



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Calibración preliminar de la estación de radar «Eco-Nube»

Sthefanía Grajales Noreña

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2017

Calibración preliminar de la estación de radar «Eco-Nube»

Sthefanía Grajales Noreña

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Máster en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D Jorge Julián Vélez Upegui

Codirector:

Ph.D Jorge Hernán Estrada Estrada

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2017

Preliminary calibration of the «Eco-Nube» radar station

Sthefanía Grajales Noreña

Thesis presented as partial requirement for the degree of:

Master in Engineering - Hydraulic Resources

Director:

Ph.D Jorge Julián Vélez Upegui

Codirector:

Ph.D Jorge Hernán Estrada Estrada

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2017

«La estrategia competitiva consiste en ser diferentes. Significa la selección deliberada de un conjunto de actividades distintas para entregar una mezcla única de valor.»

Michael Porter

Agradecimientos

Agradezco por este nuevo día en mi vida, por la oportunidad de mirar hacia atrás y sonreír, de superar los obstáculos, por la oportunidad de vivir esta experiencia y todo lo que me ha enseñado, porque me siento afortunada de haber estado rodeada de personas tan maravillosas que me apoyaron durante todo el camino. Quisiera darle las gracias a todos aquellos que hicieron posible lo imposible, muy especialmente a mi tutor Jorge Julián y a mi mentora Liliana y al ingeniero Jorge Hernán, por su dirección y conocimiento aportado, por enseñarme y contribuir en mi formación académica, profesional y personal. Ellos fueron mi gran apoyo y son mi modelo a seguir. A Yeison y a David por aportar sus grandes conocimientos y brindarme la oportunidad de crecer con ellos. A Yeison quisiera darle las gracias por permitirme entrar en el mundo de la electrónica, así pareciera una niña de 5 años tratando de aprender algo que según los electrónicos me demoraría 7 semestres en entender. A David no tengo palabras para agradecer todo su apoyo. A mis compañeros de trabajo de modelos hidráulicos, todos ellos que sufrieron conmigo y la tesis, en especial a Danilo por mojarse conmigo cuando tenía que tomar datos, al ingeniero Fernando, la ingeniera Natalie y Andrea por estar pendientes siempre de mí y de mis nubes. A mi familia, en especial a mi tío Julián, a mi hermana y a Diego, por apoyarme y permitir que fuera posible esta locura.

Esta investigación ha sido posible gracias al convenio suscrito entre la Universidad Nacional – IDEA y CORPOCALDAS en el marco del proyecto "Gestión del riesgo de los desastres en Manizales" por medio del cual se financió el desarrollo del radar meteorológico «Eco-Nube», "Jóvenes investigadores e innovadores 2015", financiado por COLCIENCIAS en la convocatoria 706 de 2015, y "Caracterización, identificación y modelamiento matemático de variables climáticas en la ciudad de Manizales y el Parque Nacional Natural Los Nevados, mediante técnicas de minería de datos e inteligencia artificial" financiado por COLCIENCIAS en la convocatoria 656 de 2014 "Es tiempo de volver".

Resumen

Las diferencias observadas en la morfología de las señales adquiridas por un radar pluviométrico experimental de bajo costo, bajo diferentes condiciones meteorológicas, permitieron formular un índice para cuantificar la nubosidad. Los resultados obtenidos mostraron que existen diferencias significativas en los patrones de las señales normalizadas del radar que permiten identificar las condiciones de nubosidad. Se comprobó que las variaciones en amplitud y longitud de la onda de la señal aumentan a medida que se incrementa la nubosidad. Esta característica permitió clasificar las señales según las condiciones meteorológicas predominantes. Para cuantificar la potencia de las señales, se formuló un índice basado en la media del área bajo la curva de los ciclos completos de las señales normalizadas. Este índice varía en un rango entre 0 y 1, donde 0 corresponde a un día totalmente despejado y 1 a un día altamente nublado con elevada probabilidad de lluvia.

La relación entre la intensidad de la lluvia y la reflectividad medida por el radar fue establecida de forma preliminar, presenta una tendencia potencial con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,98$ para el ajuste de las medianas de los pares de Z (Reflectividad) - R (Intensidad) disponibles por intervalos de intensidad de 5 minutos, lo que implica que un alto porcentaje de los datos es explicado por el modelo matemático. No obstante, existe un alto grado de incertidumbre asociado al proceso experimental y al intervalo temporal de lluvia monitoreado, que hace que la ecuación de calibración sea preliminar y que requiera la adquisición de un mayor número de pares de $Z - R$ a una diferencia del tiempo menor, a través del sistema de radar.

Los beneficios de esta investigación radican en que permiten acercarse a una calibración hidrológica preliminar de un radar experimental de bajo costo, construido a partir de un microondas convencional, para la cuantificación de la nubosidad y estimación de la potencia de las señales registradas durante los eventos de lluvia.

Palabras clave: Calibración hidrológica, Índice de nubosidad, Procesamiento de señales, Radar experimental.

Abstract

The observed differences in the morphology of the signals acquired by a low cost experimental rainfall radar, under different meteorological conditions, allowed to create an index to quantify the cloudiness. The results showed that there are significant differences in the patterns of the normalized radar signals that allow to identify the conditions of cloudiness. It was found that the variations in amplitude and length of the signal wave increase as the cloudiness increases. This characteristic allowed to classify the signals according to the prevailing meteorological conditions. To quantify the power of the signals, an index based on the mean of the area under the curve of the complete cycles of the normalized signals was formulated. This index varies in a range between 0 and 1, where 0 corresponds to a fully clear day and 1 to a highly cloudy day with a high probability of rain.

The relationship between rainfall intensity and radar reflectivity was preliminarily established. It has a potential trend with a coefficient of determination of $R^2 = 0,98$ for the adjustment of the medians of the Z (Reflectivity) - R (Intensity) pairs available by intensity intervals of 5 minutes, implying that a high percentage of the data is explained by the mathematical model. However, there is a high degree of uncertainty associated with the experimental process and the time interval of monitored rain, which makes the calibration equation preliminary and requires the acquisition of a larger number of $Z - R$ pairs at a smaller time difference, through the radar system.

The benefits of this research are that they allow us to approach a preliminary hydrological calibration of a low cost experimental radar, constructed from a conventional microwave, for the quantification of cloudiness and estimation of the power of the signals recorded during the events of rain.

Key words: Cloudiness index, Experimental radar, Hydrological calibration, Signal processing.

Índice general

Índice general	XV
Índice de figuras	XXI
Índice de cuadros	XXVII
1. Introducción	1
1.1. Justificación y descripción del problema	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Estructura de la tesis	4
Nomenclatura	1
2. Estado del Arte	7
2.1. Las nubes y la precipitación	7
2.1.1. Las nubes	8

2.1.2.	Formación de las nubes	8
2.1.3.	Clasificación de las nubes	10
2.1.4.	Medición de la nubosidad	12
2.1.5.	Precipitación	13
2.1.6.	Formación de la precipitación	13
2.1.7.	Medición de la precipitación: El Pluviómetro	15
2.1.8.	Red de estaciones meteorológicas	18
2.2.	Radars Meteorológicos	21
2.2.1.	El radar: Fundamento del fenómeno físico	22
2.2.2.	Tipos de radars	24
2.3.	El radar pluviométrico experimental «Eco-Nube»	24
2.3.1.	Características del radar pluviométrico «Eco-Nube»	27
2.3.2.	Fundamento del fenómeno físico: Las microondas	27
2.3.3.	Partes del radar «Eco-Nube»	28
2.3.4.	Funcionamiento del radar «Eco-Nube»	29
2.4.	Calibración hidrológica de un radar meteorológico	29
2.4.1.	Metodologías netamente estadísticas	30
2.4.1.1.	Método de la Integral tiempo-área	30
2.4.1.2.	Método de Coincidencia de distribuciones de probabilidad . . .	31
2.4.1.3.	Método de Coincidencia de distribuciones de probabilidad en ventanas	31

2.4.2.	Metodologías basadas en la escala del pluviómetro	32
2.4.2.1.	Calibración puntual	32
2.4.2.2.	Calibración de la vecindad	32
2.4.2.3.	Calibración de retraso	33
2.4.3.	Metodologías basadas en la escala del radar	33
2.4.4.	La Entropía como una nueva metodología.	34
2.4.5.	Errores en la calibración	36
2.5.	Conclusiones del capítulo	39
3.	Metodología	41
3.1.	Operación de la estación de radar «Eco-Nube»	42
3.1.1.	Protocolo de medición	43
3.2.	Selección de los escenarios de calibración	44
3.3.	Análisis de la información y ecos suministrados por el radar	46
3.4.	Calibración preliminar del radar experimental «Eco-Nube»	47
3.4.1.	En el dominio del tiempo	47
3.4.2.	En el dominio de la frecuencia	48
3.4.2.1.	Métodos	49
3.4.2.2.	Regresiones	50
3.5.	Conclusiones del capítulo	51

4. Resultados y Discusión	53
4.1. Análisis de la información y ecos suministrados por el radar	53
4.1.1. Descripción de las señales del radar «Eco-Nube»	54
4.1.2. Estandarización de las señales	54
4.1.2.1. Estandarización de frecuencias: submuestreo e interpolación de las señales	55
4.1.2.2. Normalización y estandarización de una señal	57
4.1.3. Señal emitida: intervalo y duración de envío, análisis de impulsos	57
4.1.3.1. Análisis de los impulsos dentro de las señales	57
4.1.4. Análisis espectral de la señal y diseño de filtros digitales para reducción de ruido	59
4.1.4.1. Filtros aplicados	60
4.1.4.2. Selección de ancho de banda	61
4.2. Calibración preliminar del radar pluviométrico «Eco-Nube» mediante <i>IN-ABC</i>	70
4.2.1. Segmentación de las señales	70
4.2.2. Caracterización de ciclos completos de la señal	75
4.2.2.1. Escenario 1: <i>Despejado</i> (sin nubes)	75
4.2.2.2. Escenario 2: <i>Parcialmente Nublado</i>	76
4.2.2.3. Escenario: <i>Nublado</i>	77
4.2.2.4. Escenario: <i>Altamente nublado</i>	77
4.2.3. Cálculo de áreas bajo la curva de una señal	79
4.2.4. Formulación de un índice de nubosidad <i>IN-ABC</i>	81

4.3. Clasificación de escenarios según densidad espectral	82
4.4. Estimación preliminar de la lluvia a partir de la información del radar «Eco-Nube»	86
4.5. Descripción de la señal de lluvia en el tiempo y la frecuencia	86
4.6. Relación Reflectividad-Intensidad	89
4.6.1. Según intervalos de 5 minutos	89
4.6.2. Según eventos	90
4.7. Determinación nuevo conjunto de pares de Reflectividad - Intensidad	93
4.8. Correlación entre las variables derivadas de las medidas del radar y la Intensidad de la lluvia	96
4.8.1. Ecuación experimental para la calibración del radar «Eco-Nube»	102
4.8.2. Error en la estimación de la precipitación	103
4.9. Conclusiones del capítulo	105
5. Conclusiones y Recomendaciones	107
Bibliografía	111
A. Índice de nubosidad IN-ABC para la clasificación de señales de un radar pluviométrico experimental en la ciudad de Manizales	115
B. Análisis de las señales de un radar pluviométrico experimental	117
C. Radar pluviométrico «Eco-Nube»	125
D. Aproximación a la dinámica de las nubes en ciudades tropicales andinas, caso Manizales (Colombia)	129

E. Certificado XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica	139
F. Invitación Week of International Scientific Young Talents	141
G. Quantification of cloudiness in andean tropical cities with an experimental low cost radar, case Manizales (Colombia)	143
H. Certificado Week of International Scientific Young Talents	149
I. Confirmación artículo	151
J. Identification of cloudiness in andean tropical cities with an experimental low cost radar, case Manizales (Colombia)	153
Índice alfabético	168

Índice de figuras

2.1. Clasificación de las nubes.	10
2.2. Comparación de los diferentes tamaños de una gota de nube y de lluvia.	14
2.3. Captación de gotas de agua por un núcleo engelante en el interior de una nube en subfusión.	16
2.4. Esquema de funcionamiento de una red de monitoreo.	19
2.5. Curva de doble masa.	21
2.6. Tipos de dispersiones.	23
2.7. Localización, caso de estudio Manizales.	25
2.8. Radar experimental de bajo coste «Eco-Nube».	26
2.9. Esquema del radar experimental de la Universidad Nacional sede Manizales.	28
2.10. Arquitectura del sistema del radar «Eco-Nube».	29
2.11. Registro de una lluvia estratiforme.	38
2.12. Registro de una Lluvia conectiva.	39
3.1. Diagrama de bloques de la metodología implementada.	42
3.2. Despejado (0 octas).	45

3.3. Parcialmente nublado (1 a 3 octas).	45
3.4. Nublado (4 a 5 octas).	45
3.5. Altamente nublado y altamente nublado con lluvia (6 a 8 octas).	46
4.1. Submuestreo de f_s , 384.000→44.100 datos por segundo para una señal del evento <i>Parcialmente nublado</i>	55
4.2. Interpolación de f_s de 44.100→384.000 datos por segundo para una señal del evento <i>Altamente nublado</i>	56
4.3. Señal perteneciente al estado de «Despejado», los impulsos principales presentan un periodo promedio de 1, 14 s.	58
4.4. Señal perteneciente al estado de «Nublado», los impulsos principales presentan un periodo promedio de 1, 14s.	58
4.5. Densidad espectral de potencia para señal 384.000 mps (campaña 2014).	61
4.6. Densidad espectral de potencia para señal 44.100 mps (campaña 2015).	62
4.7. Ancho de banda principales para para señal a 384000 mps (campaña 2014).	62
4.8. Filtro pasa banda 2,6 – 30 kHz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	63
4.9. Filtro pasa banda 2,6 – 35 kHz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	63
4.10. Filtro pasa banda 600 – 35000 Hz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	64
4.11. Ancho de banda seleccionado para señal a 44.100 muestras por segundo (campaña 2015).	64
4.12. Filtro pasa banda 20 – 600 Hz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	65
4.13. Filtro pasa banda 20 – 1000 Hz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	65
4.14. Filtro pasa banda 20 – 2000 Hz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	66
4.15. Anchos de banda en torno a cada armónico (campaña 2014).	66

4.16. Filtro pasa banda 2 – 4 kHz tipo <i>Butterworth</i> de orden 2.	67
4.17. Filtro pasa banda 6 – 7,5 kHz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	67
4.18. Filtro pasa banda 12 – 15 kHz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	68
4.19. Anchos de banda en torno a cada armónico (campana 2015).	68
4.20. Filtro pasa banda 50 – 70 Hz tipo <i>Butterworth</i> de orden 2.	69
4.21. Filtro pasa banda 100 – 140 Hz tipo <i>Butterworth</i> de orden 1.	69
4.22. Escenarios analizados.	70
4.23. Diagrama de bloques del algoritmo desarrollado para el análisis de las señales el radar «Eco-Nube».	71
4.24. Partición y segmentación de la señal.	72
4.25. Evolución de la señal altamente nublado con lluvia.	72
4.26. Evolución de la señal altamente nublado.	73
4.27. Evolución de la señal despejado.	73
4.28. Evolución de la señal nublado.	73
4.29. Evolución de la señal parcialmente nublado.	74
4.30. Señales registradas por el radar «Eco-Nube» en diferentes condiciones de nubosidad.	74
4.31. Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día despejado.	75
4.32. Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día despejado.	76
4.33. Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día parcialmente nublado.	76

4.34. Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día nublado.	77
4.35. Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día altamente nublado.	78
4.36. Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día altamente nublado con lluvia.	78
4.37. Características morfológicas de las señales para los diferentes estados de nubosidad.	79
4.38. Áreas bajo la curva de ciclos completos característicos para cada estado de nubosidad.	80
4.39. Evolución del índice de nubosidad para las señales registradas por el radar en diferentes condiciones de nubosidad.	81
4.40. Índice de nubosidad, área bajo la curva.	82
4.41. Análisis de la densidad espectral de las señales adquiridas por el radar.	83
4.42. Frecuencias seleccionadas con la mejor dispersión de escenarios.	85
4.43. Clasificación de las señales por escenarios meteorológicos como función de la frecuencia.	85
4.44. Análisis en el tiempo y la frecuencia de la señal de lluvia.	87
4.45. Relación señal ruido.	88
4.46. Relación Reflectividad radar (mm^6/m^3) vs Intensidad de precipitación según intervalos de 5 minutos.	89
4.47. Relación Reflectividad radar (mm^6/m^3) vs Intensidad de precipitación según intervalos de 5 minutos agrupados usando la mediana.	90
4.48. Relación Reflectividad radar (mm^6/m^3) vs Intensidad de precipitación según eventos.	91

4.49. Agrupaciones ambiguas en precipitaciones e intensidades.	92
4.50. Intervalo entre 15 y 30 <i>dB</i>	92
4.51. Intervalo entre 80 y 90 <i>dB</i>	93
4.52. Análisis de las interrupciones en la señal respecto al tiempo.	94
4.53. Análisis de la densidad espectral por tramos sobresaltados. Evaluación de la influencia de la presencia de interrupciones con respecto a la frecuencia.	96
4.54. Regresiones según la magnitud de densidad espectral de potencia en decibeles y la intensidad.	97
4.55. Regresiones según la magnitud de densidad espectral de potencia y la intensidad.	98
4.56. Regresiones según la media de la señal en el tiempo y la intensidad.	99
4.57. Regresiones según la mediana de la señal en el tiempo y la intensidad.	100
4.59. Regresiones según el centroide espectral.	100
4.58. Regresiones según la desviación estándar de la señal en el tiempo y la intensidad.	101
4.60. Mejor regresión obtenida según la reflectividad y la intensidad.	102
4.61. Comparación de ajuste potencial de las medianas de pares Z-R con y sin validación de los datos.	104
4.62. Distribución de los errores.	105

Índice de cuadros

2.1. Empleo de la entropía de múltiple escala para procesar series de tiempo.	35
4.1. Tabla comparativa de campañas.	70
4.2. Frecuencias discriminatorias.	84

Nomenclatura

λ	Longitud de onda
ω_p	Frecuencia de corte
\overline{Z}_1	Normalización del vector x
\overline{Z}_2	Estandarización del vector x
$H(j\omega)$	Función de transferencia de un filtro
$P(X_n)$	Función de masa de probabilidad
a, b	Constantes que relacionan la intensidad con la reflectividad
d	Diámetro de una partícula de agua condensada
dBZ	Decibeles de Z
R	Intensidad
S	Entropía
Z	Reflectividad
Z-R	Relación reflectividad intensidad

Capítulo 1

Introducción

La precipitación está caracterizada por un comportamiento altamente variable en el tiempo y en el espacio, lo cual hace complejo proporcionar una descripción cuantitativa precisa, así como obtener una resolución espacio-temporal de los datos (Rollenbeck & Bendix, 2006). Las estaciones meteorológicas aparecen como herramientas para cuantificar en un instante de tiempo dado el comportamiento de las variables hidrometeorológicas, logrando así llevar un registro histórico de las mismas. Las mediciones pluviométricas se pueden considerar como una estimación cuantitativa precisa de la lluvia, pero no pueden representar su distribución espacial, diferente a las mediciones realizadas por los radares meteorológicos que surgen como un elemento innovador y proporcionan una mejor representación espacial de la precipitación, aunque en la estimación cuantitativa de la lluvia son más pobres (Ortiz et al., 1960).

En el país, actualmente el *Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá* el (SIATA), como un proyecto de Ciencia y Tecnología del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Alcaldía de Medellín, apoyado por EPM e ISAGEN, facilitan la intervención oportuna de los organismos de respuesta haciendo posible el acceso en tiempo real a la información generada y requerida sobre la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos que amenacen la calidad de vida de los habitantes metropolitanos, ante eventos como precipitaciones extremas, inundaciones, movimientos en masa y calidad del aire. Para cumplir con su objetivo, cuentan con diversos sensores con los cuales monitorean diferentes variables meteorológicas, entre ellos está un radar meteorológico convencional, él cual cuenta con un alcance de 254 km, y es el único dentro de Colombia que se encuentra operando en función de la gestión del riesgo y el recurso hídrico

(Sepúlveda Berrío, 2015). Adicionalmente, existen otros tres radares meteorológicos sobre el territorio colombiano, en el archipiélago de San Andrés, en Subachoque - Cundinamarca, y en Corozal - Sucre, que se encuentran operados por la Aeronáutica Civil para otros fines, y se tiene proyectada la compra de un radar que cubra la zona cafetera.

Un sistema de monitoreo ideal de la precipitación sería uno en donde las redes de estaciones meteorológicas aporten información sobre cantidades de precipitación, pero la distribución espacial siga las observaciones de los radares meteorológicos (Rollenbeck & Bendix, 2011). Sin embargo, la implementación de un radar meteorológico implica altos costos, que no pueden ser asumidos por las entidades gubernamentales de las ciudades. De esta necesidad, nace la propuesta para el desarrollo del radar experimental de bajo costo llamado «Eco-Nube» y su financiamiento, gracias al convenio suscrito entre el Instituto de *Estudios Ambientales - IDEA de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales* y la *Corporación Autónoma Regional de Caldas - CORPOCALDAS* en el marco del proyecto «*Gestión del riesgo de los desastres en Manizales*».

1.1. Justificación y descripción del problema

Manizales ha sido históricamente una ciudad propensa a sufrir deslizamientos. Su topografía montañosa con pendientes fuertes, sus suelos en ocasiones con baja capacidad portante (suelos de origen volcánico) empleados en actividades antrópicas que empeoran su estado y su régimen de lluvias influenciados por los microclimas que dominan la zona, la convierten en un escenario propicio para los deslizamientos asociados a fuertes lluvias, avalanchas e inundaciones (Cortés, 2010). Por consiguiente, la ciudad se encuentra en emergencia constante y debe incurrir en altos costos económicos y sociales en la reparación y restitución de las víctimas, incluso un alto porcentaje del índice de mortalidad de la ciudad podría atribuirse a los deslizamientos, enmarcándose como una de las principales problemáticas ambientales y económicas debido a su impacto negativo sobre el desarrollo de Manizales (Fernández et al., 2006), sin embargo, existen otros factores que en conjunto con los deslizamientos magnifican el riesgo, como una alta amenaza sísmica por su localización geográfica, de acuerdo a la normativa vigente del sector de la construcción *Norma Sismo Resistente del 2010 (NSR-10)*, y una amenaza ante erupciones volcánicas asociadas al Volcán Nevado del Ruiz.

Un ejemplo de las consecuencias de eventos extremos de lluvia, se presentó entre el 18 y 19 de marzo del año 2003 en la ciudad, en donde ocurrió un evento de precipitación fuerte, con una

magnitud que osciló entre 81 y 146 *mm*, siendo la máxima históricamente registrada, con una duración entre Río Mixcoac 4 y 6 horas dependiendo del sector, y con una intensidad pico de 124 *mm/h* en cinco minutos. La magnitud de los efectos del evento extremo, se debieron a las condiciones antecedentes de lluvia, dado que se presentó en 4 días previos una precipitación de 199,6 *mm*, lo que corresponde al 81 % del total de la lluvia registrada en el mes; la capacidad de las obras de drenaje, vertimiento de aguas y estabilidad de las laderas que contiene la ciudad se vio comprometida por tal magnitud. El 4 de diciembre del 2003, se presentó otro evento catastrófico en la ciudad, un deslizamiento de tierras en el barrio La Sultana sepultó varias viviendas, provocando la muerte de 16 personas. (Fernández et al., 2006).

Recientemente, el 19 de abril de 2017, después de un periodo prolongado de poca lluvia atribuido a la ocurrencia del fenómeno meteorológico *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)* en su fase El Niño (Xacata, 2016) y uno de los años más calurosos de la historia (2015) (El Mundo, 2015), vuelven las intensas lluvias a activar la alerta roja en Manizales, las 14 estaciones meteorológicas evidencian que el nivel de lluvia caída ha estado entre los 200 *mm* como mínimo y que solo el 19 de abril la estación meteorológica *Hospital de Caldas* reportó la caída de 170,2 *mm* de lluvia, nivel considerado como histórico (La Patria, 2017), debido a que este valor se registra normalmente en un mes. Estos análisis son basados en la lluvia acumulada de los 25 días antecedentes, considerados como un indicador para la gestión del riesgo de deslizamientos y se denomina A25 (Terlien, 1996). Al analizar este indicador para el año 2014 se observaron periodos de riesgo para la mayoría de las estaciones que componen la red, dado que se superan los 200 *mm* en algunos de los meses (Vélez et al., 2014).

Esta problemática incentiva el interés de explorar y describir la variación espacio temporal de la lluvia sobre el área que comprende la ciudad, para tener un mejor entendimiento del fenómeno físico, que permita una respuesta temprana ante cualquier eventualidad (Cortés, 2010; Rollenbeck & Bendix, 2011).

Las estimaciones de lluvia proporcionadas por los radares se han vuelto cruciales para muchas aplicaciones como la planificación hidrológica (López et al., 2006), en donde los modelos hidrológicos usan la información de radar para obtener modelos distribuidos más confiables que pueden ser incluidos en los sistemas de prevención de desastres (Jácome, 2009; López et al., 2006). De esta forma, la información suministrada por los radares es útil para la generación temprana de alertas de fenómenos hidrometeorológicos de gran magnitud, y en especial de los deslizamientos (López et al., 2006). La información obtenida de los radares, también es útil para mejorar el dimensionamiento de las obras de infraestructura urbana, con una definición más

acertada de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (*IDF*) por zonas (Cortés, 2010). Para poner en funcionamiento esta estrategia sobre la región, es necesario realizar una investigación profunda en la implementación y funcionamiento del radar experimental «Eco-Nube», y requiere una comprensión de las señales adquiridas por el radar y a su vez la relación con los fenómenos físicos que trata de describir.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Calibración preliminar de la estación de radar de nubes de lluvia «Eco-Nube» empleando información de la red de monitoreo de la ciudad de Manizales, para desarrollar una herramienta del riesgo que sea útil y suministre información para tomar decisiones frente a la alerta temprana de eventos torrenciales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar la información y ecos suministrados por el radar.
- Analizar la nubosidad con base en los registros del radar.
- Analizar la lluvia ocurridas en el radar de nubes de lluvia «Eco-Nube» empleando información de la red de monitoreo de la ciudad de Manizales.
- Crear una ecuación que relacione el coeficiente de reflexión de la nube de lluvia con su precipitación.

1.3. Estructura de la tesis

Es importante resaltar que este es un desarrollo experimental y se desconocen en su totalidad los procesos y las variables que intervienen, y que al ser un dispositivo desarrollado en una nueva e

innovadora propuesta por ingenieros electrónicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, se encuentra en estado de prototipo. Esta investigación presenta los primeros análisis con el dispositivo, los cuales tienen un alto grado de incertidumbre y solo pueden obtenerse resultados preliminares que ayudarán al conocimiento y la optimización del sistema, para que a futuro pueda ser implementado como un elemento estratégico en el monitoreo de las variables meteorológicas.

Un análisis del estado del arte se presenta en el capítulo 2 en el cual se expone el fenómeno de la formación de las nubes y la precipitación; se hace una breve descripción al principio de funcionamiento de los radares meteorológicos así como los métodos y procesos para su calibración.

El capítulo 3 se desarrolló un protocolo de captura y almacenamiento de datos se hace un análisis exploratorio de las señales adquiridas por el radar, en donde se quiere entender y comprender su naturaleza.

El procesamiento de los datos adquiridos se lleva a cabo en el capítulo 4 en donde se relacionó la información suministrada por el radar, primero, con el estado de nubosidad y luego con las lluvias ocurridas durante las campañas de adquisición, con el fin de obtener una ecuación preliminar de calibración hidrológica del radar «Eco-Nube».

En capítulo 5 se presentan las conclusiones, recomendaciones y aportes de esta tesis.

Este trabajo se complementa con un conjunto de Apéndices que agrupan todas las publicaciones, presentaciones y congresos que tuvieron lugar durante el desarrollo de la tesis y que por ende representan estados parciales de esta.

Capítulo 2

Estado del Arte

El principio básico de funcionamiento de un radar meteorológico consiste en emitir señales de microondas de una longitud de onda específica y luego analizar el eco que produce esta señal al chocar con una nube, su potencia y fase permiten generar información sobre tamaño, densidad, altura y velocidad del objetivo. Este tipo de radares hacen barridos perimetrales secuenciales variando cada vez su ángulo de inclinación, esto les permite tener una gran zona de análisis.

Debido a las características del radar «Eco-Nube», específicamente el ancho de banda de análisis que provee, no es posible medir todas las magnitudes que mide un radar meteorológico convencional, es por esto que el análisis se enfocará en la potencia del eco reflejado. Este radar prototipo, además, es estático y únicamente apunta a una dirección por lo cual todos los métodos de calibración son puntuales.

2.1. Las nubes y la precipitación

Cuando se habla de la física de las nubes, se refiere desde la clasificación de las nubes hasta la química de las precipitaciones. Sin embargo, se considera que la principal tarea de la física de las nubes consiste en explicar la formación de las nubes y el desarrollo de las precipitaciones.

2.1.1. Las nubes

Las nubes son usualmente la única porción visible de la atmósfera, esta característica les permite reflejar el carácter estable o inestable del clima en un momento determinado, cumplen la función de ser el principal indicador meteorológico, dado que hablan por sí solas para quien sabe interpretarlas (García & García, 1985).

Se definen como masas formadas por pequeñas gotas de agua o cristales de hielo suspendidos en la atmósfera, aproximadamente 100 partículas componen un centímetro cúbico, cuyos radios son del orden de 10 micras. En general la estructura formada por las partículas es muy estable y las gotas manifiestan poca tendencia a juntarse o a modificar su tamaño (Rogers, 1977).

El comportamiento de la nubosidad es variado y ampliamente influenciado por las características espaciales y temporales de cada zona climática. La nubosidad total del planeta permanece en promedio entre el 50 y 55 %; en latitudes subtropicales se registran valores de cobertura del 30 %, a nivel del cinturón ecuatorial se presentan del orden del 80 %, en este caso las nubes presentan un movimiento continuo hacia el oeste (por efecto de los vientos alisios) y en las regiones polares se alcanzan valores promedio del 90 %, con un marcado movimiento hacia el este (Martínez, 2010).

2.1.2. Formación de las nubes

El proceso de formación de las nubes se da gracias a la presencia de múltiples fenómenos de naturaleza físico-química que modifican las partículas suspendidas en el aire, estos fenómenos favorecen el agrupamiento interparticular, que a su vez forma las grandes masas que se pueden apreciar en el firmamento. El nacimiento de una nube se da cuando el aire se eleva hasta el punto de saturación (100% de humedad), esta ascensión del aire se debe a la combinación de factores como: la acción de frentes climáticos, obstáculos topográficos y la convección (Falcón & Muñoz, 2007; Laing & Evans, 2016).

Los núcleos de condensación son partículas fundamentales en el proceso, dado que son las encargadas de realizar la condensación o formación de pequeñísimas gotas de agua. En la atmósfera abundan variedad de tipos de núcleos de condensación, los principales son los núcleos higroscópicos, gotas de ácido nítrico, cenizas, polvo, polen y sulfatos. El comportamiento de los núcleos de condensación es variado, por ejemplo, algunos son más higroscópicos, es decir, que tienen

mayor capacidad de absorción de humedad que otros y por ende permiten la condensación a niveles de humedad relativa menores del 100% (Laing & Evans, 2016).

El desarrollo de las nubes y las precipitaciones está determinado por dos procesos de naturaleza muy distinta. El primero está relacionado con el movimiento vertical y horizontal que ellas realizan y cómo este permite la saturación de la nube, es decir, se desarrollan en ellas humedades relativas próximas al 100%, esto ocurre casi exclusivamente en virtud de las corrientes de aire verticales que tienen lugar en el espacio libre de nubosidad (Falcón & Muñoz, 2007).

Los movimientos de las nubes pueden tener una extensión horizontal que oscila entre 30 *m* y 200 *km*, según sea la causa que los producen. Por otra parte las velocidades verticales varían también en magnitud, desde unos centímetros por segundo a decenas de metros dependiendo también del proceso que las origina (Rogers, 1977).

El segundo tipo de fenómenos tiene siempre lugar a una escala menor y son de tamaño comparable al de las partículas que constituyen la precipitación. Son los procesos de formación y crecimiento de la gotita nubosa, así como sus interacciones con el medio ambiente, en ellos intervienen conocimientos termodinámicos de la teoría de la difusión y físico-químicos (Falcón & Muñoz, 2007).

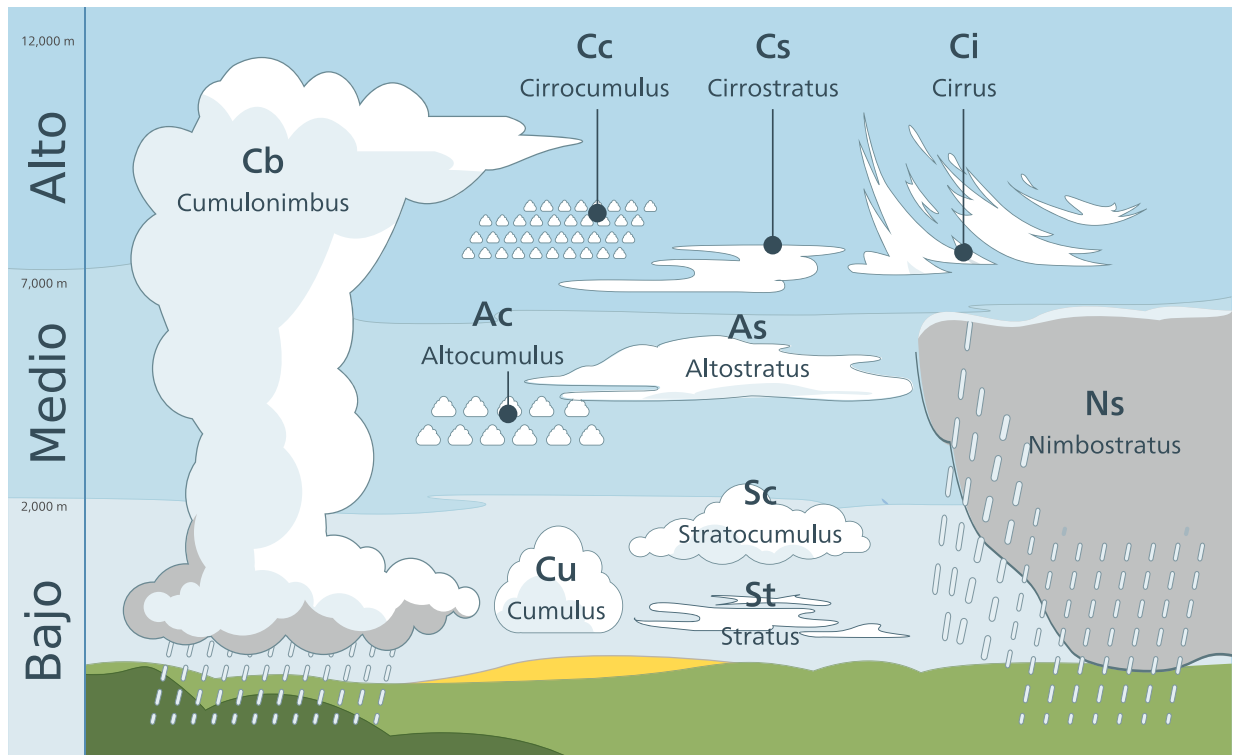
Una gotita nubosa individual se forma a partir de la fase de vapor, inicia su crecimiento hasta alcanzar un tamaño visible, posteriormente interacciona con las partículas vecinas y de esta forma dan lugar a la precipitación, estos aspectos de la física de las nubes suelen incluirse bajo la denominación general de «microfísica de las nubes» (Rogers, 1977). La microfísica de las nubes describe todos aquellos fenómenos que tienen influencia directa sobre las partículas, en especial, el efecto que tienen las fuerzas de tensión superficial en el tamaño de las mismas, de modo que para que una pueda aumentar de tamaño, producto de la condensación del vapor de agua, la tensión superficial tiene que ser contrarrestada por un fuerte gradiente de presión de vapor (Falcón & Muñoz, 2007).

Una nube se encuentra saturada en el momento en que la velocidad de evaporación y condensación son iguales, la condición de saturación se define como una situación de equilibrio (Rogers, 1977). Cuando la nube se encuentra en esta situación, se forma una barrera de energía libre entre las pequeñas gotitas, lo que implica que el cambio de fase no tiene lugar en las condiciones de equilibrio, en otras palabras, no se forman gotitas cuando la masa de aire húmedo está saturada o por encima del equilibrio, en realidad, las gotitas empezarán a condensarse solamente cuando la humedad relativa alcance valores del orden de varios cientos por cientos (Martínez, 2010).

2.1.3. Clasificación de las nubes

Las nubes poseen características que permiten diferenciarlas unas de otras, como por ejemplo, su forma, color, extensión (horizontal o vertical), capacidad de producción de precipitación que puede ser en forma de lluvia, granizo o nieve y altura respecto a la topografía, son parámetros que permiten su clasificación.

Las nubes se clasifican de acuerdo a su posición altitudinal, si se encuentran por debajo de 2 km son bajas, medias entre 2 km y 6 km, altas si están a más de 6 km y de acuerdo a su forma como estratos o capas, cirros o velos rizados y cúmulos o nubes espesas. En la figura 2.1 se aprecia como los dos parámetros determinan el tipo de nube.



Fuente: Valentin de Bruyn / Coton - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0.

Figura 2.1: Clasificación de las nubes.

Nótese que en la figura 2.1 el prefijo alto no se usa para las nubes altas, si no para las medias, además a la clasificación se le añade prefijo o sufijo «nimbo» que hace referencia a una nube de lluvia.

Las nubes estratiformes (incluyendo los cirros) pueden tener lluvia bastante uniforme gracias a que el gradiente geotérmico vertical es estable, en cambio en las nubes cumuliformes el gradiente vertical suele ser inestable, lo que hace que la lluvia no sea uniforme (Martínez, 2010). Es de resaltar que altoestratos, nimbostrato, estratos y los cumulonimbos son generadoras de precipitación.

Alto cúmulos: Son muy similares a las cirrocúmulos pero poseen mayor tamaño, son de color blanco lo que significa que están constituidos por cristales de hielo, puede contener parches de color gris lo que indica que están formadas por gotas microscópicas de agua, además se pueden encontrar dispuestas en capas, su forma y textura es variable (Martínez, 2010).

Altostratos: Son nubes con apariencia uniforme o fibrosa, son gruesas de color grisáceo o azul grisáceo oscureciendo así el sol. Este tipo de nubes suele dar lugar a precipitación ligera en forma de llovizna pequeñas gotas de agua. Están compuestas en su mayor parte por gotas de agua (Martínez, 2010).

Cirrostratos: Este tipo de nube le proporciona una apariencia lechosa al cielo, son transparentes como un velo en hoja (delgadas), se pueden observar en estructuras fibrosas y en capas.

Cirrocúmulos: Son nubes de color blanco debido a que están formadas por cristales microscópicos de hielo, de apariencia rizada, delgadas, normalmente son aisladas, aunque pueden formar agrupaciones, de estructura fibrosa, sin sombras propias (García & García, 1985).

Nimbostrato: No permiten apreciar el sol, por lo general producen lluvia. Son nubes de color gris oscuras, cuyo espesor puede llegar a alturas por encima de los 3 mil metros, dando así la posibilidad de que diferentes autores las clasifiquen como nubes de nivel medio (Martínez, 2015).

Cumulonimbos: Por lo general producen precipitaciones en forma de lluvia o de granizo, normalmente se presentan con fenómenos tormentosos. Son densas con un gran desarrollo vertical lo que puede impedir la apreciación del sol. Su color es blanco (micro-cristales de hielo) excepto en la base que es gris oscuro (micro-gotas de agua) (Renom, 2008).

Estratos: Nubes formadas por una capa de color gris de base uniforme que puede generar precipitación en forma de llovizna, nieve o agujas de hielo.

Estratocúmulos: Son nubes de color grisáceo a blanco que pueden o no permitir la visualización del cielo, dependiendo si los elementos q la forman se encuentran unidos entre sí, sin aspecto fibroso (García & García, 1985).

Cúmulos: Son nubes densas y no van unidas unas de otras. Debido al sol poseen un color blanco brillante, aunque pueden ser grises. Usualmente tiene los bordes bien definidos y una base plana, con forma de montaña. Dentro de este tipo de nubes hay que distinguir entre los cúmulos de buen tiempo que tienen un aspecto más aplanado y por lo tanto muy poco desarrollo vertical, y los cúmulos *ongestus* que forman torres debido a su gran desarrollo vertical y que con frecuencia evolucionan hacia la formación de cumulonimbos (Renom, 2008).

2.1.4. Medición de la nubosidad

Los sensores remotos han sido una herramienta versátil en cuanto a la caracterización del clima en general, parámetros como la nubosidad han demostrado un comportamiento aproximado en la medición de valores que describan la nubosidad, es importante resaltar que los valores obtenidos a partir de plataformas satelitales no representan completamente la realidad (Alonso et al., 2013; Serrano, 2015). Los sensores ópticos eléctricos de resolución media y alta como las plataformas *Landsat*, *IKONOS*, *ASTER*, *RapidEye* y *Sentinel*, son los más utilizados, dado que proporcionan la cobertura de una amplia zona de nubosidad, salvo que no cuentan con la capacidad de distinguir valores de profundidad de las nubes entre bajo, medio y alto (Meteoblue, 2016).

Otra opción que ofrece una buena aproximación en la estimación de los valores de nubosidad, son los sensores localizados en plataformas terrestres, la principal característica de este tipo de sensor es la capacidad de calcular valores de nubosidad en función de la altitud, sin embargo tienen un factor limitante, el cual es el alcance o la cobertura del sensor (Meteoblue, 2016). En la práctica, la medición directa en campo de la nubosidad es difícil, por lo tanto la mejor opción para obtener valores sigue siendo la inspección visual, que a pesar de ser un proceso subjetivo, ofrece para el mismo observador parámetros aproximados de la cantidad de nubes que tiene la

zona de interés (Meteoblue, 2016). El proceso consiste en limitar la zona de interés y utilizando una escala de 0/8 (sin nubes) para 8/8 (cobertura total del cielo), se obtienen valores de nubosidad para distintas horas del día.

La medida estándar para determinar la cantidad de nubes es el porcentaje de máxima cobertura. La nubosidad está a menudo agrupada en diferentes clases entre 0 – 25 %, 25 – 50 %, 50 – 75 % y 75 – 100 %. Valores de cero por ciento indican que no hay ninguna nube visible en el cielo, el 50 % equivale a la mitad de la cobertura de nubes en el cielo, una cubierta de nubes de 100 % significa que el cielo claro no es visible y si la cubierta de nubes de varias capas es del 50 %, sólo un porcentaje bajo del cielo es visible.

- Una nubosidad baja, media y alta de 50 % cada una, pueden llegar a 100 % de nubosidad, pero no 150 %.
- Una nubosidad media y baja de 0 % y 100 % de alta altitud pueden resultar en nubosidad de 100 %. Sin embargo, esto puede pasar (filtrar) más sol que nubosidad del 80 % a baja altura, porque nubes altas son más translúcidas de nubes bajas.
- Una nubosidad media de 50 % y baja de 50 % puede dar una nubosidad total de 60 %, porque todavía se puede ver el cielo azul (Meteoblue, 2016).

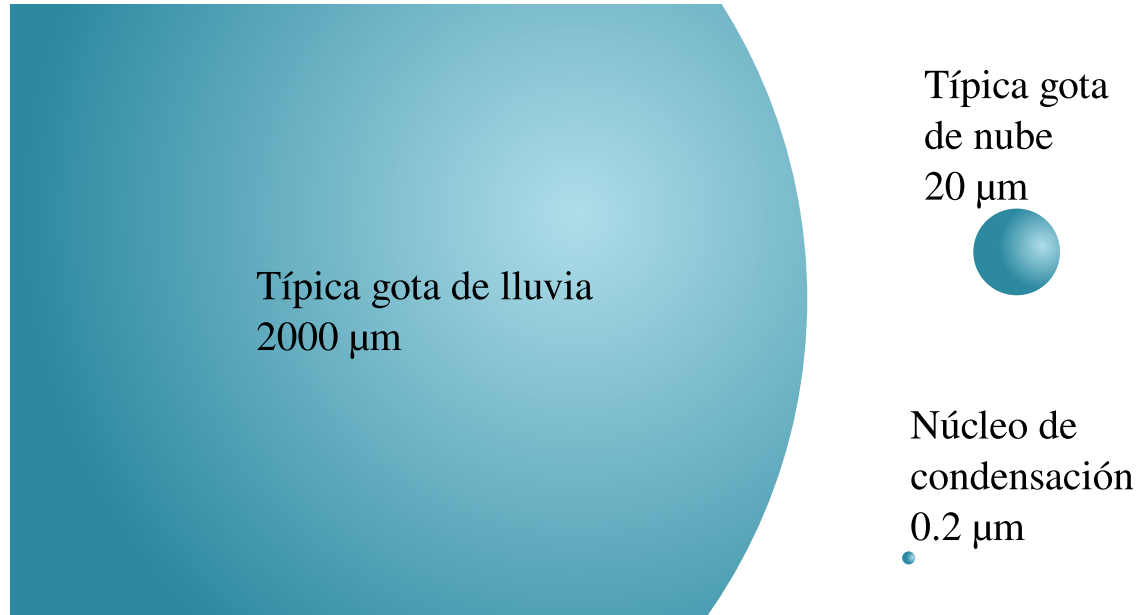
2.1.5. Precipitación

La precipitación es conocida como la caída a la superficie de partículas de tamaño ($d > 10^{-4}m$) de agua condensada, dependiendo de su estado líquido o sólido, se presenta como lluvia, nieve o granizo; sin embargo en la literatura la niebla se conoce como precipitación horizontal y puede llegar a ser el 20 % de la lluvia. Se desarrolla inestablemente en las nubes, ya que éstas tienen pequeñas partículas ($d \sim 10^{-5}m$) de donde provienen las de mayor tamaño (Martínez, 2010).

2.1.6. Formación de la precipitación

Las nubes se forman cuando se excede el umbral de saturación del aire respecto al vapor de agua. Cabe notar que existe un intervalo amplio entre la aparición de la nube y la producción

de precipitación, ya que como se menciona anteriormente el radio de las gotas de agua de las nubes es de diez micrómetros, debido a su pequeño tamaño la velocidad de caída de estas es tan pequeña que se evaporan a pocos metros por debajo de la base de la nube, mientras que la lluvia tiene un milímetro en promedio (Pierre & Gillet, 1944; Renom, 2008). En la figura 2.2 se aprecia la comparación entre los tamaños de gotas.



Fuente: Adaptado de (Serrano, 2015).

Figura 2.2: Comparación de los diferentes tamaños de una gota de nube y de lluvia.

La precipitación se origina cuando el conglomerado de partículas de las nubes (microgotas de agua y microcristales de hielo) se hace inestable, unas gotas crecen a partir de otras. Existen dos mecanismos para que las partículas alcancen la inestabilidad (Rogers, 1977).

1. Este mecanismo es exclusivo para nubes cuyas cimas se extienden superando el nivel de los 0°C , consiste en la interacción entre microgotas de agua y microcristales de hielo.
2. Puede suceder en cualquier tipo de nube, implica la colisión directa y la reunión de las gotas de agua.

Para entender un poco más de su formación, es necesario introducir el concepto de velocidad terminal, la cual se genera cuando la gota de agua cae con velocidad constante y sus dos fuerzas

(fricción y gravedad), de las cuales depende, se igualan; la velocidad terminal aumenta cuanto mayor es el radio de la gota de agua. Esta velocidad se compensa con las corrientes ascendentes de las nubes para evitar el desprendimiento de las gotas de la base de la nube, permitiendo así un crecimiento suficiente para no evaporarse y sobrevivir como gotas o copos de nieve en su descenso hasta llegar a superficie (Renom, 2008).

Para la formación de precipitación, la existencia de nubes no es la única condición, es necesaria la existencia de núcleos engelantes dentro de las nubes frías (muy activos entre -30°C y 12°C) para que se presente lluvia a partir de estas. Las gotas líquidas sobreenfriadas son captadas y catalizadas por los núcleos engelantes que producen una nucleación heterogéneas, permitiendo la formación de gotas gruesas o cristales de hielo que dan lugar a la precipitación, al desprenderse de las nubes y dirigiéndose al suelo. (García & García, 1985).

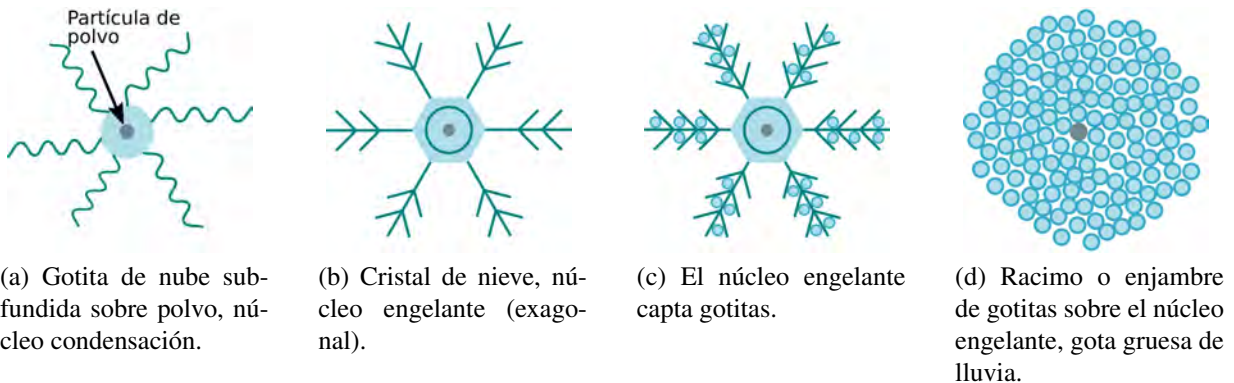
Consecución de procesos para la generación de precipitación, como se presenta en la figura 2.3:

1. Evaporación.
2. Núcleos de condensación.
3. Gotas de nube.
4. Núcleos engelantes.
5. Gotas de lluvia.
6. Precipitación.

