') % TecZapopan
plot(lon(33,1044),lat(33,1044),'*m') % Sol

stop
En este caso el mejor es
% plot(lon(102,1238),lat(102,1238),'ob')
% Ci(102,1237)=25; % lo pinte para probar que sea correcto
% Ci(102,1238)=NaN;
% Ci(103,1238)=NaN;

% busca los nodos de renx, colx, reny, coly diferentes de cero

%%%%%%%%%%%%% IGUALANDO VECTORES renx; reny colx y coly que tengan mismo
%%%%%%%%%%%%% tamaño
%%%%%%%%%%%%% identificar que es el correcto
uu=length(colx);
vv=length(coly);
% stop
if uu>vv;
    dd=uu-vv;
    for hh=1:dd;
        colx(uu)=[];
        uu=uu-1;
    end
end

```

```

    end
end

if vv>uu;
    dd=vv-uu;
    for hh=1:dd;
        coly(vv)=[];
        vv=vv-1;
    end
end
uu=length(renx);
vv=length(reny);

if uu>vv;
    dd=uu-vv;
    for hh=1:dd;
        renx(uu)=[];
        uu=uu-1;
    end
end

if vv>uu;
    dd=vv-uu;
    for hh=1:dd;
        reny(vv)=[];
        vv=vv-1;
    end
end

figure(3); clf
hold on

pcolor(lon,lat,Ci)
colormap(colornew);
shading interp
hold on
title('Las Cañadas');colorbar;caxis([-31,80]);
drawnow
set(gca,'color','none')
axis equal
hold on
figure(5)
clf; hold on
nnx=meshgrid(1:1501,1:960);
nny=meshgrid(1:1501,1:960);
pcolor(Ci)
colormap(colornew);
shading interp

```

APÉNDICE 3

Extrayendo datos de reflectividad. , UNA VEZ QUE LO ENCUENTRA, EXTRAE EL VALOR DE REFLECTIVIDAD EN ESE NODO PARA CADA ARCHIVO .MAT

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;
clc;

addpath 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes\mprogs\algoritmos-
matlab\mios\Algorit_Actuales_imagenes_radar'
cd 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes\mprogs\algoritmos-matlab\mios\mapajalisco';
municipiosZMG
cd 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes\mprogs\algoritmos-
matlab\mios\Algorit_Actuales_imagenes_radar';
load polgrid.mat % cargando matriz de malla en polares
load lonlat_grid.mat
colorvear=load('colorvear.txt'); % barra de colores de velocidad
colornew=load('colornew.txt'); % barra de colores de reflectividad

for i=29; %
    con=1;
    fecha=['201909' num2str(i)]; % es la fecha de las imagenes
    cd 'E:\RADARDOPPLER\matfiles';
    files=dir([fecha '\*.mat']);

    rangr=[-5:0.5:-0.5 -0.5 0.5 0.5:0.5:5]; % vector de rango de velocidad de 22 valores
    rangc=[-100 -10:10:100]; % vector de rango de reflectividad de 13 valores
    rangR=[0:0.3:2.4 3.6:1.2:3.6 5:1.5:6.5 8.6:9.4:18 54:35:89 127 ]; % vector de rango de rian rate de
    17 valores
    cd 'E:\RADARDOPPLER\matfiles';
    cd(fecha) % 14 31 48 53 56 59 62 65 69 76 188
    for k=1:3:size(files,1)
        rr=[];

        nAz=[files(k).name(1:20) '_Az.mat'];
        nCi=[files(k).name(1:20) '_ci.mat'];
        nrv=[files(k).name(1:20) '_rv.mat'];

        % carga el archivo
        load(nAz) % Az=1501x1
        load(nCi)
        load(nrv)

        TIME=[files(k).name(14:end-8)]; % genera la fecha del archivo
        jm=length(ci(:,1));
```

```

im=length(ci(1,:));

ind=find(rv(:)<-50);
rv(ind)=NaN;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ra=[0:jm-1]*75; %es el radio/2 Ra=1x1200;
[az,ra]=meshgrid(Az,Ra); % Az=1501x1;
az=az*pi./180;
[x,y]=pol2cart(az,ra); %az=1200x1501 ra=1200x1501
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

nnx=33; nny=1044; % sol
reflect(con,1)=ci(nnx,ny); %reflectividad
valor=ci(nnx,ny);
text(-104,21, ['Reflectividad ', num2str(valor)])
% reflect(con,2)=nd; %x(i),y(j)
reflect(con,2)=str2num(TIME); %minuto
con=con+1;

end

cd 'C:\Users\Alex\Documents\LluviasFuertes'
cd sol
save lon
save lat
save ci

open reflect
save reflect
fid = fopen([fecha,'.txt'],'wt');
fprintf(fid,'%12.8f\n',reflect);
fclose(fid);
end