2.1.7. Medición de la precipitación: El Pluviómetro

La humanidad desde sus inicios ha visto la necesidad de comprender el comportamiento de los factores climáticos que los rodean, los griegos 500 años antes de la era moderna, se atribuyen los primeros registros de medición de lluvia, 100 años más tarde en la India los campesinos usan recipientes para recoger el agua lluvia, la principal motivación para llevar a cabo la medición fue la de detectar el comportamiento futuro de los cultivos en las épocas de lluvia (Segerer & Villodas, 2006).

El pluviómetro como lo conocemos hoy, fue inventado en Corea en el año 1441, por orden del Rey Sejong El Grande, dichos artefactos constaban de un recipiente de tamaño regulado con una



Fuente: García & García, 1985.

Figura 2.3: Captación de gotas de agua por un núcleo engelante en el interior de una nube en subfusión.

escala de medida para tomar las lecturas. El Rey Sejong ordenó la construcción de una red de monitoreo a lo largo de todo el reino, esto con el objeto de planear las actividades agrícolas, para de esta forma aplicar impuestos (Segerer & Villodas, 2006).

Los instrumentos que utilizamos hoy día para medir la precipitación, son las versiones modernas de dichos pluviómetros. En la actualidad existen muchos tipos, tanto manuales como automatizados, los cuales han sido calibrados para la medición de la lluvia como el equivalente líquido de la precipitación congelada (Alfred & Rudolf, 2013; Organización Meteorológica Mundial, 2010).

La medición está sometida a varios tipos de errores. Aunque en la mayoría de los casos los pluviómetros arrojan mediciones puntuales aproximadas, se pueden presentar casos en los que los errores alteren considerablemente las lecturas obtenidas (Organización Meteorológica Mundial, 2010). Si se hablara del supuesto de una red pluviométrica perfectamente exacta, aún si este fuera el caso, no se podría representar completamente las variaciones espacio temporales de las precipitaciones acumuladas en la zona de interés (Segerer & Villodas, 2006); los pluviómetros producen mediciones puntuales que solamente son representativas de la zona inmediata del instrumento.

El comportamiento de los hidrometeoros que componen la precipitación es determinante en la calidad de las mediciones de lluvias, por ejemplo, en condiciones de poco viento, los hidrometeoros caen verticalmente hacia el pluviómetro, sin embargo, en la mayoría de los casos el viento empuja los hidrometeoros, obligándolos a caer en un ángulo respecto de la vertical (Organización Meteorológica Mundial, 2010). Otro factor que añade error es el propio instrumento ya que este

obstaculiza y altera el patrón del viento cerca del pluviómetro. El viento es un factor importante en la capacidad de captación del pluviómetro y puede provocar errores de subestimación que aumentan cuando el viento es fuerte, cuando el pluviómetro está expuesto a la acción del viento y cuando se trata de captar copos de nieve o gotas líquidas pequeñas. Es importante que los objetos en la superficie no sean lo suficientemente altos como para interceptar la precipitación entrante, el movimiento descendente inducido por la turbulencia tiende a cambiar la trayectoria de los hidrometeoros de modo que caigan verticalmente hacia la superficie (Organización Meteorológica Mundial, 2010).

En resumen, la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro depende de los efectos del ángulo de caída y de la turbulencia en las inmediaciones del instrumento. La mayoría de las entidades encargadas de ofrecer servicios meteorológicos optan por la utilización de pluviómetros automáticos, dado que la automatización permite recolectar registros en muchas estaciones meteorológicas al mismo tiempo y en regiones remotas.

En Colombia el tipo de pluviómetro automático más usado es el de balancín, o de cazoletas, el sistema consta de dos cazoletas que a medida que se llenan, accionan un sensor que cuenta el número de cazoletas llenas, el valor de precipitación se obtiene al contar el número de cazoletas llenas en un periodo de tiempo (Alfred & Rudolf, 2013). Los datos generados con estos pluviómetros tienen una alta resolución temporal. Los problemas más comunes de los pluviómetros automáticos están relacionados con la intensidad y la fase de la precipitación, por fase se entiende la naturaleza de los hidrometeoros que pueden ser líquidos, sobreenfriados (lluvia helada) y sólidos (granizo y nieve) (Organización Meteorológica Mundial, 2010).

En los análisis realizados a los diferentes tipos de pluviómetros, se ha encontrado que la afectación de la exactitud de las mediciones varía en función del diseño del instrumento, se ha observado por ejemplo en el pluviómetro de balancín que presenta problemas con precipitaciones torrenciales, ya que la cantidad de lluvia puede ser tan grande que el instrumento no sea capaz de gestionar correctamente y de lecturas erróneas. (Alfred & Rudolf, 2013).

La ventaja de los pluviómetros manuales, es que requieren de la visita constante de un operario, el cual puede garantizar que las mediciones no se vean alteradas por obstáculos como insectos, nidos, fugas, desbordamiento, obstrucción por la vegetación y vandalismo (Alfred & Rudolf, 2013).

2.1.8. Red de estaciones meteorológicas

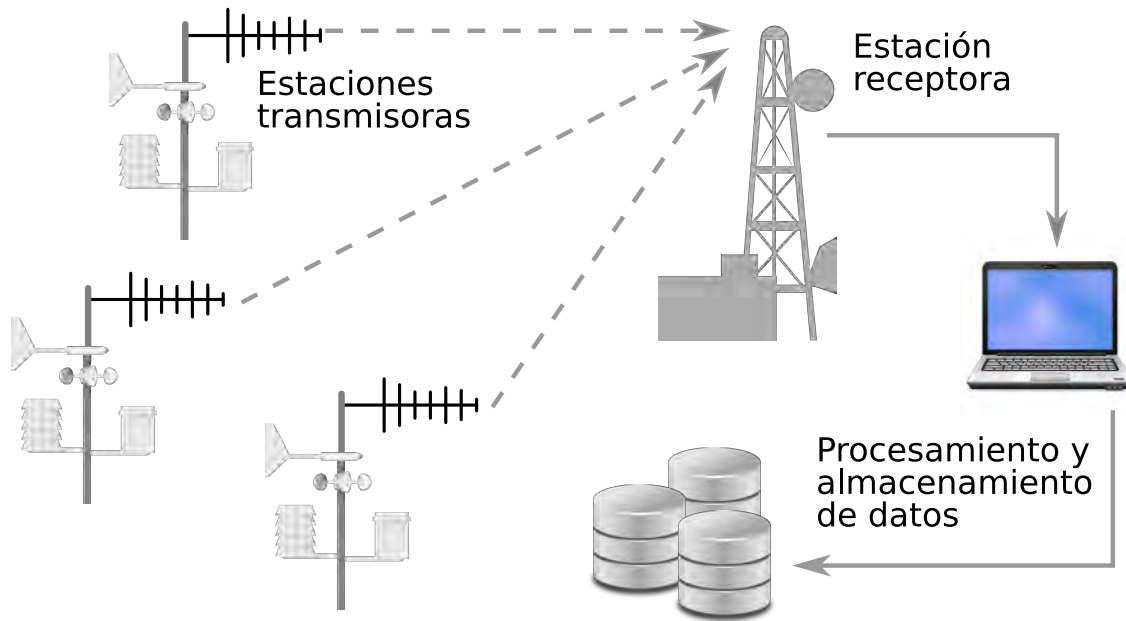
Las redes meteorológicas de monitoreo surgen por la falta de información histórica confiable, cuantificable, sistemática, sobre el comportamiento de las variables que describen fenómenos hidrometeorológicos en especial los eventos climáticos extremos que puedan llevar a la configuración de escenarios marginales de riesgo, siendo necesario conocer la magnitud, e intensidad, así como, su variación tanto en el tiempo como en el espacio, con el fin de correlacionar la información obtenida, con otras variables más difíciles de cuantificar que implique un mayor conocimiento del sistema y a su vez disminuyan la vulnerabilidad de la población ante eventos torrenciales (Fernández et al., 2006).

La adecuada cobertura espacial es uno de los factores más importante al momento de hablar de estaciones de monitoreo debido a que la variabilidad climática no puede ser representada por una sola estación (Torres et al., 2012), continuamente se evidencia en los registros históricos de lugares en los que se ha implementado, en donde se manifiestan diferencias significativas en la magnitud de las variables medidas en las diferentes estaciones (Fernández et al., 2006), y se requiere una distribución espacial estratégica de un conjunto de estaciones para cubrir la zona de interés (Erena et al., 2012).

La red de monitoreo la conforman un conjunto de estaciones emisoras que en un lugar en específico, miden a través de sensores las variables ya mencionadas, transmitiendo las señales adquiridas a una estación receptora por medio de un sistema de radio convencional (Fernández et al., 2006) o en ocasiones por vía internet pero resulta muy costoso el sistema de transmisión de la señal y requiere y la ubicación de estaciones se encuentre sesgada a la presencia del sistema de transmisión (Torres et al., 2012). Una clásica red de monitoreo se muestra en la figura 2.4.

Las redes de monitoreo meteorológico son herramientas indispensables para la adquisición rápida y confiable de datos, a pesar de que su operación y mantenimiento implique costos que aumentan con relación a su ubicación geográfica y accesibilidad, siento éste una debilidad del sistema, puesto que si las estaciones no son automáticas la información debe ser recogida de forma manual, lo que puede llevar a que no se presente en tiempo real, ni pueda ser procesada para el uso de alertas tempranas (Torres et al., 2012).

En particular, la información recolectada en la red de monitoreo de la ciudad de Manizales representa en tiempo real el estado actual de la temperatura, humedad, precipitación, velocidad del viento y radiación solar, donde cada registro se almacena de acuerdo a la hora y fecha de la



Fuente: Fernández et al., 2006.

Figura 2.4: Esquema de funcionamiento de una red de monitoreo.

última transmisión de datos, los cuales se pueden actualizar constantemente. Esta información es pública y se puede acceder a ella por medio de una Bodega de Datos, la cual permite disponer de información organizada y de confianza en cualquier momento, a partir de una plataforma de visualización *Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC)* (CDIAC, 2016). Las variables mediadas se pueden considerar como una muestra representativa del medio ambiente proporcionando información valiosa sobre el estado actual del ciclo hidrológico y su alteración (Erena et al., 2012).

Por medio de boletines periódicos diarios, mensuales y anuales se reportan los valores correspondientes a los indicadores que describen el comportamiento hidroclimático de la ciudad. Valores de acumulados de lluvias en el día y en los últimos 25 días, se encuentran en estos boletines, permitiendo compararlos con un estándar definido en 200 mm de precipitación para riesgo por deslizamiento (Terlien, 1996). Al exceder o acercarse a este límite, el municipio puede generar alertas a ciertas zonas de la ciudad. Al ser una medición en tiempo real, permite caracterizar lluvias específicas y conocer exactamente el tiempo de inicio y final, así como la región de influencia gracias a los datos de las estaciones. (IDEA, 2016).

Es posible establecer la relación de la lluvia con los caudales de crecientes en las quebradas y ríos de la ciudad, o la relación entre las condiciones antecedentes del suelo por lluvias consecutivas y la potencialidad de deslizamientos en nuestras laderas (Organización Meteorológica Mundial, 2010).

La conceptualización del fenómeno de deslizamiento como una consecuencia de factores netamente físicos, relacionados con la pendiente y variables naturales del entorno; sin considerar los inmensos pesos relativos que deben tener otros factores del orden socioeconómico, sociopolítico, educativo, cultural, ideológico, etc., los cuales, siguiendo los conceptos y metodologías planteados recientemente en *Gestión de Riesgos*, serían imprescindibles para la evaluación integral de riesgos por deslizamiento en la ciudad (Organización Meteorológica Mundial, 2010).

Para lograr establecer una relación preliminar entre la información adquirida por el radar experimental y la lluvia, se tomaron los valores de precipitación reportados por las estaciones meteorológicas de *Posgrados* y *Hospital de Caldas*, las cuales pertenecen a la red de monitoreo meteorológico de Manizales, administrado por el *Instituto de Estudios Ambientales (IDEA)*.

La estación Posgrados está localizada en la latitud $N 5^{\circ} 3' 21,86''$ y la longitud $W 75^{\circ} 29' 31,46''$ en *Campus Palogrande Universidad Nacional, Bloque I* a una altura de 2179 msnm y cuenta con registros desde el año 2002. La estación *Hospital* se encuentra localizada entre la latitud $N 5^{\circ} 3' 46,6''$ y longitud $W 75^{\circ} 30' 2,1''$ a 2183 msnm en *Hospital de Caldas S.E.S* y cuenta con registros desde el año desde diciembre de 2007. Ambas estaciones cuentan con registros temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, presión barométrica y precipitación (IDEA, 2016).

La estación meteorológica de *Posgrados* se encuentra dentro del área de influencia del radar experimental eco nube y por ende es la más cercana, sin embargo, durante la campaña del 2015 presentó problemas en su correcto funcionamiento, y omitió el reporte de valiosa información de precipitación requerida para esta investigación. Por lo cual fue necesario considerar los registros reportados por la estación *Hospital* y tomarlos como los datos de referencia, a pesar de que esta estación se encuentra más alejada del radar, logra captar la variabilidad y comportamiento de la precipitación en la zona, esto se comprobó a través de una diagrama de doble masa entre la precipitación registrada históricamente por la estación *Posgrados* y la estación *Hospital de Caldas* (ver figura 2.5) en donde se puede observar una línea de tendencia lineal y adicionalmente sin salto o cambios en la tendencia, lo cual ratifica que históricamente el comportamiento de las

lluvias descrito por la estación Posgrados es semejante al de la estación Hospital y puede ser llenada la información faltante de una estación respecto a la otra.

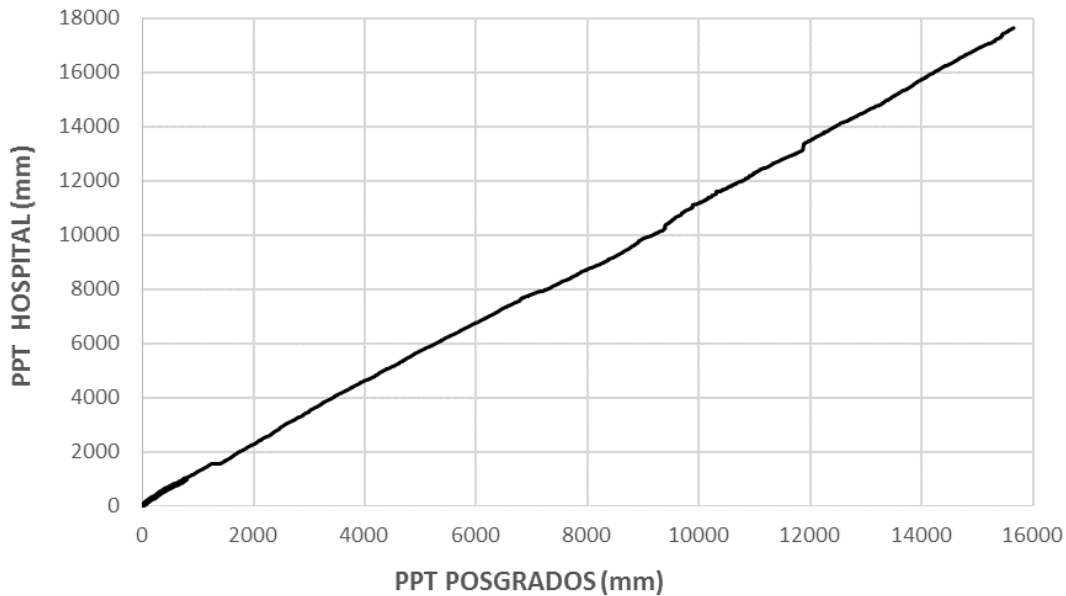


Figura 2.5: Curva de doble masa.

2.2. Radares Meteorológicos

La complejidad de las nubes y sus características propias pueden ser captadas por los radares meteorológicos. Estos dispositivos cuentan con un sistema de alta frecuencia que, a través de un transmisor, emiten un haz de radiación electromagnética hacía el ambiente. Cuando el haz choca con una nube, la señal varía sus características (amplitud y longitud de onda) y se refleja hacia un receptor, por un efímero lapso de tiempo antes que el emisor vuelva a emitir una nueva onda. La información de la variación de la señal, permite descubrir la presencia y la posición de las nubes en el espacio (Collogo Briceño, 2005).

La aparición del radar meteorológico surge como una innovación a la aplicación convencional del sistema, que permite estimar cuantitativamente la precipitación de forma remota sobre grandes extensiones (1×1 , $2 \times 2 \text{ km}^2$) a intervalos de tiempo breves entre 5 a 10 minutos. Generalmente los radares hacen un barrido volumétrico de 360° en un tiempo menor de 10 minutos, esto permite

obtener diversa información que puede ser asociada a los valores constantes de altitud, siendo los valores de menor altitud, que pasan por arriba del relieve topográfico, los más útiles desde el punto de vista hidrológico (Rosengaus, 1999).

2.2.1. El radar: Fundamento del fenómeno físico

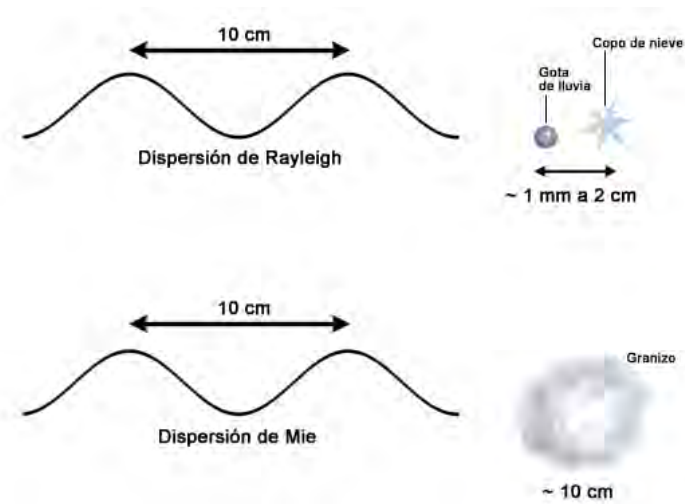
Cuando se habla de detección de blancos meteorológicos, como lo es un evento de precipitación, el haz de irradiación de radar ilumina un gran número de partículas dispersantes que para este caso sería las gotas de agua que se encuentran contenidas en las nubes, en donde se asume que es que todos los blancos son pequeñas partículas de precipitación esféricas y homogéneas cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda del radar.

El régimen de dispersión de *Rayleigh* es una relación casi lineal ocasionada por una partícula de tamaño mucho menor a la longitud de onda del radar. En la precipitación, esto ocurre generalmente debido a que en promedio las gotas de lluvia poseen un diámetro entre 1 y 4 *mm*, los copos de nieve suelen ser poco más grandes (The COMET Program, 2017) y las longitudes de onda desde 1 a 10 *cm* son aproximadamente 10 veces el diámetro de las gotas de agua, esto es generado por la dispersión *Rayleigh*, resultado de la polarización eléctrica de las partículas (Doviak et al., 1993).

Una onda luminosa mediante su campo eléctrico genera oscilación de las partículas en la misma frecuencia gracias a su actuación sobre las cargas de estas. La partícula se convierte en un pequeño dipolo radiante en el cual la luz dispersada es la radiación visible (Mazo Vivar, 2016).

Cuando La longitud de onda del radar es un poco más grande o igual que el tamaño de la partícula que se desea detectar, la dispersión provocada por las partículas se vuelve más complicada y corresponde al régimen de dispersión de *Mie*, figura 2.6, que prevé para la luz esparcida, con una menor dependencia con la longitud de onda (The COMET Program, Minnaert, 1995; University Corporation for Atmospheric Research UCAR, 2017).

La luz no se separa cuando el tamaño de la longitud de onda es menor que el de las partículas y no todas las longitudes de onda se dispersan (The COMET Program, 2017). La reflectividad del radar se considera si la potencia recibida es promediada sobre un largo número de distribuciones independientes, sobre un mismo volumen (U. Buenos Aires, 2017).



Fuente: University Corporation for Atmospheric Research UCAR (2017).

Figura 2.6: Tipos de dispersiones.

El ancho de haz de la antena, la duración y la distancia del pulso de energía electromagnética emitida permite establecer dimensiones y características de la potencia recibida por el radar ya que proviene de las gotas de agua contenidas en un volumen determinado (The COMET Program, 2017).

La potencia recibida por el radar varía pulso a pulso, en un período que puede oscilar entre 5×10^{-3} y 20×10^{-3} s, ya que las gotas que se encuentran dentro del volumen son de diferentes tamaño y se comportan como elementos irradiantes en la misma frecuencia aleatoriamente, en continuo cambio y movimiento, dando lugar a la distribución de gotas al azar (U. Buenos Aires 2017).

Los errores en los cálculos de dispersión y por ende en los valores de reflectividad pueden estar dados por cualquier blanco de dimensiones considerable (ciertos insectos, pedrisco, aves), ya que estas partículas se consideran como esferas pero en realidad no lo son. Se debe tener en cuenta que la luz para dispersarse requiere un tamaño de partícula similar o menor que la longitud de onda (The COMET Program, 2017).

2.2.2. Tipos de radares

Existen diferentes tipos de radares según la manera en como toman la información: los radares de elevación constante o volumétricos (en donde se tienen varios niveles de elevación y se obtienen volúmenes polares con centro en el radar y radio igual al alcance) y los radares multiparamétricos (con sistema *Doppler* y polarización dual, permiten conocer la forma de los blancos y monitorear los vientos).

Los radares también se pueden clasificar de acuerdo a su banda de trabajo (λ) que oscila entre 0,8 y 10 *cm*. Características como la eficiencia y el tamaño de los equipos se ven afectadas por la longitud de onda, entre menor sea esta, mayor beneficio se obtendrá en la detección de partículas de menor tamaño, y se requerirán equipos más pequeños y de menor costo. Radares con longitud de onda de 10 *cm* (2 – 4 *GHz*) son conocidos como radares de banda *S*, pueden captar precipitaciones convectivas, pero son radares de gran tamaño y de alto costo.

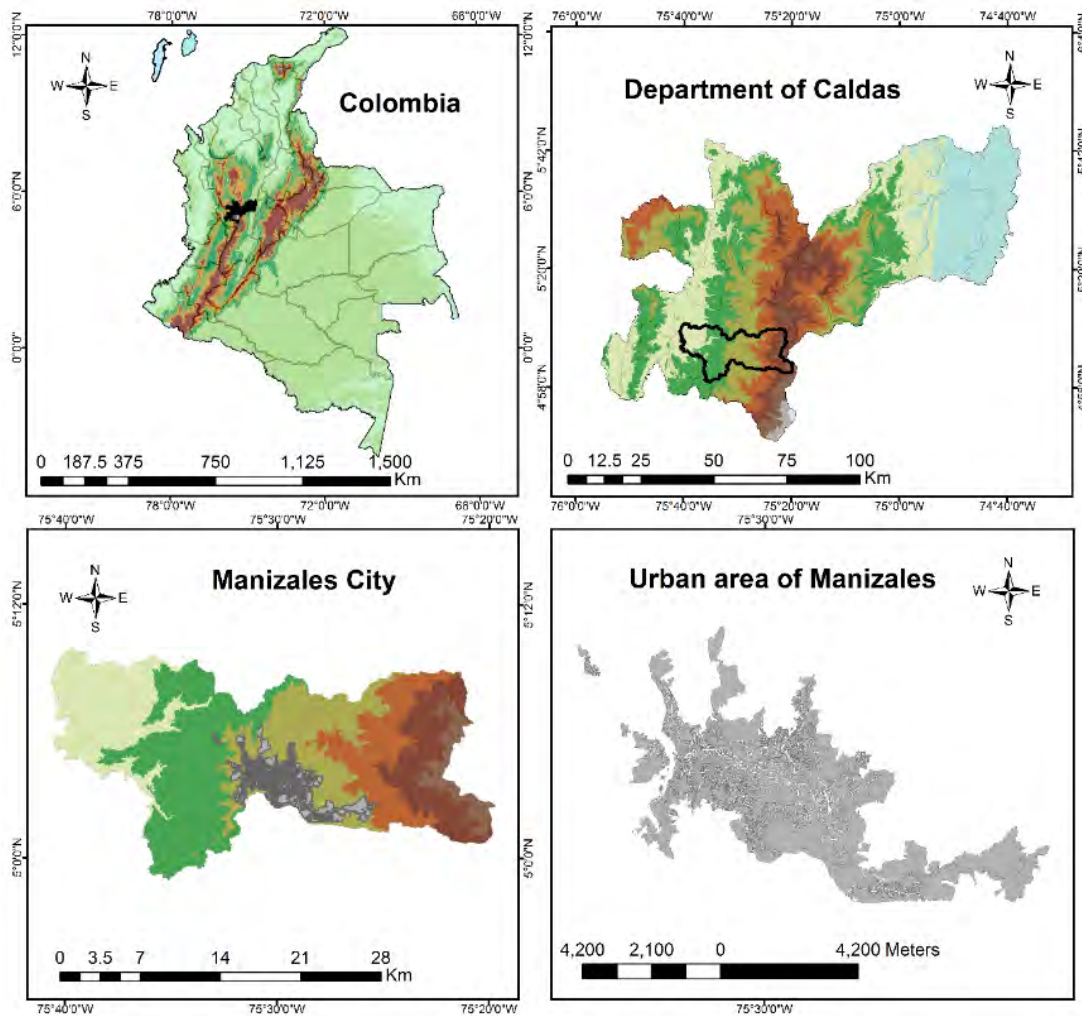
Los radares de banda *C*, cuentan con una longitud de onda menor (5 *cm*, 4 – 8 *GHz*) que la de los radares de banda *S*, pero tienen un tamaño mediano, lo que los hace aptos para zonas orográficas complejas, y el costo es la mitad del anterior. Existen radares con longitud de onda aún menor que los anteriores, (3 *cm*, 8 – 12 *GHz*) que son portables y más económicos, son generalmente usados para hidrología urbana o para investigación.

2.3. El radar pluviométrico experimental «Eco-Nube»

El radar experimental se encuentra localizado en la ciudad de Manizales, figura 2.7, ubicada en la cordillera central de los Andes, sobre los 2,150 *msnm*, en donde se presenta un clima templado típico de montaña de la zona ecuatorial, con una temperatura media de 18 °C, tiene dos períodos de máxima precipitación en el año (Marzo - Abril y Octubre - Noviembre) y un promedio anual de precipitación próximo a los 2,000 *mm* (Grajales et al., 2016b) fuertemente influenciado por El Niño Oscilación del Sur - ENOS. El 70% de los días del año son lluviosos, apreciándose grandes movimientos de masas de nubes y microclimas que dominan la zona (Suárez Hincapié et al., 2015). Adicionalmente, el efecto montañoso y de los valles de Cauca y Magdalena generan comportamientos climáticos muy particulares en la zona andina colombiana. Esta variabilidad climática, ha propiciado el interés de explorar la dinámica de las nubes y su relación con

el comportamiento de las variables ambientales locales para tener un mejor entendimiento del comportamiento de las nubes en la ciudad de Manizales.

La población de Manizales a venido creciendo hasta llegar a una población actual es de 397.466 habitantes (DANE, 2005) y que ha lo largo de la historia se ha asentado sobre un topografía abrupta en donde se dificulta la expansión, debido a las fuertes pendientes (Fernández et al., 2006) y que en conjunto con los suelos de la zona atribuidos a los volcanes de la región, favorecen el desencadenamiento de procesos de desestabilización de laderas, deslizamientos, avalanchas y derrumbes (IDEA, 2013).



Fuente: Propia.

Figura 2.7: Localización, caso de estudio Manizales.

La precipitación de la ciudad de Manizales es variable, para el año 2014 presentó valores de 1,337 mm, 1,638 mm y 1,830 mm en las estaciones *Enea*, *Boques del Norte* y *Ingeominas*, de estos valores se resalta la variabilidad de la precipitación en la zona urbana, en todas las estaciones se aprecia la bimodalidad producto del movimiento de la *Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT)* (Vélez et al., 2014). Los registros de temperatura a lo largo del año son estables para la ciudad, se observan valores de 17 °C, 18,8 °C y 20,6 °C en las estaciones *Bosques del Norte*, *Alcázares* y *Hospital de Villamaría* respectivamente, el máximo observado en la ciudad fue de 27,6 °C en la estación *Alcázares* (Vélez et al., 2014).

El radar experimental con que cuenta la *Universidad Nacional sede Manizales*, es un dispositivo electrónico basado en un radar convencional. Su objetivo es el de detectar la presencia de nubes, obtener el índice de reflexión de la onda, y explorar la dinámica de la nube mediante el estudio de los pulsos reflejados. Sin embargo, el desarrollo implementación y calibración electrónica del dispositivo no es objeto de este trabajo, y se parte del hecho, de que este proceso se realizó en una etapa anterior y solo se analizaron las señales del radar en el contexto de nubosidad y lluvia.

Este radar observado en la figura 2.8, se encuentra ubicado en el *Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional Sede Manizales* y fue el resultado de un convenio entre la *Universidad Nacional – IDEA* y *CORPOCALDAS*, el cual busca aunar esfuerzos para lograr disminuir el riesgo de desastres naturales en el departamento de Caldas.



Figura 2.8: Radar experimental de bajo coste «Eco-Nube».

2.3.1. Características del radar pluviométrico «Eco-Nube»

Hay que resaltar las diferencia entre el radar *pluviométrico* «Eco-Nube» y un radar meteorológico convencional, a diferencia de un radar típico el cual se encuentra sobre una plataforma giratoria y puede cambiar su grado de inclinación sobre el horizonte, el prototipo con el que desarrolla este trabajo es estático y únicamente apunta en una dirección, perpendicular al suelo.

El radar «Eco-Nube» realiza una operación de preprocesado sobre la señal de microondas recibida, basado en un modulador, lo cual permite desplazar el ancho de banda de la información a uno que puede ser procesado por sistemas de adquisición comunes y de bajo costo, como por ejemplo, el *PCI* de un computador. Esta característica hace que operaciones básicas como la medición de la distancia y velocidad de una nube objetivo no pueda ser precisada, la única información que se puede obtener es la potencia del eco reflejado, todo el análisis y el procesamiento de señales se realizará en base a esta característica.

2.3.2. Fundamento del fenómeno físico: Las microondas

Son ondas de radio con alta frecuencia y por esto su longitud de onda es muy corta, por lo anterior se le asignó su nombre, estas se encuentran localizadas entre los rayos infrarrojos y las ondas de radio convencionales que son de menor frecuencia, la longitud de onda de estas se sitúan aproximadamente entre 1 *mm* y 30 *cm* (Moreno, 2014).

Las microondas son generadas en un magnetrón, que es un dispositivo electrónico que posee un cilindro metálico el cual está formado por una cantidad de huecos resonantes los cuales se encuentran a su vez dispuestos en un arreglo radial; los cuales están unidos a un hueco central que posee un mayor tamaño y un eje metálico central. Existe otra categoría de generación de microondas que son los dispositivos en estado sólido los cuales están cimentados en semiconductores compuestos por arseniuro de galio o silicio e incluyen transistores de unión bipolar, efecto de campo y diodos Gunn, por esto se pueden diferenciar las microondas de las ondas de radio, ya que estas debido a la complejidad de los complementos que usa son más difíciles de generar (Pastor Vega & Martínez Morillo, 2002; Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2009).

La radio frecuencia es considerada una radiación de fondo que llega a la tierra en todas las direcciones posibles desde el espacio y que tiene la característica de ser de baja temperatura, esta

frecuencia está casi siempre entre 300 MHz y 300 GHz y tienen oscilaciones aproximadamente de 3 ns ($3 \times 10^9\text{ s}$) a 3 ps ($3 \times 10^{12}\text{ s}$) (Moreno, 2014).

Una de las aplicaciones más empleadas cotidianamente es el microondas, el cual cuenta con un magnetrón que genera aproximadamente $2,45\text{ GHz}$ de frecuencia de onda, esta frecuencia hace que se genere un movimiento vibratorio en las moléculas de agua generando calor, lo cual permite que se calienten los alimentos más fácilmente debido a su gran contenido de agua. Estas ondas también son empleadas en radio difusión, radares, la industria armamentista, sistemas de comunicación, comunicación vía satélite, radio, televisión entre otras (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2009).

2.3.3. Partes del radar «Eco-Nube»

El radar, presentado en la figura 2.9, está conformado por un emisor que envía una ráfaga de microondas al ambiente de $2,45\text{ GHz}$, si la señal choca con una nube, se refleja y regresa en forma de eco, el receptor capta la señal y realiza las operaciones de adquisición, modulación y digitalización.

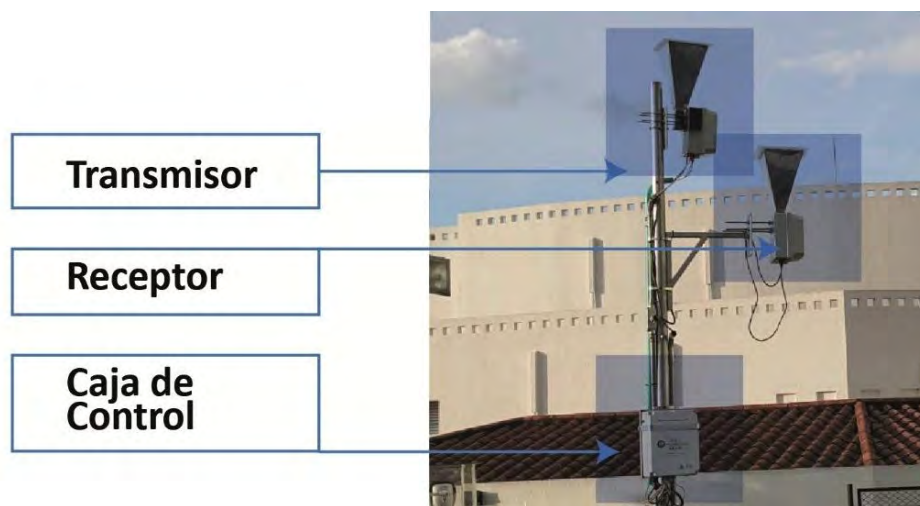
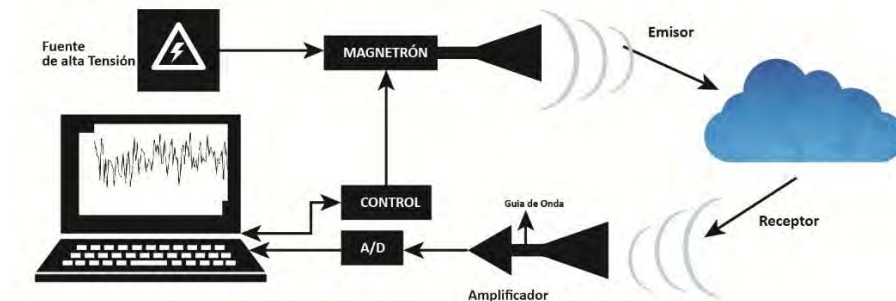


Figura 2.9: Esquema del radar experimental de la Universidad Nacional sede Manizales.

2.3.4. Funcionamiento del radar «Eco-Nube»

La información que genera el emisor-receptor es procesada a través de un software que adquiere los ecos, crea históricos, muestra en pantalla la señal del eco y almacena el eco crudo en formato *wav* para que puedan ser procesados luego. La arquitectura del sistema se muestra en la figura 2.10.



Fuente: Propia.

Figura 2.10: Arquitectura del sistema del radar «Eco-Nube».

El emisor y el receptor están fijos, ubicados verticalmente, por lo que solo cubre el área hacia la que está direccionado (a diferencia de los radares convencionales que hacen barridos de 360°). Tiene un alcance vertical de hasta 5 Km, emite los pulsos de microondas cada 30 s y recibe los ecos de acuerdo a la distancia a la que se encuentre el blanco.

2.4. Calibración hidrológica de un radar meteorológico

La aportación más importante de los radares en la hidrología fue el poder caracterizar la distribución de los tamaños de las gotas como una función de la reflectividad de la lluvia. Este aporte permitió obtener una relación entre la reflectividad de radar Z y la intensidad de la lluvia R (Marshall & Palmer, 1948) que se puede expresar como:

$$Z = aR^b \quad (2.1)$$

Sin embargo, estudios posteriores demostraron que la relación no era tan simple y que tenía alto grado de incertidumbre. Estos estudios llevaron a formular relaciones empíricas entre $Z - R$, por la falta de conocimiento de la verdadera distribución de los tamaños de las gotas. Cuando esta distribución es conocida los errores en las mediciones de intensidad de la lluvia son mínimos (Mendez et al., 2006; Rollenbeck & Bendix, 2006).

La calibración de un radar pluviométrico consiste en obtener las constantes a y b (ecuación 2.1), que relacionen la intensidad de la precipitación y la reflectividad registrada por el radar en la zona de estudio. Existen diferentes estrategias que permiten ajustar esta reflectividad con respecto a la precipitación medida con los pluviómetros, partiendo del supuesto de que la reflectividad era la variable más acertada en medir la distribución espacial, y que los valores obtenidos por los pluviómetros son la correcta cuantificación de la lluvia (Ortiz et al., 1960). Algunas de estas estrategias son netamente estadísticas como: el método de la *Integral de tiempo-área* y el método de *Coincidencia de distribuciones de probabilidad*. Otras estrategias proponen llevar la información capturada por el radar a escala de pluviómetros realizando calibración puntal, calibración en la vecindad o la calibración de retraso.

2.4.1. Metodologías netamente estadísticas

Los métodos de *Integración tiempo-área*, el método de *Coincidencia de distribuciones de probabilidad* y el método de *Coincidencia de distribuciones de probabilidad en ventanas*, son métodos que también permiten estimar la relación entre la reflectividad medida por el radar con las medidas pluviométricas. La estimación cualitativa de la lluvia se ve afectada por maniobras probabilísticas que enmascaran la dispersión real de los valores de precipitación, no obstante se presentan a continuación:

2.4.1.1. Método de la Integral tiempo-área

El método *Integral tiempo-área* se basa en la relación cercana entre la cantidad, duración y área de lluvia que precipita durante un evento, y consiste en emplear la ecuación 2.2. Con el fin de utilizar solo la información necesaria, de los esfuerzos por mejorar la estimación de la precipitación se ha logrado establecer a través de este método que la correlación entre la precipitación areal

media y el porcentaje de área con cierta intensidad en un tiempo dado, siguen la misma tendencia de distribución de probabilidad que la de la intensidad de la lluvia (Mendez et al., 2006).

$$V = \int_T \int_A R dA dt \quad (2.2)$$

Donde R es la intensidad de la lluvia en mm/h , A es el área y t el tiempo.

2.4.1.2. Método de Coincidencia de distribuciones de probabilidad

El método de *Coincidencia de distribuciones de probabilidad*, surge con el fin de plantear una solución al problema presentado en la metodología anterior, por lo que se busca obtener una relación de la precipitación preservando su función probabilística, suponiendo que para una muestra muy grande la reflectividad media del radar corresponderá a la función de probabilidad de los datos pluviométricos, de tal forma que se cumpla la ecuación 2.3. Los resultados obtenidos por este método pueden enmascarar el comportamiento de la lluvia porque no muestra la dispersión real de los datos, e ignora las diferencias entre los diferentes tipos de lluvia (Rosenfeld et al., 1994).

$$\int_{Z_0}^{\infty} P(Z) dZ = \int_{P_0}^{\infty} P(R) dR \quad (2.3)$$

Donde Z y R son pares que corresponden a percentiles.

2.4.1.3. Método de Coincidencia de distribuciones de probabilidad en ventanas

El método de *Coincidencia de distribución de probabilidad en ventanas*, presenta una modificación a la metodología anterior, que consiste en centralizar la información de acuerdo a su distribución espacial y temporal, y la ventana está determinada en forma de coordenadas polares basada en la información de radar más cercana a la ventana del pluviómetro. A diferencia del método de *Coincidencia de distribución de probabilidad*, este método propone agrupar la información por modas arrojando mejores resultados (Rosenfeld et al., 1994).

2.4.2. Metodologías basadas en la escala del pluviómetro

Se han explorado diferentes métodos de los cuales se tiene 3 metodologías implementadas en la cuenca del Río Mixcoac que son importante mencionar:

2.4.2.1. Calibración puntual

La primera es *Calibración puntual* que se basa en intervalos de tiempo de 15 m pero es específica a la localización de los pluviómetros y a las celdas correspondientes del radar y mide la relación simple de reflectividad-intensidad de la lluvia a través de la ecuación 2.4 (Marshall et al., 1947), suponiendo que la distribución de los tamaños de gotas dentro del volumen medido es homogénea, que caen verticalmente, que la intensidad de la lluvia medida por los pluviómetros en el suelo es la misma que la medida a la altitud en donde mide el radar y ocurren al mismo tiempo (Mendez et al., 2006).

$$Z_{i,t} = AR_{i,t}^b \quad i = 1, 2, \dots, np \quad (2.4)$$

Donde i es la localización espacial de la celda del radar, que corresponde con las del pluviógrafo i de coordenadas (x_i, y_i) ; Z es la reflectividad del rada en mm^6/m^3 ; R representa la intensidad de lluvia registrada en mm/h; A y b son parámetros de calibración; np es el número de pluviógrafos disponibles; t es el intervalo de tiempo (5, 10, 15 m) y R es la intensidad de lluvia registrada en mm/h.

2.4.2.2. Calibración de la vecindad

La segunda metodología propone una *Calibración en la vecindad*, en la que la intensidad de la lluvia es relacionada con un promedio de valores de reflectividad, en el mismo intervalo de tiempo, con el fin de relacionar no solo la medida tomada por el pluviómetro con el valor medido en ese punto, si no también lo que se encuentra a su alrededor, se considera una matriz de 3×3 , en donde el pluviómetro se encuentra localizado en el centro de la matriz y la reflectividad es el

promedio de las nueve celdas que conforman matriz como se muestra en la ecuación 2.5 (Mendez et al., 2006).

$$\bar{Z}_{i,t} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{j,t} \quad (2.5)$$

Donde $Z_{i,t}$ es la reflectividad promedio en la matriz en el intervalo de tiempo t en mm^6/m^3 ; n es el número de celdas promediadas en una matriz de celdas de 3×3 .

2.4.2.3. Calibración de retraso

Por último proponen una *Calibración de retraso* basada en la primera metodología pero considerando el retraso existente desde que el radar detecta las gotas en la atmósfera hasta que caen sobre el terreno, para el cálculo de los parámetros se emplea la ecuación 2.6, para determinar este intervalo de tiempo es necesario comparar los histogramas obtenidos a partir de los pluviómetros y los del radar, así mismo, es necesario considerar el intervalo de tiempo que el radar hace sus barridos volumétricos (Mendez et al., 2006).

$$Z_{i,t} = AR_{i,t+\Delta t}^b \quad (2.6)$$

Este método diferencia entre el tiempo t que el radar registra la atmósfera y el tiempo $(t + \Delta t)$ en que lo registran los pluviómetros.

2.4.3. Metodologías basadas en la escala del radar

La combinación bayesiana aparece como otro método para relacionar la información de radar-pluviómetros, la cual retoma nuevamente el problema de escala espacial que presenta la información, en donde las medidas pluviométricas se refieren a un punto, a diferencia de los métodos mencionados con anterioridad, este método propone una malla de $2 \times 2 \text{ km}^2$ para promediar las medidas tomadas por el radar, y espacializar a escala de radar los datos pluviométricos a través del *Block de Kriging* que es una extensión de la técnica geoestadística *Kriging*, que consiste en

otorgar un peso a cada medida pluviométrica puntual sobre las celdas de la malla en función de la distancia que se entren de ellas y el variograma, que se define como la dependencia espacial entre el área estimada y las medidas puntuales, en donde la técnica bayesiana actualiza los parámetros de la función del variograma en cada paso temporal usando el estimador de la máxima verosimilitud (Ortiz et al., 1960).

Por otra parte no todos las metodologías para calibración de un radar se basan en la $Z - R$, puesto que, dependiendo del tipo de radar, el preprocesamiento interno, la función de ajuste del sistema entre otros, la calibración física no puede ser posible como es el caso del radar de banda X, que se encarga de establecer la distribución de la precipitación, de los andes en el sur de Ecuador (Rollenbeck & Bendix, 2011), por lo tanto, la conversión de los números digitales a términos de lluvia se realiza mediante procesamientos estadísticos, que hace uso de los datos pluviométricos existentes y las imágenes de satélite.

2.4.4. La Entropía como una nueva metodología.

La entropía, puede considerarse como otro elemento a través del cual se podría estudiar la relación existente entre los datos pluviométricos con las mediciones del radar; pero no basado simplemente en el comportamiento espacio-temporal de la precipitación, sino desde el enfoque de la variabilidad de la nube (Estrada, 2014). En donde la entropía se concibe como una medida del desorden o variabilidad (Estrada, 2013) que proporciona elementos importantes para entender la complejidad de los procesos hidrológicos en una amplia gama de escalas de espacio.

La entropía puede ser considerada como una medida de la incertidumbre y de la información necesaria para, en cualquier proceso, poder acotar, reducir o eliminar la incertidumbre (Salas & Poveda, 2015).

Existen diferentes tipos de entropía, de las cuales la entropía informática es la aportada por los sistemas de radares, esto es posible gracias a que las ondas electromagnéticas generadas por los radares crean series de tiempo que pueden ser cuantificadas para obtener nueva información y conocimiento. Una de las medidas de regularidad más populares para una serie de tiempo es la entropía muestreada, que caracteriza la complejidad del sistema en una escala de tiempo definida por el procedimiento de muestreo que se utiliza para obtener la serie de tiempo bajo evaluación en un ámbito en donde la serie de tiempo puede presentar múltiples escalas, lo cual introduce mayor precisión (Estrada, 2013).

Escala 1	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
Escala 2	$\frac{x_0+x_1}{2}$		$\frac{x_2+x_3}{2}$		$\frac{x_4+x_5}{2}$		$\frac{x_6+x_7}{2}$		$\frac{x_8+x_9}{2}$		$\frac{x_{10}+x_{11}}{2}$	
Escala 3	$\frac{x_0+x_1+x_2}{3}$			$\frac{x_3+x_4+x_5}{3}$			$\frac{x_6+x_7+x_8}{3}$			$\frac{x_9+x_{10}+x_{11}}{3}$		
Escala 4	$\frac{x_0+x_1+x_2+x_3}{4}$				$\frac{x_4+x_5+x_6+x_7}{4}$				$\frac{x_8+x_9+x_{10}+x_{11}}{4}$			

Cuadro 2.1: Empleo de la entropía de múltiple escala para procesar series de tiempo.

Esta entropía multiescala se calcula en series de tiempo discretas determinadas por la variable a medir. La serie de tiempo original se divide en ventanas no solapadas de longitud igual a la escala que representa, luego, en cada ventana se promedian los puntos contenidos en el mismo, como se muestra en el cuadro 2.1 por medio de la cual se ilustra el procedimiento para obtener una nueva serie, y así generar de cada nueva serie de tiempo una nueva escala, lo que permite calcular la entropía (Costa et al., 2002), matemáticamente se puede ver como la ecuación 2.7.

$$y_j^n = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{nj+i} \quad (2.7)$$

Donde n es la escala y j es el nuevo índice de la nueva serie de tiempo y .

El procedimiento descrito anteriormente se denomina *Entropía Multiescala (MSE)*, y los resultados son usados para comparar la relativa complejidad de las series de tiempo normalizadas (Estrada, 2013). Dicha complejidad puede asociarse a la complejidad de la nube mencionada al principio del presente trabajo, y puede definirse como la suma de la variabilidad de diferentes componentes que definen la nube, basándose en la función de masa de probabilidad de la entropía clásica de Shannon que se encuentra representada por la Ecuación 2.8 (Salas & Poveda, 2015).

$$S(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_a P(x_i) \quad (2.8)$$

Donde $P(X_1), P(X_2), \dots, P(X_n)$ representa la función de masa de probabilidad.

Debe de cumplirse las siguientes condiciones:

$$\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1 \quad P(x_i) \geq 0 \quad (2.9)$$

Las series de tiempo generadas por el sistema pueden ser relacionadas con las series pluviométricas ya procesadas, de acuerdo con el tiempo de funcionamiento del radar, los valores de los medidores totales se reducen proporcionalmente al campo espacial de las estaciones meteorológicas más cercanas (Ortiz et al., 1960) con el fin de poder obtener condiciones similares que permitan obtener una relación entre ambas series de tiempo y obtener un factor de ajuste al que se resume toda la calibración.

Como ejemplo de la calibración basada en el estudio de la entropía presentada en múltiples escalas, se puede tomar la investigación realizada por el profesor Hernán D. Salas autor del artículo «*Scaling of entropy and multi-scaling of the time generalized q -entropy in rainfall and stream-flows*» que propone relacionar los datos de lluvia de 21 meses a 40 años de los andes tropicales de Colombia para intervalos de tiempo de 15 minutos, así como los caudales diarios promedio en Colombia, la cuenca del Río Amazonas y EE.UU que abarca 34–69 años, encontrando resultados importantes desde el punto de vista hidrológico que sin el uso de la entropía, no serían cualitativos, por ejemplo logró determinar para las series de lluvia para las cuencas de estudio una relación en la que las series eran estadísticamente independiente de la longitud de registro (Salas & Poveda, 2015).

2.4.5. Errores en la calibración

Igualmente es importante resaltar que la calibración no solo consiste en hacer que los datos medidos por el radar sean coherentes con los datos medidos por los pluviómetros, es necesario que se consideren alteraciones inducidas por objetos que se interponen entre el haz de la onda y el radar, por ejemplo: el terreno o zonas apantalladas; así mismo, se debe considerar la absorción y dispersión generada por las gotas y gases de la atmosfera y la distorsión inducida por la distancia a la que se puede encontrar la tormenta al radar, esto implica que el haz incrementa su posición en altura y tamaño conforme la distancia aumenta, degradando la señal de retorno y alejándose de la lectura realizada por los pluviómetros (Collogo Briceño, 2005; Estrada, 2014).

Los errores mencionados traen consigo implicaciones en diferentes ámbitos, por ejemplo, las alteraciones generadas por objetos debido a ecos principalmente de superficie generan una calibración inestable y pueden conducir a errores graves en las cantidades de lluvia (Collogo Briceño, 2005). El desorden del suelo es un problema también grave, especialmente cuando se utiliza la tecnología de radar en terreno montañoso y pueden ser afectadas el rango cercano (de 10 a 30 *km*)

alterando a su vez la extensión espacial de los campos de lluvia, mientras que la atenuación y la distancia de amortiguación tienen más efecto en el rango del tiempo, generando una ampliación en la medida (Rollenbeck & Bendix, 2006).

Un enfoque específico de escala se desarrolla para incluir datos de satélite sobre la frecuencia y distribución de las nubes, para superar estas limitaciones, para esto se elimina la contaminación de desorden de la señal y de las obstrucciones generadas por el terreno circundante, posteriormente los valores perdidos se sustituyen por una interpolación bilineal de las señales inalteradas (Rosengaus, 1999).

El sesgo espacio-temporal de la señal de la onda electromagnética del radar se corrige utilizando una hipótesis de distribución espacial dependiendo de la caracterización de los eventos hidroclimáticos y del comportamiento de la dinámica atmosférica, como ejemplo se puede mencionar nuevamente el caso de la calibración experimental de un radar meteorológico de banda X, para observar el comportamiento de la precipitación de los Andes en el sur de Ecuador. Para poder superar el sesgo espacio-temporal se consideró una distribución espacial omni-direccional. Esto es posible debido a la ubicación de estaciones de radar en la zona de transición entre las altas precipitaciones en la vertiente oriental de los Andes y la escasez de precipitaciones en el lado de sotavento (Rollenbeck & Bendix, 2006).

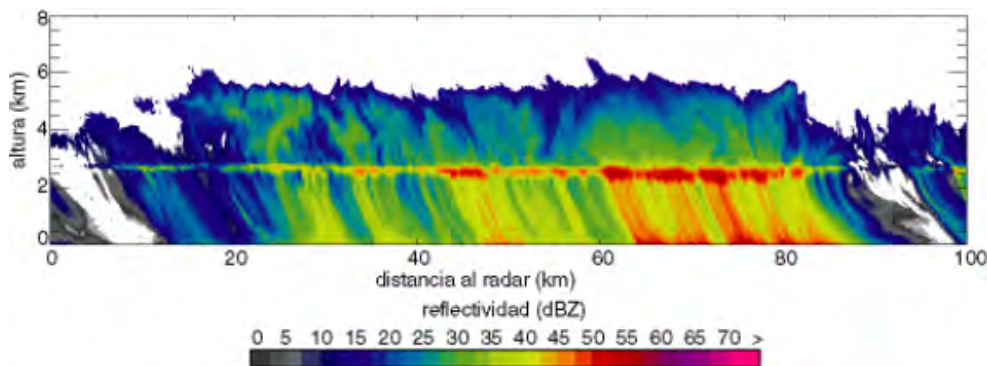
Es importante resaltar que las mediciones con pluviómetros también, revelan errores específicos, como por ejemplo en entornos con viento, las altas montañas tropicales, que requieren datos auxiliares que con frecuencia no están disponibles (Rollenbeck & Bendix, 2011).

Los errores mencionados afectan la estimación de la reflectividad, lo que se refleja en la distribución espacial en las dos componentes (vertical-horizontal) de la lluvia, que difieren a su vez de las nubes de las que tuvo origen. Es por esto que estos errores deben ser considerados desde el punto de vista de tipos de lluvia puesto que cada una trae consigo implicaciones diferentes.

El volumen de precipitación total de una tormenta depende en gran medida de su tamaño y duración. Este fenómeno en conjunto con la variabilidad espacio-temporal de la lluvia, evidencia la heterogeneidad de la reflectividad en áreas donde la convección de la lluvia predomina (Colloogo Briceño, 2005), teniendo lluvias convectivas que se presentan en áreas muy concentradas con precipitaciones intensas y son causadas por nubes de espesores de hasta 12 km, por el contrario, los eventos ocasionados por nubes estratiformes de espesores que oscilan entre 4 a 6 km, cubren grandes áreas de afectación con precipitaciones ligeras y uniformes de más duración (Mendez et al., 2006).

Para notar las diferencias mencionadas se presenta la figura 2.11 y la figura 2.12 (Collogo Briceño, 2005), las para resaltar las diferencias entre ambos tipos. En la primera figura se tiene el registro de una lluvia estratiforme generado por el radar vertical de alta resolución de la universidad de Brixtol el 18 de noviembre de 1998 en Marsella, y en la segunda figura se tiene el registro de una lluvia convectiva registrada por el radar vertical de alta resolución de la misma universidad del 4 de septiembre de 1998 en la misma ciudad.

En la figura 2.11 se presenta una línea a lo largo del espectro que enmarca el cambio de fase de los procesos atmosféricos en donde las moléculas de agua gaseosas se condensan y forman gotas de lluvia, adicionalmente se presenta un campo más uniforme, y se marca un límite altimétrico de conformación de este tipo de lluvia.



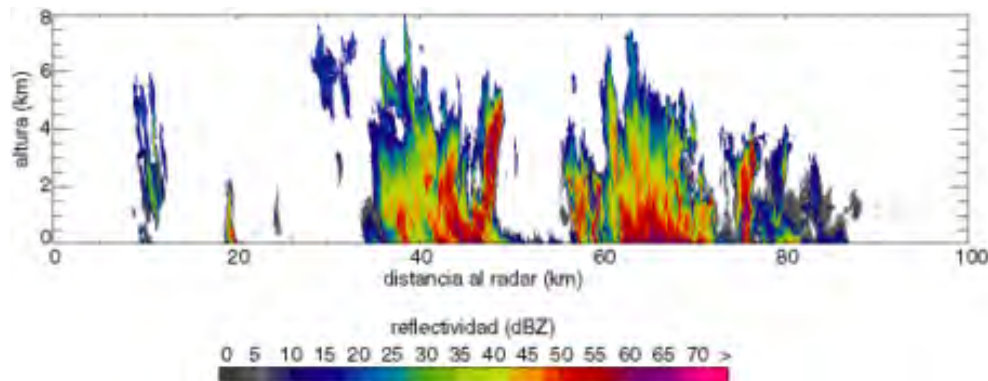
Fuente: Collogo Briceño, 2005.

Figura 2.11: Registro de una lluvia estratiforme.

Se encuentran diferentes posibilidades entre ambos tipos de precipitación, algunas de estas pueden ser convección embebida en lluvia frontal o lluvia estratiforme asociada a fenómenos convectivos, las cuales pueden presentar mayor o menor variación ocasionando que logren coexistir diversas situaciones en la precipitación(Collogo Briceño, 2005).

La figura 2.12 muestra las características más apreciables de una lluvia convectivas, como lo es la estructura de la precipitación que se manifiesta con muchas variaciones que la hacen más compleja que el caso estratiforme y esto se puede apreciar principalmente en el sentido horizontal, con diferencias entre valores de reflectividad más elevados.

La estimación de la reflectividad se ve afectada por el tipo de lluvia, y esto se refleja en la distribución espacial en las dos componentes (vertical-horizontal) siendo más uniforme en su distribución las lluvias estratiformes que las lluvias convectivas en las que se presentan más



Fuente: Collogo Briceño, 2005.

Figura 2.12: Registro de una Lluvia conectiva.

variación. Las suposiciones iniciales de la teoría de la reflectividad se ven forzadas a evolucionar, considerando factores como la distribución de probabilidad y el umbral óptimo de reflectividad y la relación $Z - R$ descrita por *Marshall y Palmer* en 1947 debe ser replanteada dependiendo del origen de la lluvia (Marshall et al., 1947; Mendez et al., 2006).

El ajuste cuantitativo de los datos del radar se debe comprender como un proceso de carácter específico para cada radar, ya que el establecimiento de la metodología a seguir está estrechamente ligada a la naturaleza propia del mismo, como de su entorno y la climatología de la zona donde se encuentra instalado. La corrección detallada de esos errores permite llegar a una etapa de refinamiento y de control de calidad de la calibración, con el fin de tener datos lo más cercanos a la realidad, y que puedan ser utilizados para la generación temprana de alarmas contra con la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos de gran magnitud, y a su vez proporcionen herramientas para tomar decisiones referentes a la planificación de las cuencas, basadas en un análisis de variabilidad espacio-temporal para un mejor entendimiento del sistema.

2.5. Conclusiones del capítulo

El radar pluviométrico «Eco-Nube», debido a su implementación, plantea la necesidad de desarrollar métodos no convencionales para un radar meteorológico que permitan procesar las señales y que estos pueda combinarse con algún procedimientos de calibración descrito para así determinar la correlación existente.

Capítulo 3

Metodología

Para lograr una homogeneidad en la forma en la que se capturan los datos se desarrollo un protocolo de medición que se cumplía cada que pretendía adquirir señales.

Antes de comenzar procesar las señales adquiridas es necesario caracterizarlas y comprender su naturaleza, ya que al tratarse de un radar prototipo nada de esto puede conocerse a priori, así que una primera etapa consiste en estudiar estas las señales, y en base a ellas desarrollar una metodología que permita extraer la información, para esto, los datos se procesaron en dos espacios de representación diferentes, en el tiempo, analizando la forma de onda y en la frecuencia, analizando la densidad espectral de potencia.

Para el cumplimiento del objetivo general, calibración preliminar de la estación de radar «Eco-Nube», se estableció la metodología resumida en la figura 3.1.

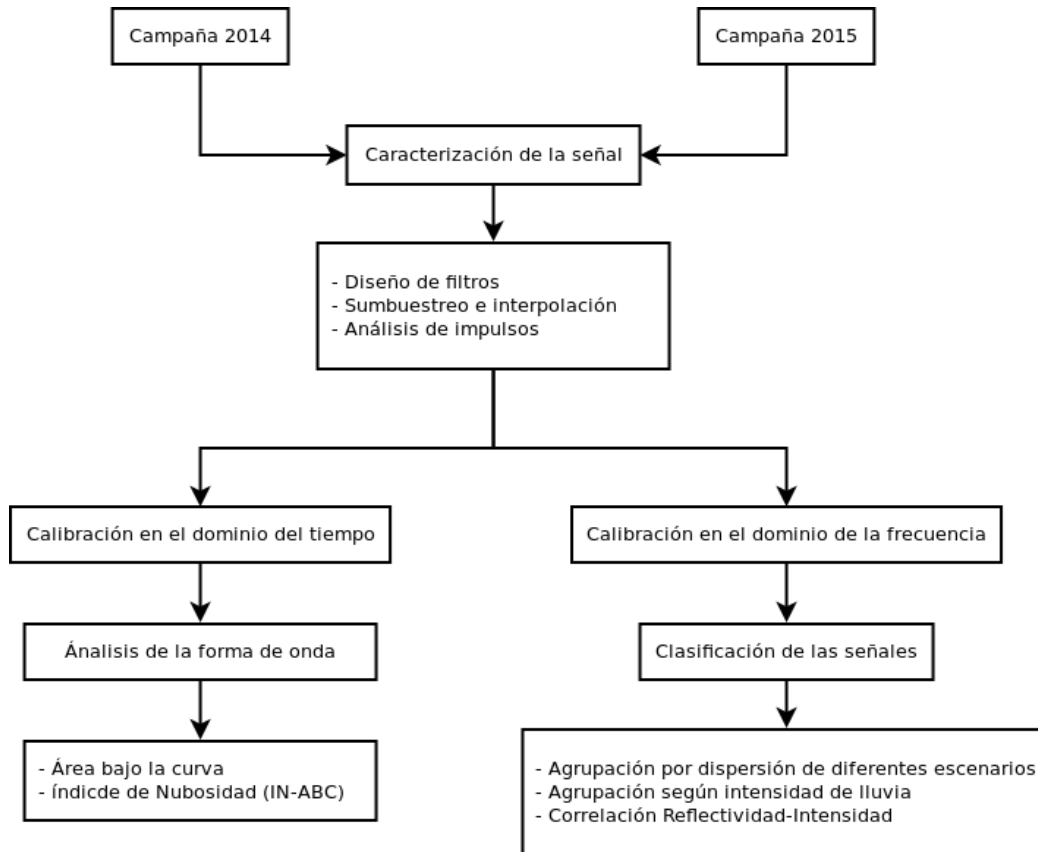


Figura 3.1: Diagrama de bloques de la metodología implementada.

3.1. Operación de la estación de radar «Eco-Nube»

Se adquirieron los ecos generados por la estación de radar «Eco-Nube» bombardeando, mediante microondas de $2,45 \text{ Hz}$ de forma fija y vertical, la zona de influencia del radar que se encuentra sobre las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica.

El eco se registra mediante un receptor, se digitaliza, se almacena en archivos tipo .wav y procesa en los softwares *Audacity*, *Matlab* y *Python* a través de módulos para cálculo científico.

Las señales fueron adquiridas en dos fases del proyecto a través de campañas de muestreo bajo diferentes condiciones meteorológicas.

3.1.1. Protocolo de medición

Se tienen los siguientes instrumentos: lápiz, libreta de anotaciones, cámara, cronómetro, reloj, sombrilla, computador con software *Audacity*.

1. Se verifica el estado meteorológico y se clasifica en un escenario de calibración.
2. Se verifica que el radar se encuentre energizado y activado, de lo contrario se procede con el proceso de activación.
3. Se verifica que el radar se encuentre en adecuado funcionamiento de la siguiente manera:
 - Comprobar que se encuentre enviando señales a la atmósfera, a través del encendido y apagado de la bombilla (que se genera cada 50 segundos durante 6 segundos).
 - Comprobar que la caja de control no se encuentre demasiado caliente, ni con signos de carbonización debido a cortos, en general que todas las partes del sistema se encuentre completas y en buen estado.
 - Comprobar que en la pantalla del monitor el programa *Audacity* se encuentre registrando ecos con amplitudes mayores a 0 decibeles.
 - Experimento de comprobación de la medición (que se mantenga dentro de cierto rango establecido previamente de forma experimental), de lo contrario es necesario contactar al grupo encargado del mantenimiento.
4. Se define la duración de la sesión de captura de datos (grabación).
5. Se inicia grabación con el software *Audacity*, se registra la hora de inicio y se inicia el cronómetro.
6. Se registra la hora en la que el transmisor envía la señal.
7. Se hace un registro fotográfico del estado meteorológico en el área de influencia del radar durante toda la sesión, es necesario definir uno o varios puntos para la toma de las fotografías para asegurar una misma percepción del estado meteorológico de la sesión y de las futuras sesiones.
8. Se documentan las observaciones de los diferentes cambios y estados meteorológicos así como las necesarias referentes a otros temas.
9. Al llegar el tiempo definido previamente en el paso 4, se dispone a detener la grabación en el software, detener el cronómetro y anotar la hora de finalización de la grabación.

10. Es necesario guardar las grabación adquirida con el software con un nombre que permita identificar claramente la sesión, para ello se ha elegido el siguiente formato:
{estado_meteorológico}_{fecha|DD-MM-YYYY}_{hora_fin|HH:MM:SS}
La grabación debe ser guardada en 32 bits, un solo canal y en un formato *wav*.

3.2. Selección de los escenarios de calibración

Una forma habitual de medir la nubosidad en un área es mediante la inspección visual. Esta técnica consiste en dividir la bóveda celeste en áreas denominadas *octas* u *octales* y estimar el porcentaje de cielo cubierto. De esta forma, un día totalmente despejado corresponde a 0 octas, días ligeramente nublados varían en un rango entre 1 a 3 octas, los días nublados están entre 4 y 5 octas, los días muy nublados entre 6 y 7 octas y los días totalmente cubiertos o nubosidad total corresponden a 8 octas (Cantolla, 1984).

Para llevar a cabo la calibración es necesario que el radar en su fase de operación adquiriera diferentes condiciones meteorológicas de las cuales se esperan los siguientes escenarios, presentados en las figuras 3.2 a 3.5:

- Días despejados con total ausencia de nubes (0 octas).
- Días parcialmente nublados con presencia de alguna o varias nubes (1 a 3 octas).
- Días nublados con la presencia casi total de nubes (4 y 5 octas).
- Días altamente nublados, pero sin lluvia (6 a 8 octas).
- Días altamente nublados, pero con lluvia (6 a 8 octas).

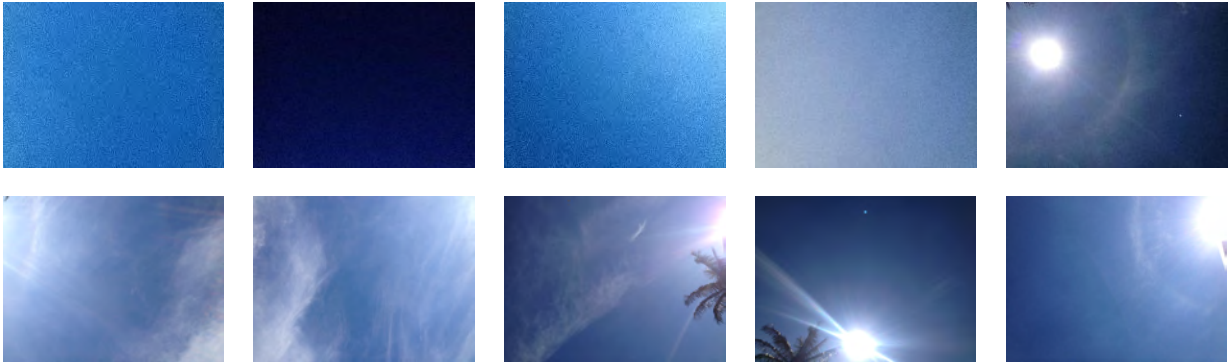


Figura 3.2: Despejado (0 octas).

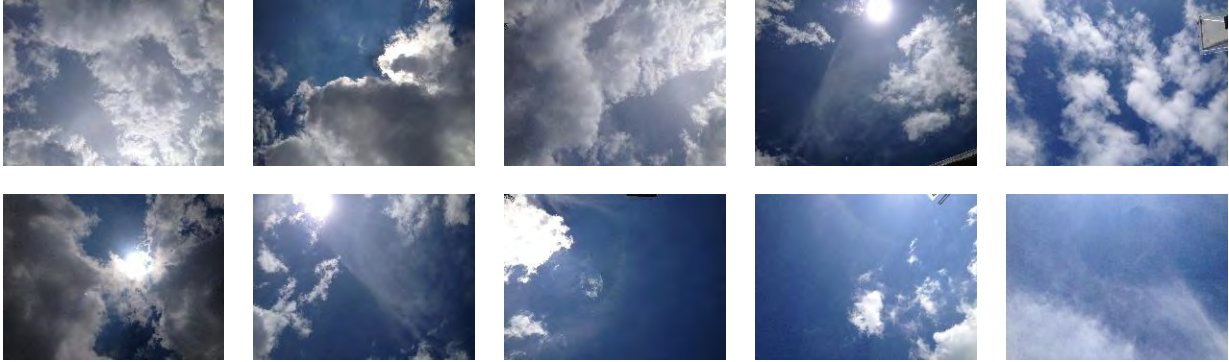


Figura 3.3: Parcialmente nublado (1 a 3 octas).

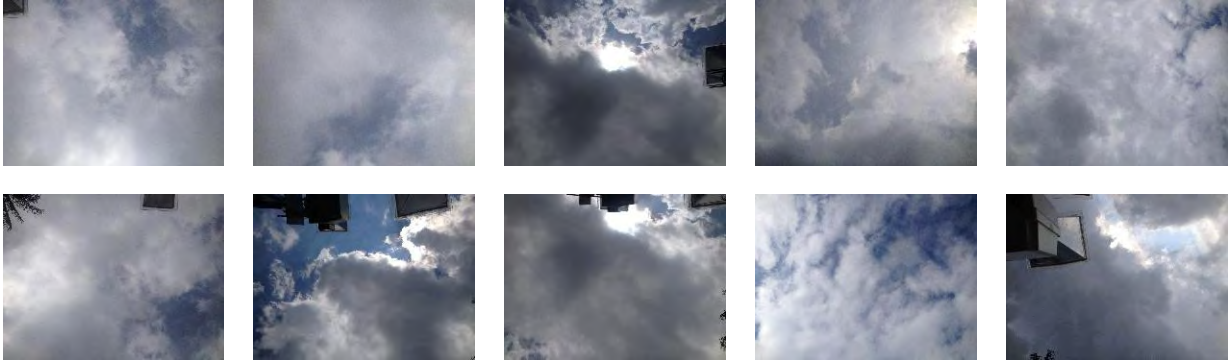


Figura 3.4: Nublado (4 a 5 octas).

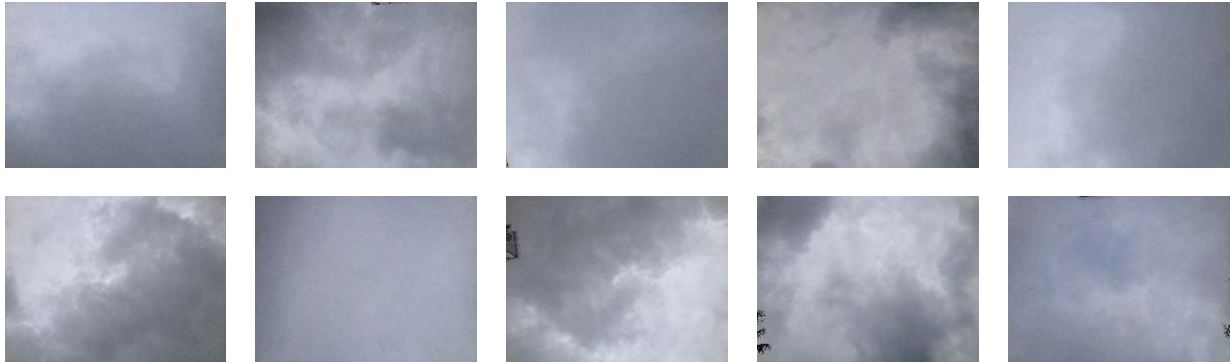


Figura 3.5: Altamente nublado y altamente nublado con lluvia (6 a 8 octas).

3.3. Análisis de la información y ecos suministrados por el radar

Al digitalizar el eco recibido por el receptor, la información es almacenada en valores de potencia voltaje en (dB), sin embargo, al ser un desarrollo experimental, las características y la naturaleza de la señal que se recibe y almacena, no se encuentran determinadas, por lo cual, para el cumplimiento del objetivo específico uno, esta sección de la metodología está dedicada al análisis exploratorio de las señales, donde el punto que requirió más tiempo y más recursos dentro de la investigación, fue determinar los procesos necesarios para establecer y comprender en que parte de la señal se encuentra la información que describe el fenómeno físico que se está analizando.

El análisis exploratorio consistió en:

- Estandarización de las señales: debido a que la recolección de la información se realizó en dos fases dentro del proyecto, con dos diferentes versiones del dispositivo del radar, implicó que la información recopilada se encontrara en diferentes escalas. Con el fin de llevar las señales a la misma escala, se plantea una estandarización y normalización tanto en la frecuencia de muestreo como en el tiempo. (ver sección 4.1.2)
- Análisis de la señal emitida, determinación del intervalo y duración del envío, análisis de impulsos: un comportamiento marcado dentro de la señal, que se puede apreciar visiblemente, es la presencia de constantes impulsos que presentan mayor amplitud que los demás componentes de la señal, por lo que fue necesario establecer la frecuencia de estos y su

conexión con el momento de envío, con el fin de determinar si describían el fenómeno físico. (ver sección 4.1.3).

- Análisis espectral de la señal y diseño de filtros digitales para reducción de ruido: las señales adquiridas durante la segunda fase del proyecto presentaron un ruido incorporado por las modificaciones realizadas al radar en esta etapa. Debido a lo anterior, fue más complejo identificar donde se encontraba la información asociada al fenómeno físico; como solución, se analizó el espectro de la señal y se determinaron los filtros digitales que mejor revelaran la señal asociada a la frecuencia dominante (ver sección 4.1.4).
- El software retorna como resultado series de tiempo en donde se presenta como varía la reflectividad de la nube vs el tiempo, lo que permite realizar el análisis en función del tiempo y de la frecuencia para detectar las variaciones y atenuaciones sufridas en amplitud y longitud de onda, adicionalmente, se le realizará un análisis estadístico que permita observar la naturaleza de la señal y eliminar ruido dentro de la misma.

3.4. Calibración preliminar del radar experimental «Eco-Nube»

A continuación se describe el proceso que se desarrolló para realizar una calibración hidrológica preliminar del radar «Eco-Nube».

Las señales obtenidas a partir de la información del radar fueron analizadas cualitativamente con el software Matlab con el objetivo de detectar las variaciones y atenuaciones sufridas en amplitud y longitud de onda, así como sus características en tiempo y frecuencia.

3.4.1. En el dominio del tiempo

La calibración preliminar del radar en el dominio del tiempo se realizó mediante una metodología novedosa y propia de este estudio, al ser un proceso experimental la mayoría de las metodologías no son aplicables al diseño y desarrollo del radar «Eco-Nube», de ahí surge de la necesidad de implementar esta nueva calibración, basada en la creación de un índice de nubosidad IN-ABC que relaciona la forma de onda de la señal asociada a una condición meteorológica (despejado, nublado, parcialmente nublado, altamente nublado, altamente nublado con lluvia), esta relación

se logra tomando el valor del área bajo la curva de los ciclos de cada escenario y clasificándolo en un rango definido por el índice para cada escenario meteorológico. La metodología para la creación del índice se presenta a continuación:

- Registro e identificación de las señales.
- Realizar una segmentación de la señal en el tiempo, en registros de un minuto (38.4000 datos) y luego en registros más pequeños de 500 datos debido al coste computacional requerido para manipular la información suministrada por el radar.
- Análisis de la forma de onda y el estudio de la estacionariedad de las señales se realiza una descomposición de cada señal normalizada en ciclos completos y se hace su análisis descriptivo.
- Se formuló el índice en base al área bajo la curva de los ciclos completos de las señales normalizadas.
- Se pretende poder tomar este índice IN-ABC para determinar el escenario meteorológico a partir de la información de la forma de onda y su área bajo la curva.

Los resultados obtenidos de esta metodología de calibración se presentan en la sección 4.2.

3.4.2. En el dominio de la frecuencia

Para la calibración preliminar del radar en el dominio de la frecuencia es necesario encontrar los márgenes de potencias y frecuencias propias de la señal que describe el fenómeno físico y no de otras señales no deseadas. Las señales obtenidas por el radar se clasificaron para relacionar las diferentes frecuencias asociadas a los escenarios meteorológicos. Este análisis es enfocado en la *Densidad Espectral de Potencia*.

Una vez identificadas las frecuencias fundamentales que describen el fenómeno físico, es necesario establecer la relación entre la intensidad de la lluvia y la reflectividad medida por el radar, para esto se cuenta con 71 pares de datos en donde se relacionan los valores de reflectividad, coincidentes en tiempo y espacio para una intensidad de 5 minutos, que fueron ajustados a través de

regresiones por mínimos cuadrados, evaluando relaciones de tipo lineal, potencial, exponencial y logarítmica entre los pares de datos.

Adicionalmente con el fin de hallar una relación directa entre los datos recolectados por el radar y la reflectividad, se decidió procesarlos mediante diferentes métodos que abarcan análisis de media, mediana, desviación estándar de la amplitud, centroide espectral, densidad espectral de potencia, y densidad espectral de potencia al cuadrado. Este procedimiento consiste en reducir cada fracción de datos de 5 minutos ($x(n)$) a un escalar V y emparejarlo con su respectivo valor de pluviómetro, $x(n)$ representa un vector de N valores a un muestreo de 44.100 datos por segundo. Sin embargo, para lograr establecer alguna relación fue necesario primero determinar metodologías para evaluar en que momento existen señales asociadas a la precipitación cuando el radar estaba funcionando correctamente para lograr un adecuado emparejamiento de los pares de datos de $Z - R$.

3.4.2.1. Métodos

Los métodos utilizados para el análisis de la relación entre la información proveniente del radar y la reflectividad son:

Centroide Espectral: Este método permite caracterizar el «centro de masa» de un espectro, en aplicaciones del campo de la música está relacionado con el concepto de «brillo», Se calcula como la media ponderada de las frecuencias presentes en la señal, considerando el espectro como una distribución cuyos valores son las frecuencias $f(n)$ y la probabilidad de observar estos corresponde a la amplitud normalizada.

$$V_{sc} = \frac{\sum_{n=0}^N f(n)x(n)}{\sum_{n=0}^N x(n)} \quad (3.1)$$

Densidad espectral de potencia: Puesto que se conoce que la información que retorna el radar se encuentra en torno a los 60 Hz, este método reduce el vector de datos a su respectivo valor de potencia según su DFT .

$$V_{DFT} = DFT(x(n))_{60 Hz} \quad (3.2)$$

Densidad espectral de potencia al cuadrado: Dado que potencia de la densidad espectral de *Fourier* en 60 Hz expresada en decibelios, es proporcional con la energía reflejada de vuelta al radar, se puede suponer que:

$$V_{DFT^2} = dBZ = 20 \log_{10}(DFT(x(n))_{60 Hz}) \quad (3.3)$$

Con lo que podemos relacionar la reflectividad con el cuadrado de la potencia según *Fourier*:

$$Z = 10^{\frac{dBZ}{10}} \quad (3.4)$$

$$Z = 10^{\frac{20 \log_{10}(DFT(x(n))_{60 Hz})}{10}} \quad (3.5)$$

Simplificando:

$$V_{DFT^2} = Z = DFT(x(n))_{60 Hz}^2 \quad (3.6)$$

De este modo queda demostrada la relación directa entre el cuadrado de la potencia de la frecuencia fundamental con la reflectividad Z.

Media, Mediana y Desviación Estándar de los datos: Estos métodos se aplicaron a la serie de datos en el tiempo directamente, con propósitos comparativos complementarios a procedimientos que implementan análisis en la frecuencia.

3.4.2.2. Regresiones

Con fines comparativos se decidieron implementar 4 tipos diferentes de regresiones: lineal (3.7), potencial (3.8), exponencial (3.9) y logarítmica (3.10), usando el método de mínimos cuadrados para los ajustes de curva.

$$Y_{lineal} = a * R + b \quad (3.7)$$

$$Y_{potencial} = a * R^b \quad (3.8)$$

$$Y_{exponencial} = a * e^{R*b} \quad (3.9)$$

$$Y_{logarítmica} = a * \ln(R) + b \quad (3.10)$$

Donde a y b son los parámetros de ajuste y V son cada uno de los valores que definen los anteriores métodos descritos.

Una vez se adquirió este conjunto de datos, se quiere satisfacer la necesidad de relacionar los datos experimentales a modelos matemáticos que permitan utilizar esa información, con el fin de entender la relación entre variables dependientes e independientes, generar formulaciones matemáticas usando los modelos obtenidos a partir del conjunto de datos analizados y a futuro obtener modelos que permitan predicciones. Los resultados obtenidos de esta metodología de calibración se presentan en la sección 4.3.

3.5. Conclusiones del capítulo

El proceso de calibración debe relacionar el escenario de nubosidad y/o la intensidad de la lluvia con un único parámetro de comparación, dado que lo que se tiene es un conjunto de datos que cambian en el tiempo entonces se ve la necesidad de implementar métodos que permiten tomar una sección de tiempo cualquiera y determinar un único valor para esta, estos métodos están definidos tanto para el dominio del tiempo como el de la frecuencia.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

Durante el tiempo de funcionamiento del radar se llevaron a cabo algunas modificaciones en el hardware del mismo, lo que significa la generación de dos conjuntos de datos con características diferentes, los cuales son analizados por separado y para los cuales se considera la posibilidad de desarrollar un método que permita converger ambos tipos de señales y a partir de ellas seguir aplicado un único modelo de análisis.

La calibración del radar se lleva a cabo para dos objetivos relacionados, el primero es el estado de nubosidad el cual consiste en emparejar los datos adquiridos con descripciones cualitativas basadas en observaciones, el segundo es la intensidad de la lluvia para lo cual se emparejaron los datos del radar con datos de pluviómetros en tierra.

4.1. Análisis de la información y ecos suministrados por el radar

A continuación se presenta el procedimiento realizado, este consta de la selección, organización y descripción de las señales a través de métodos de estandarización, normalización, y filtrado; y el proceso de extracción de la información asociada al fenómeno físico.

4.1.1. Descripción de las señales del radar «Eco-Nube»

Las señales analizadas en esta investigación corresponden a registros diarios adquiridos por el radar en dos fases del proyecto. La primera fase corresponde a pruebas realizadas durante el mes de diciembre de 2014, con señales adquiridas con una frecuencia de muestreo de 385 000 datos por segundo que abarcan cuatro condiciones de nubosidad: días despejados con total ausencia de nubes (0 octas), días parcialmente nublados con presencia de alguna o varias nubes (1 a 3 octas), días nublados con la presencia casi total de nubes (4 y 5 octas) y días altamente nublados pero sin lluvia (6 a 8) (Grajales et al., 2016a). En una segunda fase del proyecto, realizada entre agosto y diciembre de 2015, el sistema de adquisición fue modificado y los nuevos registros fueron adquiridos con una frecuencia de muestreo mucho menor, de 44.100 datos por segundo (antes era de 384.000). De esta segunda fase del proyecto se analizaron las señales adquiridas durante días con eventos de lluvia. Durante las campañas realizadas se presentó el fenómeno *El Niño Oscilación del Sur - ENOS* en su fase El Niño (cálida), ocasionando que el tiempo dentro de la investigación fuera seco con pocas lluvias, dificultando la toma de datos de lluvia y sesgando la muestra con valores de poca intensidad.

Las señales adquiridas en las dos fases del proyecto fueron analizadas cualitativamente con diferentes herramientas para cálculo científico y se logró comprobar la existencia de patrones diferentes en las señales, como variaciones y atenuaciones en amplitud y longitud de onda, haciendo posible obtener una característica cualitativa para la clasificación de las señales.

4.1.2. Estandarización de las señales

Como se mencionó anteriormente existen dos campañas en las que se basa esta investigación, no obstante, las condiciones de adquisición del radar fueron cambiadas durante el lapso intermedio, esto trajo implicaciones con respecto a la caracterización de las señales, alterando especialmente las escalas de muestreo, la longitud de la onda y un ruido adicional en la señal. Se hizo necesario entonces verificar que las características de las señales de la primera campaña todavía se conservan en las señales de la segunda, siendo la estandarización la solución para llevar la información a la misma escala y homogeneizar el banco de datos.

4.1.2.1. Estandarización de frecuencias: submuestreo e interpolación de las señales

Cuando se habla de frecuencia de muestreo se habla de la capacidad que tiene el dispositivo y en general el sistema de muestrear una variable continua en intervalos de tiempo sin que se altere su naturaleza. El análisis de las señales iniciales demostró que bastaba con 44.100 datos por segundo para representar el fenómeno que se está monitoreando. Esto trajo una menor carga en el procesamiento debido que tener una frecuencia elevada implicaba un alto coste computacional para su análisis. Se hace necesario entonces que las señales de ambas campañas¹ pudieran ser comparables y darle continuidad a la investigación.

Existen dos mecanismos para que ambos grupos de señales puedan ser comparables, el primero consiste en llevar la información tomada a 384.000 datos por segundo a una frecuencia de 44.100 datos por segundo, lo que implica que la señal debía reducir el número de datos, y por tanto, reducir la resolución de la información. El segundo mecanismo consiste en el proceso opuesto, es decir, pasar 44.100 datos por segundo a 384.000 datos por segundo a través de una interpolación para cada serie de datos.

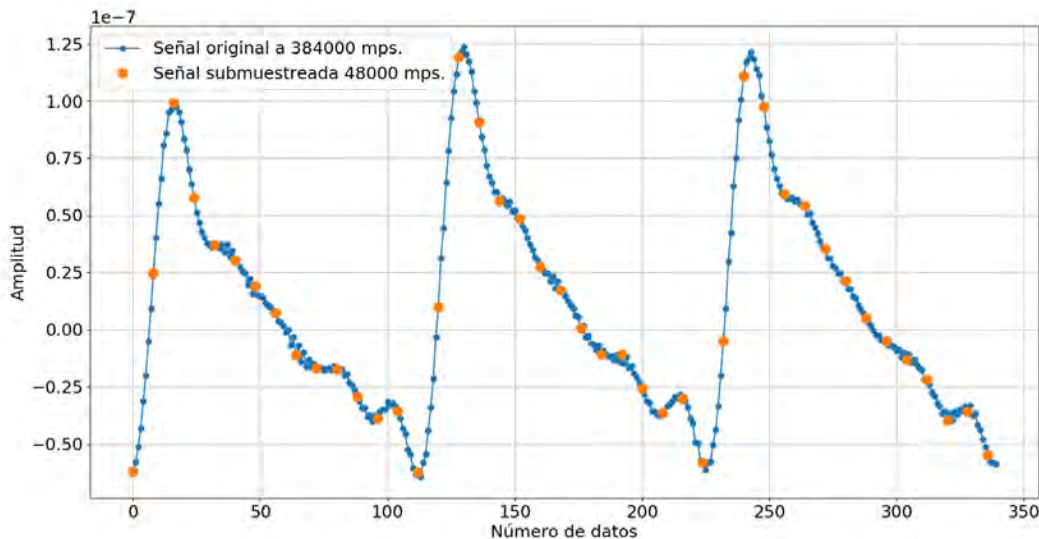


Figura 4.1: Submuestreo de f_s , 384.000→44.100 datos por segundo para una señal del evento *Parcialmente nublado*.

¹En la campaña de 2014 la adquisición de datos se hizo a 384.000 muestras por segundo, la campaña de 2015 se hizo a 44.100 muestras por segundo.

En la figura 4.1 se puede ver como la forma de onda no se ve afectada debido al submuestreo, esto se debe a que el ancho de banda que contiene la información se encuentra en una banda dentro de los primeros 22,050 Hz.

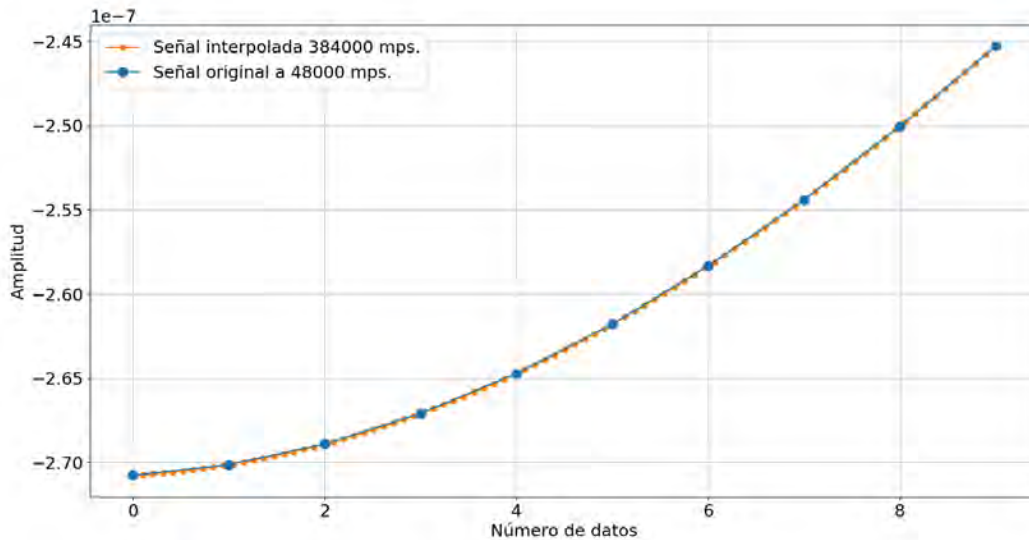


Figura 4.2: Interpolación de fs de 44.100→384.000 datos por segundo para una señal del evento *Altamente nublado*.

La figura 4.2 muestra el resultado del proceso de interpolación, es claro que esta transformación no afecta la información de la señal de ningún modo, su espectro de frecuencias queda casi invariante, simplemente se aumenta el tamaño y la resolución del archivo transformado, sin embargo, este proceso puede ser muy útil en el caso de evaluar la señal a través de herramientas estadísticas como la *Entropía Multiescala*, puesto que esta requiere de una considerable cantidad de datos en su cálculo.

Implementar ambos métodos no presenta alteraciones ni conlleva a corrupciones en la información contenida en las señales, lo que significa que pueden ser comparables y adaptadas en la misma escala, por lo cual se planteó una estandarización de las amplitudes y del tiempo mediante el submuestreo de las señales de la campaña 2014.

4.1.2.2. Normalización y estandarización de una señal

Para una correcta comparación de las formas de onda las amplitudes de los ciclos fueron normalizadas sustrayendo la media y la desviación estándar, como lo indica la ecuación 4.1. Adicionalmente, el eje de tiempo de cada ciclo se estandarizó entre 0 y 1 como se indica en la ecuación 4.2 (Aguilar, 2008).

$$\bar{Z}_1 = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.1)$$

Donde x es el valor a normalizar, \bar{Z}_1 el valor normalizado, μ es la media de la población y σ es la desviación estándar.

$$\bar{Z}_2 = \frac{x}{\max(x)} \quad (4.2)$$

Donde x es el valor a estandarizar, \bar{Z}_2 el valor estandarizado y x es la población.

4.1.3. Señal emitida: intervalo y duración de envío, análisis de impulsos

Una de las características visibles que predominan la señal son la presencia de impulsos, en donde la amplitud varía en el tiempo y se encarga de hacer cada señal única. Por lo anterior era necesario identificar si la información recibida a través de esta característica correspondía a la señal de interés, que enmarca el comportamiento de las microondas con los hidrometeoros de la atmósfera.

4.1.3.1. Análisis de los impulsos dentro de las señales

El objetivo de esta sección es caracterizar la señal a través de las agujas que se observan en la figura 4.3 y determinar si la información asociada al estado de nubosidad se encontraba presente en la amplitud en decibelios y determinar si son periódicos.

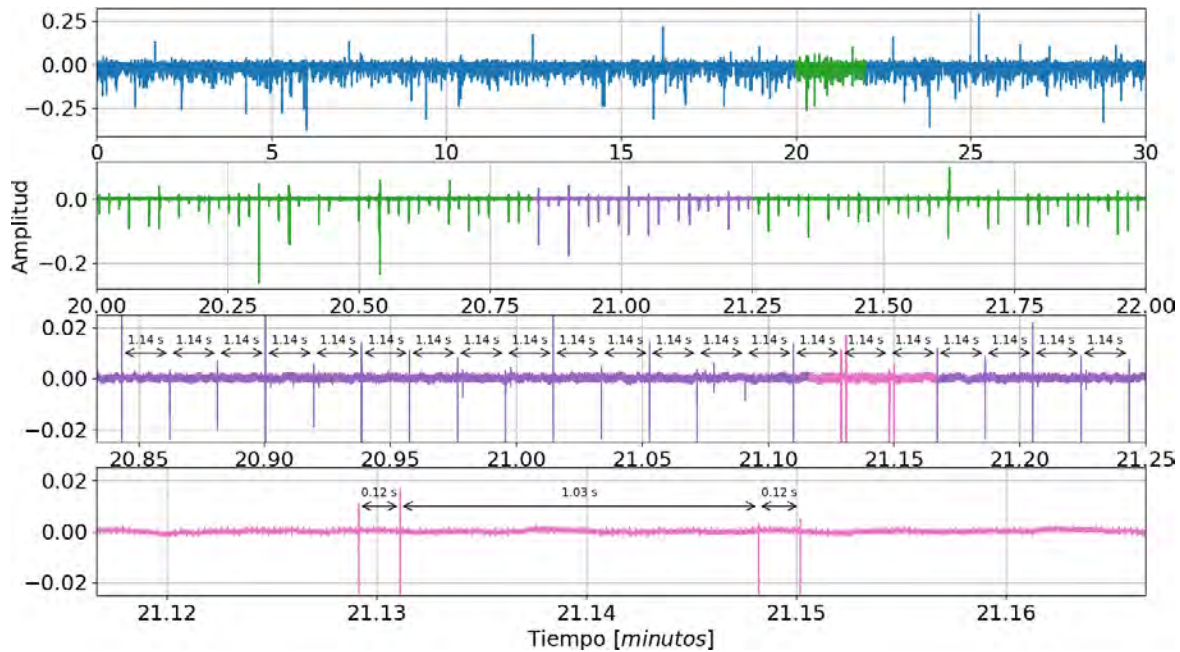


Figura 4.3: Señal perteneciente al estado de «Despejado», los impulsos principales presentan un periodo promedio de 1,14 s.

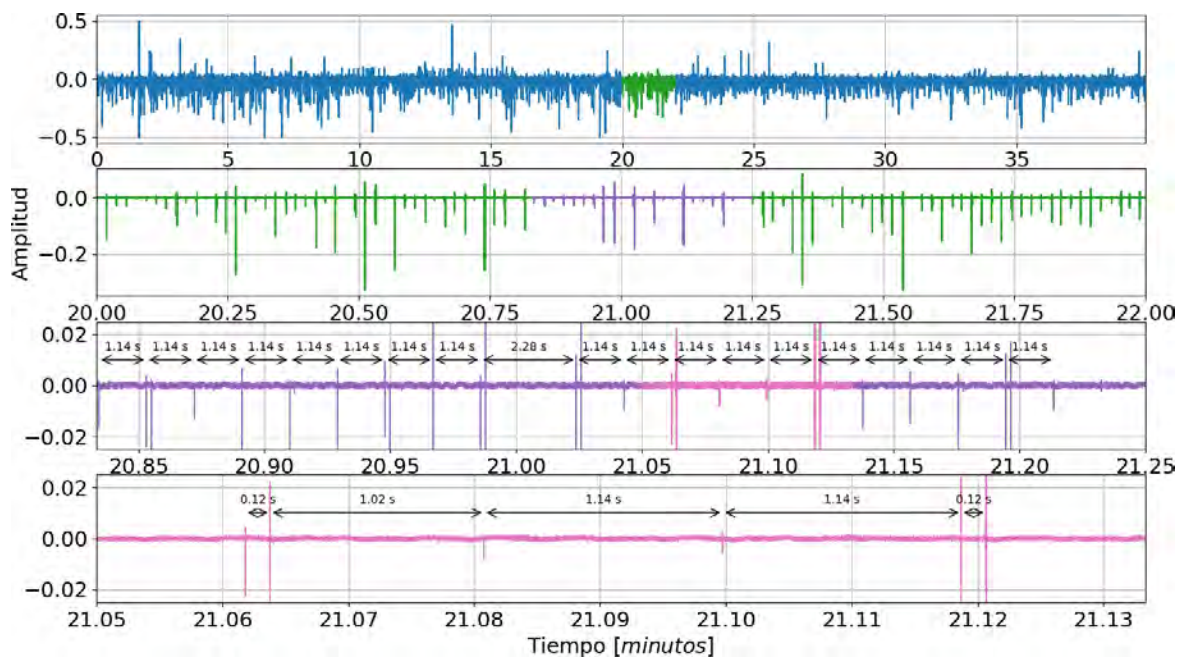


Figura 4.4: Señal perteneciente al estado de «Nublado», los impulsos principales presentan un periodo promedio de 1,14 s.

Un análisis realizado a un par de señales pertenecientes a diferentes estados de nubosidad, permitió determinar la naturaleza de estos impulsos, como se muestran en las figuras 4.3 y 4.4.

La primera fila de cada una de las figuras 4.3 y 4.4 representa la totalidad de la señal a analizar, con una pequeña porción resaltada que es tomada aleatoriamente, la segunda columna expande esta porción y resalta una nueva porción, la tercera columna representa la porción anterior en la que se han resaltado las distancias en segundos que hay entre los impulsos mas significativos (amplitud mayor a 0,005). Durante el análisis se encontraron otro tipo de impulsos que en ocasiones acompañaban al impulso principal (cuarta fila de las figuras 4.3 y 4.4).

Finalmente se comprobó que las agujas son producto del inicio de la ráfaga de microondas que envía el radar y que el rebote es producido en menor medida al momento de finalizar el envío, esto fue posible identificarlo a través de los intervalos que al convertirlos el frecuencias se tienen frecuencias aproximada de 1 Hz para el periodo de envío, y 10 Hz para el rebote, es decir para el periodo de tiempo durante el cual es sistema envía la microonda.

$$f_{impulso\ principal} = \frac{1}{t} = \frac{1}{1,14\ s} = 0,87\ Hz \quad (4.3)$$

$$f_{impulso\ rebote} = \frac{1}{t} = \frac{1}{0,12\ s} = 8,3\ Hz \quad (4.4)$$

La ecuación 4.3 y 4.4 corresponden al cálculo de la frecuencia de los impulsos principales y de los rebotes respectivamente.

4.1.4. Análisis espectral de la señal y diseño de filtros digitales para reducción de ruido

Debido a la completa incertidumbre respecto a la naturaleza de la señal, no se pudo diseñar un filtro que cumpliera con ciertas características, en su lugar se procedió a implementar filtros con diferentes parámetros y evaluar analíticamente su respuesta.

4.1.4.1. Filtros aplicados

Butterworth: Es el filtro mas simple y más usado, está diseñado para generar respuestas máximamente planas cuando $\omega = 0$ (Avendaño, 2007), esto es, que la salida se mantiene constante hasta la frecuencia de corte, luego disminuye a razón de 20 veces el número de polos del filtro.

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}} \quad (4.5)$$

Donde ω es la frecuencia analógica compleja, n es el orden del filtro y ω_p es la frecuencia de corte.

Chebyshev: Los filtros cuyas respuesta es máximamente plana en la banda pasante (*Butterworth*) presentan el inconveniente de que la transición de esta banda a la banda de rechazo no es tan aguda como se requiere en alguna aplicaciones (Avendaño, 2007), una forma de corregir esto es permitiendo un risado en alguna de las dos bandas, si el risado se encuentra en la banda pasante el filtro se denomina de tipo I (4.6), y si se encuentra en la banda de rechazo se denomina de tipo II (4.7).

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \xi^2 C_n^2(\omega)} \quad (4.6)$$

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{\xi^2 C_n^2\left(\frac{1}{\omega}\right)}{1 + \xi^2 C_n^2\left(\frac{1}{\omega}\right)} \quad (4.7)$$

Elíptico: Este tipo de filtro permite un risado en ambas bandas, como una combinación de los dos tipos *Chebyshev*, esta característica permite estrechar aún mas la transición entre bandas, está definido por:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \xi^2 R_n^2(\omega)} \quad (4.8)$$

Dónde R_n es una función jacobiana elíptica de orden n .