```

APÉNDICE 4

main.R

2021-07-04

```
# install some usefull package
```

```
source("/home/ayjf/Desktop/miro models/packages.R") load_package()
```

```
## Loading required package: ggplot2
```

```
## Loading required package: plotly
```

```
##
```

```
## Attaching package: 'plotly'
```

```
## The following object is masked from 'package:ggplot2':
```

```
##
```

```
## last_plot
```

```
## The following object is masked from 'package:stats':
```

```
##
```

```
## filter
```

```
## The following object is masked from 'package:graphics':
```

```
##
```

```
## layout
```

```
#load .csv file
```

```
zr_10km_df <- read.csv("/home/ayjf/Desktop/miro models/dataset/ZR_general.csv", header = newdf <-  
data.frame(R = seq(min(zr_10km_df$R), max(zr_10km_df$R), len = 100)) head( zr_10km_df )
```

TRUE)

```
##
```

```
R
```

Z ## 1
1.0
35.0
2
5.1
48.0
3
0.5
24.0
4
0.5
22.0
5
0.5
22.0
6
7.9
55.5

`attach(zr_10km_df)`

Coefficients: These are the weights that minimize the sum of the # square of the errors.

To learn how to calculate these weights by hand, see this page.

- Std. Error is Residual Standard Error (see below) divided by

the square root of the sum of the square of that particular x variable. # - t value: Estimate divided by Std. Error

- Pr(>|t|): Look up your t value in a T distribution table with the given

degrees of freedom.

Residual Standard Error

In R, the lm summary produces the standard deviation of the error with a # slight twist. Standard deviation is the square root of variance.

Standard Error is very similar. The only difference is that instead

of dividing by n-1, you subtract n minus 1 + # of variables involved.

Multiple R-Squared

Also called the coefficient of determination, this is an oft-cited

measurement of how well your model fits to the data. While there are # many issues with using it alone (see Anscombe's quartet), it's a quick # and pre-computed check for your model.

R-Squared subtracts the residual error from the variance in Y.

The bigger the error, the worse the remaining variance will appear.

F-Statistic

Finally, the F-Statistic. Including the t-tests, this is the second "test"

that the summary function produces for lm models. The F-Statistic is a # "global" test

that checks if at least one of your coefficients are nonzero `poly <- lm(Z ~ poly(R, 2, raw = T))`

`summary(poly)`

##

Call:

`lm(formula = Z ~ poly(R, 2, raw = T))`

##

Residuals:

##	Min	1Q	Median	3Q	Max
##	-28.2502	-3.2887	0.3498	3.2215	21.1543

##

Coefficients:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept) 19.87360 0.38541 51.56 <2e-16 *** ## poly(R, 2,
raw = T)1 6.40472 0.19873 32.23 <2e-16 *** ## poly(R, 2, raw =
T)2 -0.29831 0.01631 -18.29 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