4.1.4.2. Selección de ancho de banda

Debido a que el ancho de banda que contiene la información es aún desconocido, debido principalmente a la pobre documentación sobre la implementación del radar, se procede a realizar un análisis espectral de la señal con el fin de determinar que ancho de banda caracteriza la forma de onda principal para cada campaña y con esta información determinar los parámetros del filtro. Se implementaron filtros pasa-bandas digitales para múltiples bandas, estas fueron determinadas según la densidad espectral de potencia de las figuras 4.5 y 4.6.

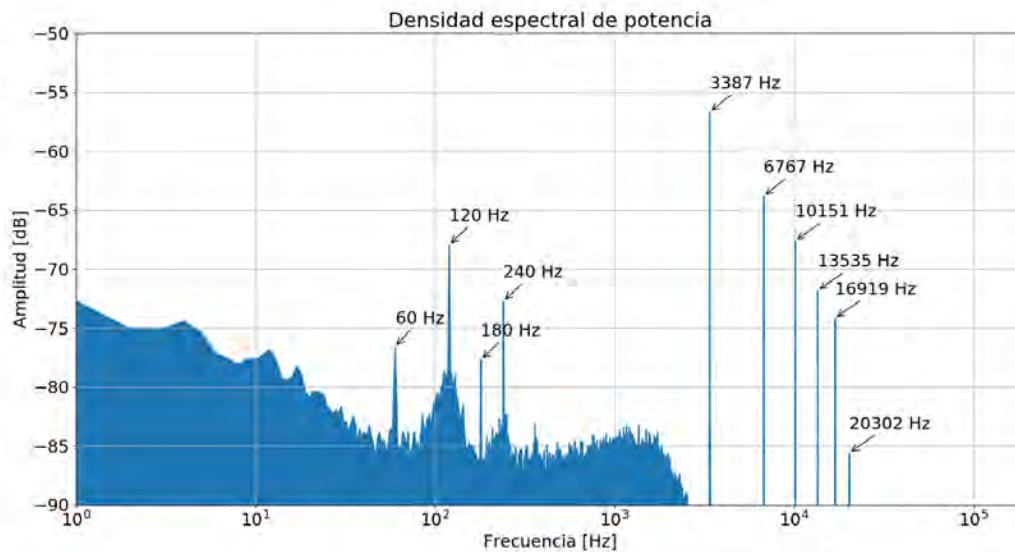


Figura 4.5: Densidad espectral de potencia para señal 384.000 mps (campaña 2014).

Ancho de banda según grupos de frecuencias: En la figura 4.7 se pueden ver claramente dos anchos de bandas principales, cada uno con una serie de armónicos, el primer grupo se sitúa entre los 30 y los 600 Hz , con un armónico principal en 120 Hz , el segundo bloque se encuentra entre los 2,6 kHz y los 30 kHz , con un armónico principal a 3,3 kHz el cual también corresponde a la frecuencia fundamental de toda la señal.

Algunas de las respuestas a los filtros comparados con las señales originales para ambos anchos de banda se muestran en las figuras 4.8 a 4.10, estos filtros se seleccionaron porque fueron los que

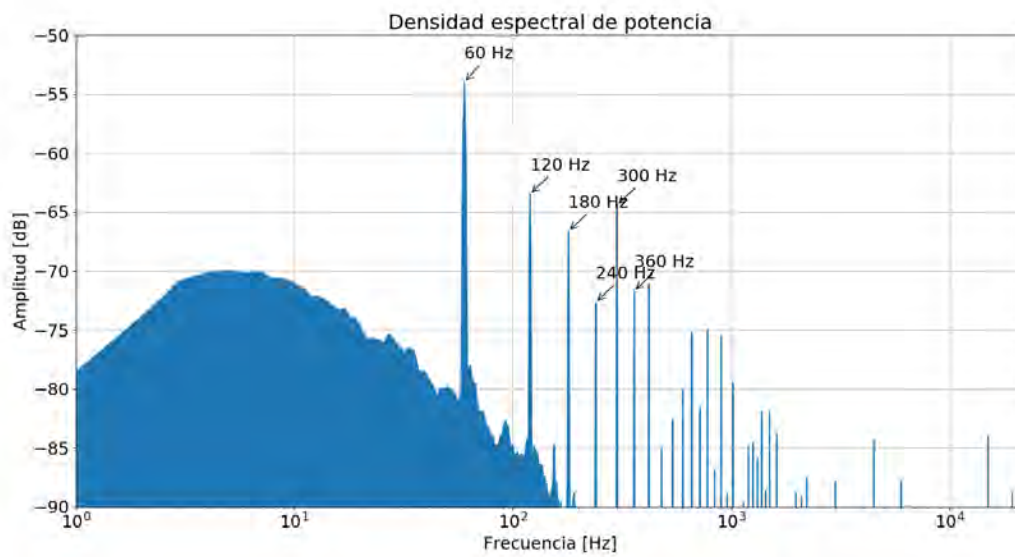


Figura 4.6: Densidad espectral de potencia para señal 44.100 mps (campaña 2015).

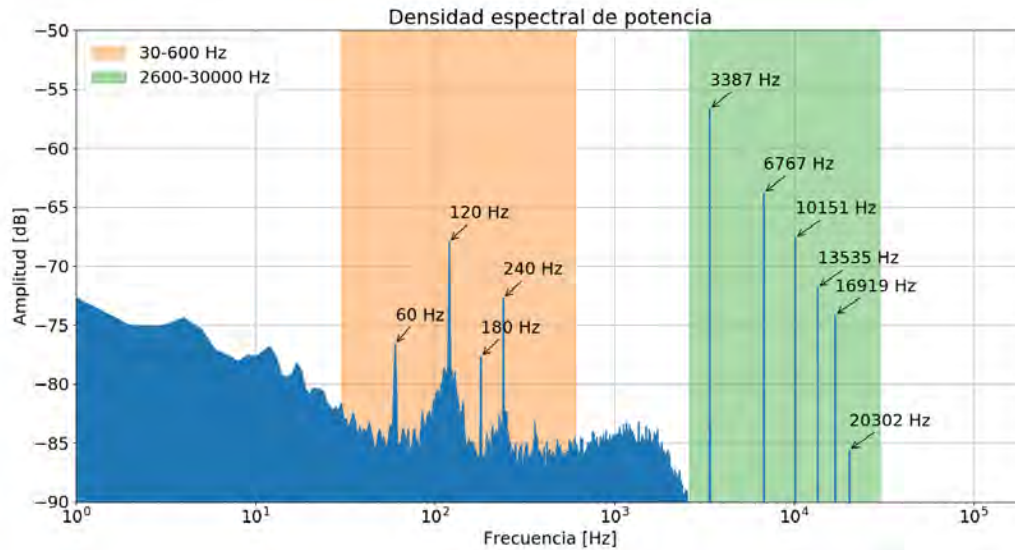


Figura 4.7: Ancho de banda principales para para señal a 384000 mps (campaña 2014).

mejor conservaron la forma de onda de la señal original, todos corresponden a filtros *Butterworth* de orden 1.

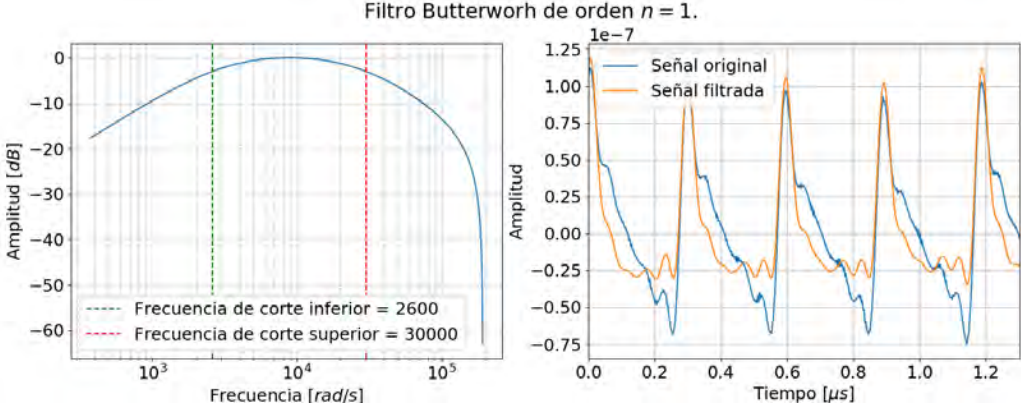


Figura 4.8: Filtro pasa banda 2,6 – 30 kHz tipo Butterworth de orden 1.

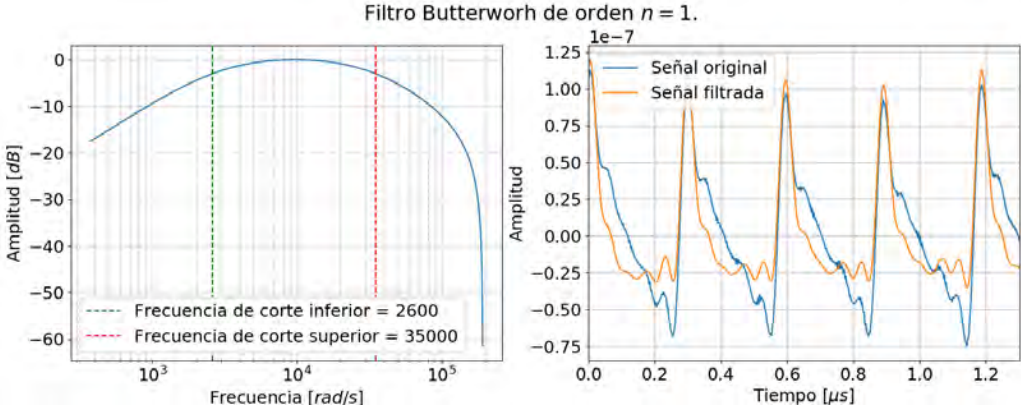


Figura 4.9: Filtro pasa banda 2,6 – 35 kHz tipo Butterworth de orden 1.

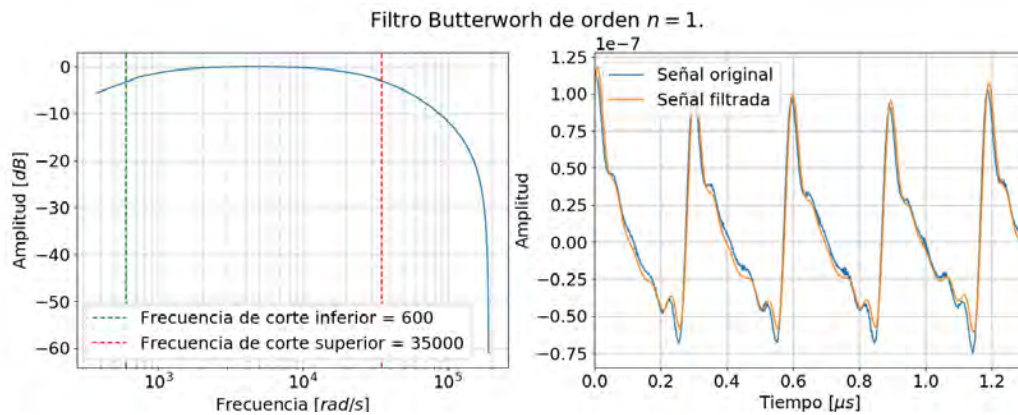


Figura 4.10: Filtro pasa banda 600 – 35000 Hz tipo *Butterworth* de orden 1.

En la figura 4.11 se presenta una densidad espectral de potencia muy común en las señales de la campaña 2015, a diferencia de las señales de la campaña 2014, este no presenta grupos de ancho de bandas que resalten, solo una frecuencia fundamental a 60 Hz y una gran cantidad de sus armónicos asociados.

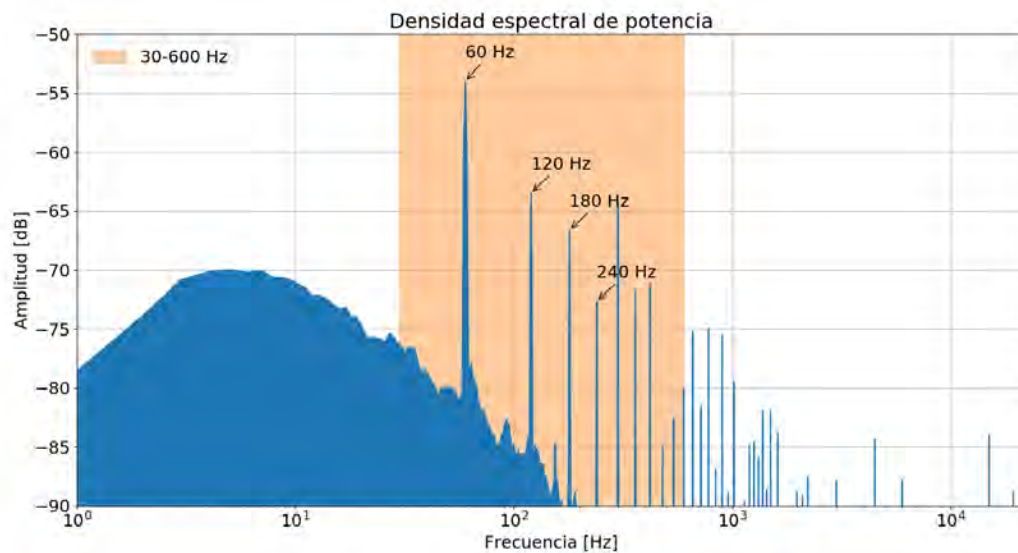


Figura 4.11: Ancho de banda seleccionado para señal a 44.100 muestras por segundo (campaña 2015).

De acuerdo a los resultados de los filtros que se pueden ver en las figuras 4.12 a 4.14 la forma de onda principal se encuentra entre los 30 y 600 Hz y la señal presenta un ruido de alta frecuencia, los mejores filtros correspondieron a los de tipo *Butterworth* todos de orden 1.

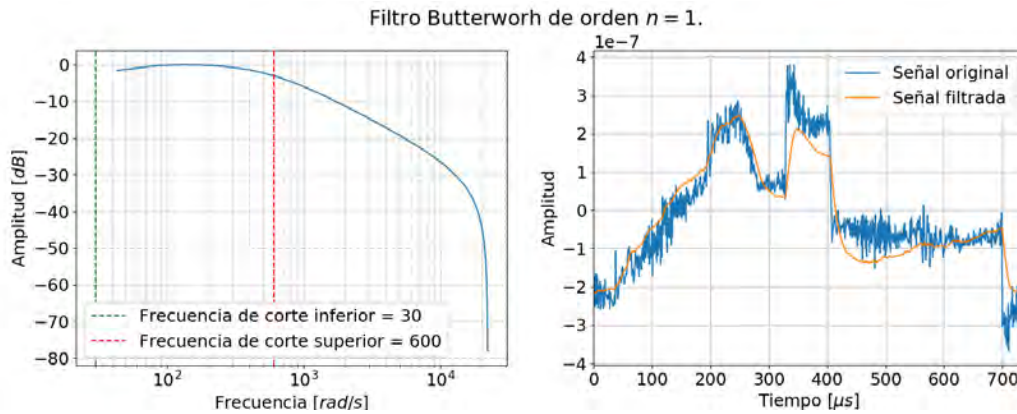


Figura 4.12: Filtro pasa banda 20 – 600 Hz tipo *Butterworth* de orden 1.

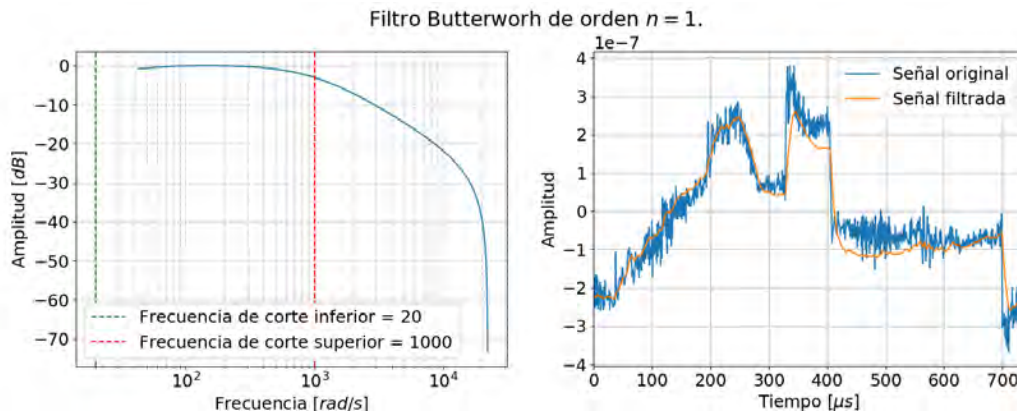


Figura 4.13: Filtro pasa banda 20 – 1000 Hz tipo *Butterworth* de orden 1.

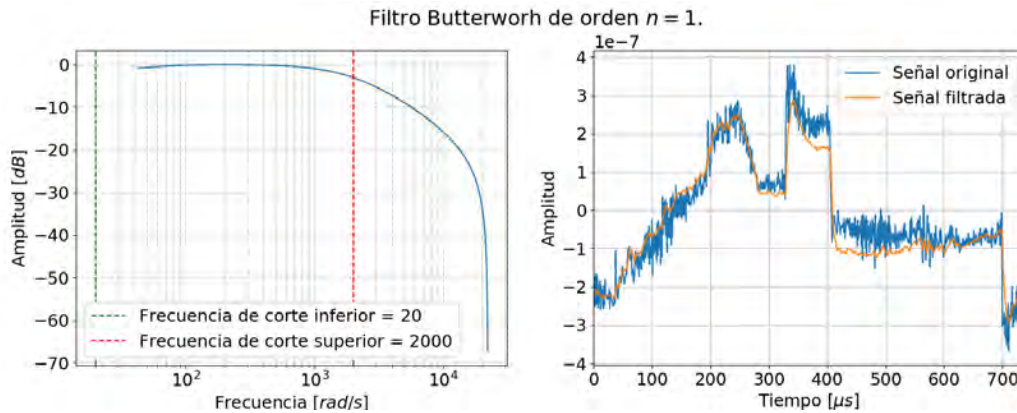


Figura 4.14: Filtro pasa banda 20 – 2000 Hz tipo *Butterworth* de orden 1.

Anchos de banda según armónicos: Filtrar entorno a armónicos permite confirmar el aporte de cada uno a la forma de onda principal, a diferencia de los filtros planteados en la sección inmediatamente anterior, estos no retornaran un ajuste de forma de onda debido a la complejidad de la señal, en su lugar, retornarán formas sinusoidales de diferentes complejidades, esto permitirá caracterizar mejor aún la señal.

En la figura 4.15 se pueden ver como se han seleccionado diferentes armónicos, los cuales se van a filtrar mediante una combinación de tipos de filtros y órdenes.

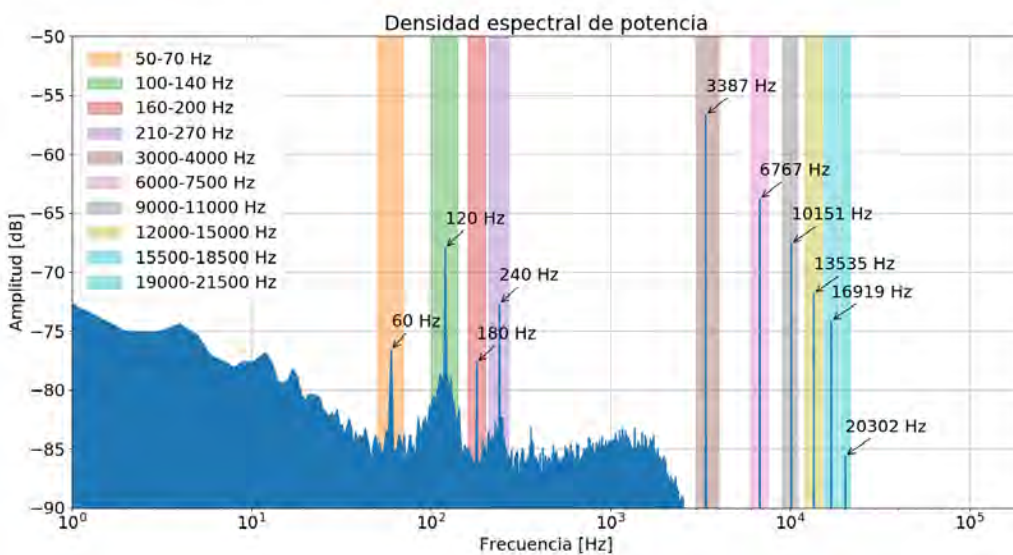


Figura 4.15: Anchos de banda en torno a cada armónico (campana 2014).

Las figuras 4.16 a 4.18 corresponden a las mejores respuestas de filtros obtenidas, todas corresponden a filtros *Butterworth* de órdenes 1 y 2.

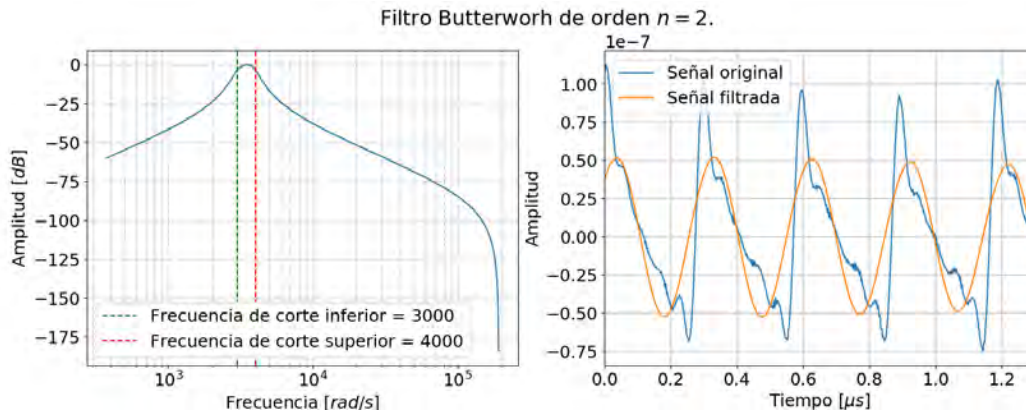


Figura 4.16: Filtro pasa banda 2 – 4 kHz tipo *Butterworth* de orden 2.

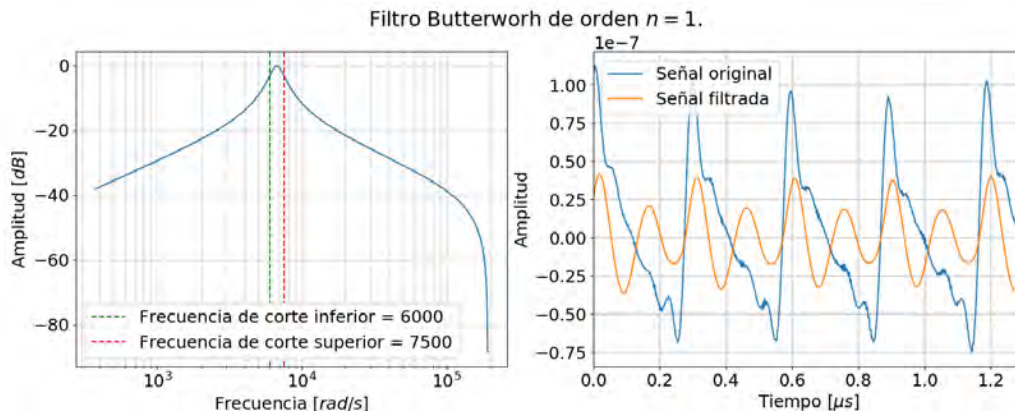


Figura 4.17: Filtro pasa banda 6 – 7,5 kHz tipo *Butterworth* de orden 1.

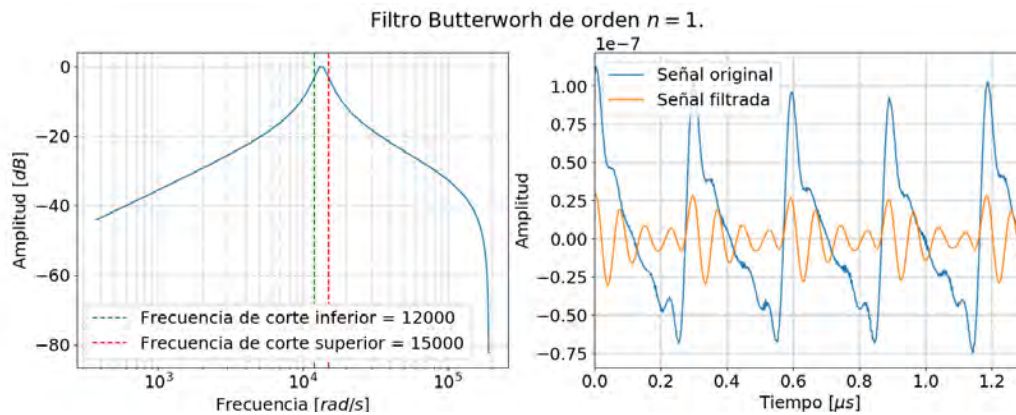


Figura 4.18: Filtro pasa banda 12 – 15 kHz tipo *Butterworth* de orden 1.

Para la campaña de 2015 los armónicos principales que se resaltan en la figura 4.19 corresponden todos a los de la fundamental en 60 Hz. Estas señales presentan un número elevado de armónicos claramente identificables a lo largo de todo su espectro pero con muy poco valor informativo, es por esto que sólo se seleccionaron armónicos de frecuencias bajas.

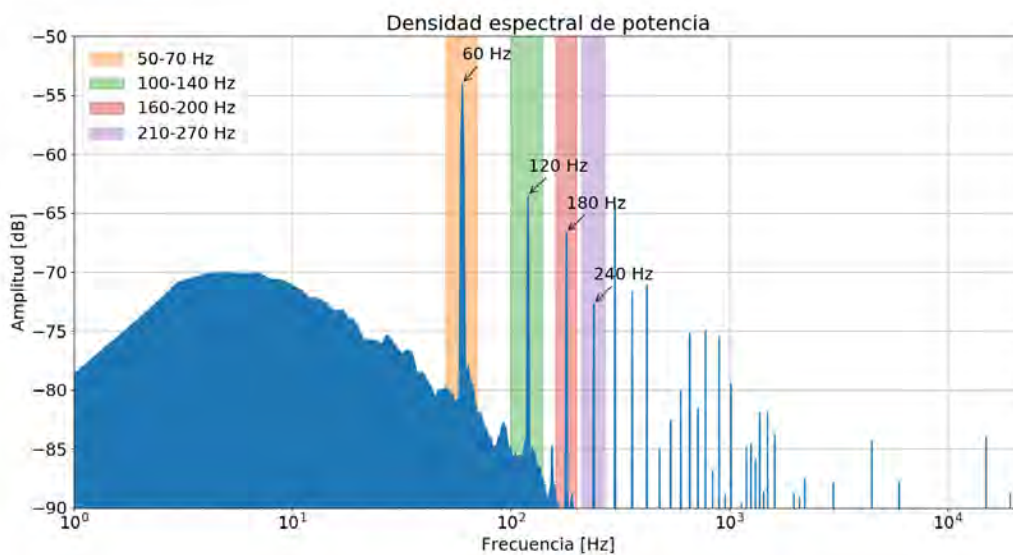


Figura 4.19: Anchos de banda en torno a cada armónico (campaña 2015).

Según se puede ver en las figuras 4.20 y 4.21, esta claro que la forma de onda principal es una combinación puramente de los armónicos de 60 Hz , filtrar cada armónico nos dejaría únicamente con una forma de onda sinusoidal de baja complejidad.

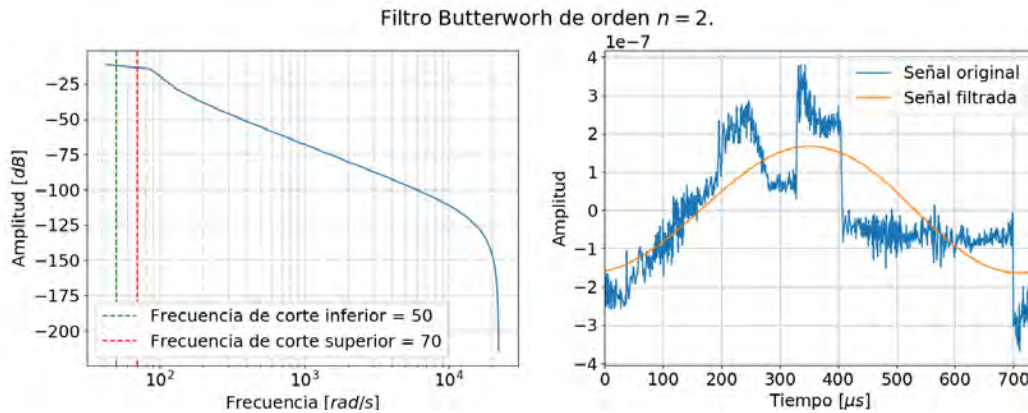


Figura 4.20: Filtro pasa banda $50 - 70\text{ Hz}$ tipo *Butterworth* de orden 2.

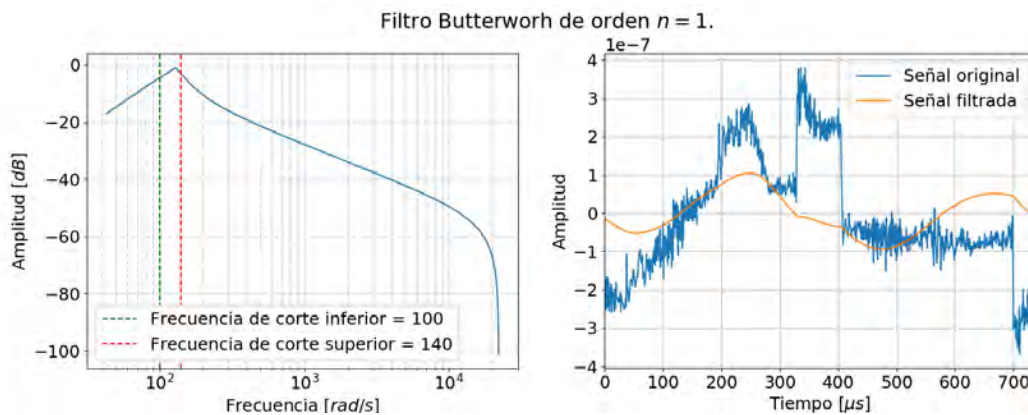


Figura 4.21: Filtro pasa banda $100 - 140\text{ Hz}$ tipo *Butterworth* de orden 1.

Luego de este análisis se puede concluir que las señales de ambas campañas, no solo diferían en la velocidad de muestreo, sino que también en la banda de frecuencia que contiene la información fundamental, haciendo que definir un método que las permita relacionar sea un poco mas elaborado de lo planteado inicialmente. En el cuadro 4.1 se puede apreciar el resumen luego del análisis se los filtros implementados para cada campaña.

	Campaña 2014	Campaña 2015
Velocidad de muestreo	384.000 mps	44.100 mps
Frecuencia fundamental	3.387 Hz	60 Hz
Ancho de banda que contiene la forma de onda	600-35.000 Hz	0-2 kHz
Periodo aproximado de la forma de onda	0,3 μ s	700 μ s

Cuadro 4.1: Tabla comparativa de campañas.

4.2. Calibración preliminar del radar pluviométrico «Eco-Nube» mediante *IN-ABC*

El algoritmo desarrollado para el análisis de las señales se muestra en el diagrama de bloques de la figura 4.23. El algoritmo consta de 4 pasos principales, el primero consiste en el registro e identificación de las señales; el segundo paso es realizar una segmentación de la señal en el tiempo, en registros de un minuto (384.000 datos) debido al coste computacional requerido para manipular la información suministrada por el radar; el tercer paso consiste en el análisis de la forma de onda y el estudio de la estacionariedad de las señales; finalmente, se realiza una descomposición de cada señal normalizada en ciclos completos y se hace su análisis descriptivo según los 4 escenarios tenidos en cuenta que se muestran en la figura 4.22.



Figura 4.22: Escenarios analizados.

4.2.1. Segmentación de las señales

Cada registro fue segmentado en ventanas no solapadas de un minuto de duración, estas partes de señal se graficaron en función del tiempo y la frecuencia, (ver figura 4.24).

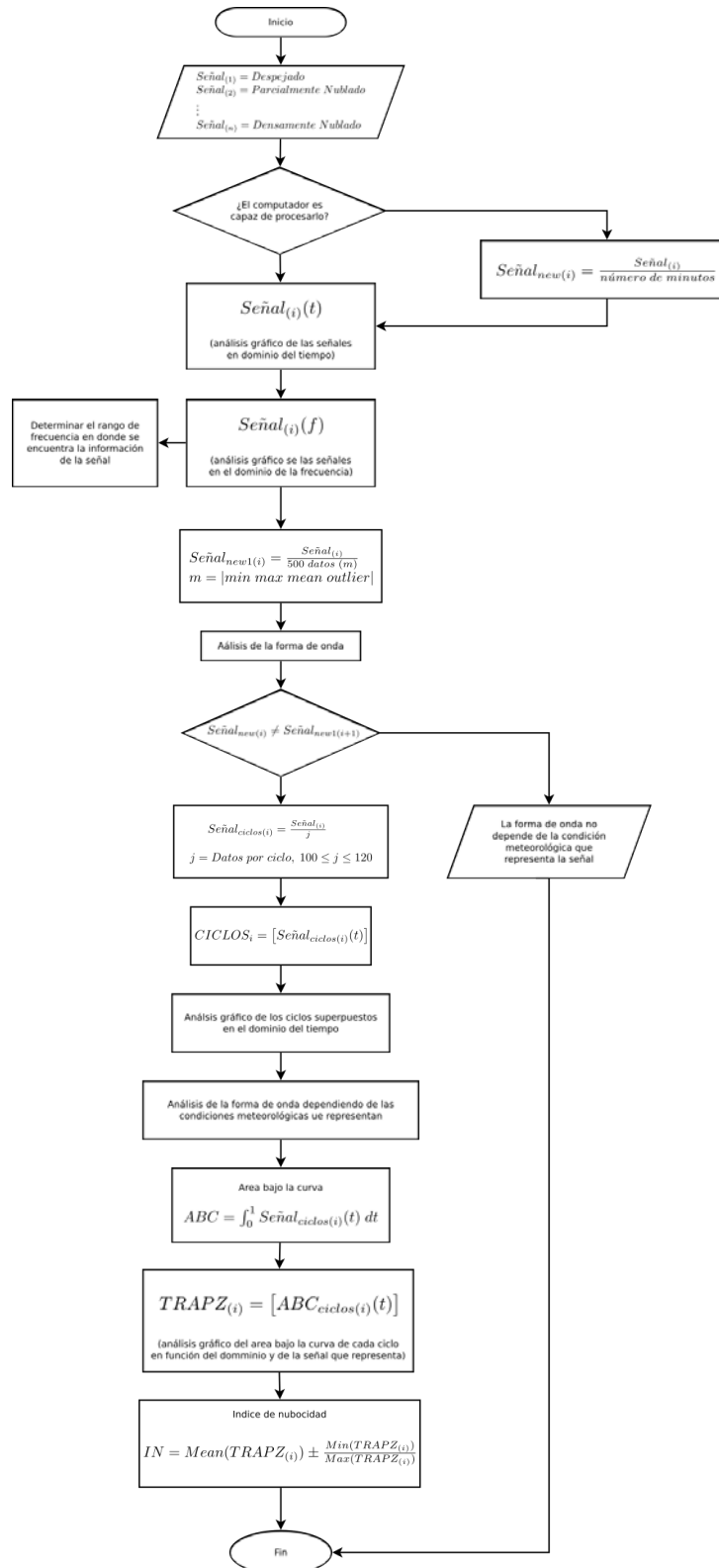


Figura 4.23: Diagrama de bloques del algoritmo desarrollado para el análisis de las señales el radar «Eco-Nube».

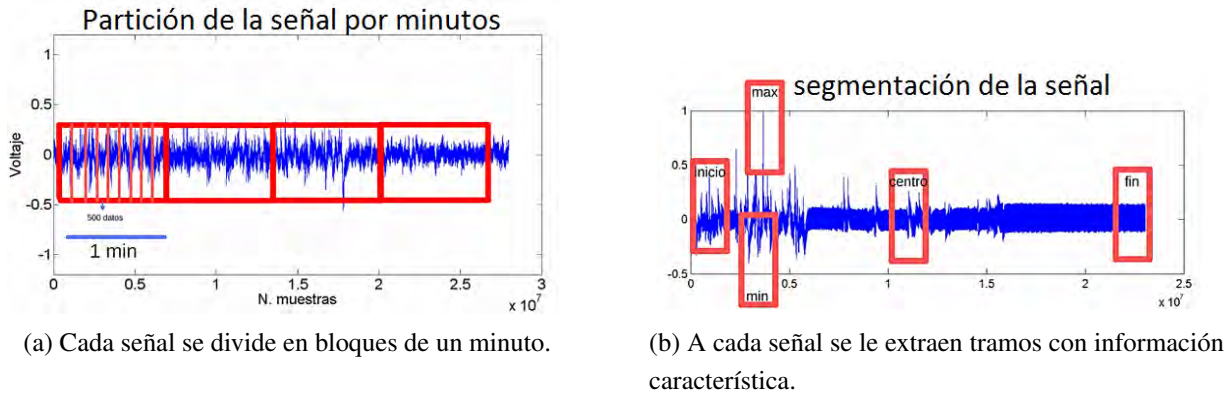


Figura 4.24: Partición y segmentación de la señal.

Las gráficas en el dominio del tiempo revelaron que la amplitud de voltaje de los registros adquiridos por el radar es variable y no describe una relación directa con el estado de nubosidad. No obstante, las gráficas en el dominio de la frecuencia mostraron que la mayor cantidad de información, que caracteriza la condición de nubosidad, se concentra en las frecuencias bajas, entre 1 y 1 kHz . Por esta razón se aplicó a las señales un filtro paso bajo con frecuencia de corte en 1 kHz . Los resultados de este proceso se muestran de las figuras 4.25 a 4.29.

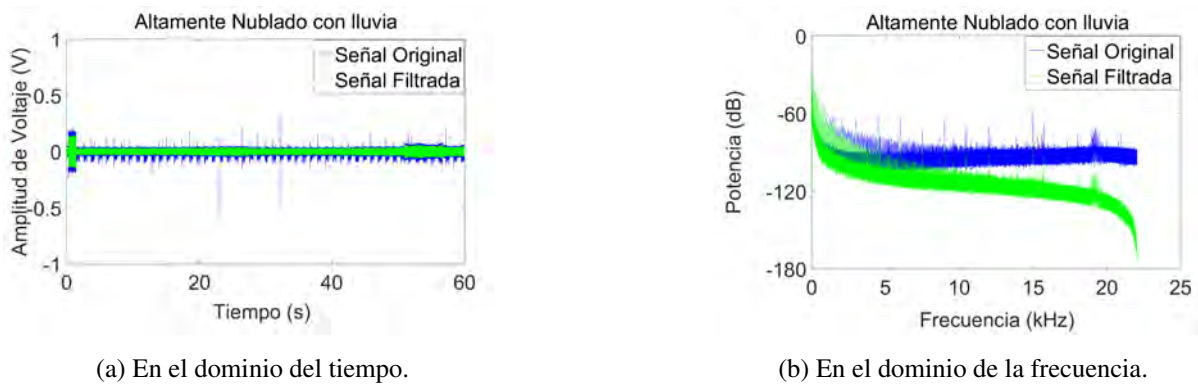


Figura 4.25: Evolución de la señal altamente nublado con lluvia.

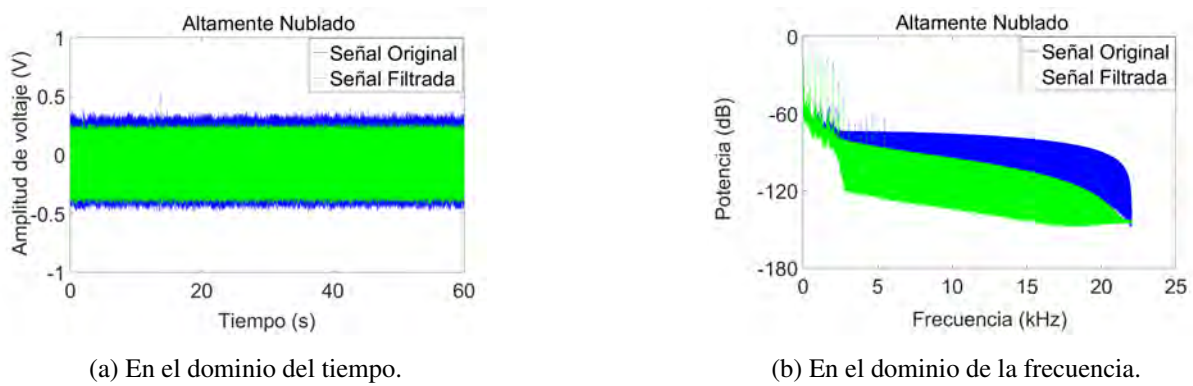


Figura 4.26: Evolución de la señal altamente nublado.

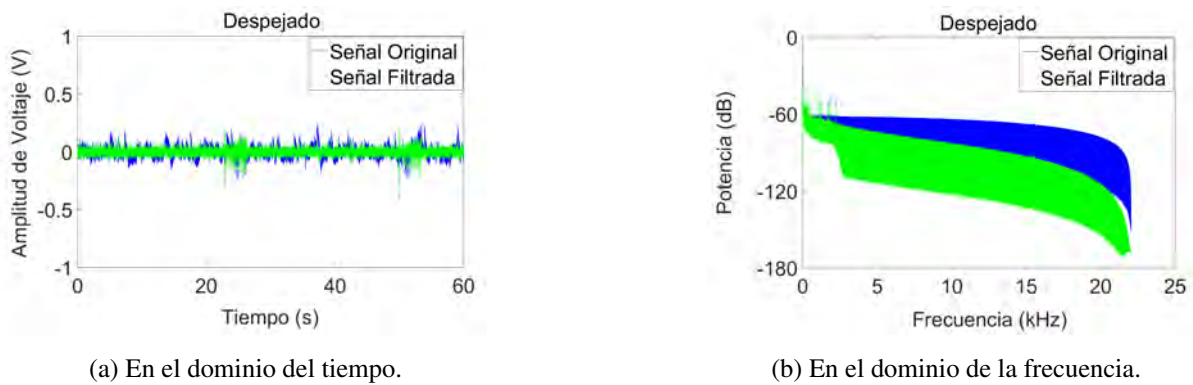


Figura 4.27: Evolución de la señal despejado.

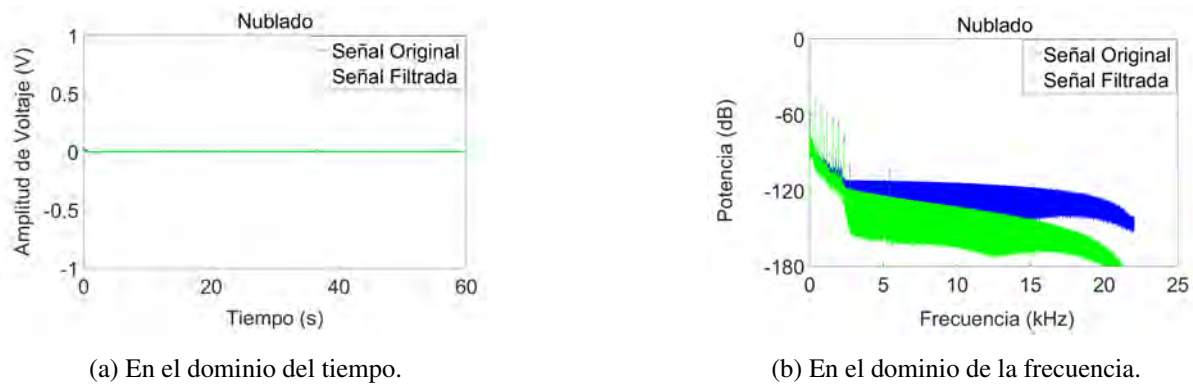
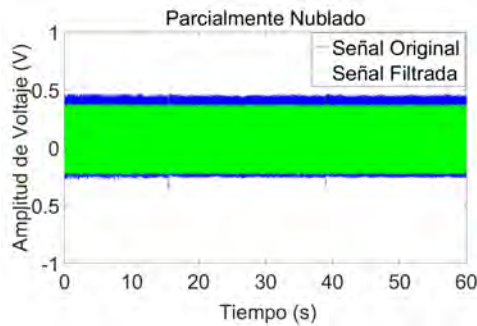
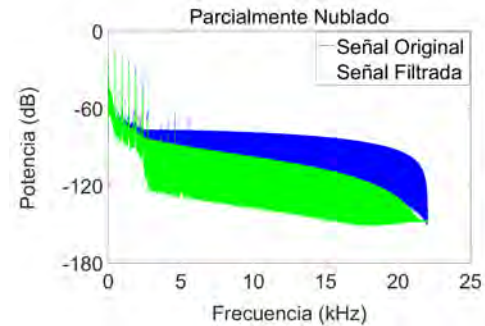


Figura 4.28: Evolución de la señal nublado.



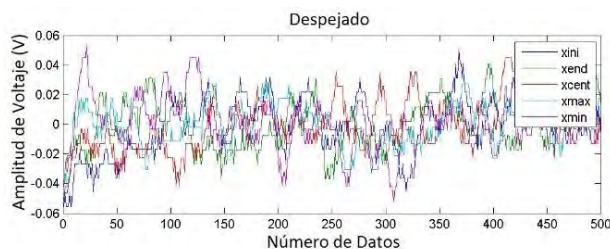
(a) En el dominio del tiempo.



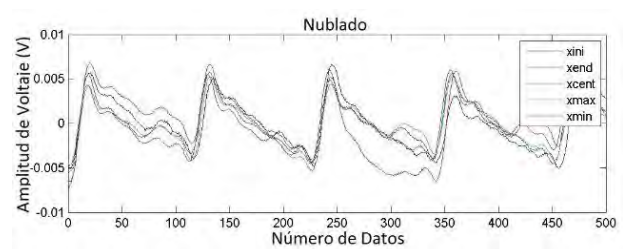
(b) En el dominio de la frecuencia.

Figura 4.29: Evolución de la señal parcialmente nublado.

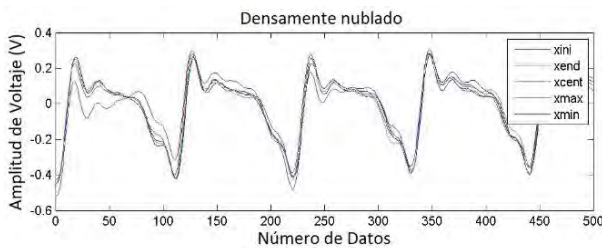
Con el fin de comprender la información suministrada por el radar y analizar la forma de la onda recibida, se graficaron ventanas de 500 datos de diferentes partes de la señal y se superpusieron según su forma de onda. En la figura 4.30 muestra la evolución de la amplitud de voltaje para estos datos y para diferentes tipos de nubosidad.



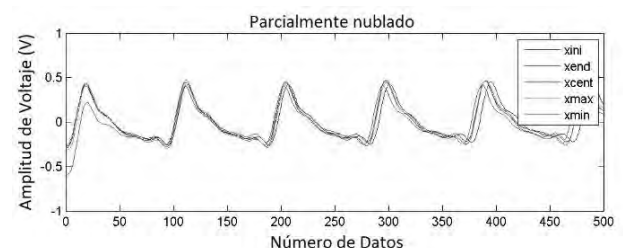
(a) Día despejado con ausencia de nubes.



(b) Día parcialmente nublado.



(c) Día nublado.



(d) Día altamente nublado.

Figura 4.30: Señales registradas por el radar «Eco-Nube» en diferentes condiciones de nubosidad.

Como se observa en la figura 4.30 las señales presentan un comportamiento diferente para cada una de las condiciones de nubosidad registradas; en días despejados, con ausencia de nubes (figura 4.30a), el receptor solo registra ruido debido a que la señal enviada por el emisor no es reflejada, sin embargo, en los registros obtenidos en días con alguna presencia de nubes (figuras 4.30b, 4.30c y 4.30d) la señal tiene características armónicas con una forma de onda bien definida y discriminante para cada clase.

4.2.2. Caracterización de ciclos completos de la señal

Para comprobar que la señal conserva sus características morfológicas a lo largo del tiempo, cada señal fue segmentada en ciclos completos. Se muestra las gráficas de los ciclos completos superpuestos para cada condición de nubosidad, luego de un proceso de normalización y remoción de medias.

En cada gráfica t es el tiempo acumulado del ciclo y T es la duración total del ciclo.

4.2.2.1. Escenario 1: *Despejado* (sin nubes)

La gran característica de las señales de despejado es que la forma onda que las representa cuenta con cambios abruptos de pendiente que carecen de periodicidad, por lo que al sobreponerse las señales en el tiempo no se encuentra una sola forma de onda representativa, ni es posible identificar los ciclos como se observa en las figuras 4.31 y 4.32 .

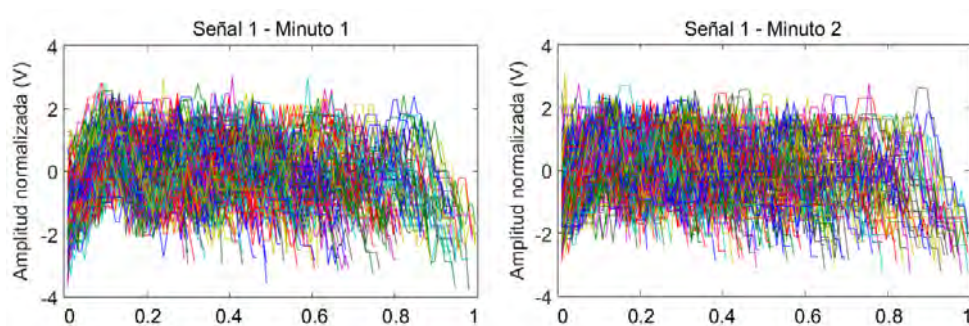


Figura 4.31: Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día despejado.

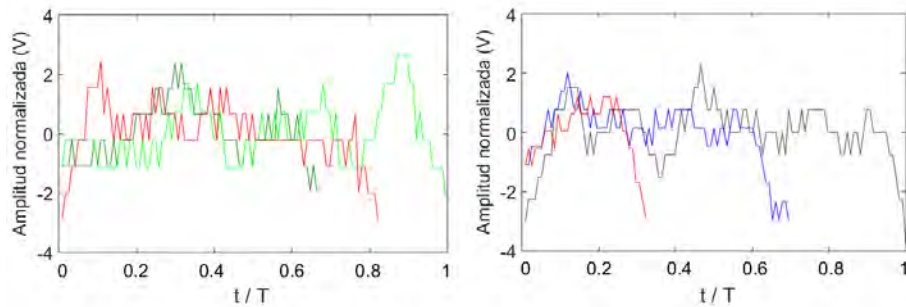


Figura 4.32: Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día despejado.

4.2.2.2. Escenario 2: *Parcialmente Nublado*

Los ciclos completos de las señales registradas en días parcialmente nublados (figura 4.33) exhiben pocas diferencias entre ellos. Las características de amplitud a lo largo del ciclo se mantienen casi invariables, lo que hace posible agrupar este tipo de señales y definir las con una forma de onda característica.

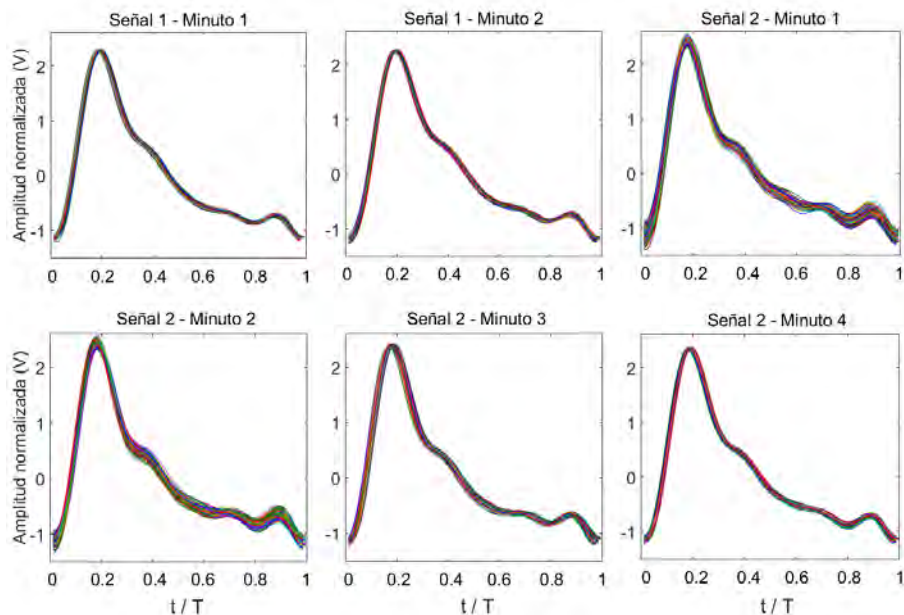


Figura 4.33: Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día parcialmente nublado.

4.2.2.3. Escenario: *Nublado*

La superposición de los ciclos en la señal registrada en un día *Nublado* (figura 4.34), permite apreciar diferentes grupos de formas de onda según la nubosidad presente en el área de influencia del radar en el momento del experimento.

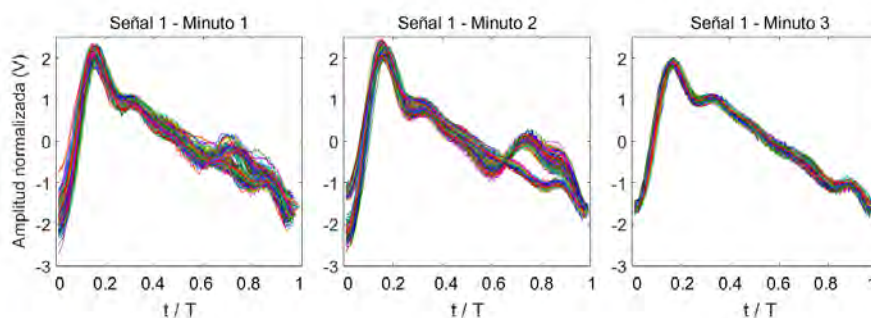


Figura 4.34: Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día nublado.

4.2.2.4. Escenario: *Altamente nublado*

A medida que nubosidad aumenta, también aumenta el número de crestas o «jorobas» del ciclo completo de la señal. Los días altamente nublados presentan mayor número de crestas y grupos de formas de onda más variados, asociados a un grado mayor de nubosidad como se ve en las figuras 4.35 y 4.36.

La superposición de los ciclos completos de las señales permitió observar la evolución de la forma de onda en cada una de las condiciones de nubosidad analizadas. En días despejados (figura 4.31) la señal no presenta forma de onda periódica ni características determinísticas. No obstante, las señales con algún tipo de nubosidad registrada (figuras 4.33 a 4.36) presentan características de amplitud y longitud de onda similares entre señales del mismo escenario.

Este análisis permitió comprobar que, al normalizar los ciclos completos de las señales recibidas por el radar, la longitud de la onda y el área bajo la curva de cada ciclo completo aumentan a medida que aumenta la condición de nubosidad, como se muestra en la figura 4.37.

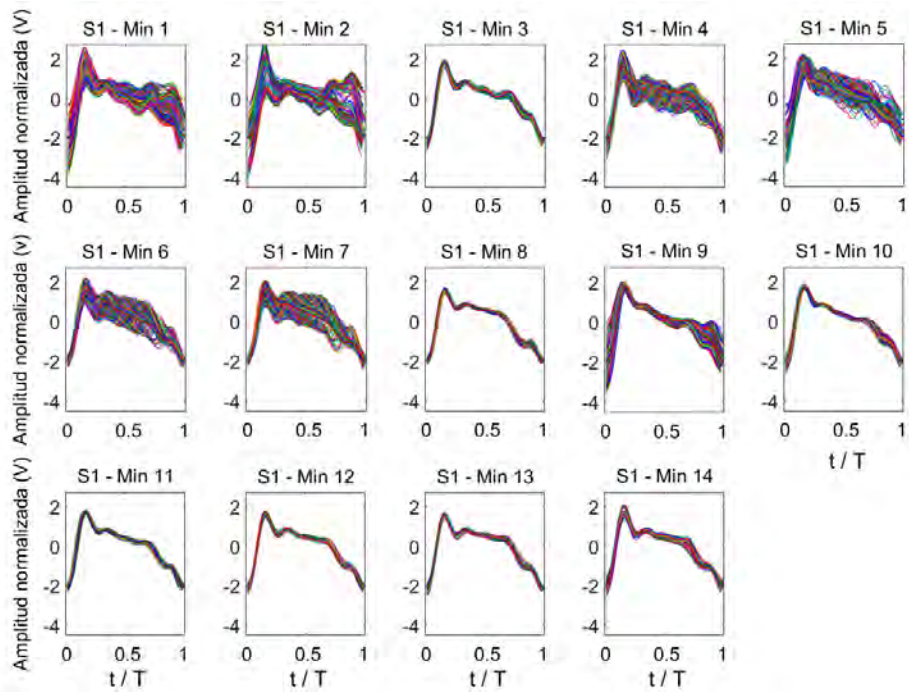


Figura 4.35: Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día altamente nublado.

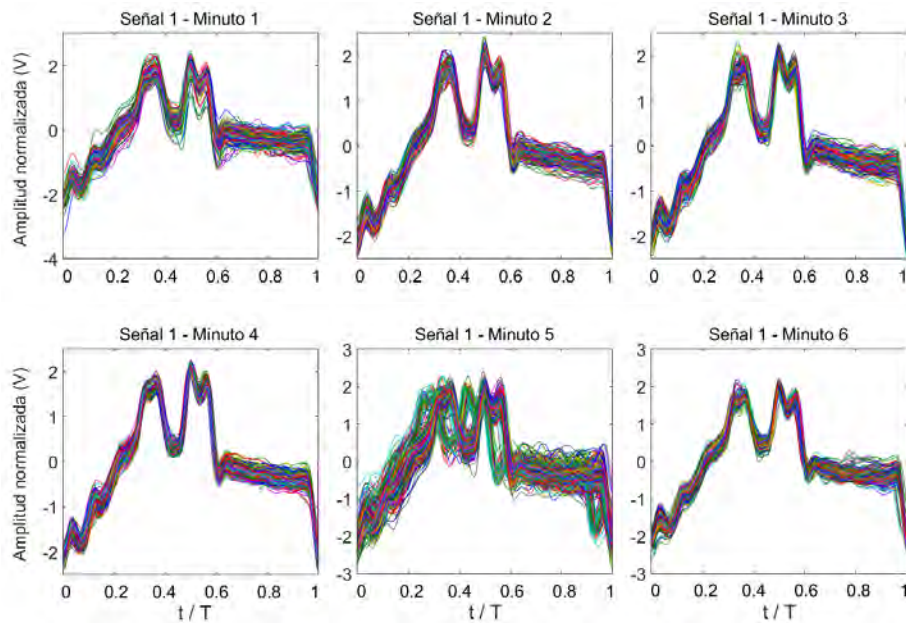


Figura 4.36: Superposición de los ciclos completos de señales registradas durante un día altamente nublado con lluvia.

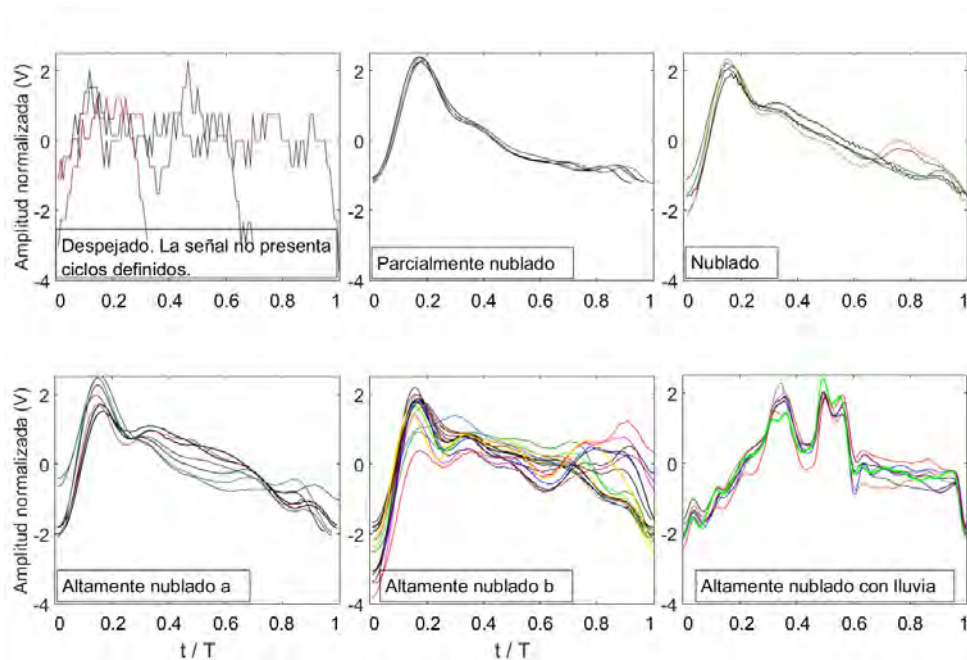


Figura 4.37: Características morfológicas de las señales para los diferentes estados de nubosidad.

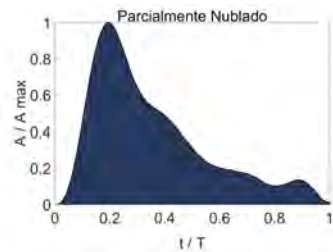
4.2.3. Cálculo de áreas bajo la curva de una señal

El área bajo la curva de cada ciclo completo (normalizado y estandarizado) fue calculada por el método del trapecio como se muestra en la ecuación 4.9. Este método es una aproximación numérica a la integral de cada curva (Miji & Ujevi, 2008).

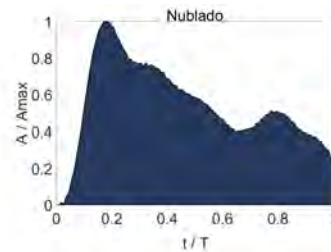
$$ABC = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \frac{1}{2}h(f_1 + f_2) - \frac{1}{12}h^3 f''(\xi) \quad (4.9)$$

En la figura 4.38 se puede observar que el área bajo la curva de una señal registrada en un día despejado (figura 4.38e) no puede calcularse debido a la aleatoriedad de la señal (la señal enviada por el emisor no es reflejada al receptor por la ausencia de nubes). Por otro lado, la señal de un ciclo completo en los registros de un día parcialmente nublado (figura 4.38a) presenta una sola cresta o pico máximo característico. Estas crestas se incrementan con la nubosidad (figura 4.38b) y las ondas presentan máximos locales característicos adicionales. Finalmente, los ciclos completos de los registros de días altamente nublados (figura 4.38c) presentan un área

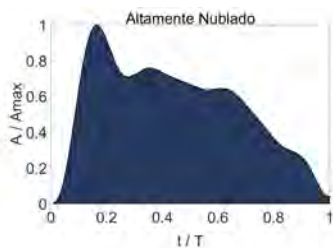
bajo la curva mucho mayor que los anteriores debido a que la magnitud de la señal aumenta a lo largo de todo el ciclo. Esta característica permitió determinar que la información relevante dentro de las señales adquiridas por el radar está en la forma de onda de los ciclos completos y no en la amplitud media del voltaje registrado, por lo que se hace necesario analizar con mayor detenimiento el área bajo la curva de cada una de estas señales.



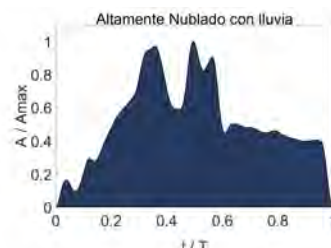
(a) Cielo parcialmente nublado.



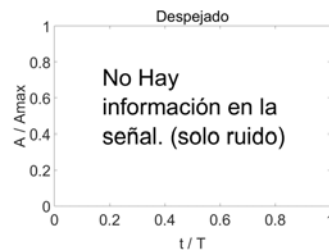
(b) Cielo nublado.



(c) Cielo altamente nublado.



(d) Evento de lluvia.



(e) Cielo despejado.

Figura 4.38: Áreas bajo la curva de ciclos completos característicos para cada estado de nubosidad.

4.2.4. Formulación de un índice de nubosidad *IN-ABC*

La consistencia en los resultados obtenidos tras aplicar los pasos anteriores, permitieron formular el *Índice de Nubosidad de Área Bajo la Curva IN-ABC* (ecuación 4.10), con el que se logró asociar un valor numérico con cada estado de nubosidad (Grajales et al., 2016a).

$$IN - ABC = \overline{ABC} \pm \sigma(ABC) \quad (4.10)$$

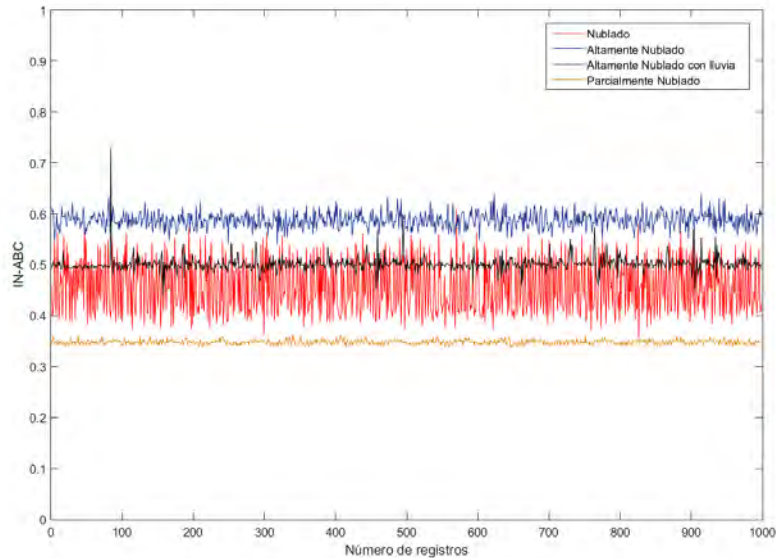


Figura 4.39: Evolución del índice de nubosidad para las señales registradas por el radar en diferentes condiciones de nubosidad.

Como se puede observar en las figuras 4.39 y 4.40, el *IN-ABC* registra rangos y valores medios característicos para cada estado de nubosidad. En registros para días parcialmente nublados el *IN-ABC* registra los menores valores, con un valor medio de 0,35 y baja dispersión. El *IN-ABC* para registros de días nublados aumenta, con valores en el rango entre 0,4 y 0,55. Esta dispersión puede deberse a la variabilidad en la densidad de las nubes y su movimiento o superposición sobre la bóveda celeste. Los valores de *IN-ABC* más elevados se obtuvieron para los registros de días altamente nublados, con un valor medio de 0,6. Finalmente, los valores de *IN-ABC* obtenidos para días con lluvia varían en el rango de 0,45 y 0,55. La disminución en el valor del

índice y la mayor dispersión obtenida respecto a los días altamente nublados, pueden deberse a que los pulsos enviados por el radar chocan con las gotas de lluvia antes que con las nubes y rebotan a alturas menos elevadas.

Cabe anotar que el *IN-ABC* no aplica para días despejados en ausencia de nubes, ya que no es posible calcularlo al no existir periodicidad en la señal.

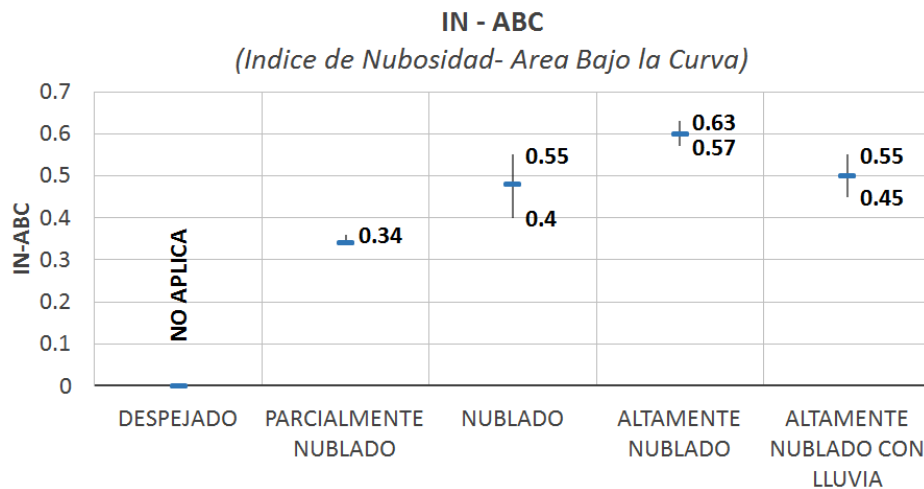


Figura 4.40: Índice de nubosidad, área bajo la curva.

Con esta información se pretende generar un método para realizar una asociación preliminar del estado de nubosidad a partir del área bajo la curva de los ciclos de las señales adquiridas por el radar. El objetivo de la metodología y los resultados dispuestos en esta sección es encontrar la relación entre las señales y su incertidumbre asociada con los escenarios meteorológicos, y luego usar esta información para establecer una relación para obtener un resultado de la medida a partir del índice *IN-ABC*. El concepto es novedoso y propio de esta investigación, fue necesario crearlo debido a que por la forma de diseño y desarrollo del radar experimental «Eco-Nube» la mayoría de metodologías existentes no se aplican adecuadamente.

4.3. Clasificación de escenarios según densidad espectral

Una vez encontrada una forma de onda definida, es necesario verificar o comprobar en que frecuencias se encuentra la señal. A pesar de estar filtrada la señal alrededor de un 1 *kHz*, la densidad

espectral de Fourier de esta, muestra un amplio rango de frecuencias que dominan aún la señal y se desconocía exactamente que frecuencias correspondían a los componentes que describían las diferentes condiciones meteorológicas. Como se puede apreciar en la figura 4.41

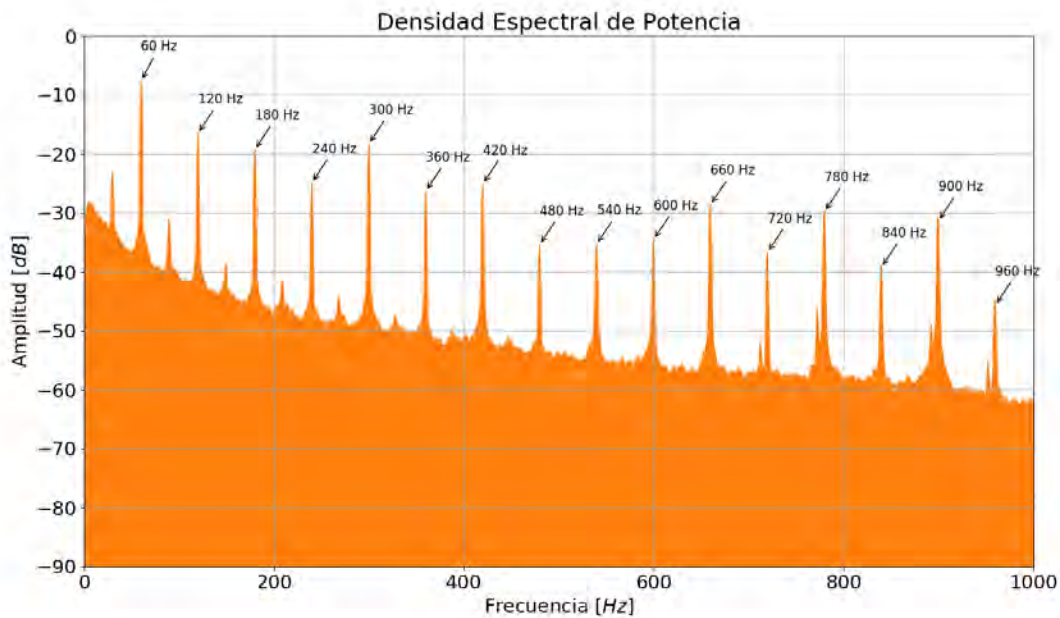


Figura 4.41: Análisis de la densidad espectral de las señales adquiridas por el radar.

Un análisis en el dominio de la frecuencia, como los que se muestran en la figura 4.41, permiten validar la señal, es decir, confirmar que se encuentre en unos márgenes de potencias y frecuencias propios a la naturaleza del radar y no de otras señales no deseadas, encontrándose alrededor de los 60 Hz y sus armónicos (120 , 180 , 240 , 300 Hz etc.), esto además permite desarrollar un método de clasificación ágil y confiable.

Si bien el análisis que se enfoca en la forma de onda de la señal es adecuado para permitir caracterizar una señal con bastante precisión, es muy susceptible al ruido, interferencias u otras señales no estacionarias. Esto se debe a que este método no permite discriminar la naturaleza de la señal y tiene problemas al momento de procesar altas cantidades de información. Es por eso que se decidió desarrollar otro método que permitiese describir grandes conjuntos de datos.

Por lo anterior, se subdividieron todos los datos con información en trozos mucho más pequeños, a cada uno de estos segmentos se le calculó la densidad espectral de potencia y se aislaron los

valores correspondientes de su frecuencia fundamental y de sus primeros 9 armónicos, como se muestra en la tabla 4.2, es decir se obtuvieron 10 valores de potencias para cada segmento y se le asociaron a su estado de nubosidad correspondiente.

60 Hz	120 Hz	180 Hz	240 Hz	...	600 Hz	Estado de Nubosidad
95.261	39.222	26.268	12.054	...	5.485	DESPEJADO
95.261	39.222	26.268	12.054	...	5.485	PARCIALMENTE NUBLADO
85.785	24.768	29.798	9.395	...	4.795	PARCIALMENTE NUBLADO
95.774	33.700	28.532	10.794	...	5.701	DESPEJADO
93.365	39.326	31.443	11.803	...	5.536	NUBLADO
92.155	25.905	2.077	11.410	...	4.998	NUBLADO
97.446	30.658	29.177	9.572	...	5.610	PARCIALMENTE NUBLADO
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Cuadro 4.2: Frecuencias discriminatorias.

Con esta información se quería generar un método que permitiese predecir el estado de nubosidad a partir de uno o varios valores de potencia. Lo primero que se pudo concluir es que se necesitaría más de una dimensión para desarrollar el clasificador. Finalmente analizando una combinación de 3 frecuencias (240, 540 y 360 Hz) (figura 4.42), es evidente que los estados se pueden agrupar en regiones de un espacio determinado por estas tres potencias. Si bien es posible implementar un clasificador que tome las 10 entradas, la finalidad de este análisis consiste en reducirlas al mínimo y determinar los espacios de frecuencias con más peso en la predicción del estado de nubosidad.

En la figura 4.43 se puede apreciar que el conjunto de datos asociado a cada condición meteorológica ocupa un espacio independiente de la gráfica. Adicionalmente estas frecuencias representan pocos traslapes entre sí. Sin embargo, la condición altamente nublado con lluvia es la que mayor dispersión en las 3 dimensiones presenta y solo se puede apreciar a través de ese análisis la ocurrencia del evento más no la cuantificación del mismo. Los gráficos y análisis realizados ratifican la existencia de diferentes escenarios de condición meteorológica, que a su vez poseen características propias que los identifican. Aunque a la señal se le pueden asociar muchos armónicos además de la frecuencia fundamental, sólo son necesarios 3 (como mínimo), para implementar métodos de predicción con una buena precisión. Un análisis en la frecuencia es mucho más

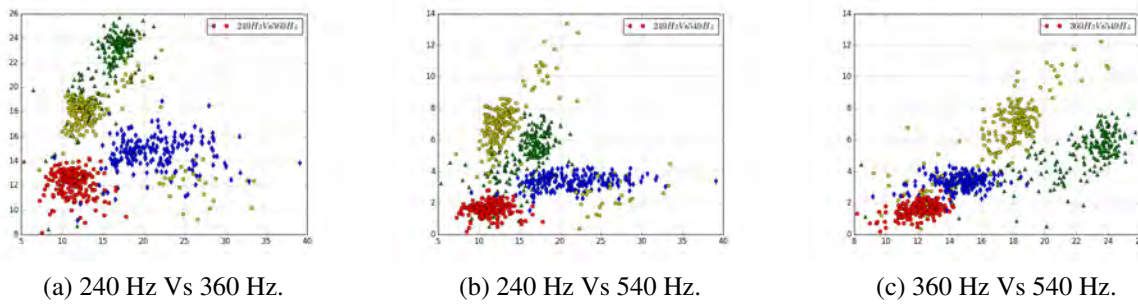


Figura 4.42: Frecuencias seleccionadas con la mejor dispersión de escenarios.

robusto, porque permite a la vez de clasificar la señal, validar el origen de la información y discriminarla de señales no estacionarias indeseadas.

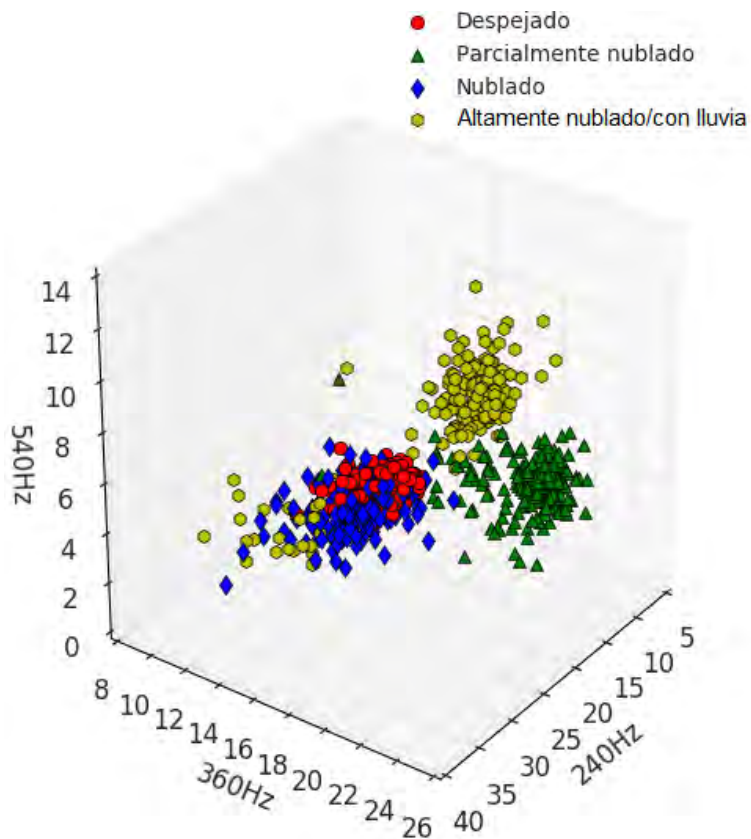


Figura 4.43: Clasificación de las señales por escenarios meteorológicos como función de la frecuencia.

4.4. Estimación preliminar de la lluvia a partir de la información del radar «Eco-Nube»

Para la estimación de la lluvia a partir de la información obtenida por el radar «Eco-Nube» se propone llevar los datos adquiridos por el radar a escala de pluviómetro a través de una calibración puntual, esto debido a la naturaleza del radar, ya que se encuentra apuntando de manera vertical y por tanto solo se tendría un único valor del pluviómetro con respecto a un único de valor proporcionado por el radar, este único valor en realidad está representado para este estudio como el conjunto de valores en dBZ coincidente en tiempo y espacio con las mediciones realizadas en tierra por el pluviómetro.

La calibración puntual mide la relación simple de reflectividad-intensidad de la lluvia, la más conocida es la ecuación 4.11 (Marshall et al., 1947) que sigue un modelo de ajuste potencial, que se basa en intervalos de tiempo, para este caso es de 5 minutos.

$$Z_{i,t} = AR_{i,t}^b \quad i = 1, 2, \dots, np \quad (4.11)$$

Donde, i es la localización espacial de la celda del radar, que corresponde con las del pluviómetros i de coordenadas (x_i, y_i) ; Z es la reflectividad equivalente en mm^6/m^3 ; R es la intensidad de lluvia registrada en mm/h ; a y b son parámetros de calibración (ajuste); np es el número de pluviómetros disponibles y t es el intervalo de tiempo (5, 10, 15 minutos).

La reflectividad equivalente se relaciona con la medida del radar meteorológico en (dB) como se muestra a continuación:

$$Z_i = 10^{\frac{dBZ}{10}} \quad (4.12)$$

4.5. Descripción de la señal de lluvia en el tiempo y la frecuencia

Con el fin de describir la señal del radar asociada a la ocurrencia de un evento de lluvia se presenta una señal típica en el tiempo y en la frecuencia lográndose apreciar la forma de onda

característica de la señal analizada y cumple con las características de ser periódica y permanecer constante en el tiempo. Por otro lado, la gráfica 4.44 que muestra la el espectro de potencia permite apreciar que la señal fue filtrada y atenuada a partir de 1 kHz , haciendo énfasis en que los retos más grandes a los que se enfrentó esta investigación fue en lograr encontrar una forma definida para el conjunto de datos de precipitación de la campaña del segundo semestre del 2015, puesto que el radar ha presentado múltiples fallas y reconstrucciones lo que ha generado variaciones en su diseño, elaboración física y electrónica, y por ende trajo repercusiones en la naturaleza de las señales adquiridas en cada una de estas modificaciones, todo esto atribuido a que es un dispositivo experimental y todavía se encuentra en una etapa de validación, sin embargo desde el procesamiento de datos se ha tratado en la medida que la información proporcionada por cada versión del radar en conservar, adaptar y estandarizar todo el conjunto de información para que puedan ser comparables.

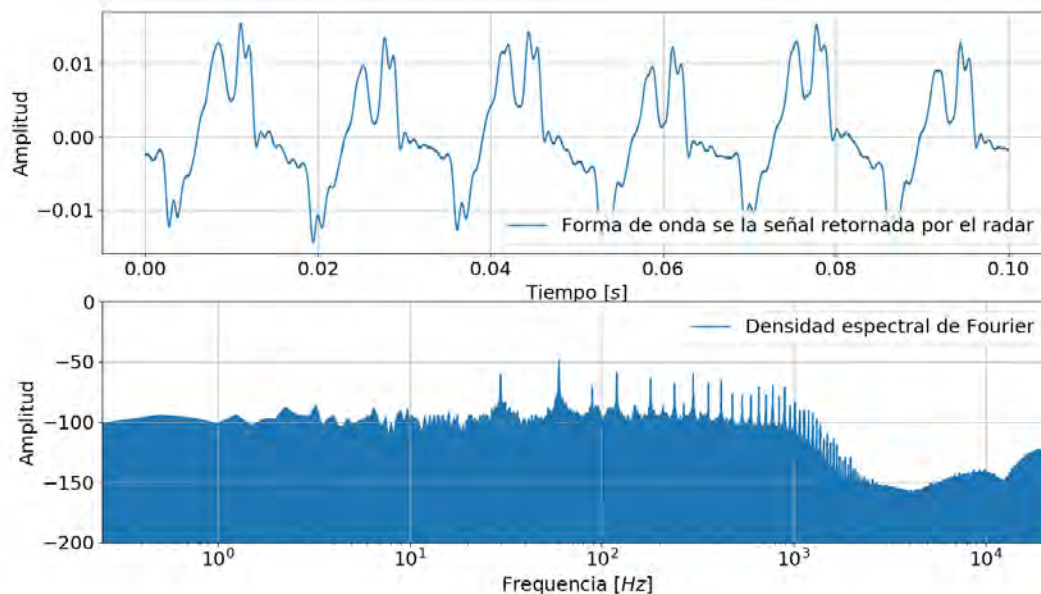


Figura 4.44: Análisis en el tiempo y la frecuencia de la señal de lluvia.

Una vez se encontró una forma de onda definida, era necesario verificar o comprobar en qué frecuencias se encontraba la señal grabada por el sistema de audio, a pesar de que se encontraba filtrada la señal alrededor de los 1 kHz , la densidad espectral de Fourier de la señal mostraba un amplio rango de frecuencias que dominaban aún la señal y se desconocía exactamente qué frecuencias correspondían a los valores de reflectividad buscados por lo que fue necesario, para

la obtención del perfil del ruido que se realizaran pruebas con el sistema de transmisión del radar apagado con el fin de registrar únicamente el ruido de fondo que debido a las condiciones naturales del sistema de adquisición registra, de esta manera es posible determinar que la potencia de las señales del ruido se encuentra por debajo de los -80 dB, Mientras que una señal típica con información de reflectividad tendrá un valor entre los -10 dB y los -50 dB, encontrándose que la información importante se encuentra alrededor de los 60 Hz y sus armónicos (120 , 180 , 240 , 300 Hz etc).

Como se observa en la gráfica 4.45 la señal únicamente con ruido de base (señal azul) presenta menos potencia alrededor de -110 dB, y contiene información en todas las frecuencias sin tener una frecuencia que domine el archivo de audio, a diferencia de la señal retornada por el radar (señal de color naranja) que presenta lobulaciones marcadas que dominan la señal, siendo el pico alrededor de 60 Hz el de mayor valor, es decir la frecuencia fundamental.

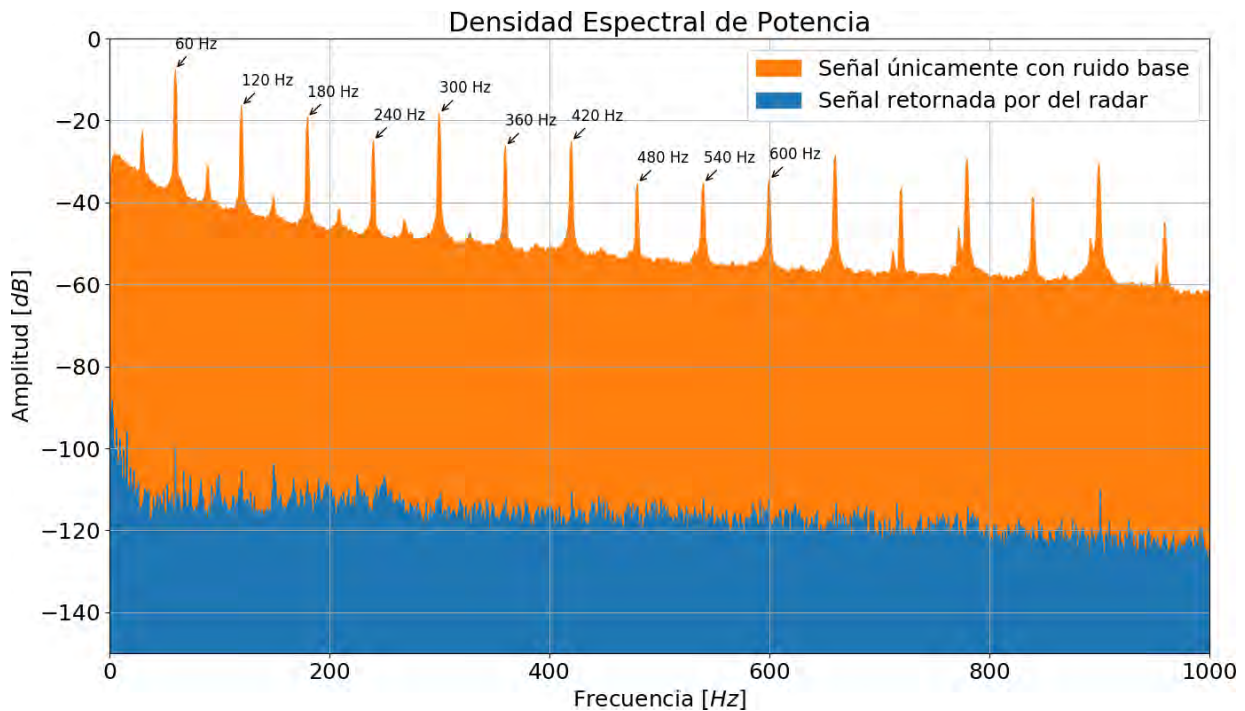


Figura 4.45: Relación señal ruido.

Un primer análisis espectral a las señales obtenidas con el radar permite confirmar que las frecuencias fundamentales que contiene la información se encuentran en torno a la banda de los 60 Hz, esto podría ser un inconveniente dado que es necesario entonces garantizar una buena

relación señal-ruido para que la recolección de datos no se vea afectada por los ruidos inherentes en la red eléctrica.

4.6. Relación Reflectividad-Intensidad

4.6.1. Según intervalos de 5 minutos

En esta investigación se cuenta con 71 pares de datos en donde se relacionan los valores de reflectividad en dBZ coincidentes en tiempo y espacio con la intensidad cada 5 minutos de los eventos de precipitación obtenidos. En la figura 4.46, se presenta la relación $Z - R$ ajustada, en donde se utilizan los valores de intensidad en mm/h correspondientes a la precipitación (mm) adquirida por la estación meteorológica *Posgrados* en intervalos de tiempo de 5 minutos para diferentes eventos de lluvia y se correlacionaron con la reflectividad obtenida por el radar «Eco-Nube» en el mismo tiempo del evento. Se utiliza la estación *Posgrados* ya que se encuentra cerca del radar «Eco-Nube». La correlación se hace para la campaña realizada durante el segundo semestre del 2015.

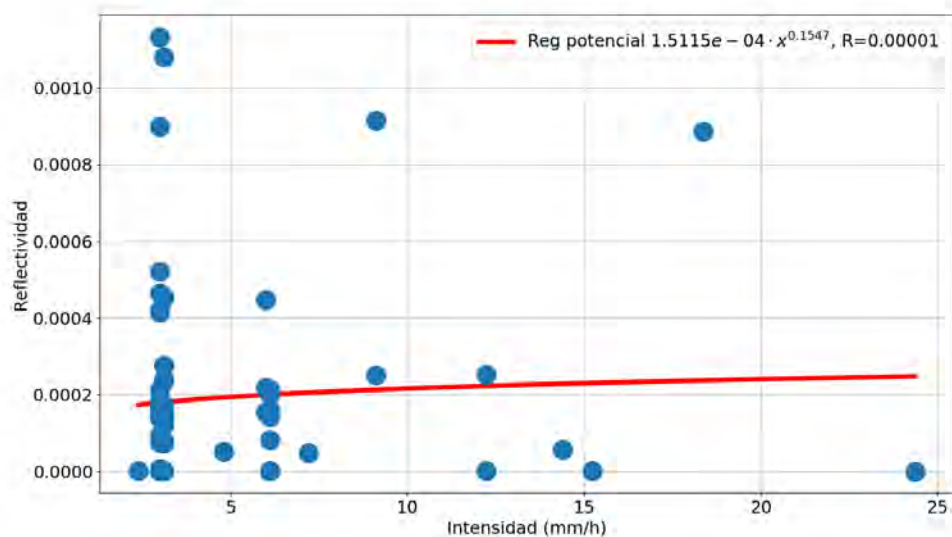


Figura 4.46: Relación Reflectividad radar (mm^6/m^3) vs Intensidad de precipitación según intervalos de 5 minutos.

En la figura 4.46 se puede evidenciar de manera visual que para un solo valor de intensidad existe un rango amplio de valores de Z asociados, esto causa que disminuya el ajuste del modelo utilizado. Se planteó como solución agrupar los valores de Z de acuerdo a los rangos de intensidad obtenidos, extrayendo del conjunto de datos de Z ya sea la media o la mediana para buscar el mejor ajuste. El resultado de este proceso se presenta en la figura 4.47, en donde se aprecian en color azul todos los valores de intensidad obtenidos de los diferentes eventos de precipitación en intervalos de 5 minutos, y en color rojo los valores agrupados de acuerdo a estos valores de intensidad, es decir, se tomaron todos los valores de intensidad iguales y se agruparon promediando el valor de la amplitud para obtener 1 solo punto. De esta manera se puede apreciar como la correlación aumenta ya que no se ve influenciada por los valores repetidos de intensidad.

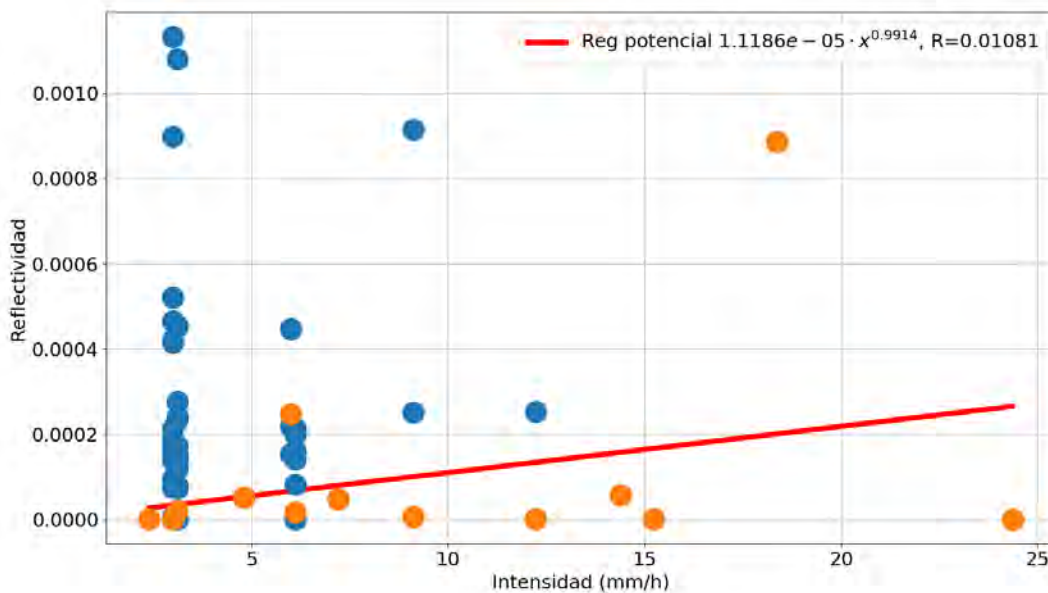


Figura 4.47: Relación Reflectividad radar (mm^6/m^3) vs Intensidad de precipitación según intervalos de 5 minutos agrupados usando la mediana.

4.6.2. Según eventos

Llevar las series de tiempo de las estaciones a una escala temporal mayor y comparar la precipitación puntual con valores de reflectividad promediados por píxeles vecinos al punto de la

estación sirven como mecanismos para reducir la incertidumbre mencionada, no obstante para este caso en particular no existen píxeles vecinos, por lo que aumentar la resolución temporal podría ser implementada para mejorar el modelo de ajuste, por lo cual se consideró la intensidad de los eventos ocurridos durante la campaña del segundo periodo del año 2015, y los valores de reflectividad como el conjunto de valores en dBZ coincidente en tiempo y espacio con los eventos de lluvia registrados por el pluviómetro. Adicionalmente se agruparon los valores de Z de acuerdo a los rangos de intensidad de los eventos, extrayendo del conjunto de datos de Z ya sea la media o la mediana para buscar el mejor ajuste. En la figura 4.48 se presentan los valores de la intensidad total de cada evento registrado y se relacionan con la amplitud promedio obtenida por el radar durante cada evento.

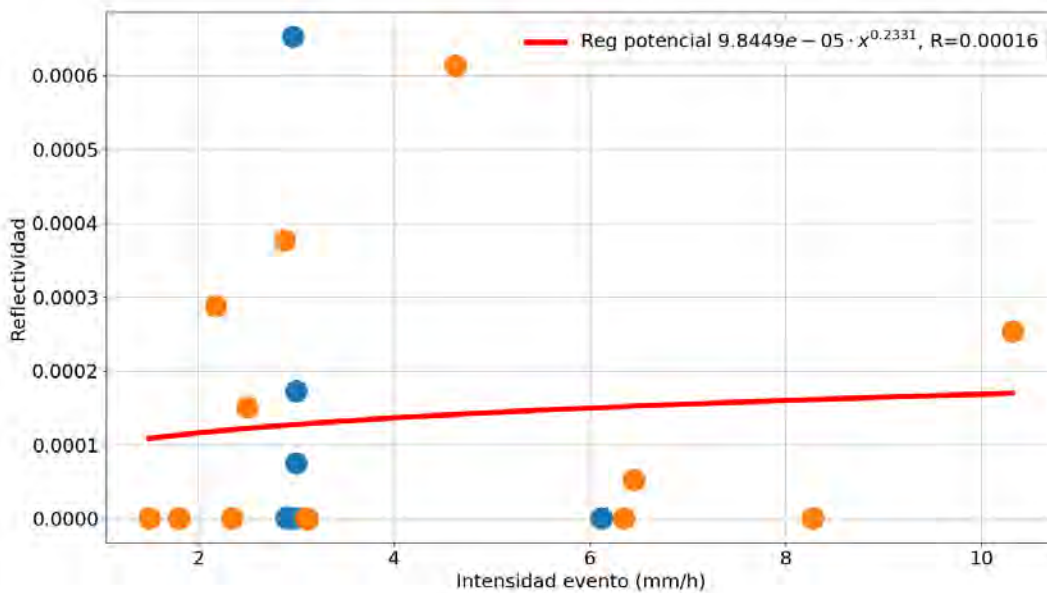


Figura 4.48: Relación Reflectividad radar (mm^6/m^3) vs Intensidad de precipitación según eventos.

Debido a que la tendencia presentada en las gráficas anteriores no muestra un buen ajuste para la determinación de los valores de a y b , fue necesario considerar otros agrupamientos como separar por valores en dBZ , esto se puede ver claramente en la figura 4.49, en se comprueba que existen dos grupos asociados a las intensidades, para valores de entre los 80 y 90 dBZ (ver figura 4.51) y para los valores de Z entre 15 y 50 dBZ (ver figura 4.50).

A continuación, en la figura 4.49, se observan los datos de precipitación acumulada en mm y la intensidad (mm/h) obtenidos para cada evento relacionados con la amplitud promedio en dB del radar «Eco-Nube» correspondientes a cada uno de los eventos.

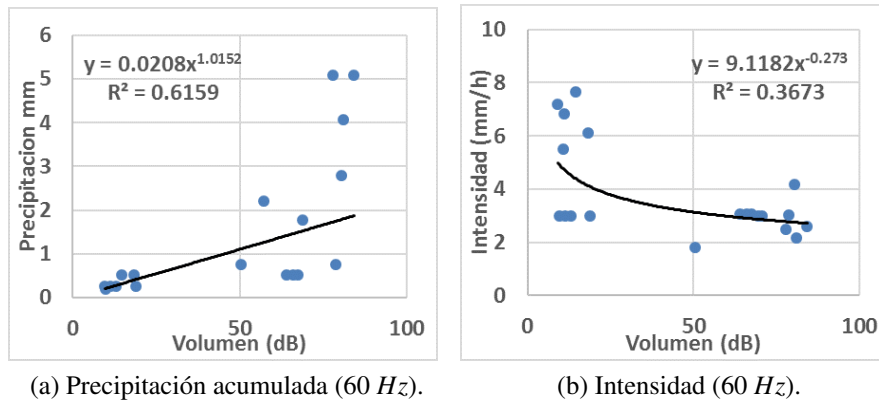


Figura 4.49: Agrupaciones ambiguas en precipitaciones e intensidades.

Partiendo de las gráficas anteriores, se procedió a agrupar los datos presentes en cada una tanto la de precipitación como la de intensidad, en 2 grupos, diferenciando cada uno por los volúmenes (dB) obtenidos en intervalos entre 80 y 90 dB grupo 1 y entre 15 y 50 dB el grupo 2. En la figura 4.50 se presentan los valores del grupo 2 correspondientes a la precipitación total de los eventos registrados con amplitud entre 15 y 50 dB.