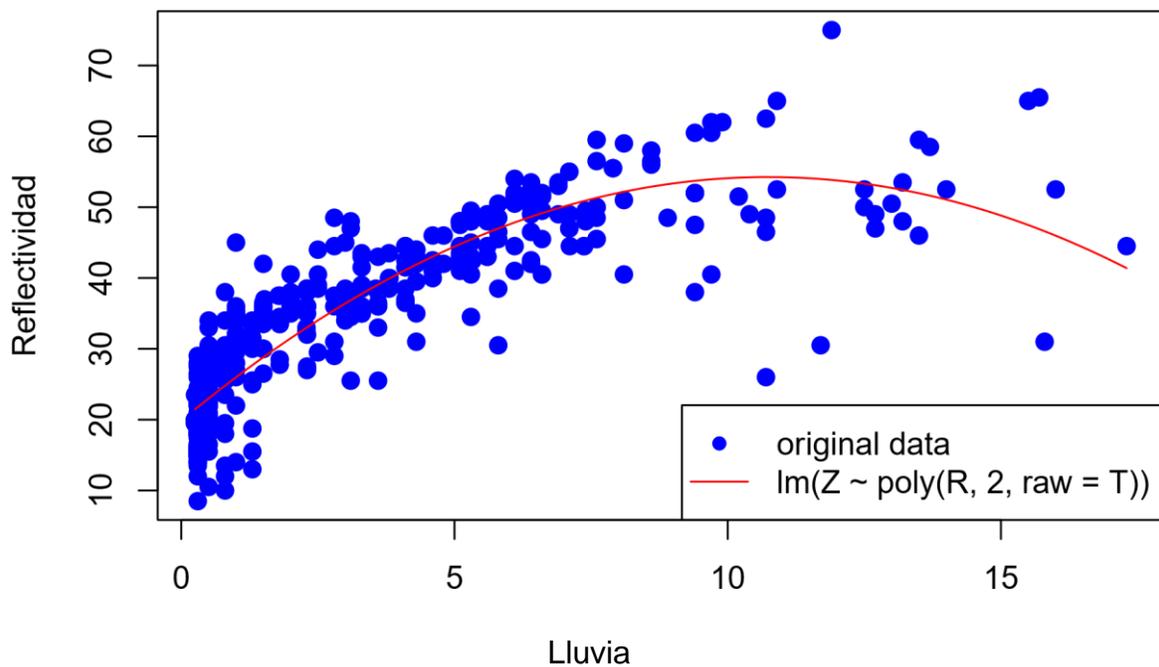
##

Residual standard error: 5.572 on 512 degrees of freedom ## Multiple R-squared: 0.8017, Adjusted R-squared: 0.8009

```
## F-statistic: 1035 on 2 and 512 DF, p-value: < 2.2e-16
```

```
plot(R, Z, pch = 16, cex = 1.3, col = "blue", main = "Funcion  
Polinomial orden 2",  
xlab = "Lluvia", ylab = "Reflectividad")  
lines(newdf$R, predict(poly, newdf), col = "red")  
legend("bottomright", c("original data", "lm(Z ~ poly(R, 2, raw = T))"), pch = c(16, NA,  
NA), lty = c(NA, 1, 1), col = c("blue", "red"))
```

Función Polinomial orden 2



```
exp <- lm(log(Z) ~ R)  
summary(exp)
```

```
##
```

```
## Call:
```

```
## lm(formula = log(Z) ~ R)
```

```
##
```

```
## Residuals:
```

```
##      Min    1Q   Median3Q    Max
## -1.12541 -0.14282 0.06206 0.20627
## 0.57366
```

```
##
```

```
## Coefficients:
```

```
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 3.1433850 0.015353 204.74 <2e-16 ***
## R      0.089621      0.003453      25.96 <2e-16 ***
```

```
## ---
```

```
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
##
```