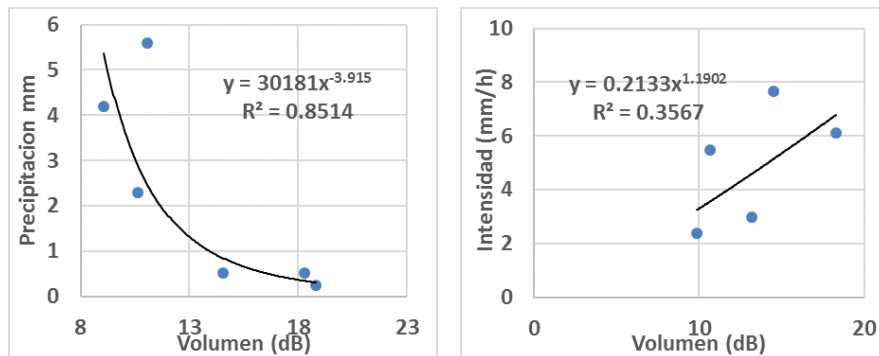
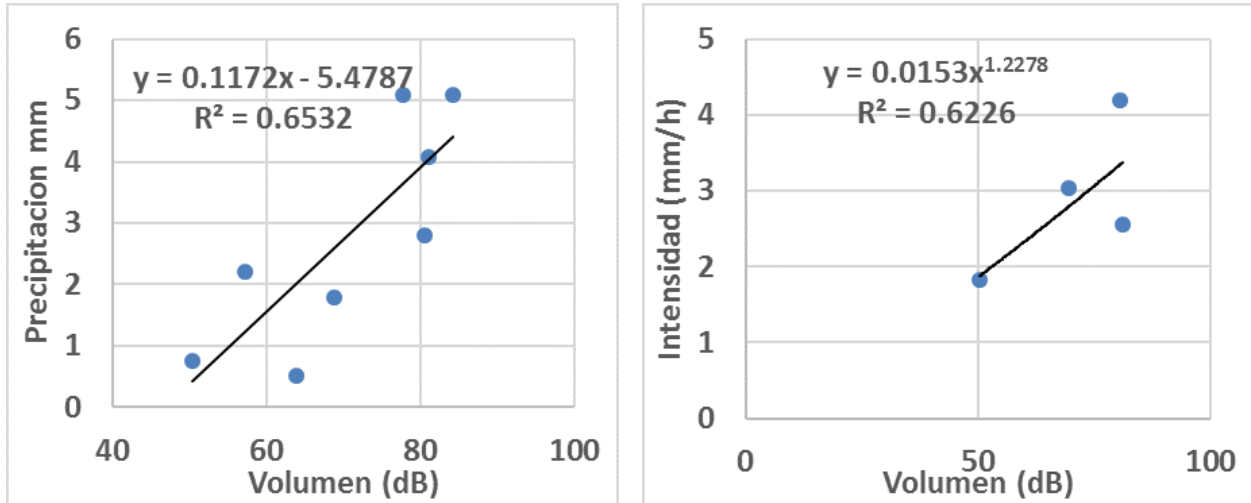


Figura 4.50: Intervalo entre 15 y 30 dB.

En la siguiente figura se presentan los datos del grupo 1 correspondientes a la precipitación

acumulada e intensidad de cada evento registrado con amplitud entre 80 y 90 *dB*.



(a) Precipitación acumulada (ejes distintos para que se pudiera graficar -dbz+100). (b) Intensidad (ejes distintos para que se pudiera graficar -dbz+100).

Figura 4.51: Intervalo entre 80 y 90 *dB*.

Una vez se llegaron a estos resultados, se hace notar que estos ajustes hacen que las metodologías y los modelos de ajuste implementados sea poco robustos, pues no se logra alcanzar una cantidad suficiente de parejas de intensidades de precipitación y reflectividad equivalente, para que el ajuste $Z - R$ sea representativo.

4.7. Determinación nuevo conjunto de pares de Reflectividad - Intensidad

Al observar que existen inconsistencias en los datos se desarrolló un algoritmo que validara que parte de la información del radar representa el fenómeno físico, y que parte no, es decir cuando el radar funcionaba correctamente y cuando no. Este análisis se realizó para todas las señales y se extrajo los tramos de lluvia de la nueva información en la que si existe señal y se crearon nuevamente pares de $Z - R$ coincidentes en tiempo y espacio.

Al encontrarse para un único valor de intensidad diferentes valores en la medida del radar, se realizó un análisis más detallado de cada uno de los archivos de cada señal de lluvia con el fin de encontrar diferencias significativas que validaran que ambos valores obtenidos eran verídicos o que por el contrario presentaran inconsistencias.

Del análisis se logró establecer que dentro de las señales existían tramos en donde la amplitud de la señal en el tiempo presentaba valores muy pequeños en comparación con la amplitud promedio de valor absoluto de la señal (ver figura 4.52), los cuales podrían considerarse como interrupciones del sistema, lo cual podría deberse a un mal funcionamiento del radar e inestabilidad del sistema, trayendo consigo una nueva fuente de incertidumbre a las medidas realizadas puesto que el sistema fallaba constantemente pero no fue posible detectar dicha características dentro de la señal sino después de este análisis, por lo que para la nueva versión del radar será uno de los primeros puntos a mejorar.

La figura 4.52 trata de representar los eventos que intenta corregir el algoritmo mencionado, en donde se presenta una señal con interrupciones (resaltados de color rojo), estos son tramos en donde los valores promedio de amplitud son muy cercanos a 0 o se encuentran por debajo del valor promedio absoluto la señal.

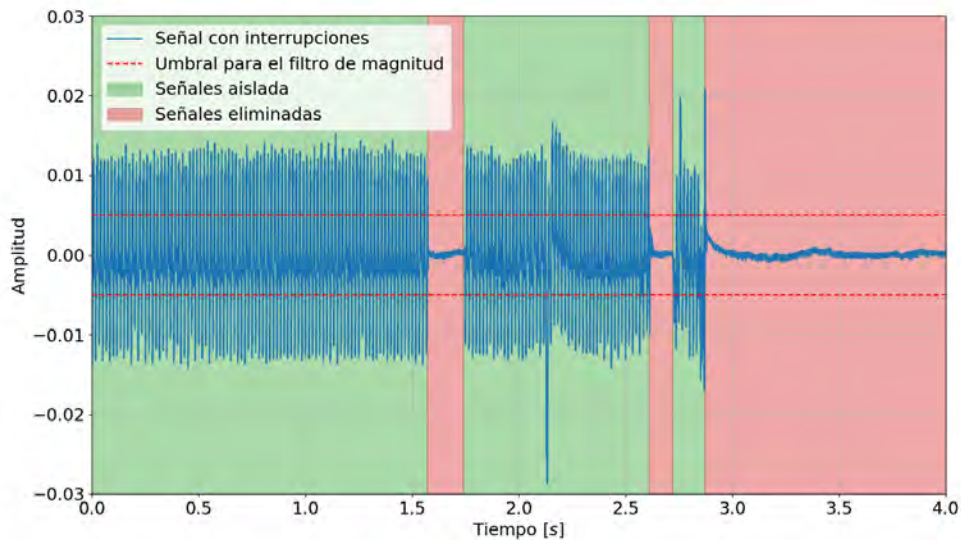


Figura 4.52: Análisis de las interrupciones en la señal respecto al tiempo.

Los tramos con interrupciones no son periódicos, además son de diferentes tamaños por lo que

podrían ir del orden del segundo, minutos hasta de horas completas de grabación, por lo que se presentan a lo largo de la señal y en todas las señales analizadas. Este comportamiento hace más complejo su eliminación dentro de las señales analizadas por lo que en primera instancia se eliminaran de los archivos de grabación los tramos mayores a un minuto de grabación, lo que implica que en ocasiones se tengan los archivos de radar y de pluviómetro coincidentes en tiempo y en espacio, pero la información registrada por el radar no fue adquirida correctamente y deben ser eliminados, en consecuencia, se tiene un número menor de pares de datos de $Z - R$.

El método anterior elimina los tramos grandes en donde no hay señal, aun así, quedan tramos mucho más pequeños los cuales los cuales también deben ser suprimidos, además, de posibles tramos con señales de una naturaleza diferente a la del radar, estos tramos tienen la característica de no poderse filtrar observando simplemente la amplitud de la señal, se hace necesario entonces necesario evaluar la densidad espectral de potencia y decidir si contiene información. El método planteado para esta última selección de datos consiste en hacer uso del enventanamiento tipo *Hanning*, con ventanas de tamaño igual a la tasa de muestreo, antes de ponderar todas las ventanas se analiza cada una por separado para determinar si el espectro de potencia corresponde a uno con información del radar, esto se realiza simplemente calculando su frecuencia fundamental la cual debe de estar en torno a los 60 Hz o en algunos casos en uno de sus armónicos, las ventanas que no pasan este filtro se eliminan y la densidad espectral de potencia final se pondera teniendo en cuenta únicamente las ventanas restantes.

En la gráfica figura 4.53 se observa cómo funciona este método en comparación con la densidad espectral de potencia clásica, para ello se seleccionó una señal que presenta interrupciones y señales no estacionarias de alta potencia, el enfoque clásico no permite calcular un espectro con potencias confiables, esto porque pondera las potencias de las interrupciones de señal y otras de otras señales no estacionarias, sin embargo el método con validación de datos únicamente tiene en cuenta los tramos de señal que con cierta confiabilidad contienen información.

Una vez se ha realizado el proceso anterior se tiene como resultado se tiene paquetes de señales con información de reflectividad asociadas a intensidades de 5 minutos de eventos de lluvia, Es de resaltar que después de implementar este proceso en 71 pares de $Z - R$ la población se redujo a tan solo 54 pares.

Una vez se adquirió este nuevo conjunto de datos se evaluó diferentes correlaciones no solo con los dBZ si otras variables que se pueden derivar de dichas señales y poderlas correlacionar con la intensidad de la lluvia.

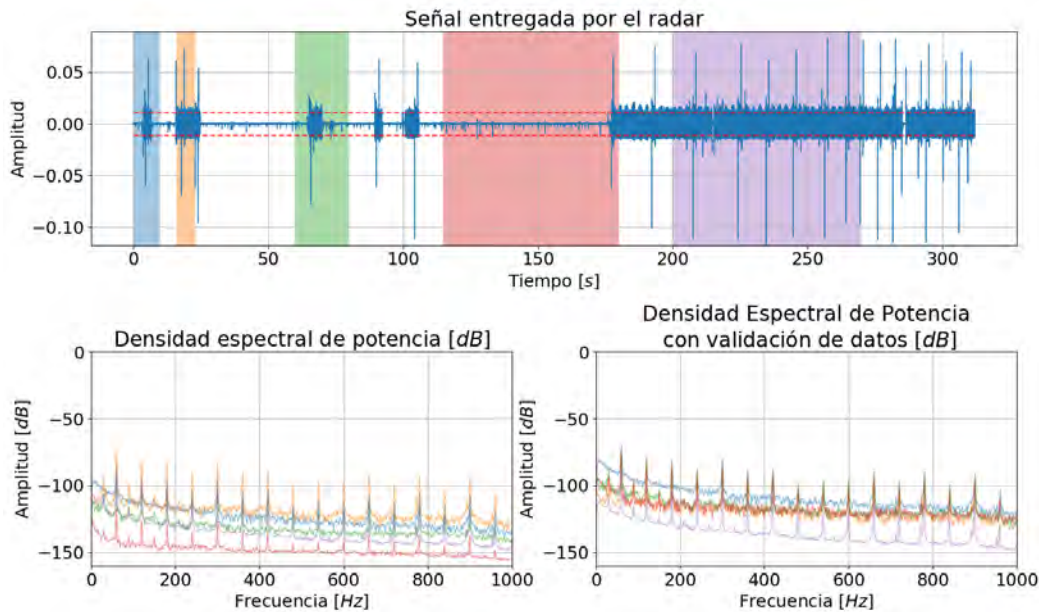


Figura 4.53: Análisis de la densidad espectral por tramos sobresaltados. Evaluación de la influencia de la presencia de interrupciones con respecto a la frecuencia.

4.8. Correlación entre las variables derivadas de las medidas del radar y la Intensidad de la lluvia

El objetivo de esta sección es minimizar el error entre los datos tabulados y la aproximación usada para representar los datos, por lo cual se evaluó diferentes modelos de regresión por mínimos cuadrados: regresión lineal, exponencial, logarítmica y potencial, esta última representa los métodos convencionales de cálculo, no obstante, como esta investigación se basa en un prototipo de radar experimental, se quería evaluar otras alternativas con el fin de obtener el mejor ajuste y desarrollar estrategias de estimación cuantitativa de la precipitación que sean representativos para las condiciones propias de la zona de estudio y del dispositivo diseñado.

Los resultados se presentan a continuación (figuras 4.54 a 4.59) en donde se presentan en color azul todas las parejas de puntos disponibles de $Z - R$, en color rojo se presentan las medianas por intervalos de intensidad (abscisas) según describe (Supúlveda Berrío 2015), a partir de los cuales parten los ajustes por mínimos cuadrados de la regresión lineal (línea de color verde), regresión potencial (línea de color rojo), regresión exponencial (línea de color amarillo) y de la regresión logarítmica (línea de color magenta).

4.8 Correlación entre las variables derivadas de las medidas del radar y la Intensidad de la lluvia 97

El color azul que representa todas las parejas de puntos disponibles de $Z - R$, se hace más intenso a medida que los pares de $Z - R$ se superponen, esto se hace con el fin de ilustrar en donde se concentra la mayoría de la información y a que valores tienen los diferentes valores de reflectividad respecto a las intensidades analizadas.

Los coeficientes de la relación $Z - R$, son calculados a partir de la dispersión de puntos entre la reflectividad Z y la intensidad de precipitación considerando todas las parejas de puntos disponibles, a pesar de que se aplicaron diferentes metodologías para disminuir el error y la incertidumbre asociada al conjunto de datos, se presentan datos atípicos que se salen del comportamiento del conjunto de datos similares alterando la tendencia de conjunto de datos en general, sin embargo se aprecia una notable mejoría en la dispersión de los datos asociados a cada valor de intensidad, después de haber eliminado los huecos dentro de las señales, generando de ante mano un mejor ajuste y logrando así obtener una ecuación que describa el comportamiento de la tendencia. Lo anterior justifica la necesidad de calcular la mediana del conjunto de datos asociados a cada valor de intensidad (representado por los puntos rojos en la figura y ajustar las regresiones por mínimos cuadrados al conjunto de datos generado a partir de las medianas obtenidas.

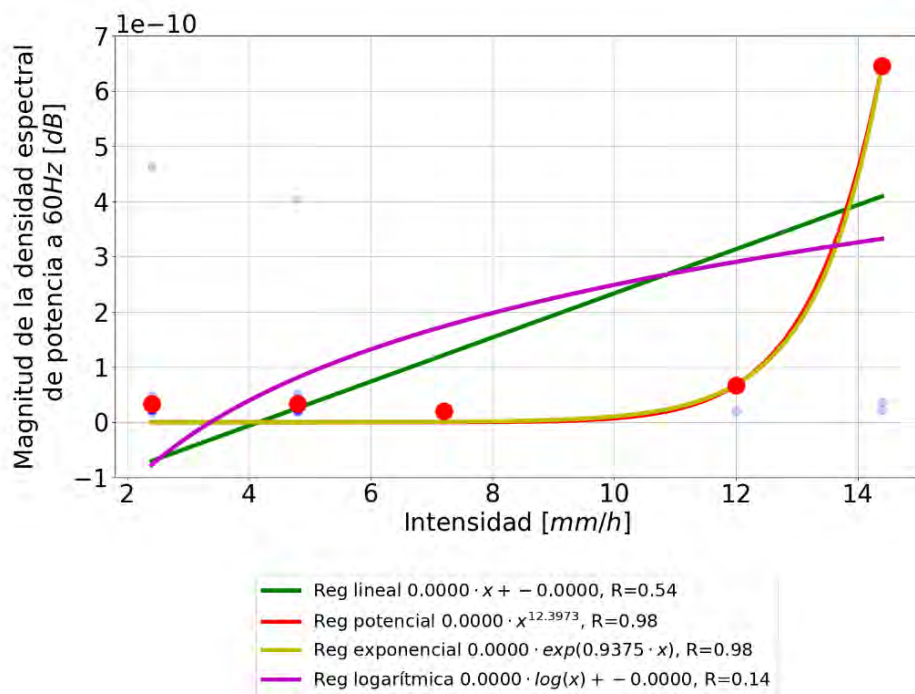


Figura 4.54: Regresiones según la magnitud de densidad espectral de potencia en decibeles y la intensidad.

La figura 4.54 se describe la relación existente entre la magnitud de la densidad espectral de potencia al cuadrado a 60 Hz (dB) y la intensidad (mm/h), en donde se puede apreciar que para las regresiones potenciales y exponenciales, el coeficiente de determinación tiene valores altos de $R^2 = 0,98$, adicionalmente de manera visual se puede apreciar un ajuste de los pares de $Z - R$ correspondientes a las medianas por intervalos de intensidad, la regresión lineal tiene un ajuste aceptable, mientras que la regresión logarítmica no describe el conjunto de datos.

En la figura 4.55, se describe la relación existente entre la magnitud de la densidad espectral de potencia a 60 y la intensidad (mm/h), en donde se puede apreciar que las correlaciones realizadas con la densidad espectral son mejores, aunque para este caso las regresiones lineal, potencial y exponenciales son aceptables, los coeficientes de determinación calculados tiene valores medios alrededor de $R^2 = 0,6$, mientras que el ajuste por regresión logarítmica no describe de una manera adecuada el conjunto de datos.

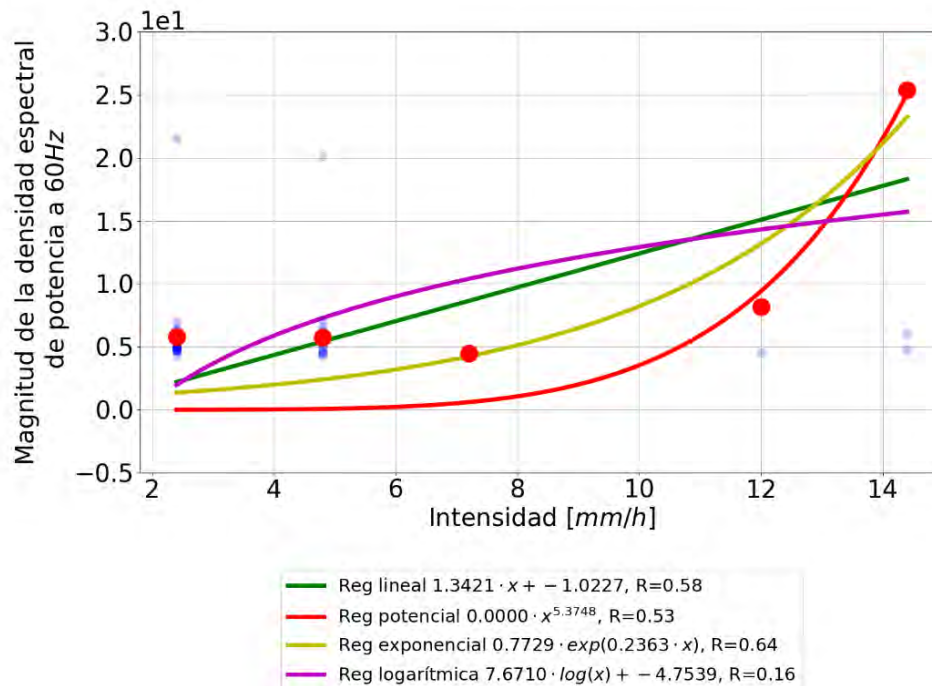


Figura 4.55: Regresiones según la magnitud de densidad espectral de potencia y la intensidad.

En las figuras 4.56 y 4.57 se ilustra la relación existente entre media, la mediana, de la amplitud de la señal en el tiempo y la intensidad (mm/h), sin embargo los datos no pueden ser explicados por los modelos, y esto se puede validar en los bajos valores del coeficiente R^2 y el pobre ajuste

4.8 Correlación entre las variables derivadas de las medidas del radar y la Intensidad de la lluvia

visual, y esto puede ser debido a que existe para un solo valor de intensidad un rango amplio de valores de amplitud asociados, por lo que esta variación no ha sido posible ser atenuada con las metodologías implementadas disminuyendo los modelos de ajuste como consecuencia.

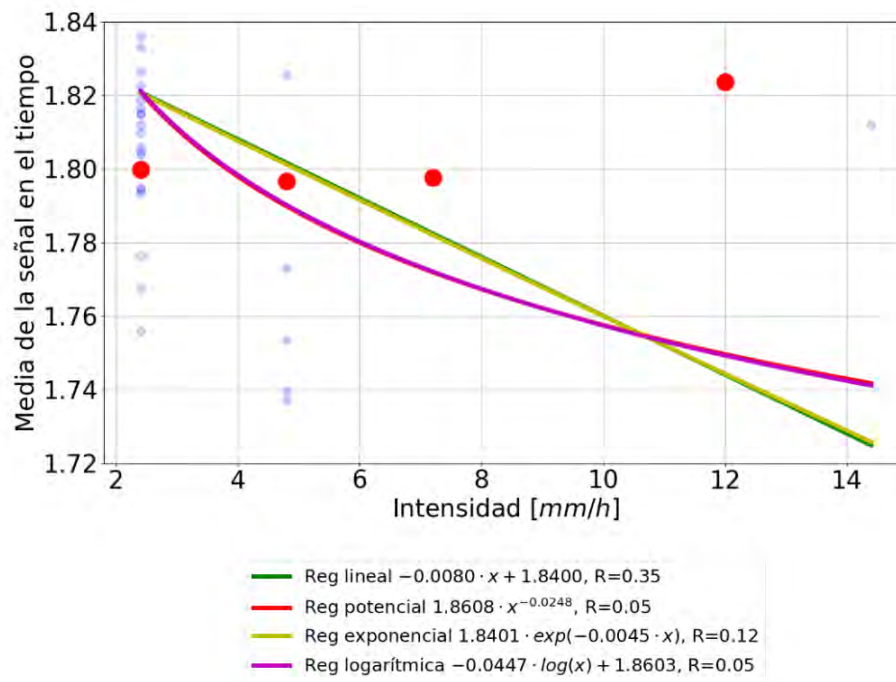


Figura 4.56: Regresiones según la media de la señal en el tiempo y la intensidad.

En la figura 4.58 se puede apreciar que hay una relación lineal entre la intensidad de la señal y la desviación estándar de la señal en el tiempo con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,69$, entendiéndose que a medida que la intensidad de la lluvia aumenta también la dispersión de los datos adquiridos por el radar lo hace.

En la figura 4.59, se describe la relación existente entre centroide espectral y la intensidad (mm/h), entendiéndose que el centroide espectral es la potencia que más se repite dentro de las componentes de frecuencia de la señal, se puede notar como la mejor distribución de los datos de esta relación es lineal y directamente proporcional, es por eso que el mejor coeficiente de determinación corresponde propiamente a la regresión lineal de $R^2 = 0,64$.

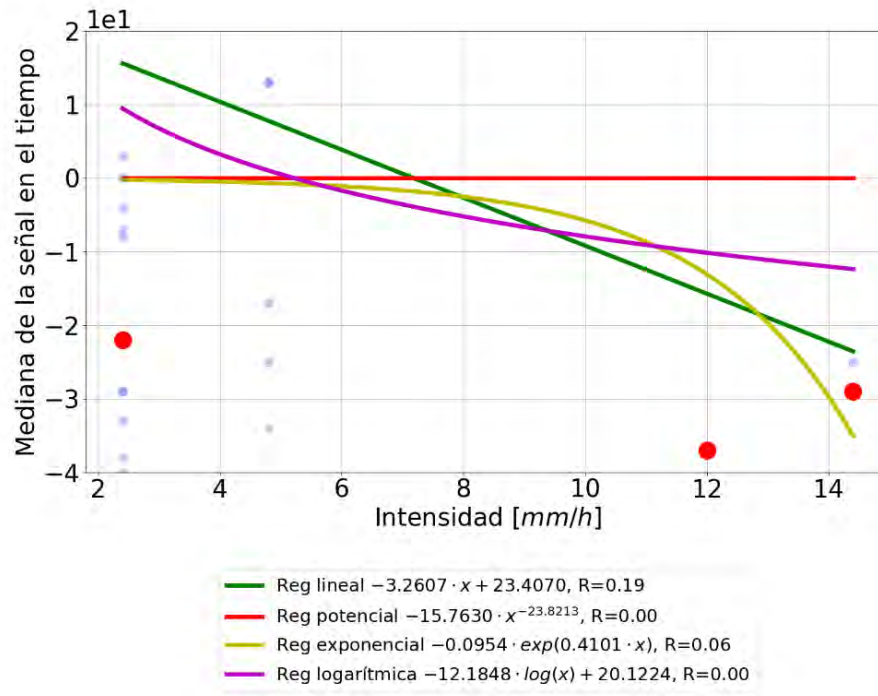


Figura 4.57: Regresiones según la mediana de la señal en el tiempo y la intensidad.

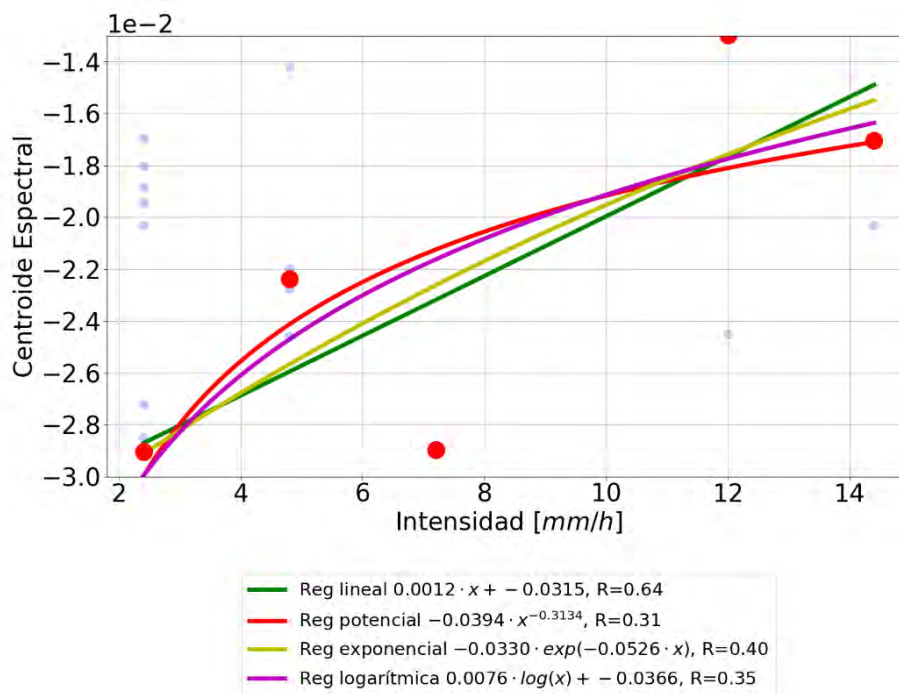


Figura 4.59: Regresiones según el centroide espectral.

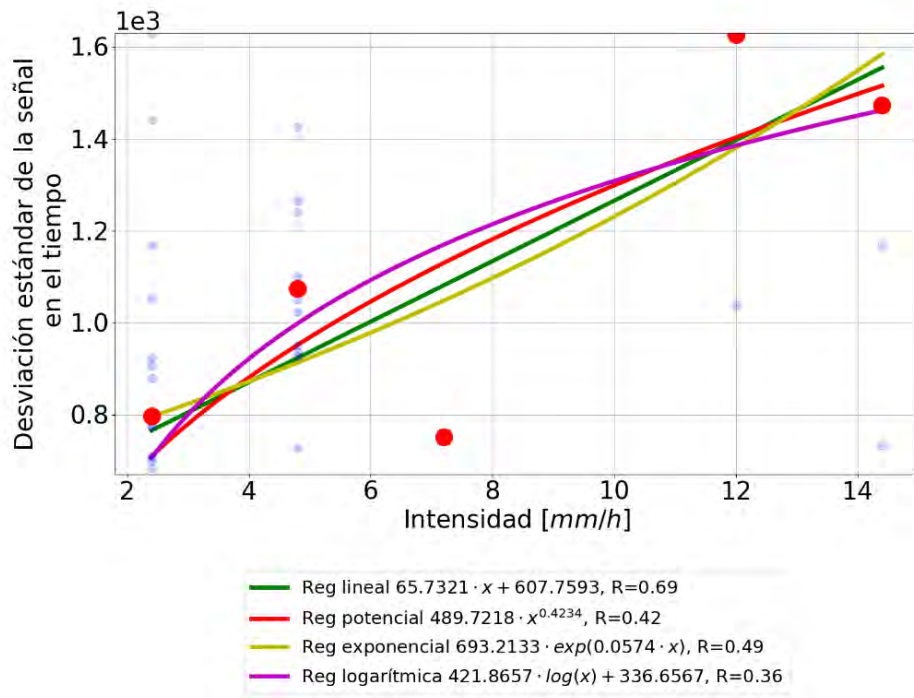


Figura 4.58: Regresiones según la desviación estándar de la señal en el tiempo y la intensidad.

La relación $Z - R$ fue calculada en base a las intensidades registradas por las estaciones *Hospital* y *Posgrados*, pertenecientes a la red de monitoreo meteorológico de Manizales, no obstante la estación *Hospital* presenta un mayor ajuste a los valores de reflectividad, que la estación *Posgrados* a pesar de que esta se encuentre más cercana a la estación de radar, esto debido a que se presentaron inconsistencias en el correcto funcionamiento de la misma durante el periodo de adquisición de las señales por lo que se presentaron eventos de lluvia que la estación no registró disminuyendo el número de pares de $Z - R$ y adicionalmente sesgando el conjunto de datos a valores bajos de intensidad y a poca variabilidad de la misma por lo que no se tiene una cobertura adecuada de los valores de intensidad para lograr un ajuste, en consecuencia las gráficas 4.54 a 4.59 presentan la relación $Z - R$ ajustada, en donde se utiliza la intensidad de precipitación de la estación *Hospital* y los diferentes valores obtenidos por la estación de radar «Eco-Nube» para la campaña realizada en el segundo semestre del 2015.

4.8.1. Ecuación experimental para la calibración del radar «Eco-Nube»

Para determinar la calidad que los modelos matemáticos planteados a través de las regresiones aplicadas anteriormente, se tiene como referencia el coeficiente de determinación R^2 que es un estadístico con el que se determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo. El coeficiente de determinación puede tomar valores entre 0 y 1, entre más cercano a 1 mayor será el porcentaje de datos explicados por el modelo, y por ende un mejor ajuste.

Finalmente se encontró que de los 6 métodos para reducir la información de radar a un único valor por cada intervalo de 5 minutos de lluvia se tiene que la variable que presenta una relación que se puede describir a través de una función es la de la reflectividad, ver figura 4.60, puesto que cuenta con el coeficiente de determinación más elevado, lo que ratifica un buen ajuste. Por lo cual se logró establecer una relación potencial donde los parámetros $a = 2,81^{-24}$ y $b = 12,3973$.

$$Z = 2,81^{-24}R^{1,3973} \quad (4.13)$$

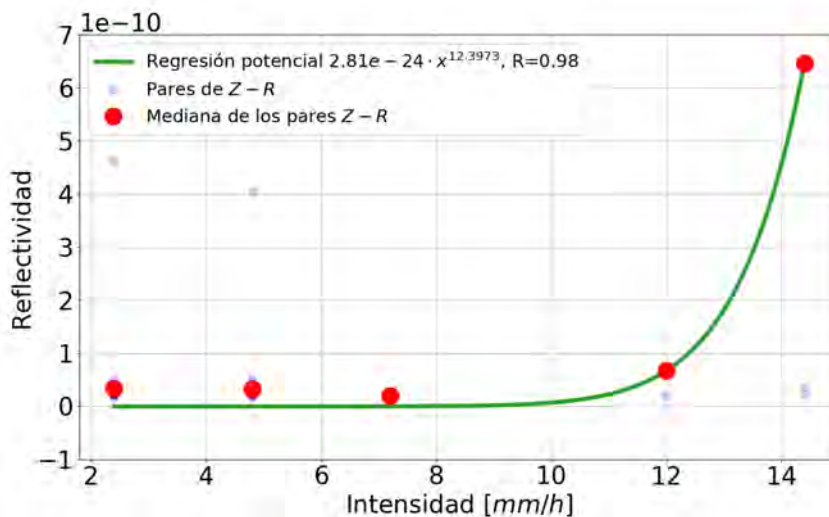


Figura 4.60: Mejor regresión obtenida según la reflectividad y la intensidad.

Para precisar la relación se hace necesario un factor que ajuste la escala en el eje vertical a valores reales de Z , no obstante, los valores usados para determinar esta relación no contaban con los

4.8 Correlación entre las variables derivadas de las medidas del radar y la Intensidad de la lluvia

pares correspondientes de reflectividad obtenidos con un radar meteorológico calibrado, por lo cual no es posible en el desarrollo de este trabajo su determinación, de modo que la relación final debe quedar indicada mediante una constante C , es decir:

$$V_{DFT^2} = Z = C * DFT(X_n)_{60Hz}^2 \quad (4.14)$$

Agregando C a la ecuación de reflectividad definida, obtenemos la ecuación final:

$$Z = C * (2,81^{-24} R^{12,3973}) \quad (4.15)$$

4.8.2. Error en la estimación de la precipitación

Para medir el desempeño de la regresión potencial se decidió usar el error absoluto porcentual (4.16) en donde Y_{oi} corresponde a los datos observados y Y_{mi} a los datos estimados mediante la función obtenida de la regresión potencial (Sepúlveda Berrío, 2015).

$$EAP = \frac{|Y_{oi} - Y_{mi}|}{\sum_{i=1}^n Y_{oi}} \quad (4.16)$$

En la figura 4.61 se presenta la comparación entre el ajuste reflectividad vs intensidad con y sin validación de los datos, en donde se puede apreciar que sin validación de los datos el ajuste potencial de las medianas de los pares $Z - R$ es de 0,22, mientras que con validación este ajuste se incrementa a 0,98.

En la figura 4.62 se observa el histograma con la distribución de los errores y aunque su densidad se concentra casi totalmente para frecuencias de errores menores al 100, existen estimaciones con errores muy altos que optimizando el algoritmo de validación de datos tiendan a desaparecer y se consideran como valores outlier sin confirmar su veracidad, aunque se trata únicamente de un valor de entre todas las observaciones, estos valores extraños que se salen del rango de los datos observados, no afectan en gran medida, las regresiones anteriormente calculadas debido a que para estas los datos se agruparon según su mediana.

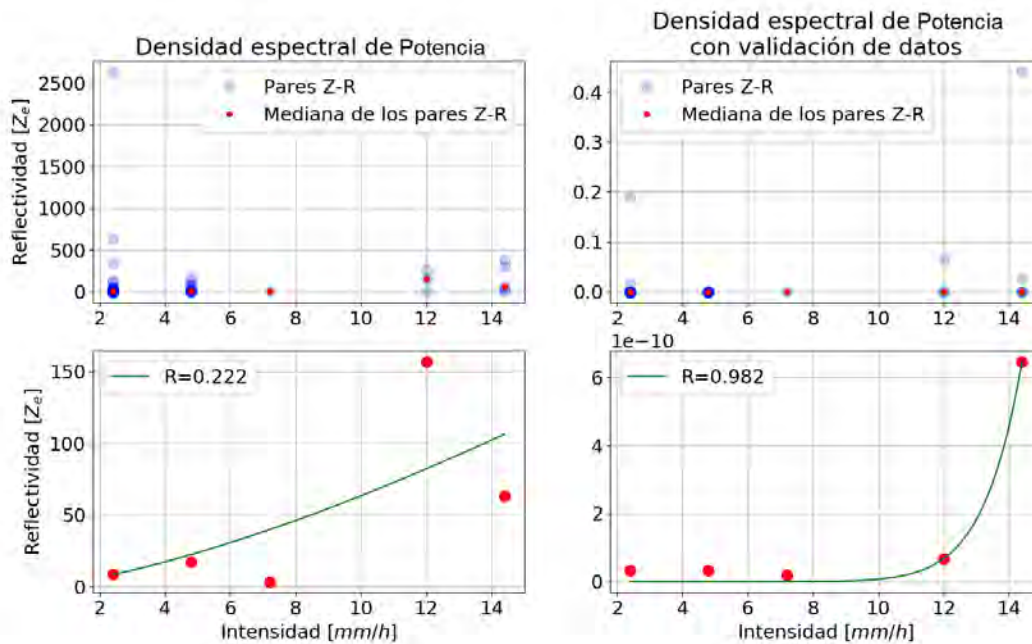


Figura 4.61: Comparación de ajuste potencial de las medianas de pares Z-R con y sin validación de los datos.

Estos errores recalcan el componente preliminar de esta ecuación determinada, y establece que los valores obtenidos a través de esta, no pueden considerarse verídicos y requieren de una mayor toma de datos, que a su vez representen y abarquen un gran campo de intensidades con valores propios de la región para así, ratificar o negar esta tendencia potencial de los datos. Adicionalmente que el radar funcione correctamente y que se modifiquen y solucionen los inconvenientes, mencionados dentro de esta investigación y que contribuyan al prototipo a funcionar de una manera más adecuada, optimizando a su vez, los procesos de adquisición y registro de los datos.

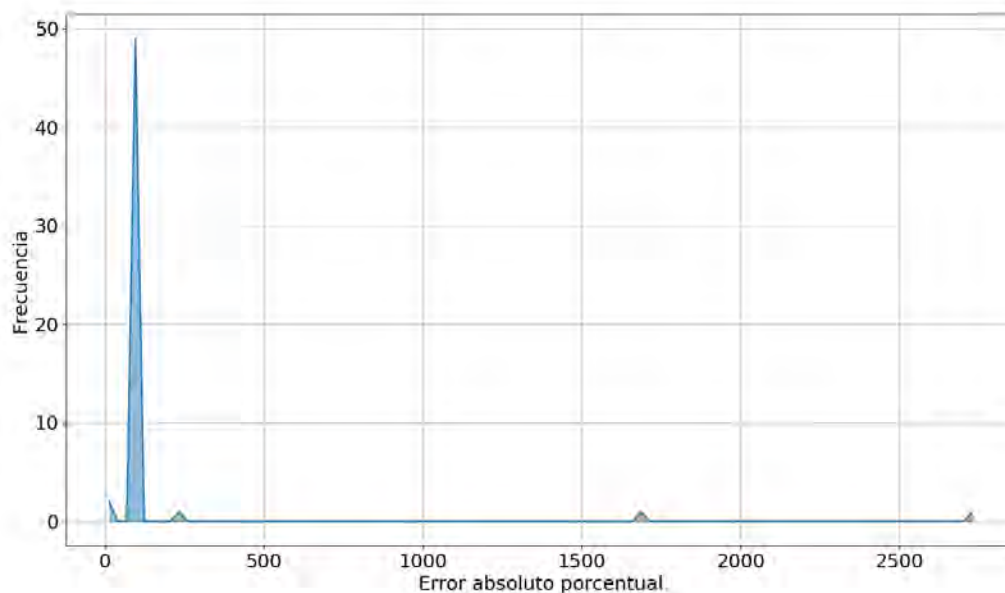


Figura 4.62: Distribución de los errores.

4.9. Conclusiones del capítulo

Para la clasificación de los estados de nubosidad se pudo determinar 3 armónicos de la frecuencia fundamental (240, 360 y 540 Hz) que permiten construir un gráfico de dispersión lo suficientemente discriminatorio y dejar abierta la posibilidad de derivar un clasificador basado en machine learning para cuando se cuente con un conjunto de datos lo suficientemente grande.

Se puede determinar un método que permite relacionar la potencia de la señal en un armónico específico con la reflectividad Z , esto principalmente por la misma reflectividad esta relacionada con la potencia reflejada de vuelta al radar.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

- A través de esta tesis se logró en una primera instancia asociar las medidas tomadas por el radar a diferentes condiciones de nubosidad permitiendo discernir cuando se presenta un estado u otro en base a la forma de onda de la señal y del área bajo la curva; en una segunda instancia se consiguió establecer una ecuación empírica que describe la relación existente entre la intensidad de la lluvia y la reflectividad del radar. Sin embargo es importante resaltar que esta ecuación es preliminar y que requiere mayor investigación y estudio.
- En esta investigación se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de las formas de onda recibidas por el radar experimental «Eco-Nube» en diferentes campañas de ensayos. Se analizó la estacionalidad de las señales y se pudo comprobar que los registros presentan un comportamiento diferente dependiendo de la condición de nubosidad predominante. También se comprobó que las variaciones y atenuaciones en la amplitud de voltaje y en longitud de onda de la señal son mayores a medida que aumenta la nubosidad lo que permitió su clasificación.
- Se pudo comprobar que los estados de nubosidad de las señales adquiridas por el radar se pueden cuantificar en función de la magnitud del área bajo la curva de un periodo completo de la forma de onda, luego de los procesos de filtrado, normalización y estandarización, demostrando que esta magnitud se incrementa a medida que aumenta la nubosidad.
- Se estableció que en días despejados, con ausencias de nubes, el receptor sólo registra ruido. Esto se debe a que la señal enviada por el radar no se encuentra con hidrometeoros en su trayectoria y esta no se refleja al receptor.

- Uno de los aportes mas importantes de este trabajo fue poder cuantificar la nubosidad a través del IN-ABC, debido a que se logró atribuirle características numéricas a la determinación de los estados meteorológicos, los cuales tradicionalmente están sujetos a la percepción subjetiva del observador.
- La relación entre la intensidad de la lluvia y la reflectividad medida por el radar fue establecida de forma preliminar, presenta una tendencia potencial con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,98$ para el ajuste de las medianas de los pares de Z (Reflectividad) - R (Intensidad) disponibles por intervalos de intensidad de 5 minutos, lo que implica que un alto porcentaje de los datos es explicado por el modelo matemático. No obstante, existe un alto grado de incertidumbre asociado al proceso experimental y al intervalo temporal de lluvia monitoreado, que hace que la ecuación de calibración sea preliminar y que requiera la adquisición de un mayor número de pares de $Z - R$ a una diferencia del tiempo menor, a través del sistema de radar.
- El número de pares de datos de $Z - R$ es uno de los componentes que aporta mayor incertidumbre a los modelos de ajustes implementados, sin olvidar que factores como las mediciones del radar y las mediciones del pluviómetro in situ, son afectados por diferentes factores como la adveración de los hidrometeoros al caer, la agregación o disgregación o cambio de fase que contribuyen adicionalmente a aumentar la incertidumbre.
- Debido a que el dispositivo se encuentra aún en estado de prototipo la señal tiene interrupciones a lo largo del tiempo cuya causa aún no se ha establecido completamente, podrían atribuirse a los sistemas de alimentación del radar y del computador, interrupciones eléctricas, cables susceptibles a ruidos externos, deterioro por la acción de la intemperie, etc. Durante el periodo de desarrollo de la investigación el funcionamiento del radar se vio afectado por estos fallos, principalmente los datos adquiridos en las campañas de recolección del 2016 que no los hace confiables para realizar una calibración preliminar, por este motivo se ha trabajado con la información de las campañas del 2014 y 2015 que son las que presentan mejores condiciones en su adquisición.
- Los resultados obtenidos requieren de una validación e investigación profunda, a través de la adquisición de un mayor número de señales para las cuales se debe garantizar una homogeneidad en las medidas realizadas por el radar y que su diseño como dispositivo preserve las mismas características sin alterar el conjunto de datos, adicionalmente obtener una cobertura de todos los rangos de intensidad debido a que la campaña del 2015 se

segmentó en valores bajos con muy pocos datos de intensidad mayor debido a la ocurrencia de un fenómeno *ENSO* en su fase de *El Niño* durante la campaña.

- Debido a que el modelo de funcionamiento del radar experimental «Eco-Nube» no sigue al de los radares convencionales se vio la necesidad de desarrollar un conjunto de nuevas metodologías de análisis que describan la naturaleza de la señal de acuerdo a las características propias del dispositivo y que permitan extraer la información del fenómeno analizado.
- Se demostró que es posible implementar un radar de exploración que use microondas sin la necesidad de equipos computacionales que responda a las altas frecuencias de muestreo que son requeridas para su manipulación, esto mediante la implementación de moduladores que muevan las frecuencias de operación a niveles admitidos por los sistemas de adquisición de señales básicos, sin embargo la utilidad estaría limitada a calcular únicamente la reflectividad, otros parámetros como la medición de la altura y velocidad de las nubes quedan fuera de su alcance.
- Para este prototipo de radar nunca se contaron con las características típicas de funcionamiento de todo radar, apenas si se tenía la frecuencia de operación, otros valores fundamentales como la potencia de envío de las microondas, el área de cobertura, la ganancia del receptor, las polarizaciones, entre muchos otros, nunca se calcularon, principalmente porque no era la finalidad de este trabajo, por lo cual se plantea como tema de profundización desde el punto de vista electrónico y de mejoramiento del dispositivo.
- Habría sido de gran utilidad comparar en paralelo el desempeño de este prototipo con un radar meteorológico convencional, principalmente para el cálculo real de la reflectividad, es por eso que el máximo alcance de este trabajo quedó en establecer una relación directa que permitiese definirla en lugar de determinarla con exactitud.
- El radar «Eco-Nube» tiene el potencial de convertirse en una herramienta más de la red meteorológica de Manizales y Caldas, como otro de sus dispositivos de medición para el monitoreo y entendimiento de variables hidrometeorológicas, e implemente este estudio para su correcta utilización.
- Como trabajo futuro se pretende obtener una distribución espacial de la lluvia a través de una implementación del radar que le permita realizar barridos de 360°, debido a que el radar actualmente es un sistema fijo por lo que solo se tiene un área de influencia proyectada sobre el cono de la bocina, y aunque se envía una ráfaga de microondas solo se puede

representar en conjunto un único valor de reflectividad para asociarlo a un único valor de pluviómetro.

- Se busca que en el futuro esta investigación sea tomada en cuenta para mejorar la información obtenida por los diferentes sistemas de detección temprana para la gestión del riesgo, siendo una alternativa de bajo costo.
- Esta investigación contribuye a aumentar los conocimientos sobre el comportamiento de la nubosidad en la ciudad de Manizales, en un futuro próximo permitirá realizar la calibración hidrológica definitiva del radar experimental «Eco-Nube» para la cuantificación de la nubosidad y estimación de la potencia de las señales registradas durante los eventos de lluvia.

Bibliografía

- Aguilar, D. P. R. (2008). Distribución normal, prueba de normalidad y transformación de datos.
- Alfred, M. & Rudolf, F. (2013). *Pluviómetros y Pluviógrafos*. The address of the publisher.
- Alonso, J., Ternero, A., Batlles, F. J., López, G., Rodríguez, J., & Burgaleta, J. I. (2013). Prediction of cloudiness in short time periods using techniques of remote sensing and image processing. *Energy Procedia*, 49:2280–2289.
- Avendaño, L. E. (2007). *Sistemas electrónicos analógicos: un enfoque matricial*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Cantolla, A. U. (1984). Nubosidad y nieblas en el observatorio de igueldo en san sebastián. *Lurralde: Investigación Y Espacio*, (7):151–160.
- Collogo Briceño, J. A. (2005). Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidroclimatológicos en colombia.
- Cortés, A. C. (2010). Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña andina, caso de estudio: Manizales.
- Costa, M., Goldberger, A. L., & Peng, C.-K. (2002). Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. *Physical Review Letters*, 89(6).
- DANE (2005). Poyecciones municipios 2005-2020.
- Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires (2017). El radar meteorológico.
- Doviak, R. J. et al. (1993). *Doppler radar and weather observations*. Courier Corporation.
- El Mundo (2015). 2015 fue el año más caluroso en el registro histórico.
- Erena, M., López, J. A., García, P., Caro, M., Belda, F., Palenzuela, J. E., Toledo, F., González-Barbera, G., & García-Pintado, J. (2012). Estimación de precipitación combinada radar-pluviómetros y publicación mediante servicios ogc. XV congreso nacional de tecnologías de la información geográfica, Madrid, AGE-CSIC.
- Estrada, J. H. (2013). *Aplicación de la entropía y esfera Debye al estudio de precursores sísmicos*

- y calidad de la energía eléctrica*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Estrada, J. H. (2014). Con radar se sabrá cuánta lluvia contienen las nubes. Agencia de noticias UNAL, Manizales.
- Falcón, N. & Muñoz, E. (2007). Microfísica de la formación de nubes. pages 87–98.
- Fernández, F. M., Linares, J. P. L., & Gómez, J. A. P. (2006). Red de estaciones meteorológicas para prevención de desastres en manizales - caldas (colombia).
- García, L. & García, J. (1985). Las nubes como indicadores del tiempo. *Hojas Divulgadoras*, pages 10–11.
- Grajales, S., Romo, L., Vélez, J. J., & Estrada, J. H. (2016a). Análisis de las señales de un radar pluviométrico experimental. *Boletín Ambiental*, 129:1–12.
- Grajales, S., Romo-Melo, L., Romo, L., Vélez, J. J., & Estrada, J. H. (2016b). Aproximación a la dinámica de las nubes en ciudades tropicales andinas, caso manizales (colombia). XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú.
- Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (2016). Centro de datos e indicadores ambientales de caldas.
- Instituto de Estudios Ambientales - IDEA & Universidad Nacional de Colombia (2013). Red de estaciones idrometeorológicas para prevención de desastres de manizales - caldas (colombia). Technical report.
- Instituto de Estudios Ambientales - IDEA & Universidad Nacional de Colombia (2016). Estado tiempo manziales.
- Jácome, S. M. (2009). Modelo hidrológico distribuido basado en información de radar meteorológico en zonas urbanas.
- La Patria (2017). Manizales, en alerta roja por lluvias. page 6.
- Laing, A. & Evans, J.-L. (2016). Introducción a la meteorología tropical.
- López, M., Miguel, C. D., Campiñez, R., & Manchado, E. (2006). Desarrollo de plataforma de supervisión para cuencas hidrológicas. Telvent.
- Marshall, J. S., Langille, R. C., & Palmer, W. M. K. (1947). Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology*.
- Marshall, J. S. & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*.
- Martínez, I. (2010). Termodinámica de la atmósfera.
- Martínez, M. I. R. (2015). Estudio de las características de las nubes sobre jaén y análisis de su influencia en la radiación solar medida en superficie.

- Mazo Vivar, A. d. (2016). Esparcimiento de rayleigh. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2):505–510.
- Mendez, A. B., Domínguez Mora, R., Magaña Rueda, V., Caetano, E., & Carrizosa Elizondo, E. (2006). Calibración hidrológica de radares meteorológicos. *Ingeniería hidráulica en México*, 21(4):43–64.
- Meteoblue (2016). Nubes.
- Miji, L. & Ujevi, N. (2008). An optimal 3-point quadrature formula of closed type and error bounds. *Revista Colombiana de Matemáticas*, 42(2):209–220.
- Minnaert, M. (1995). *Light and Color in the Outdoors*, volume 17. Springer Science & Business Media.
- Moreno, R. C. (2014). Microondas-definición.
- Organización Meteorológica Mundial, O. (2010). Guía de la red de estaciones de observación en superficie del smoc (gsn) y de la red de estaciones de observación en altitud del smoc (guan).
- Ortiz, E., Pujol, L., & Todini, E. (1960). Combinación bayesiana de datos pluviométricos e imágenes del radar meteorológico mediante block kriging y filtro de kalman.
- Pastor Vega, J. & Martínez Morillo, M. (2002). Microondas.
- Pierre, J. & Gillet, M. (1944). Las nubes. *Anales de Ingeniería*.
- Renom, M. (2008). Nubes y procesos de precipitación.
- Rogers, R. R. (1977). *Física de las nubes*. Editorial Reverté, S.A.
- Rollenbeck, R. & Bendix, J. (2006). Experimental calibration of a cost-effective x-band weather radar for climate ecological studies in southern ecuador. *Atmospheric Research*, 79:296–316.
- Rollenbeck, R. & Bendix, J. (2011). Rainfall distribution in the andes of southern ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research*, 79(2):277–289.
- Rosenfeld, D., Wolff, D. B., & Amitai, E. (1994). Comments on "the window probability matching method for rainfall measurements with radar". *Journal of Applied Meteorology*.
- Rosengaus, M. (1999). Sobre el error en la estimación utilizando radar meteorológico. *Ingeniería Del Agua*, pages 185–198.
- Salas, H. D. & Poveda, G. (2015). Scaling of entropy and multi-scaling of the time generalized q-entropy in rainfall and streamflows. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 423:11–26.
- Segerer, C. & Villodas, E. R. (2006). Hidrología i. *Universidad Nacional de Cuyo, Argentina*.

- Sepúlveda Berrío, J. (2015). Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de radar meteorológico del área metropolitana del valle de aburrá. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Serrano, D. (2015). Estudio del espesor óptico de nubes a partir de radiación solar.
- Suárez Hincapié, J., Vélez, J., Romo Melo, L., & Chang, P. (2015). Classification and space-time analysis of precipitation events in manizales, caldas, colombia. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Terlien, M. T. J. (1996). *Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides: the integration of hydrologic models, slope stability models and geographic information systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales (Colombia)*. International Inst. for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Torres, M., A., Portillo R., Otniel, P. R., Días D., C., García H., R. A., & Martines M., R. (2012). Red de monitoreo ambiental bajo un contexto urbano.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia, U. (2009). Curso cálculo integral.
- University Corporation for Atmospheric Research UCAR, C. p. (2017). Fundamentos de radar meteorológico.
- Vélez, J. J., Aristizábal, B., Duque, N. D., Zambrano, J., Pérez, Á., Patiño, D., & Li, J. (2014). Análisis de variables meteorológicas - año 2014 línea base ambiental de caldas.
- Xacata (2016). Hemos roto el récord del año mas caluroso. diez veces seguidas.

Apéndice A

Índice de nubosidad IN-ABC para la clasificación de señales de un radar pluviométrico experimental en la ciudad de Manizales

Segundo Congreso Nacional de Ciencias Ambientales.

21 al 23 de Octubre de 2015. Pereira, Colombia.

Índice de Nubosidad IN-ABC para la Clasificación de Señales de un Radar Pluviométrico Experimental en la Ciudad de Manizales



Autores

Stieffann Grajales¹
Liliana Romo-Mateo¹
Jorge Hernán Estrada¹
Jorge Julián Vélez¹

Correo electrónico

sgrajales@unal.edu.co
lromom@unal.edu.co
jestrada@unal.edu.co
jvelez@unal.edu.co

¹ Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura - IDEA

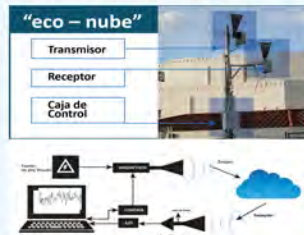
INTRODUCCIÓN

El radar "eco-nube" fue diseñado y construido por académicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Consta de un magnetrón (obtenido de un microondas convencional) que genera una ráfaga de ondas de alta frecuencia. Un emisor envía el haz de ondas que, al chocar con una nube o con las gotas de agua contenidas en ella, varía sus características y se refleja hacia un receptor en forma de eco.

El receptor recibe la señal y realiza las operaciones de amplificación, adquisición, demodulación y digitalización. La señal registrada es almacenada y graficada en un software diseñado para tal fin.

Radar pluviométrico experimental "eco - nube"



Se presentan los resultados obtenidos del análisis de las señales del radar pluviométrico experimental "eco - nube".

Las señales analizadas corresponden a varias campañas de ensayos realizadas bajo diferentes condiciones meteorológicas.

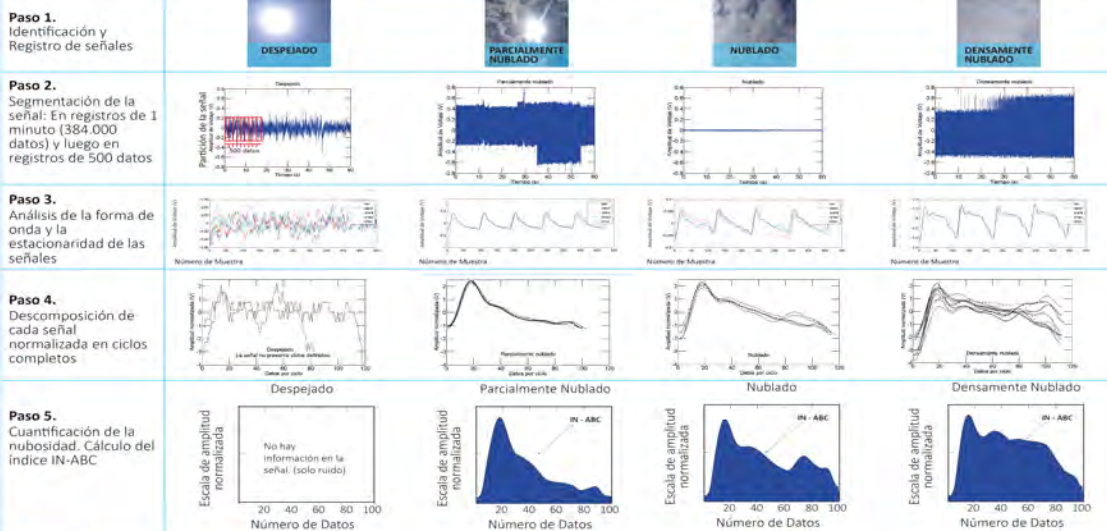
Se estudiaron las variaciones que sufrirían los ecos registrados en amplitud y longitud de onda. Se comprobó que las señales reflejadas al radar, tras chocar con una nube, tienen periodos y formas de onda diferentes para cada condición de nubosidad.

Las señales fueron segmentadas en ciclos completos y se comprobó que el área bajo la curva de un ciclo completo de la señal normalizada es mayor a medida que aumenta la nubosidad.

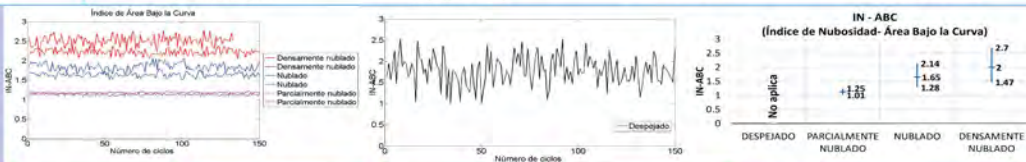
Esta característica permitió formular el índice IN-ABC que cuantifica la nubosidad registrada por el radar en su área de influencia.

METODOLOGÍA

Tipos de Señales



RESULTADOS



CONCLUSIONES

- Señales diferentes según la nubosidad**
Se comprobó que las señales recibidas por el radar son diferentes dependiendo del estado de nubosidad en la zona de influencia del radar.
- Diferencias aumentan con la nubosidad**
Las variaciones sufridas en amplitud y longitud de onda de la señal emitida, son mayores a medida que aumenta la nubosidad.
- IN-ABC coherente**
El índice de nubosidad, calculado como el área bajo la curva de un ciclo de señal normalizada, es coherente con los resultados esperados, su magnitud se incrementa a medida que aumenta la nubosidad.
- Días despejados no tienen IN-ABC**
La dispersión del índice de nubosidad es muy elevada en días totalmente despejados. Esto es debido a que la señal no es reflejada y el radar solo registra ruido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Briceño, J. A. C. (2002). Descripción de una zona controlada y educación de usuarios para observaciones de estaciones.
Cortés, A. C. C. (2010). Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en un estudio de medio montañoso en el Cauca del Atlántico, Alto Cauca.
Estrada Estrada, J. H. (2013). Asociación de la estructura y valores DDB de un estudio de precipitación. Tesis de grado de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
López, M., Miquel, C. D., Camparini, A., & Tolazzi, M. (s.f.). Instituto de Física para la Superficie para Ciencias Meteorológicas.
Ortiz, E., Esc, I., Pulgarín, O., Tenorio, S. L., Pujol, L., Civi, L., ... Universidad, F. (1982). Caracterización de la zona de precipitación e influencia del Radar Pluviométrico mediante Simulacros y Filtros en Cálculo. Aplicación en España.
Rothstein, R., & Barnes, E. (2014). Aplicación de un sistema de radar de superficie. Estudio de caso: Radar Pluviométrico experimental en la ciudad de Manizales. *Atmospheric Research*, 139(1), 172-180.
Rosenzweig, M. (1995). *Cartografía de la Meteorología*. (pp. 101-114).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias al convenio suscrito entre el Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales - IDEA y la Corporación Autónoma Regional de Caldas - CORPOCALDAS en el marco del proyecto "Gestión del riesgo de los desastres en Manizales" por medio del cual se financió el desarrollo del radar meteorológico.

Esta investigación se ha desarrollado en el marco del proyecto "Caracterización, identificación y modelamiento matemático de variables climáticas en la ciudad de Manizales y el Parque Nacional Natural de las Nevadas, mediante técnicas de minería de datos e inteligencia artificial" financiado por COLCIENCIAS en la convocatoria 056 de 2014 "Es tiempo de volver".



Apéndice B

Análisis de las señales de un radar pluviométrico experimental

Boletín ambiental 129 - Instituto de Estudios Ambientales, IDEA.
Abril de 2016. Manizales, Colombia.

boletín
ambiental

Abril de 2016

Instituto de Estudios Ambientales IDEA 129

Análisis de las Señales de un Radar Pluviométrico Experimental



Análisis de las Señales de Un Radar Pluviométrico Experimental

STHEFANIA GRAJALES, LILIANA ROMO-MELO, JORGE JULIÁN VELEZ, JORGE HERNÁN ESTRADA
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Grupo de
Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental, IDEA,
sgrajalesn@unal.edu.co, lromomom@unal.edu.co, jhestradae@unal.edu.co, jivelezu@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Manizales ha sido históricamente una ciudad propensa a sufrir deslizamientos de tierra. Su topografía con pendientes fuertes, sus suelos de ceniza volcánica y su régimen de lluvias, la convierten en un escenario propicio para los deslizamientos asociados a fuertes lluvias. Esta problemática ha propiciado el interés de explorar el comportamiento de las precipitaciones a fin de garantizar una respuesta temprana ante cualquier eventualidad relacionada con este fenómeno (Cortés, 2010) (Rollenbeck y Bendix, 2011).

Los radares pluviométricos son instrumentos electrónicos que permiten realizar una representación espacial de la precipitación. Estos dispositivos dejan estimar cuantitativamente la precipitación de forma remota sobre grandes extensiones (1x1, 2x2 km²) a intervalos de tiempo breves, entre 5 y 10 minutos. Generalmente hacen un barrido volumétrico de 360° en un tiempo menor de 10 minutos, lo que permite obtener gran cantidad de información en poco tiempo (Rosengaus, 1999). De esta forma, los radares pluviométricos brindan información sobre la complejidad y características propias de las nubes (Ortiz et al., 1960). La variación de la forma de onda registrada por los radares pluviométricos permite descubrir

la presencia, tipo de nube y su posición en el espacio (Briceño Cogollo, 2005). Por esta razón, las estimaciones de lluvia proporcionadas por los radares se han vuelto cruciales para la generación temprana de alertas de fenómenos hidrometeorológicos de gran magnitud, como son los deslizamientos de tierra y los flujos torrenciales (López, Miguel, Campañez, & Telvent, 2006).

Miembros de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales han desarrollado un radar de vigilancia meteorológica cuyo objetivo inicial es detectar la presencia de nubes, medir su distancia y explorar la dinámica de la nube mediante el estudio de los pulsos reflejados.

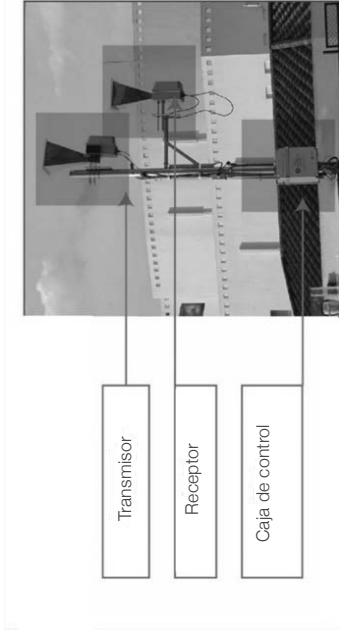


Figura 1. Partes del radar meteorológico "eco-nube"

El radar desarrollado y denominado "eco-nube", cuyo esquema se muestra en la Figura 1, está conformado por un emisor que envía una ráfaga de microondas al ambiente con una frecuencia de 2.46 GHz. Si la señal choca con una nube se refleja y regresa en forma de eco. Las características del eco dependen del grado de densidad de la nube. El receptor

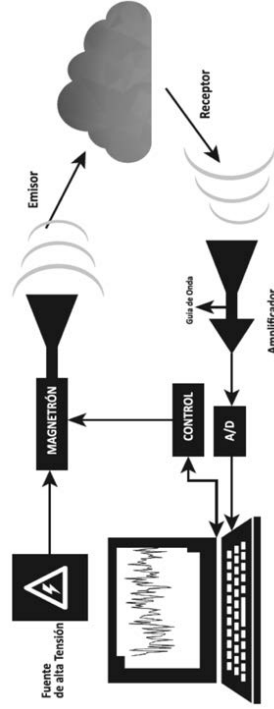


Figura 2. Diagrama del sistema de radar meteorológico "eco nube"

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar esta investigación se realizaron ocho campañas de ensayos con el radar experimental en diferentes condiciones de nubosidad: días despejados con total ausencia de nubes (27,961,360 datos), días parcialmente nublados con la presencia de alguna o varias nubes (546,681,633 datos),

días nublados con la presencia casi total de nubes (109,233,152 datos) y días densamente nublados pero sin lluvia (576,613,184 datos). La Figura 3 muestra la evolución de la amplitud de voltaje de algunas de las señales registradas por el radar para diferentes condiciones meteorológicas.

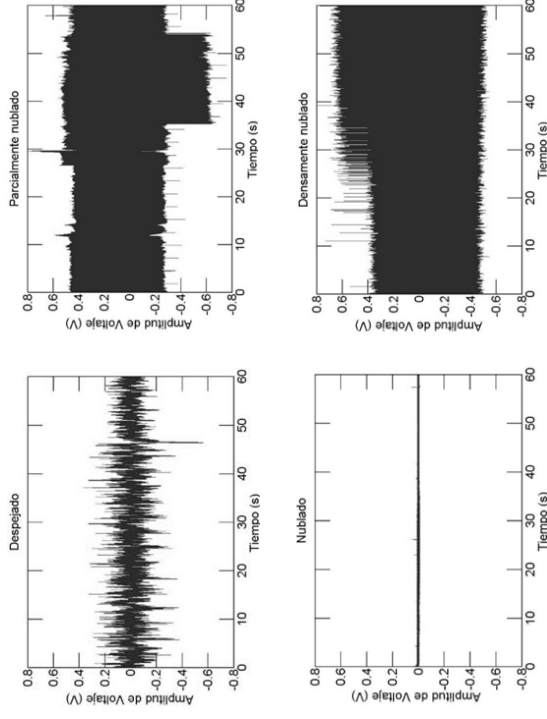


Figura 3. Evolución de la amplitud de voltaje para registros de señales en diferentes condiciones de nubosidad: a) día despejado con ausencia de nubes, b) día parcialmente nublado, c) día nublado y d) día densamente nublado

Las señales registradas por el radar "eco-nube" fueron almacenadas en ficheros tipo wav con una frecuencia de muestreo de 384.000 datos por segundo. Estas señales fueron analizadas cualitativamente con el software de Matlab con el objetivo de detectar las variaciones y atenuaciones sufridas en amplitud y longitud de onda.

El algoritmo desarrollado para el análisis de las señales se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 4. El algoritmo consiste en 4 pasos principales, el primero de las señales, el segundo paso es realizar una segmentación de la señal en el tiempo, en registros de un minuto (384,000 datos) debido al coste computacional requerido para manipular la información suministrada por el radar. El tercer paso consiste en el análisis de la forma de onda y el estudio de la estacionalidad de las señales. Finalmente, se realiza una descomposición de cada señal normalizada en ciclos completos y se hace su análisis descriptivo.

RESULTADOS

Para realizar un análisis cualitativo de la forma de la onda recibida por el radar y de la estacionalidad de las señales, se hicieron gráficas con ventanas de 400 datos de cada señal. La Figura 5 muestra un ejemplo de estas gráficas para cada una de las condiciones de nubosidad analizadas.

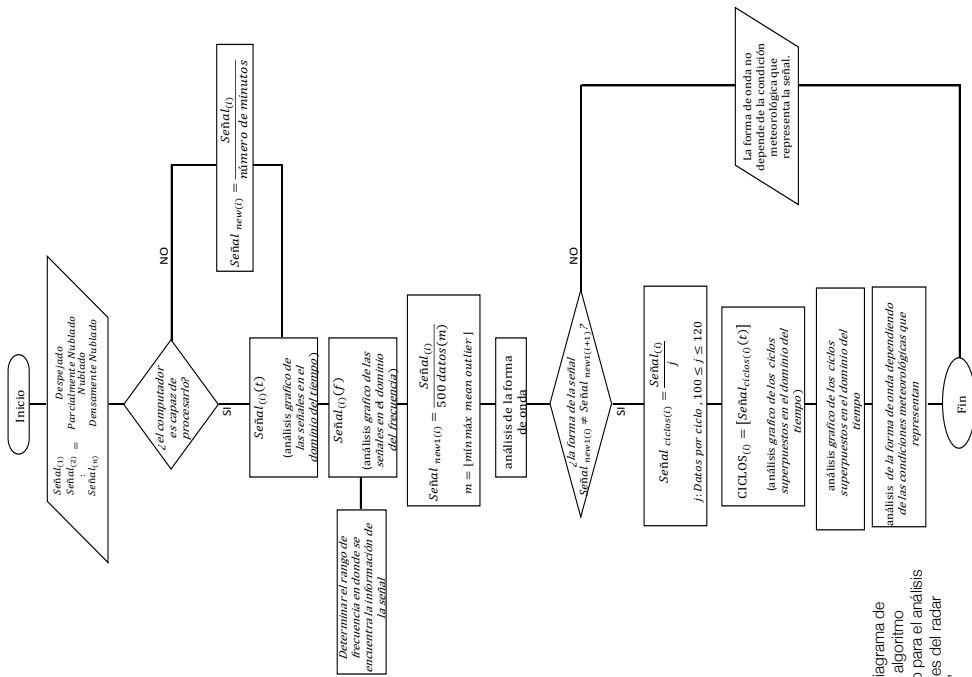
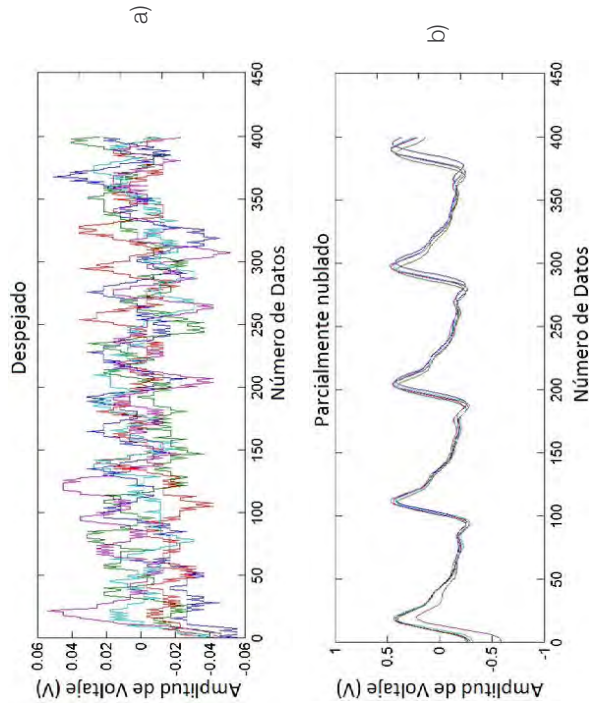


Figura 4. Diagrama de bloques del algoritmo desarrollado para el análisis de las señales del radar "eco- nube"



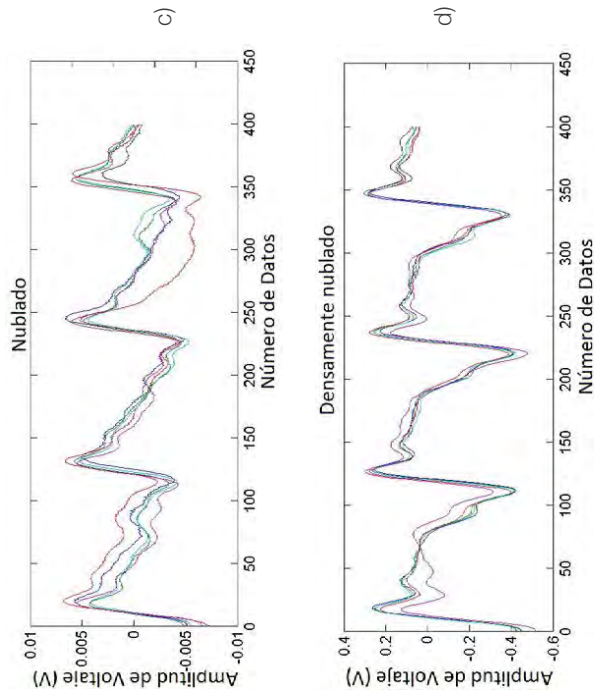
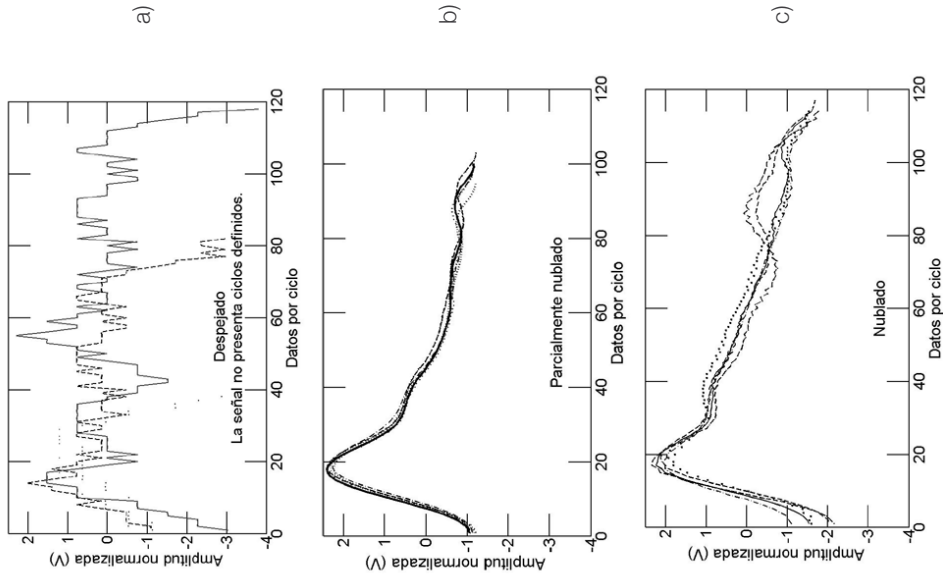


Figura 5. Señales registradas por el radar "eco-nube" en diferentes condiciones de nubosidad, análisis para ventanas de 500 datos: a) día despejado con ausencia de nubes, b) día parcialmente nublado, c) día nublado y d) día densamente nublado

Como se observa en la Figura 5 las señales presentan un comportamiento diferente para cada una de las condiciones de nubosidad registradas. En días despejados, con ausencia de nubes (Figura 5a), el receptor solo registra ruido debido a que la señal enviada por el emisor no es reflejada, sin embargo, en los registros obtenidos en días con alguna presencia de nubes (Figuras 5b, 5c y 5d) la señal tiene características armónicas

con una forma de onda bien definida y discriminante para cada clase.

Para comprobar que la señal conserva sus características morfológicas a lo largo del tiempo, cada señal fue segmentada en ciclos completos. La Figura 6 muestra las gráficas de los ciclos completos superpuestos para cada condición de nubosidad, luego de un proceso de normalización y remoción de medias.



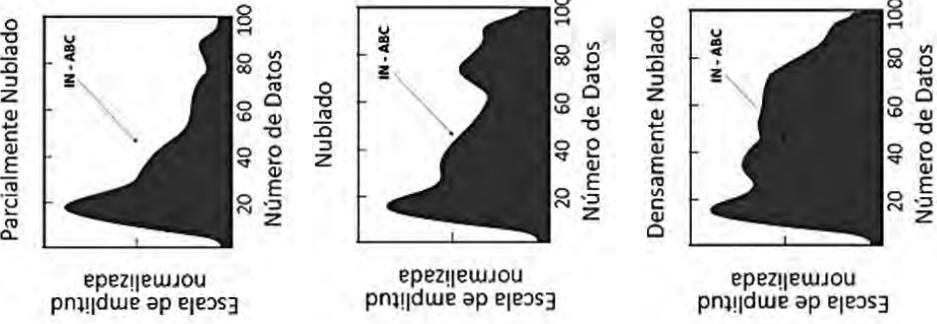


Figura 7. Área bajo la curva de un ciclo completo de las señales registradas por el radar en diferentes condiciones de nubosidad: a) día despejado con ausencia de nubes, b) día parcialmente nublado, c) día nublado y d) día densamente nublado

En la Figura 7 se puede observar que el área bajo la curva de una señal registrada en un día despejado (Figura 7a) no puede calcularse debido a la aleatoriedad de la señal (la señal enviada por el emisor no es reflejada al receptor por la ausencia de nubes). Por otro lado, la señal de un ciclo completo en los registros de un día parcialmente nublado (Figura 7b) presenta una sola cresta o pico máximo característico. Estas crestas se incrementan con la nubosidad (Figura 7b) y las ondas presentan máximos locales característicos adicionales. Finalmente, los ciclos completos de los registros de días densamente nublados (Figura 7d) presentan un área bajo la curva mucho mayor que los anteriores debido a que la magnitud de la señal aumenta a lo largo de todo el ciclo. Esta característica permitió determinar que la información relevante dentro de las señales adquiridas por el radar está en la forma de onda de los ciclos completos y no en la amplitud media del voltaje registrado, por lo que se hace necesario analizar con mayor detenimiento el área bajo la curva de cada una de estas señales.

CONCLUSIONES

Las señales registradas por el radar experimental durante las campañas de ensayos fueron analizadas y se obtuvieron resultados satisfactorios. Se comprobó que las señales recibidas son diferentes

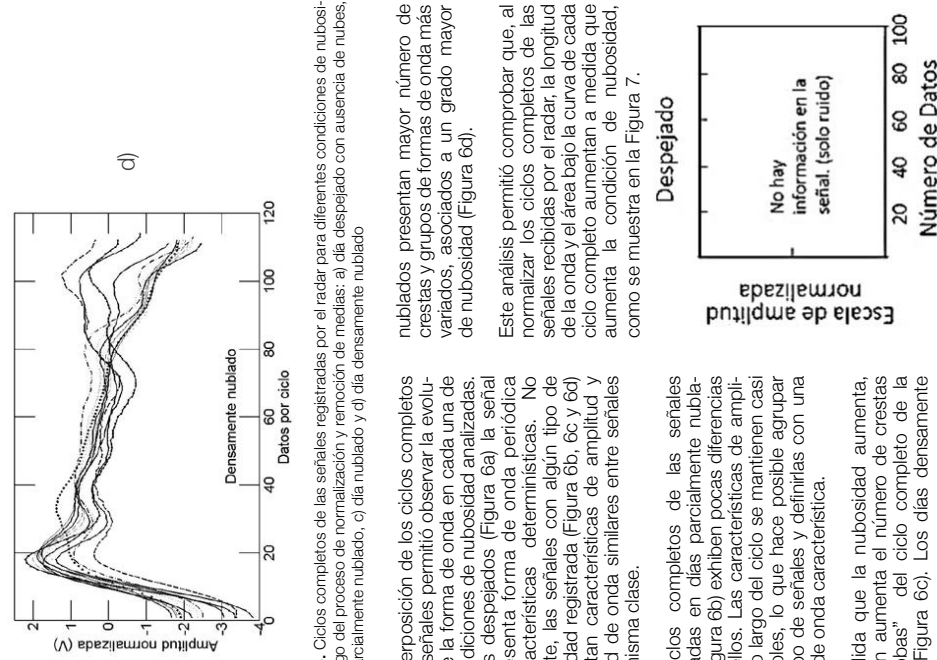


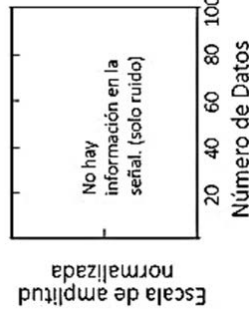
Figura 6. Ciclos completos de las señales registradas por el radar para diferentes condiciones de nubosidad, luego del proceso de normalización y remoción de medias: a) día despejado con ausencia de nubes, b) día parcialmente nublado, c) día nublado y d) día densamente nublado

La superposición de los ciclos completos de las señales permitió observar la evolución de la forma de onda en cada una de las condiciones de nubosidad analizadas. En días despejados (Figura 6a) la señal no presenta forma de onda periódica ni características determinísticas. No obstante, las señales con algún tipo de nubosidad registrada (Figura 6b, 6c y 6d) presentan características de amplitud y longitud de onda similares entre señales de la misma clase.

Los ciclos completos de las señales registradas en días parcialmente nublados (Figura 6b) exhiben pocas diferencias entre ellos. Las características de amplitud a lo largo del ciclo se mantienen casi invariables, lo que hace posible agrupar este tipo de señales y definirías con una forma de onda característica.

A medida que la nubosidad aumenta, también aumenta el número de crestas o "jorobas" del ciclo completo de la señal (Figura 6c). Los días densamente

Despejado



dependiendo del estado de nubosidad en la zona de influencia del radar. Las variaciones sufridas en la amplitud y longitud de onda de las señales son mayores a medida que aumenta la nubosidad. Se pudo comprobar que las señales adquiridas por el radar se pueden caracterizar por la magnitud del área bajo la curva de un ciclo completo de señal normalizada, esta magnitud se incrementa a medida que aumenta la nubosidad. Finalmente, en días despejados, con ausencia de nubes, la forma de onda no puede ser analizada, debido a que la señal enviada por el radar no es reflejada, ya que bajo esta condición el receptor solo registra ruido.

De esta forma este radar ha contribuido al conocimiento del comportamiento de la nubosidad en la ciudad de Manizales y se convierte en el punto de inicio para el estudio de la lluvia y de las alertas tempranas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias al convenio suscrito entre la Universidad Nacional – IDEA y CORPOCALDAS en el marco del proyecto “Gestión del riesgo de los desastres en Manizales” por medio del cual se financió el desarrollo del radar meteorológico “eco-nube”. Adicionalmente, la investigación se desarrolla en el marco del proyecto “Caracterización, identificación y modelamiento matemático de variables climáticas en la ciudad de Manizales y el Parque Nacional Natural Los Nevados, mediante técnicas de

minería de datos e inteligencia artificial” financiado por COLCIENCIAS en la convocatoria 656 de 2014 “Es tiempo de volver”.

BIBLIOGRAFÍA

- **Cortés, A. C. C. (2010).** Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña andina. Caso de estudio: Manizales.
- **López, M., Miguel, C. De, Campiñez, R., & Telvent, M. (2006).** Desarrollo de Plataforma de Supervisión para Cuencas Hidrológicas. Telvent.
- **Ortiz, E., Tec, I., Públicas, O., Tecnología, S. L., Pujol, L., Civil, I., ... Universitá, T. (1960).** Combinación Bayesiana de datos pluviométricos e imágenes del Radar Meteorológico mediante Block Kriging y Filtro de Kalman . Aplicación en España.
- **Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2011).** Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. Atmospheric Research, 99(2), 277–289. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.018>
- **Rosengaus, M. (1999).** Utilizando Radar Meteorológico. Ingeniería Del Agua, 6(junio), 185–198.

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA -
Teléfono: 8879300 Ext. 50190 / Fax 8879383
Cra 27 #64-60 / Manizales - Caldas
<http://idea.manizales.unal.edu.co>
idea_man@unal.edu.co

Apéndice C

Radar pluviométrico «Eco-Nube»

Tecnova.

04 al 05 de Agosto de 2016. Medellín, Colombia.

Radar pluviométrico “Eco - Nube”



STHEFANÍA GRAJALES NOREÑA

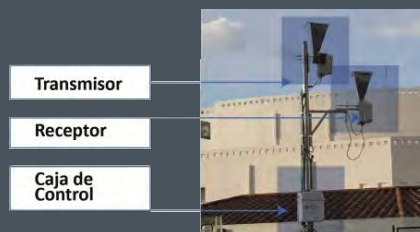
Medellín 4-5 de agosto 2016 Plaza Mayor

335 desastres naturales al año ocurren por fenómenos climáticos y dejan 30.000 muertos



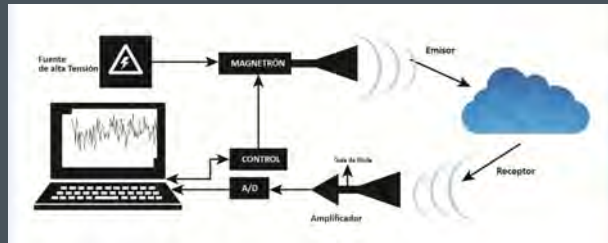
El 90 % de los desastres están asociados al clima y el 10 % restante son de origen geofísico

Radar pluviométrico “Eco - Nube”



Dispositivo electrónico capaz de monitorear la nube y predecir la precipitación de lluvia.

Radar pluviométrico “Eco - Nube”



El equipo

Respaldo por: El grupo de trabajo académico en ingeniería hidráulica y ambiental de la universidad nacional.

www.tecnova.org



Contexto de prestación del servicio o posible uso de la capacidad

- Portable, flexible, y ajustable al tipo de solución que exija al futuro usuario.
- Bajo costo en comparación con los radares convencionales.
- Utiliza algoritmos matemáticos basados en la teoría de la entropía.
- Innova los procedimientos del manejo del riesgo ante desastres naturales.
- Es completamente automático y puede crear alertas tempranas a los entes de control.
- Tiene una cobertura mayor que los pluviómetros convencionales.
- Software ajustable a la personalidad del comprador.

tecnova



El proceso de prestación del servicio

Requerimientos de entrada:
Manual del usuario incluyendo:
Instalación, operación,
adquisición, configuración y
manejo de resultados.

Requerimientos de Salida:
Reportes de alertas tempranas en
el contexto de la prevención de
desastres.
Históricos de la precipitación


www.tecnova.org



Sectores de aplicación

- Gestión del riesgo asociado a la precipitación de lluvias.
- Investigaciones sobre el calentamiento global
- Salud de los bosques de niebla
- Precipitación de ceniza
- Contaminación atmosférica
- Agricultura

tecnova

 Detalles técnicos

El producto se vende bajo pedido, garantía de 3 años, prestación de servicio virtual y presencial.

www.tecnova.org

Cientes

- Empresas oficiales o privadas relacionadas con la prevención de desastres naturales y especialmente asociadas a la precipitación de lluvia.
- Universidades y centros de investigación en la salud del clima.
- Empresas hidroeléctricas y empresas acueducto y alcantarillado.

[tecnova](http://www.tecnova.org)

 Costos

El valor del producto comienza en 120.000.000

www.tecnova.org

Formas de acceso al servicio

Contacto con la dirección de extensión de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Lida López y el grupo de trabajo académico en ingeniería Hidráulica y ambiental .

Teléfono : (68) 879300

jhestradae@unal.edu.co
sgrajalesn@unal.edu.co

[tecnova](http://www.tecnova.org)



Tecnova LEE



Tecnova LEE



@tecnova_LEE



Apéndice D

Aproximación a la dinámica de las nubes en ciudades tropicales andinas, caso Manizales (Colombia)

XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

26 al 30 de Septiembre de 2016. Lima, Perú.



APROXIMACIÓN A LA DINÁMICA DE LAS NUBES EN CIUDADES TROPICALES ANDINAS, CASO MANIZALES (COLOMBIA)

Sthefania Grajales, Liliana Romo-Melo, Jorge Julián Vélez y Jorge Hernán Estrada

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental.

sgrajalesn@unal.edu.co, lmromom@unal.edu.co, jhestradae@unal.edu.co, jvelezu@unal.edu.co

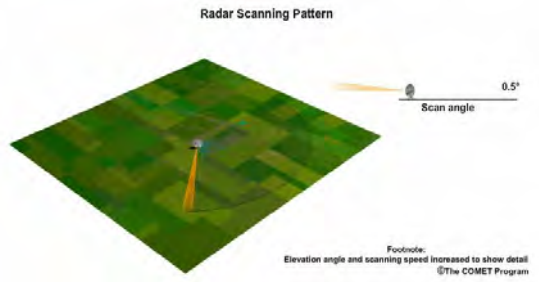
Índice

	Introducción	<ul style="list-style-type: none"> • Radar Meteorológico • Radar Eco Nube
	- Analisis en el tiempo (ABC)	<ul style="list-style-type: none"> • Forma de onda • Pasos formulación índice de nubosidad
	Analisis en la frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de frecuencias discriminantes y agrupamiento
	Conclusiones	

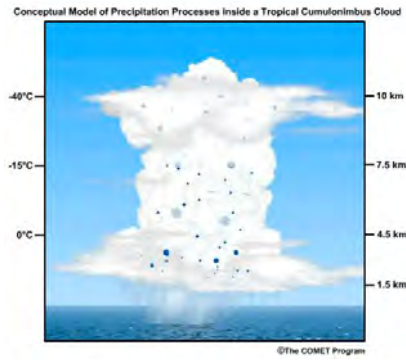
Introducción Radares Meteorológicos



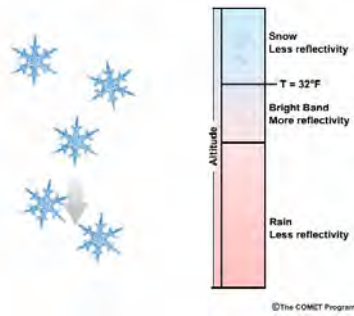
Introducción

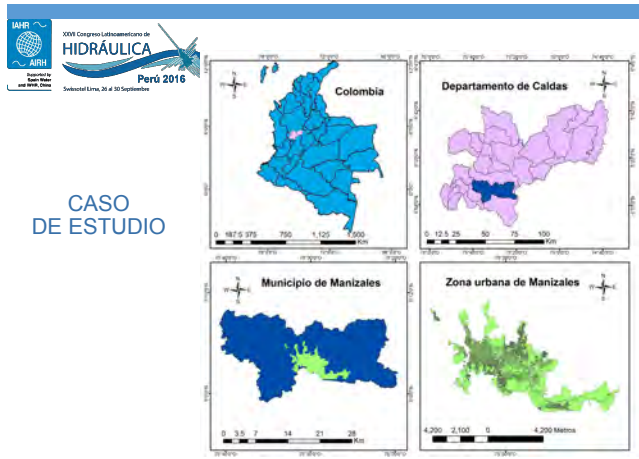


Introducción



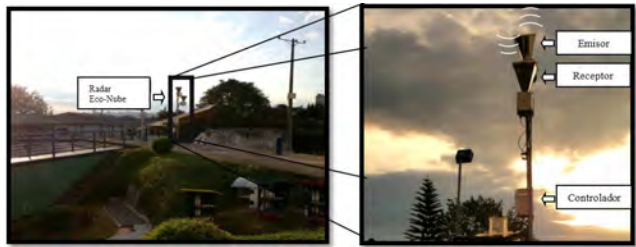
Introducción





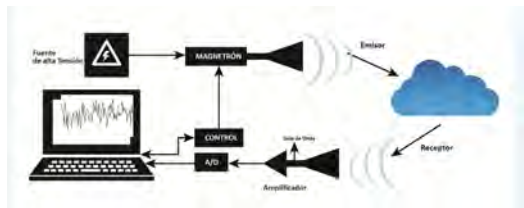
XXX Congreso Latinoamericano de
HIDRÁULICA
Perú 2016
Subsector Lima, 26 al 30 Septiembre

Radar experimental de bajo coste "Eco-Nube"



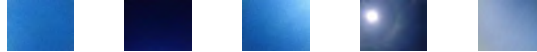
XXX Congreso Latinoamericano de
HIDRÁULICA
Perú 2016
Subsector Lima, 26 al 30 Septiembre

Radar experimental de bajo coste "Eco-Nube"



Escenarios de nubosidad

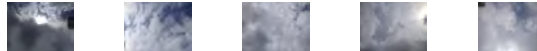
Despejado



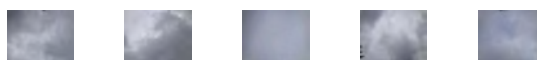
Parcialmente nublado



Nublado

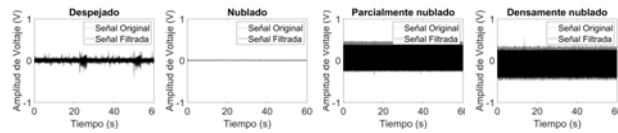


Densamente Nublado - Densamente Nublado con Lluvia

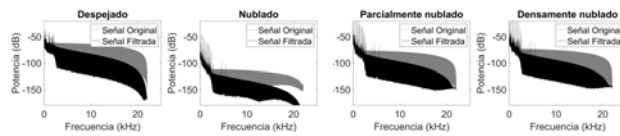


Evolución la señal adquirida por el radar en distintos escenarios de nubosidad

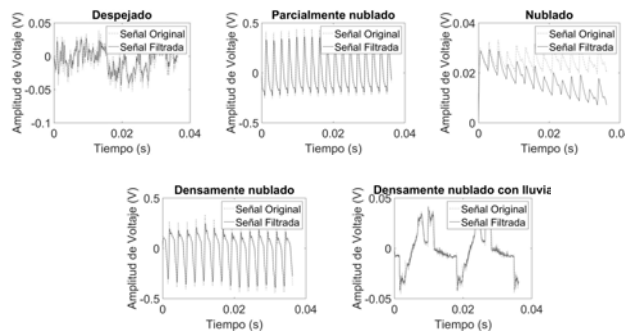
Evolución de la señal en el dominio del tiempo



Evolución de la señal en el dominio de la frecuencia



Características morfológicas de las señales en diferentes estados de nubosidad



Paso 1. Filtrado de la señal: Eliminación de ruido de alta y baja frecuencia

$$H(s) = k \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \text{ Low Pass Filter} \quad [1]$$

Donde:
H: función de transferencia, filtro pasa bajos.
s: señal a filtrar.
k: Constante de ponderación de ganancia del filtro.
 ω_c : frecuencia de corte. (1 kHz.)

Paso 2. Normalización y estandarización de las señales:

$$Z_1 = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad [2]$$

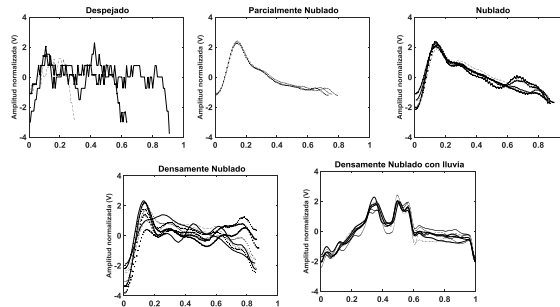
Donde:
x: Valor a Normalizar.
Z₁: Valor Normalizado.
 μ : Medida de la población.
 σ : Desviación estandar.

$$Z_2 = \frac{x}{\max(X)} \quad [3]$$

Donde:
x: Valor a estandarizar.
Z₂: Valor estandarizado.
x: Población.

Paso 3. Selección y superposición de ciclos completos de la señal.

Para las diferentes condiciones de nubosidad



Paso 4. Cálculo de áreas bajo la curva:

$$ABC = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \frac{1}{2} h (f_1 + f_2) - \frac{1}{12} h^3 f''(\xi) \quad [4]$$

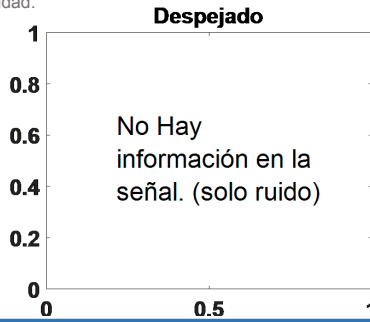
Donde:
ABC: Area Bajo la curva
 $f_i = f(x_i)$
h: separación entre puntos
 ξ : es un punto entre $x_1 \leq \xi \leq x_2$

Paso 5. Cálculo del índice de nubosidad IN-ABC.

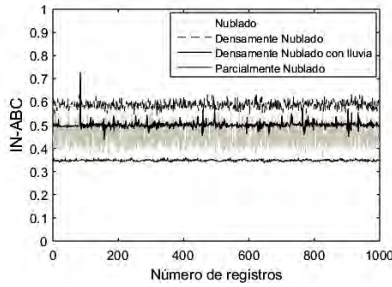
$$IN-ABC = \overline{ABC} \pm \sigma(ABC) \quad [5]$$

Donde:
IN-ABC: Índice de Nubosidad, Area Bajo la curva.
 \overline{ABC} : promedio del Area Bajo la curva.
ABC: Area Bajo la curva.
 σ : Desviación estandar.

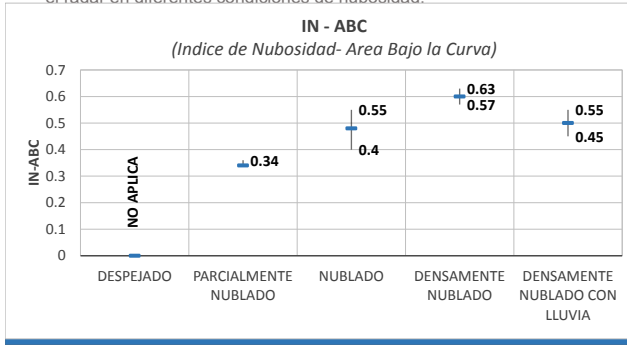
Evolución de la señal registrada por el radar en diferentes condiciones de nubosidad.



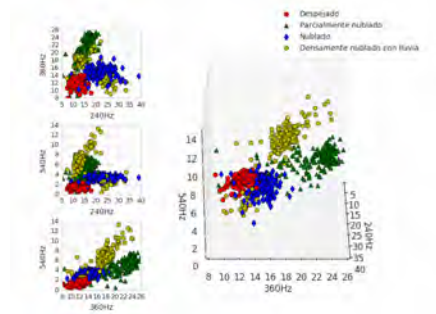
Evolución del índice de nubosidad-ABC para las señales registradas por el radar en diferentes condiciones de nubosidad.



Evolución del índice de nubosidad-ABC para las señales registradas por el radar en diferentes condiciones de nubosidad.



Agrupamiento – densidad espectral de potencia en las frecuencias discriminantes 240 - 360 y 540Hz



Conclusiones

Señales diferentes según la nubosidad	Diferencias aumentan con la nubosidad	IN-ABC coherente	Días despejados no tienen IN-ABC
Se comprobó que las señales recibidas por el radar son diferentes dependiendo del estado de nubosidad en la zona de influencia del radar.	Las variaciones sufridas en amplitud y longitud de onda de la señal emitida, son mayores a medida que aumenta la nubosidad.	El índice de nubosidad, calculado como el área bajo la curva de un ciclo de señal normalizada, es coherente con los resultados esperados, su magnitud se incrementa a medida que aumenta la nubosidad.	La dispersión del índice de nubosidad es muy elevada en señales registradas en días totalmente despejados. Esto es debido a que la señal no es reflejada y el radar solo registra ruido.

Trabajo futuro

Esta investigación contribuye a aumentar los conocimientos sobre el comportamiento de la nubosidad en la ciudad de Manizales y, en un futuro próximo, permite realizar la calibración hidrológica del radar experimental Eco-Nube, para la cuantificación de la nubosidad y estimación de la potencia de las señales registradas durante los eventos de lluvia

Se propone explorar la dinámica de las nubes a través de la entropía y mediante un análisis multiescala. Este análisis permitiría acotar o eliminar la incertidumbre que se presenta en un fenómeno físico como este.