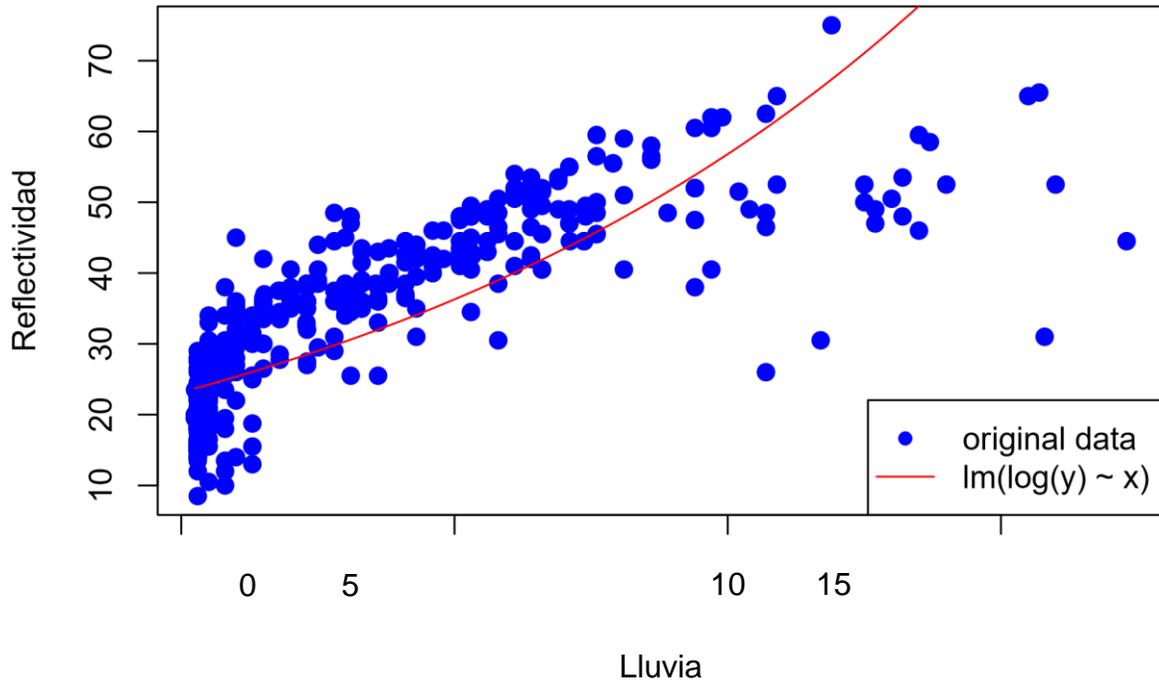
```
## Residual standard error: 0.2652 on 513 degrees of freedom
```

```
## Multiple R-squared: 0.5677, Adjusted R-squared: 0.5669
```

```
## F-statistic: 673.8 on 1 and 513 DF, p-value: < 2.2e-16
```

```
exp2 <- exp(predict(exp, newdf)) plot(R, Z, pch = 16,
cex = 1.3, col = "blue",
main = "Funcion Exponencial",
xlab = "Lluvia", ylab = "Reflectividad") lines(newdf$R, exp2, col
= "red")
legend("bottomright", c("original data", "lm(log(y) ~ x)"), pch
= c(16, NA, NA), lty = c(NA, 1, 1), col = c("blue", "red"))
```

Función Exponencial



```
log_model <- lm(Z ~ log( R )) summary( log_model  
)
```

```
##
```

```
## Call:
```

```
## lm(formula = Z ~ log(R))
```

```
##
```

```
## Residuals:
```

```
##      Min      1Q  Median      3Q      Max  
## -25.136 -2.287   0.239   2.433  22.880
```

```
##
```

```
## Coefficients:
```

```
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
## (Intercept) 29.2062 0.2352 124.19 <2e-16 *** ##  
## log(R) 9.2523 0.1840 50.29 <2e-16 ***
```

```
## ---
```

```
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
##
```

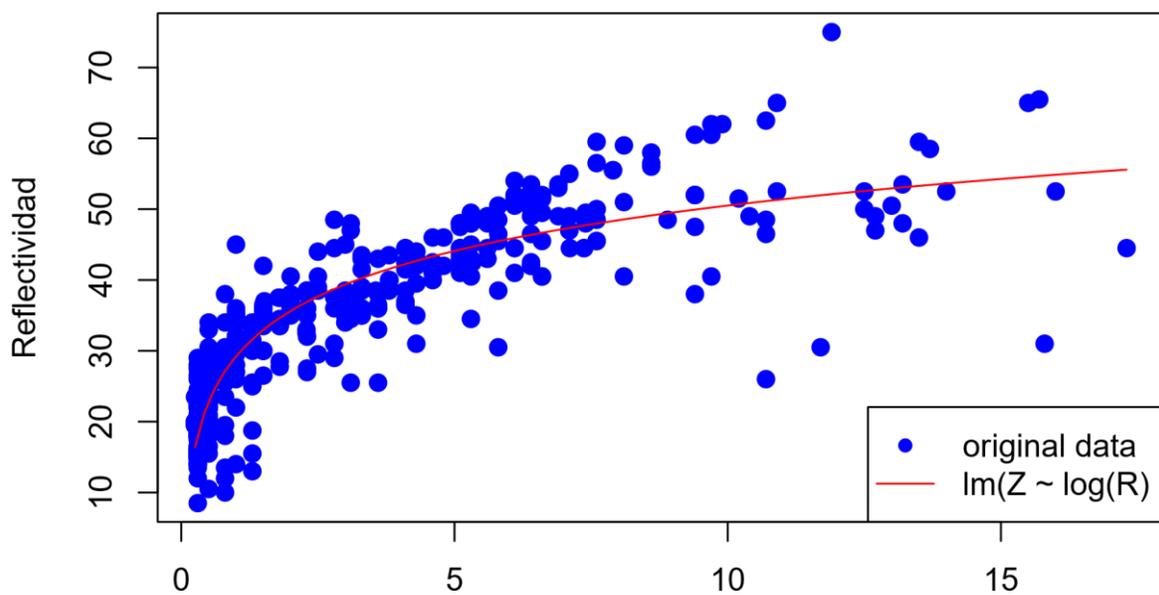
```
## Residual standard error: 5.133 on 513 degrees of freedom
```

```
## Multiple R-squared: 0.8314, Adjusted R-squared: 0.831
```

```
## F-statistic: 2529 on 1 and 513 DF, p-value: < 2.2e-16
```

```
log2 <- predict(log_model, newdf) plot(R, Z, pch = 16,  
cex = 1.3, col = "blue",  
main = "Funcion Logaritmica",  
xlab = "Lluvia", ylab = "Reflectividad")  
lines(newdf$R, log2, col = "red")  
legend("bottomright", c("original data", "lm(Z ~ log(R))",  
NA), lty = c(NA, 1, 1), col = c("blue", "red"))
```

Función Logarítmica



Lluvia

```
pow_model <- lm(log(Z) ~ log(R)) summary(
pow_model )

##

## Call:
## lm(formula = log(Z) ~ log(R))

##

## Residuals:
##      Min       1Q   Median3Q      Max
## -0.93146 -0.07653 0.03283 0.09816
0.50729

##

## Coefficients:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 3.2993740.008279      398.5 <2e-16
*** ## log(R)  0.292775      0.006477      45.2
<2e-16 ***

## ---

## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

##

## Residual standard error: 0.1807 on 513 degrees of freedom

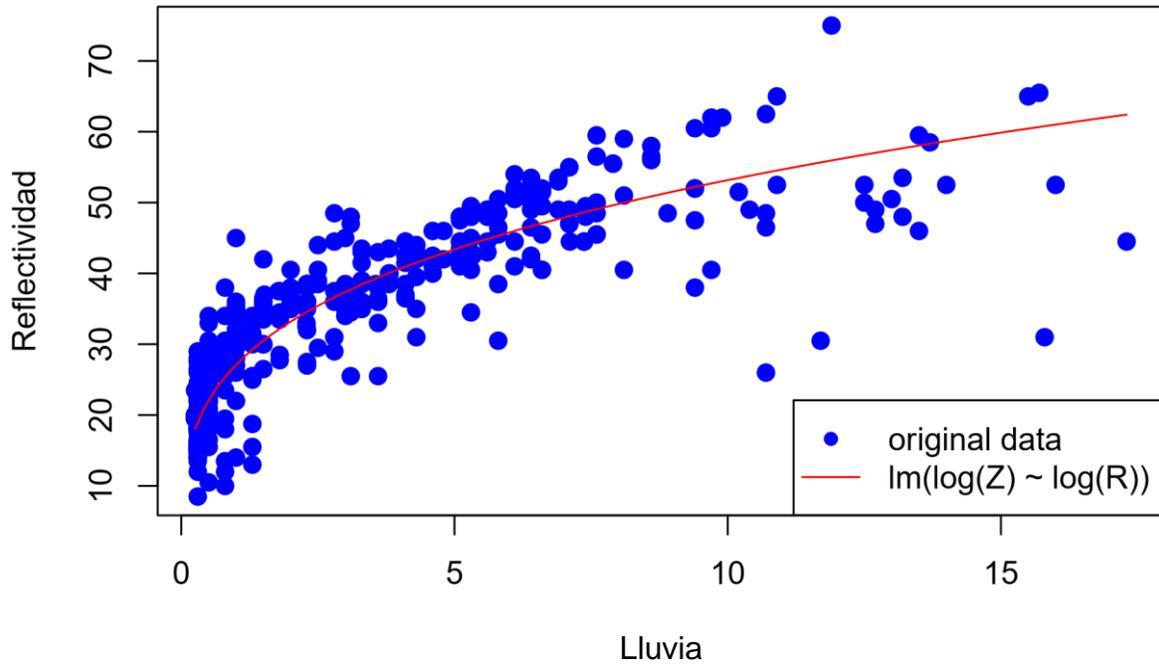
## Multiple R-squared: 0.7993, Adjusted R-squared: 0.7989

## F-statistic: 2043 on 1 and 513 DF, p-value: < 2.2e-16

pow_model2 <- exp(predict(pow_model, newdf)) plot(R,
Z, pch = 16, cex = 1.3, col = "blue", main = "Funcion
Potencial",
xlab = "Lluvia", ylab = "Reflectividad")
lines(newdf$R, pow_model2, col = "red")
```

```
legend("bottomright", c("original data", "lm(log(Z) ~ log(R))"), pch = c(16, NA,
NA), lty = c(NA, 1, 1), col = c("blue", "red"))
```

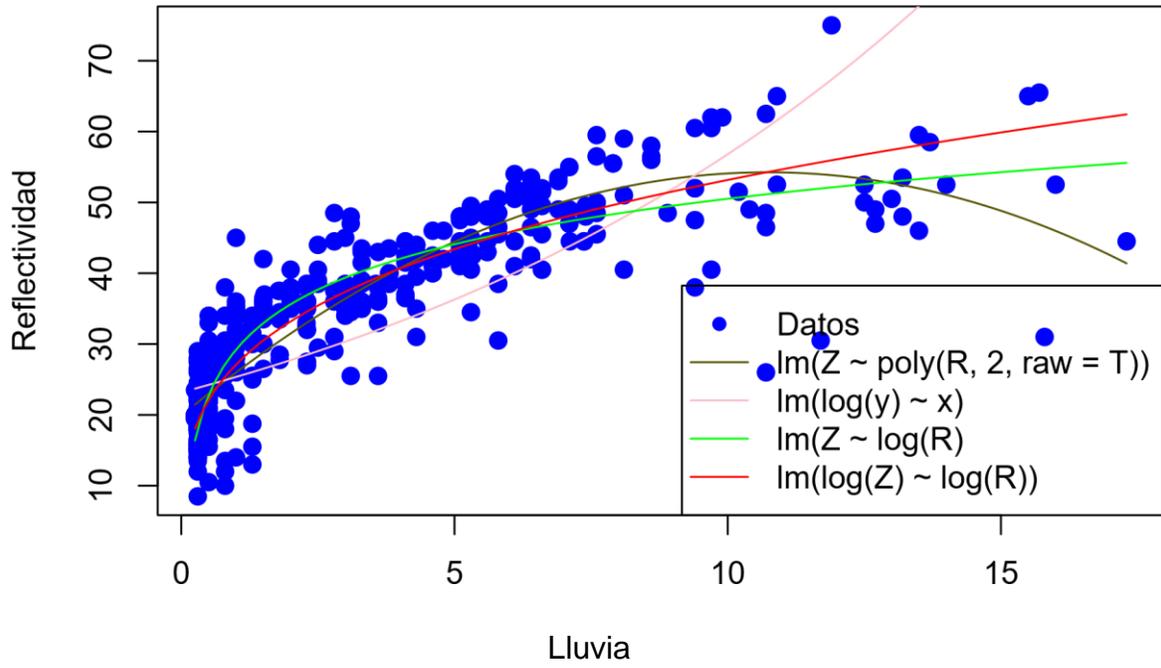
Función Potencial



```
plot(R, Z, pch = 16, cex = 1.3, col = "blue",
xlab = "Lluvia", ylab = "Reflectividad", main =
"Resumen de todas las funciones")

lines(newdf$R, predict(poly, newdf), col = "#585803")
lines(newdf$R, exp2, col = "pink") lines(newdf$R, log2, col =
"green") lines(newdf$R, pow_model2, col = "red")
legend("bottomright", c("Datos",
"lm(Z ~ poly(R, 2, raw = T))", "lm(log(y) ~ x)", "lm(Z ~ log(R))",
"lm(log(Z) ~ log(R))"), pch = c(16, NA, NA, NA, NA), lty =
c(NA, 1, 1, 1, 1), col = c("blue", "#585803", "pink", "green",
"red"))
```

Resumen de todas las funciones



APÉNDICE 5

Características del radar doppler del estado de jalisco