Referencias bibliográficas

- Aguilár, D. P. R. (2008). *Distribución normal prueba de normalidad*. Retrieved from <http://ley.exami.com/other/9550/index.html>
- Briceño, J. A. C. (2005). *Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidro-climáticos en Colombia*.
- Cantolla, A. U. (1984). Nubosidad y nieblas en el observatorio de Igueldo en San Sebastián. *Lurralde: Investigación Y Espacio*, N° 7 (ISSN 0211-5891), págs. 151-160.
- CORPOCALDAS, U. N. (2014). *Gestión del riesgo de los desastres en Manizales*. Manizales.
- Fernández, F. M., Linares, J. P. L., & Gómez, J. A. P. (2006). Red de estaciones meteorológicas para prevención de desastres en Manizales – Caldas (Colombia).
- Grajales Noreña, S., Romo Melo, L., Estrada Estrada J. y Vélez Upegui J. (2015). Índice de nubosidad IN-ABC para la clasificación de señales de un radar pluviométrico experimental en la ciudad de Manizales. *Segundo Congreso Nacional de Ciencias Ambientales*. Pereira, Colombia: Red Colombiana de Formación Ambiental y Universidad Tecnológica de Pereira.
- Grajales, S., Romo, L., Vélez, J. J., & Estrada, J. H. (2016). Análisis de las Señales de un Radar Pluviométrico Experimental. *Boletín Ambiental*, 129, 1-12.
- Hank Zumbahlen. (2009). Phase Response in Active Filters. *Analog Devices*, 43, 4.
- López, M., Miguel, C. De, Campilez, R., & Telvent, M. (2006). Desarrollo de Plataforma de Supervisión para Cuentas Hidrológicas. *Telvent*.
- Martínez Isodoro. (2015). Termodinámica de la atmósfera. In *Environmental thermodynamics*.
- Miji, L., & Ujevi, N. (2008). An optimal 3-point quadrature formula of closed type and error bounds, 42, 209-220.
- Ortiz, E., Tec, I., Públicas, O., Tecnología, S. L., Pujol, L., Civil, I., ... Universitá, T. (1960). Combinación Bayesiana de datos pluviométricos e imágenes del Radar Meteorológico mediante Block Kriging y Filtro de Kalman. Aplicación en España.
- Rosengaus, M. (1999). Utilizando Radar Meteorológico. *Ingeniería Del Agua*, 6(junio), 185-198.
- Suárez Hincapié J., Romo Melo L., Vélez Upegui J. y Chang P. (2015). Classification and space-time analysis of precipitation events in Manizales, Caldas, Colombia. In *AGU Fall Meeting*. San Francisco, EE.UU.



Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto

“Caracterización, identificación y modelamiento matemático de variables temáticas en la ciudad de Manizales y el Parque Nacional Natural los Nevados”

financiado por el programa
“Es tiempo de Volver” - Convocatoria 656 de Colciencias.



GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

Contactos:

Universidad Nacional de Colombia
- Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería
Hidráulica y Ambiental

**Sthefania Grajales, Liliana Romo Melo, Jorge
Julián Vélez y Jorge Hernán Estrada**

Correo:

sgrajalesn@unal.edu.co, lmromom@unal.edu.co,
jhestradae@unal.edu.co, jivelezu@unal.edu.co

Apéndice E

Certificado XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica



Supported by
Spain Water
and IWRH, China

XXVII Congreso Latinoamericano de

HIDRÁULICA



Perú 2016

APHA
ASOCIACIÓN PERUANA DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

Se confiere el presente **CERTIFICADO** a

Sthefania Grajales Noreña

Por su participación en calidad de

PONENTE

Aproximación a la dinámica de las nubes en ciudades tropicales andinas, caso Manizales (Colombia)
Grajales S.; Romo-Melo L.; Vélez J.; Estrada J.

En el **XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA** celebrado en Lima, Perú,
del 26 al 30 de Setiembre del año 2016.

Dr. Arturo Rocha Felices
Presidente Honorario LADHI 2016



Ing. José De Piérola Canales
Presidente del Comité Organizador

"De la sabiduría hidráulica ancestral a la tecnología de punta al servicio del desarrollo sostenible"

Apéndice F

Invitación Week of International Scientific Young Talents

December 15, 2016

Sthefania Grajales
Carrera 21, n°65a 66
170004 Manizales
Colombia

INVITATION

Dear Miss Grajales,

Universcience is honored to welcome you in its two venues, the Cité des sciences et de l'industrie and the Palais de la découverte (Paris, France), from January 29th to February 3rd, 2017, in order to attend the Week of International Scientific Young Talents.

This event is a mobility program for young scientists proposed by Universcience, in the framework of its anniversary season (30th anniversary of the Cité des sciences et de l'industrie in 2016 and 80th anniversary of the Palais de la découverte in 2017), and in partnership with the Ministry of Foreign Affairs and International Development in France.

It is agreed that the French Embassy in Colombia will cover your air ticket as well as your accommodation, and that Universcience will cover all the expenses related to the activities of the program.

Only a few diners and personal expenses will remain at your own charge.

It is also agreed that you are free to stay a few days longer to enjoy Paris before or after the event, but the expenses related to this extension of the stay will be at your charge.

Looking forward to welcoming you at the Week of International Scientific Young Talents,

Best regards,



Flavie Marie
Delegation of national and international affairs
Universcience

Apéndice G

Quantification of cloudiness in andean tropical cities with an experimental low cost radar, case Manizales (Colombia)

The Week of International Scientific Young Talents.

Enero 29 a Febrero 03 de 2017. París, Francia.



QUANTIFICATION OF CLOUDINESS IN ANDEAN TROPICAL CITIES WITH AN EXPERIMENTAL LOW COST RADAR, CASE MANIZALES (COLOMBIA)

Sthefania Grajales, Liliana Romo-Melo, Jorge Julián Vélez and Jorge Hernán Estrada

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Academic Working Group on Hydraulic and Environmental Engineering.

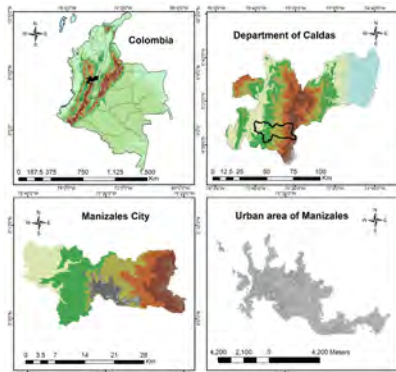
sgrajalesn@unal.edu.co, lromom@unal.edu.co, jhestradae@unal.edu.co, jivelezu@unal.edu.co



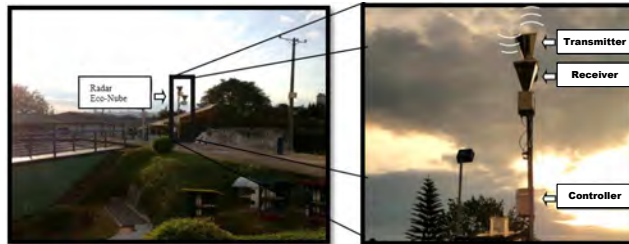
Did you know?



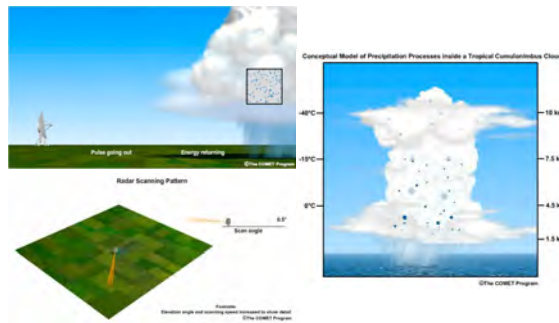
Case study



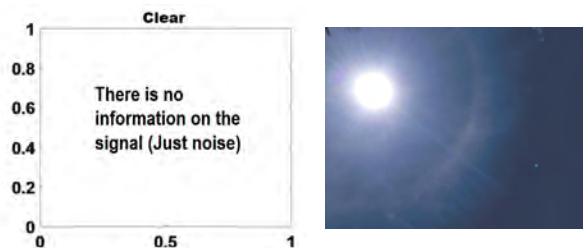
Low-cost experimental radar “Eco-Nube”



Meteorological Radars

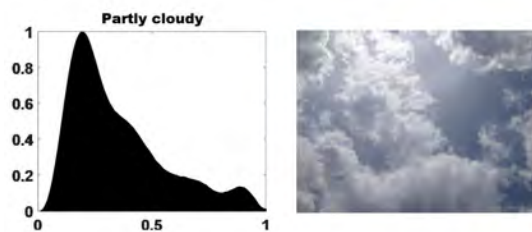


Evolution of the signal registered by the radar in different conditions of cloudiness

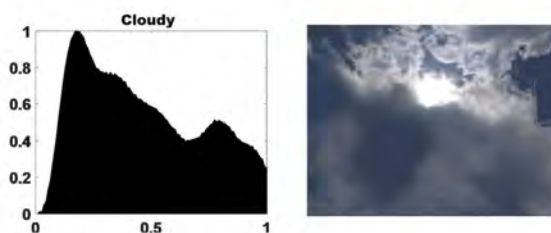




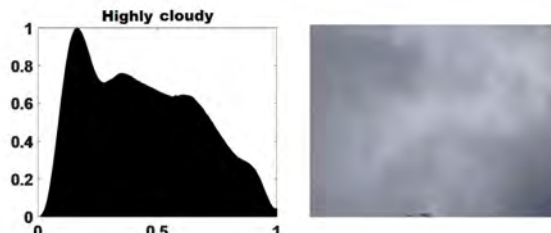
Evolution of the signal registered by the radar in different conditions of cloudiness



Evolution of the signal registered by the radar in different conditions of cloudiness

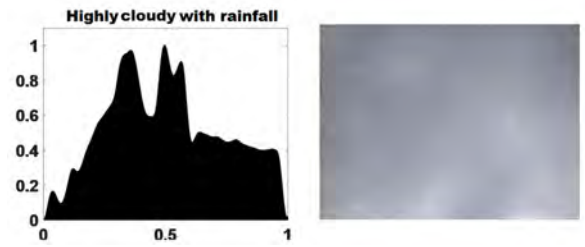


Evolution of the signal registered by the radar in different conditions of cloudiness

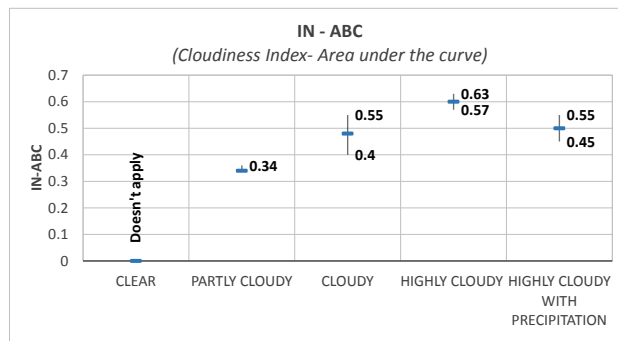




Evolution of the signal registered by the radar in different conditions of cloudiness



Evolution of the cloudiness index-ABC for the signals registered by the radar in different conditions of cloudiness.



Acknowledgments

This work has been done within the framework of the project

"Caracterización, identificación y modelamiento matemático de variables temáticas en la ciudad de Manizales y el Parque Nacional Natural los Nevados"

Financed by the program

"Es tiempo de Volver" - Colciencias.



Thanks for your attention.

Contacts:

Universidad Nacional de Colombia

- Academic Working Group on Hydraulic and
Environmental Engineering

***Sthefania Grajales, Liliana Romo Melo, Jorge
Julián Vélez y Jorge Hernán Estrada***

E-Mail:

*sgrajalesn@unal.edu.co, lmromom@unal.edu.co,
jhestradae@unal.edu.co, jjvelezu@unal.edu.co*

Apéndice H

Certificado Week of International Scientific Young Talents

universcience
Paris - France

universcience
30 80

Universcience est heureux d'avoir accueilli **Sthefania Grajales** pour sa participation à **la semaine des jeunes talents scientifiques internationaux** dans le cadre de la saison anniversaire 30/80 des trente ans de la Cité des sciences et de l'industrie et des quatre-vingts ans du Palais de la découverte, du 29 janvier au 3 février 2017.

Bruno Maquart, président.

Universcience was pleased to welcome **Sthefania Grajales** for participating in **the Week of international scientific young talents** within the season 30/80 when the Cité des sciences et de l'industrie celebrates its 30th anniversary and the Palais de la découverte its 80th anniversary from January 29 to February 03 2017.

Bruno Maquart, chairman and CEO.



Apéndice I

Confirmación artículo



Sthefania Grajales Norena <sgrajalesn@unal.edu.co>

Submission Confirmation

1 mensaje

Agriculture, Ecosystems & Environment! <eesserver@eesmail.elsevier.com>

27 de abril de 2017, 17:08

Responder a: "Agriculture, Ecosystems & Environment!" <agee@elsevier.com>

Para: sgrajalesn@unal.edu.co, sthefaniagrajalesnorena@gmail.com

This is an automatically generated response indicating that your submission entitled "IDENTIFICATION OF CLOUDINESS IN ANDEAN TROPICAL CITIES WITH AN EXPERIMENTAL LOW COST RADAR, CASE MANIZALES (COLOMBIA)"

"Research Paper" has been received by the Editorial Office of Agriculture, Ecosystems and Environment .

The Editorial Office will contact you with a manuscript reference number and further details of the review process in due course.

Thank you for submitting your work to our journal.

With kind regards,

Elsevier Editorial System
Email: agee@elsevier.com

Apéndice J

Identification of cloudiness in andean tropical cities with an experimental low cost radar, case Manizales (Colombia)

IDENTIFICATION OF CLOUDINESS IN ANDEAN TROPICAL CITIES WITH AN EXPERIMENTAL LOW COST RADAR, CASE MANIZALES (COLOMBIA)

Sthefania Grajales, Liliana Romo-Melo, Jorge Julián Vélez y Jorge Hernán Estrada

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental.

sgrajalesn@unal.edu.co, lmromom@unal.edu.co, jhestradae@unal.edu.co, jjvelezu@unal.edu.co

ABSTRACT:

The observed differences in the shape of radar signals acquired in a cloud-cover/rainfall experiment, under a range of meteorological conditions, exhibited patterns that were used to create an index for determining the extent of cloud-cover. The responses to radar waves were normalized and they exhibited distinct patterns that were associated with the various conditions of cloud-cover (clear, partly cloudy, cloudy and dense cloud-cover). The characteristic signal reflected the predominant meteorological condition. In order to quantify the strength of the radar signals, an index was formulated based on the mean of the area below the normalized curve of a complete radar cycle. The index range varied between 0 and 1, where 0 corresponded to clear conditions (no cloud-cover), and 1 to a dense cloud-cover with elevated probability of rainfall. The benefits of this investigation lies in the finding that it is possible to calibrate the prevailing meteorological conditions with radar using this low cost conventional microwave methodology, and quantify cloud-cover and the strength of signals registered during rain events.

KEYWORDS: Cloudiness index, meteorological radars, signal processing.

INTRODUCTION

The formation of clouds is a consequence of the dynamics of hot air masses. When these masses of air ascend to the atmosphere, they lose pressure, expand and cool. In this process, suspended particles, in the form of water droplets or small ice crystals, condense and generate water vapor (Martínez Isodoro, 2015). The condensation of this vapor gives rise to the clouds. A common way to measure cloudiness in an area is through visual inspection. This technique consists in dividing the celestial vault in areas called octal and to estimate the percentage of covered sky. Thus, a clear day is 0 octal, slightly cloudy days vary in a range between 1 to 3 octal, cloudy days are between 4 and 5 octal, very cloudy days between 6 and 7 octal and totally cloudy Covered or total cloud cover correspond to 8 octal (Cantolla, 1984).

A more precise measure is the one that is made by the use of meteorological radars. These instruments allow spatial representation of precipitation. They are provided with an emitter that sends a microwave burst to the environment and a receiver that records the reflected signal in echo form. The result of the impact of the signal on the cloud is the generation of an echo whose characteristics depend on the density of the cloud. Meteorological radars allow quantitative estimation of precipitation in large areas (1x1, 2x2 km²) at intervals of 5 or 10 minutes and generally make a 360 ° volumetric sweep (Rosengaus, 1999). The variation of the waveform recorded by the pluviometric radars provides information on the complexity and characteristics of the clouds and allows to discover the presence, type of cloud and its position in space. Rainfall estimates obtained from meteorological radars are essential in generating early warnings of phenomena such as landslides and torrential flows (López, Miguel, Campiñez, & Telvent, 2006).

There are several works in which the information captured by the meteorological radars is analyzed to determine the percentage of cloudiness of an area. One of the researches on this topic in Colombia, is the work of (Briceño, 2005). This author presents a conceptual basis for the application of hydro-climatological radars in Colombia. Regarding the relation and influence of the meteorological variables in the cloudiness, (Ortiz et al., 1960) analyzed the relationship between the rainfall data and the images of a meteorological radar.

The objective of this research was to perform the calculation of a cloudiness indicator obtained from the time series recorded by an experimental meteorological radar. This radar was developed with low cost materials by members of the Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. The obtained indicator allowed to increase the knowledge of the dynamics of the clouds in a city of half mountain of the Colombian Andean tropic.

MATERIALS AND METHODS

Study area

Manizales is located in the central Andes mountain range (Figure 1). It is a medium-mountain city within the Intertropical Confluence Zone -ZCIT. It has two periods of maximum precipitation in the year and an annual precipitation average of 2000 mm (Fernández, Linares, & Gómez, 2006), strongly influenced by El Niño Southern Oscillation-ENSO. It presents an equatorial climate and, in general, 70% of the days of the year are rainy, appreciating great mass movements of clouds and microclimates that dominate the zone (Suárez et al., 2015). In addition, the mountainous effect and the valleys of Cauca and Magdalena generate very particular climatic behaviors in the Colombian Andean zone. This climatic variability has led to the interest of exploring cloud dynamics and its relationship with the behavior of local environmental variables in order to have a better understanding of the behavior of clouds in the city of Manizales.

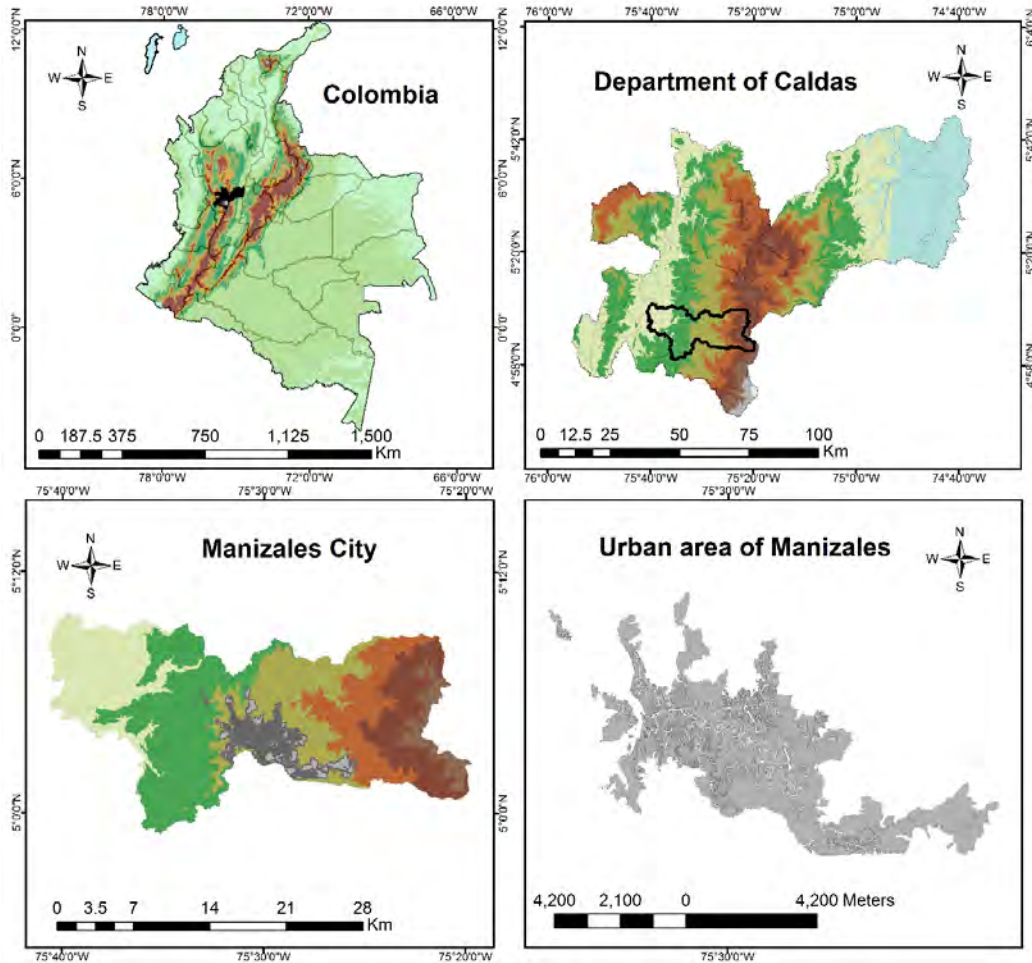


Figure 1.- Geographical location of the study area, city of Manizales.

Experimental Radar Eco-Nube

The Universidad Nacional de Colombia, Manizales-UNAL Sede Manizales-has a low-cost experimental pluviometric radar called Eco-nube. This radar was developed by students and professors of the Faculty of Engineering with the objective of detecting the presence of clouds, measuring their distance and exploring the dynamics of the cloud by studying the reflected pulses (CORPOCALDAS, 2014). The Eco-nube radar was built with the magnetron of a conventional microwave that generates a signal of high voltage with a frequency of 2.46 GHz. The radar is composed of an emitter, a receiver and a control system. The emitter sends the microwave burst to the environment, when the signal collides with a cloud a part of it is reflected and returns in echo form. The receiver receives the signal and the control system performs the acquisition, demodulation and digitizing operations (See Figure 2). This information is processed through software that acquires echoes, creates historical data, displays the echo signal and generates .wav files for later analysis.

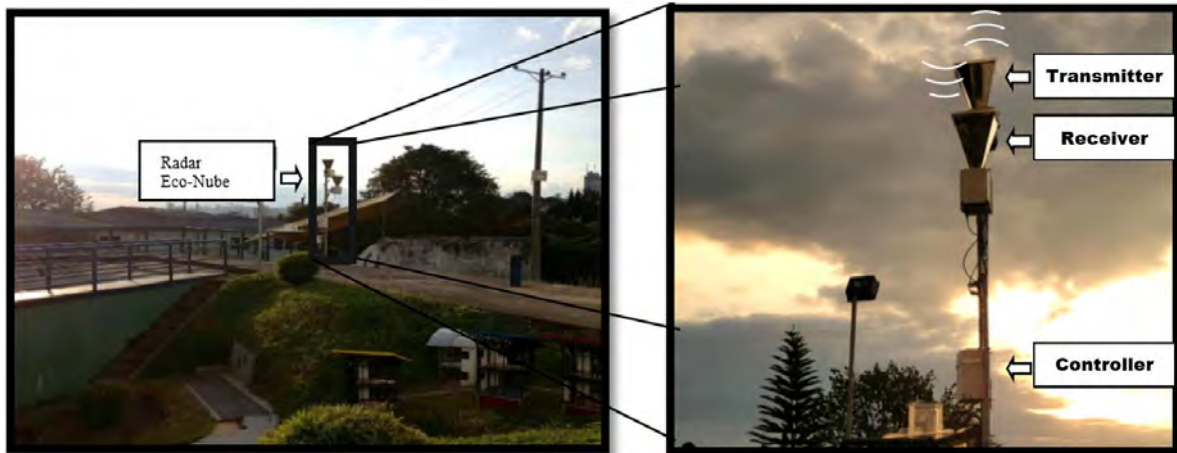


Figure 2.- Low-cost experimental "Eco-Nube"

Description of the signals

The signals analyzed in this research correspond to daily records acquired by the radar in two phases of the project. The first phase corresponds to tests performed during the month of December 2014, with signals acquired with a sampling frequency of 385000 data per second covering four cloud conditions: clear days with total absence of clouds (0 oktas), partly cloudy days With one or more clouds (1 to 3 oktas), cloudy days with almost total clouds (4 and 5 oktas) and heavily clouded but not rainy days (6 to 8) (Grajales, Romo, Vélez, & Estrada , 2016). In a second phase of the project, conducted between August and December 2015, the acquisition system was modified and the new records were acquired with a much lower sampling frequency of 44100 data per second. This second phase of the project analyzed the signs acquired during days with rain events.

The signals acquired in the two phases of the project were analyzed qualitatively with the software Matlab and it was possible to verify the existence of different patterns in the signals, such as variations and attenuations in amplitude and wavelength, making possible to obtain a qualitative characteristic for the classification of the signals.

METHODOLOGY

The pulses reflected by the clouds to the radar were characterized by the analysis of the amplitude and the wavelength of the following form.

Step 1. Analysis of signals in time domain and frequency. Each record was segmented into one-minute non-overlapping windows. These signal parts were plotted as a function of time and frequency.

Step 2. Filtering the signal. To eliminate noise from the signals, the registers were filtered with a low-pass filter with cutoff frequency at 1 kHz as indicated in equation (1) (Hank Zumbahlen, 2009).

$$H(s) = k \frac{1}{1 + \frac{s}{wc}} \quad [1]$$

where:

H: transfer function, low pass filter.

S: signal to be filtered.

K: Filter gain equation constant.

w_c: cut-off frequency.

Step 3. Temporal analysis at low resolution. The filtered signals resulting from the segmentation were analyzed in the time domain at a very low resolution of 0.04 (s). This analysis revealed a defined and periodic waveform in each cloud state.

Step 4. Detection of complete cycles. An algorithm was developed for the identification and superposition of the complete cycles of the signal. This analysis allowed to identify in detail the own characteristics of amplitude and wavelength for each state of cloudiness.

Step 5. Standardization and standardization of the signal. For a correct comparison of the waveforms the amplitudes of the cycles were normalized by subtracting the mean and the standard deviation, as indicated by equation 2. In addition, the time axis of each cycle was standardized between 0 and 1 as indicated in the equation 3, (Aguilar, 2008).

$$Z_1 = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad [2]$$

Where:

x: Value to Normalize.

Z₁: Normalized Value.

μ: Mean population.

σ: Standard deviation.

$$Z_2 = \frac{x}{\max(X)} \quad [3]$$

Where:

x: Value to standardize.

Z₂: Standardized value.

X: Population.

Step 6. Calculate areas under the curve. The area under the curve of each complete cycle (normalized and standardized) was calculated by the trapezoid method as shown in equation 4. This method is a numerical approximation to the integral of each curve (Miji & Ujevi, 2008).

$$ABC = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = \frac{1}{2} h (f_1 + f_2) - \frac{1}{12} h^3 f''(\xi) \quad [4]$$

Where:

ABC: Area Under the Curve

f_i = *f*(*x_i*)

h : separation between points
 ξ : is a point between $x_1 \leq \xi \leq x_2$

Step 7. Calculate the cloudiness index IN-ABC. The consistency in the results obtained after applying the previous steps, allowed to formulate Area Index of Cloudiness Under the curve IN-ABC (equation 5) with which it was possible to associate a numerical value with each state of cloudiness (Grajales, Romo, Vélez, & Estrada, 2015).

$$IN-ABC = \overline{ABC} \pm \sigma(ABC) \quad [5]$$

Where:

IN-ABC: Index of Cloudiness, Area Under the curve.

ABC: Area average Under the curve.

ABC: Area Under the curve.

σ : Standard deviation.

Step 8.

RESULTS

The signals were analyzed regarding to time and frequency. In the next figure, it can be seen the signal behavior regarding to, where, the time domain graphs revealed that the voltage amplitude of the radar-acquired records is variable and does not describe a direct relationship to the cloud state.

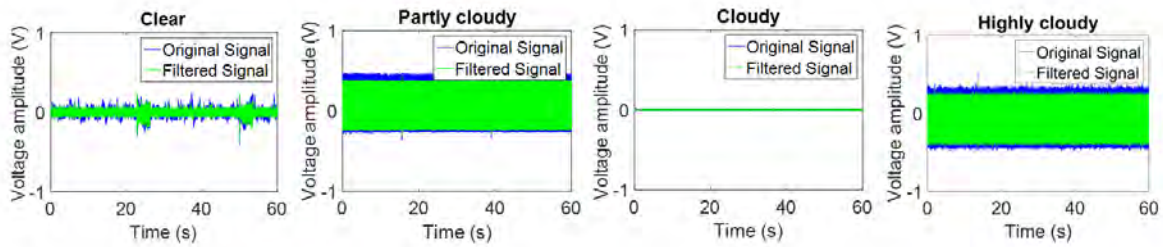


Figure 3.- Voltage amplitude as a function of time for varied meteorological conditions.

However, the graphs in the frequency domain showed that the greatest amount of information, which characterizes the cloudiness condition, is concentrated at low frequencies, between 1 and 1000 Hz. For this reason, a step filter Low with cutoff frequency at 1 kHz (equation 1). The results of this process are shown in figures 3 to 7 (on the left the graphs as a function of time and on the right the graphs as a function of the frequency).

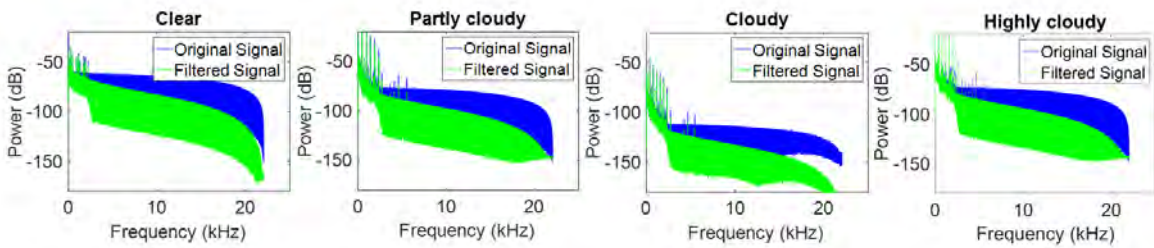


Figure 13. Power (dB) as a function of frequency for varied meteorological conditions.

After the segmentation and filtering of the signals, a time domain analysis was performed at a resolution of 0.04 (s) as shown in Figures 8a-8e. It can be observed how each cloud state presents a representative form, which is periodic for the partially cloudy, cloudy, heavily cloudy states and for signs with rain events. It was verified that these morphological characteristics are maintained throughout the record.

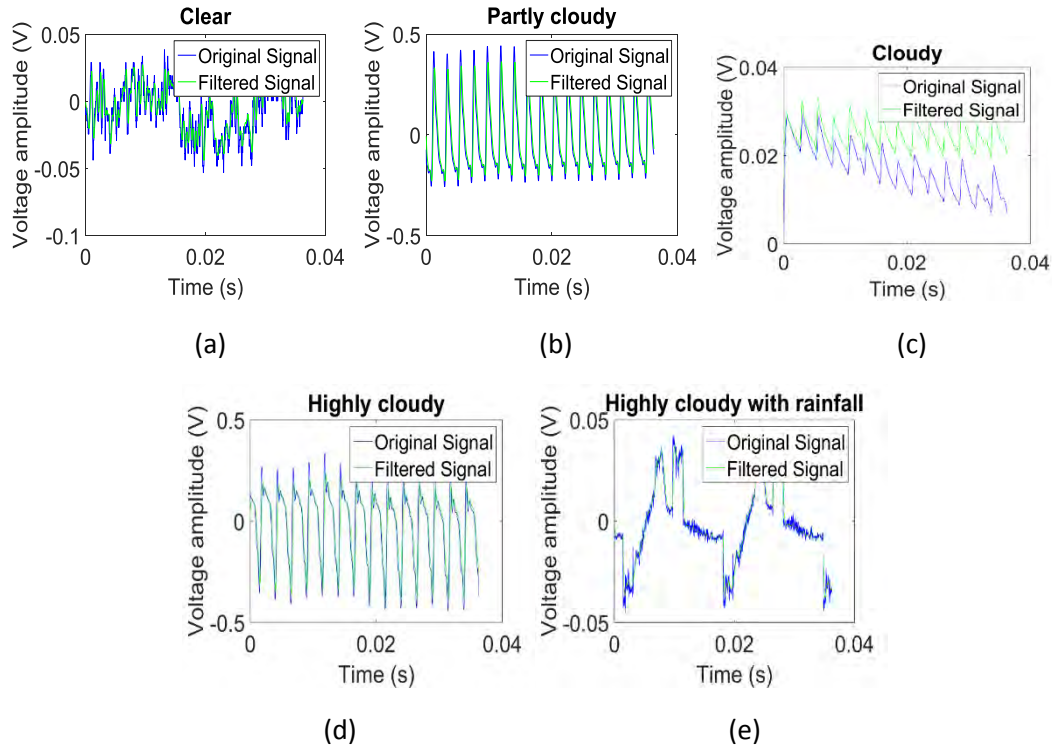


Figure 8.- Morphological characteristics of the signals for the different states of cloudiness, a) clear day, b) partly cloudy day, c) cloudy day, d) highly cloudy day and e) rain event

The different patterns in the waveforms found (variations in amplitude and wavelength) make possible a classification of the signal for each condition of cloudiness. As can be seen in Figure 9a, it is evident that on clear days, in the absence of clouds, the pulse sent by the radar emitter to the atmosphere is not reflected to the receiver. The signal lacks periodicity and deterministic characteristics. However, in the records obtained on days with a cloudiness presence and during rainfall events (Figures 9b, 9c, 9d and 9e) the signal has harmonic characteristics with one with a defined and discriminant waveform for each class.

Figure 9 shows the superimposition of several complete signal cycles for each cloud state after the filtering, standardization and normalization process described by equations (1), (2) and (3).

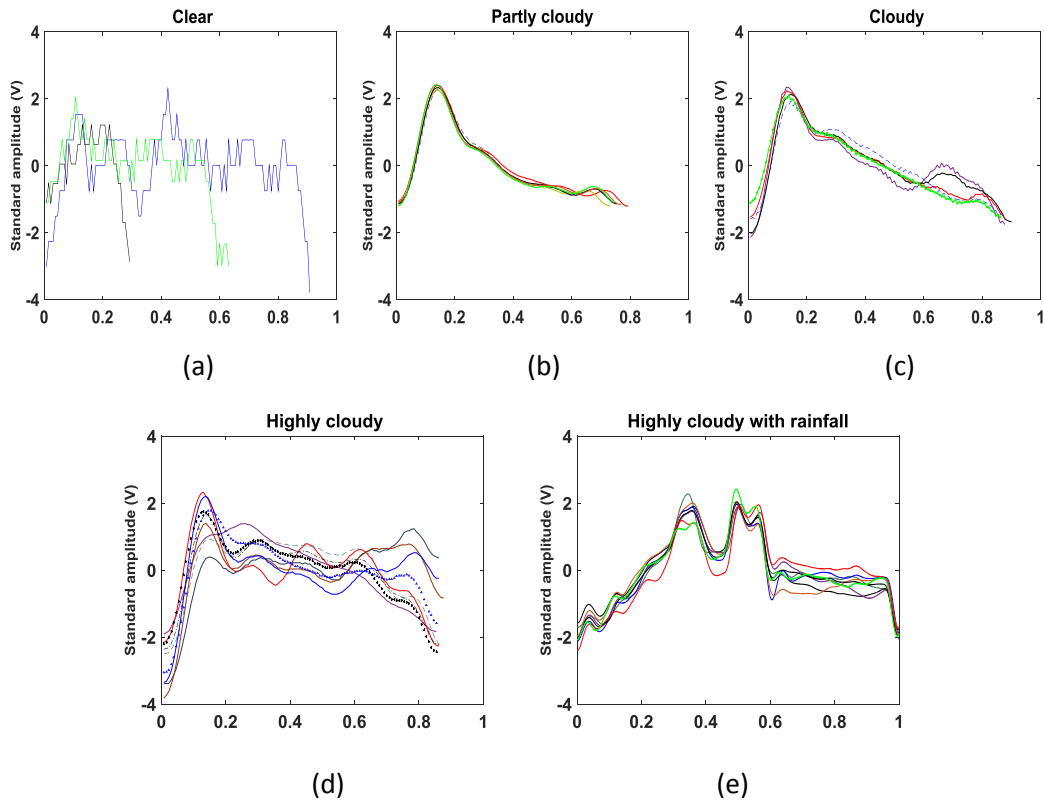


Figure 9.- Overlap of complete cycles of signals with different conditions of cloudiness: a) clear sky, b) partly cloudy sky, c) cloudy sky, d) highly cloudy sky, e) rain event.

The overlapping of the standardized and standardized complete cycles (figure 9) allowed to observe the evolution of the waveform in each of the cloud conditions. It can be noted how the amplitude and the length of the wave increases as cloud conditions increase. It is also observed that there is a low dispersion between registers with the same cloudiness condition, so that in general there is a form with characteristics that remain unchanged throughout the cycle, which makes the associated cloud state easily identifiable.

However, it is clear that the cycles of densely cloudy days show greater dispersion, with more varied wave groups. This dispersion can be associated to very variable cloudiness, with cloud overlap. It is possible that this phenomenon is associated with the variation of the wavelength in this type of signals.

Figure 10 shows the graphs of the areas under the curve of the standardized and standardized forms that characterize each cloud state. These areas were calculated by the trapezoidal method as indicated in equation 4. The calculation of these areas allowed to associate a numerical value to each state of cloudiness

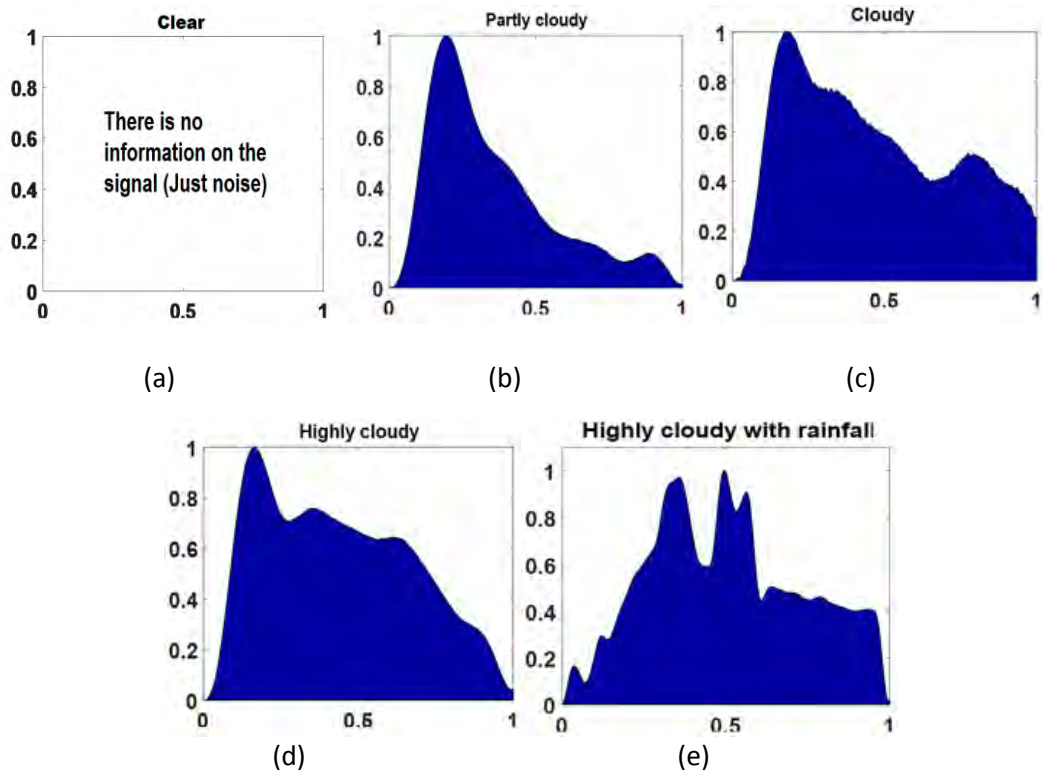


Figure 10.- Areas under the curve of complete cycles characteristic for each state of cloudiness:
 a) clear sky, b) partly cloudy sky, c) cloudy sky, d) highly cloudy sky,
 e) rainy event.

It is possible to observe that the waveforms associated to partially cloudy days (Figure 10a) are characterized by a crest with an asymmetric tip offset to the left and a narrow base. The characteristic peak of this wave comprises a smaller area with respect to the other waveforms. On the other hand, the wave form of a densely cloudy day (Figure 10c) presents a flattened main crest similar to a plateau that envelops a larger area because the convolution of the local crests increases the magnitude of the signal throughout the cycle.

In general, waveforms associated with cloudy, heavily cloudy days and days with rain events (Figures 10b, 10c and 10d) are affected by the convolution of secondary peaks associated with local maxima starting from the base of the signal and Which increase proportionally with the cloudiness.

On cleared days, with no clouds present, (Figure 10e) the recorded signal is random and there are no defined waveforms. This is because the pulse sent by the radar encounters no obstacle and the signal is not reflected to the receiver. In this case, the recorded signal only contains noise.

Figure 11 shows the evolution of the index of cloudiness IN-ABC calculated as a function of the area under the curve of each filtered signal cycle, normalized and

standardized. This index allows to determine the range in which the measurements of the area of the characteristic waveforms vary for each state of cloudiness.

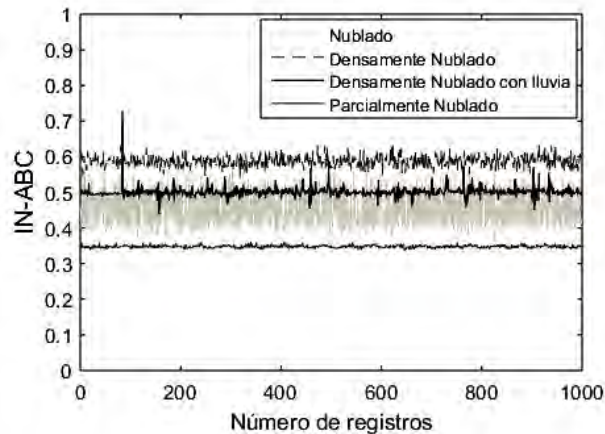


Figure 11.- Evolution of the cloudiness index for the signals recorded by the radar in different conditions of cloudiness.

As can be seen in Figure 11, the IN-ABC records characteristic ranges and average values for each cloud state. In records for partially cloudy days, the IN-ABC recorded the lowest values, with an average value of 0.35 and low dispersion. The IN-ABC for cloudy day records increases, with values in the range between 0.4 and 0.55. This dispersion may be due to the variability in the density of the clouds and their movement or superposition over the celestial vault. The highest IN-ABC values were obtained for densely cloudy days, with a mean value of 0.6. Finally, the IN-ABC values obtained for rainy days vary in the range of 0.45 and 0.55. The decrease in the value of the index and the greater dispersion obtained with respect to the densely cloudy days may be due to the pulses sent by the radar collide with the raindrops rather than with the clouds and bounce to less elevated heights.

It should be noted that Figure 11 does not present the IN-ABC for clear days in the absence of clouds, since it was possible to calculate it because there is no periodicity in the signal.

Once a defined waveform was found, it was necessary to verify or check at what frequencies the signal was found. Although the signal was filtered around 1000 hz, the spectral density of Fourier of the signals showed a wide range of frequencies that still dominated the signal and it was not known exactly which frequencies corresponded to the components that described the different meteorological conditions. As can be seen in the figure 12.

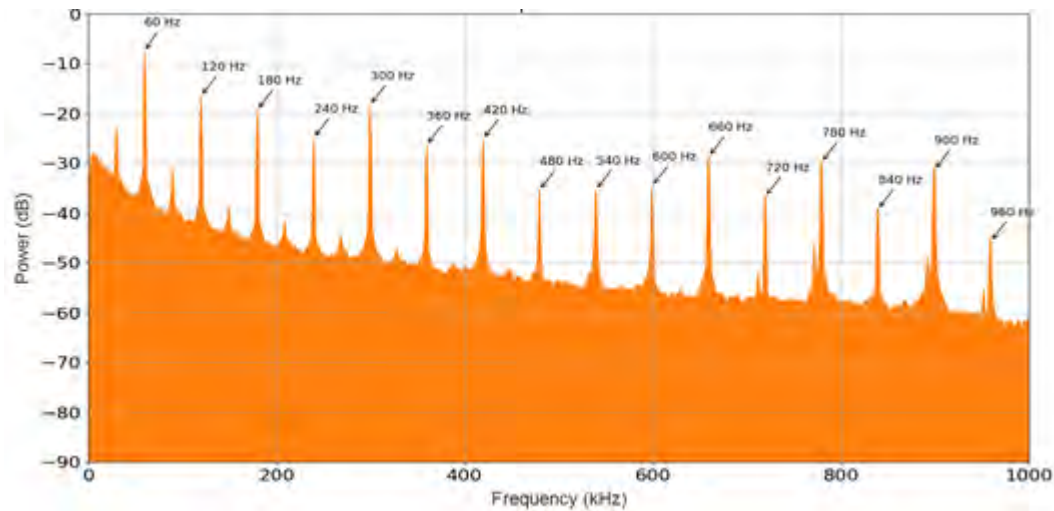


Figure 12.- Analysis of the spectral power density of signals acquired by radar.

A frequency domain analysis, such as those shown in Figure 13, allows the signal to be validated, this means, to confirm that it is within the range of powers and frequencies proper to the nature of the radar and not to other unwanted signals, being around the 60 Hz and its harmonics (120, 180, 240, 300Hz, and so on), and also to develop an agile and reliable classification method.

Although the analysis that focuses on the waveform of the signal is quite accurate to allow to characterize a signal with enough precision, it is very susceptible to noise, interference or other non-stationary signals. This is because this method does not allow to discriminate the nature of the signal and has problems when processing high amounts of information. That is why it was decided to develop another method that would allow to describe long sets of data and also an agile and reliable classification.

Therefore, all arrays were subdivided with information in much smaller parts. To each of these segments the power spectral density was calculated and the corresponding values of their fundamental frequency and their first 9 harmonics were isolated (See Table 1), in other words, 10 power values were obtained for each segment and associated with its corresponding cloudiness status.

Table 1. Discriminating frequencies

60Hz	120Hz	180Hz	240Hz	300Hz	360Hz	420Hz	480Hz	540Hz	600Hz	CLOUDINESS
95.261	39.222	26.268	12.054	31.781	12.333	14.300	3.745	1.938	5.485	CLEAR
95.261	39.222	26.268	12.054	31.781	12.333	14.300	3.745	1.938	5.485	PARTLY CLOUDY
85.785	24.768	29.798	9.395	30.983	12.280	14.999	4.208	1.521	4.795	PARTLY CLOUDY
95.774	33.700	28.532	10.794	31.784	13.038	15.344	3.738	2.026	5.701	CLEAR

93.365	39.326	31.443	11.803	30.975	13.313	14.908	4.294	2.264	5.536	CLOUDY
92.155	25.905	29.077	11.410	30.012	11.360	14.345	2.807	1.720	4.998	CLOUDY
97.446	30.658	29.177	9.572	30.697	13.057	15.349	3.865	1.755	5.610	PARTLY CLOUDY
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

With this information, we wanted to generate a method to predict the cloudiness status from one or several power values. The first thing that could be concluded is that it would take more than one dimension to develop the classifier. Finally, by analyzing a combination of three frequencies (240Hz, 540Hz and 360Hz) (see Figure 14) and with the help of a graphical representation, it is evident that states can be grouped into regions of a space determined by these three powers. Although it is possible to implement a classifier that takes the 10 inputs, the purpose of this analysis is to reduce them to the minimum and to determine the frequency spaces with more weight in the prediction of the cloud state.

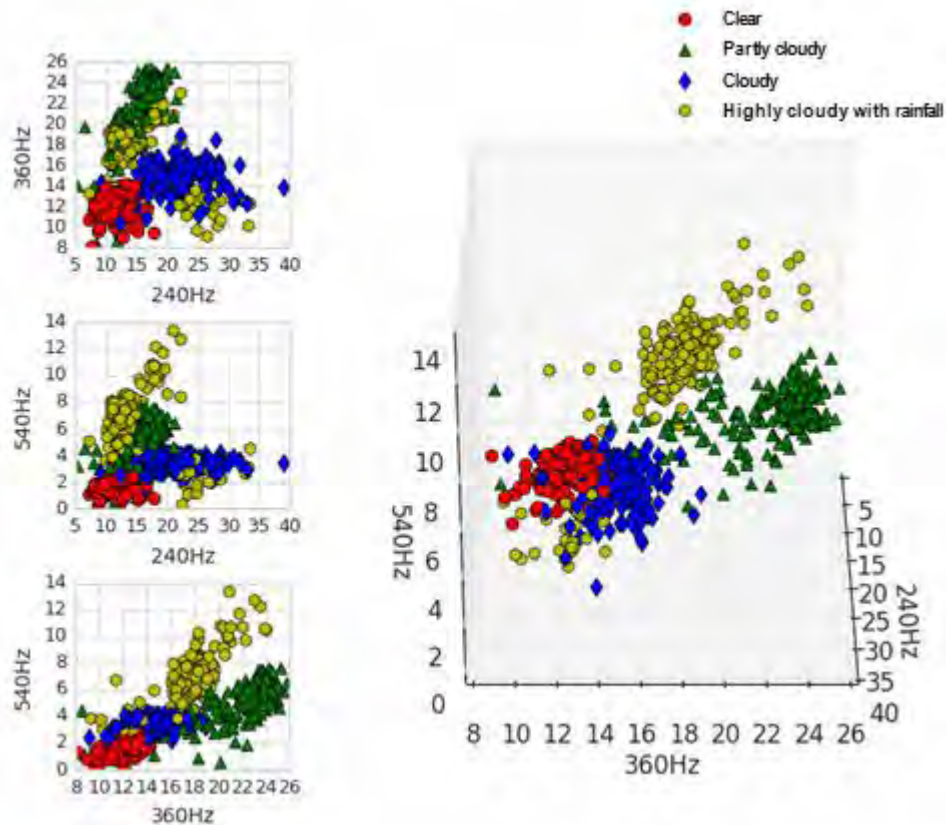


Figure 13. Classification of signals by meteorological scenarios as a function of frequency.

In the previous figure, it can be seen that the data set associated to each meteorological condition occupies a space independent of the graph, additionally these frequencies represent few overlaps with each other. However, the highly clouded with rain condition is

the one with the greatest dispersion in the three dimensions, and it is only through this analysis that the occurrence of the event can be seen, but not the quantification of the event.

CONCLUSIONS

In this research, a qualitative and quantitative analysis of the waveforms received by the experimental meteorological radar Eco-Nube was carried out in different test campaigns. The seasonality of the signals was analyzed and it was verified that the registers present a different behavior depending on the prevailing cloudiness condition. It was also verified that the variations and attenuations in the amplitude of voltage and in wavelength of the signal are greater as the cloudiness increases that allowed its classification.

It was verified that the cloudiness of the signals acquired by the radar can be quantified as a function of the magnitude of the area under the curve of a complete signal cycle, after filtering, normalization and standardization. This magnitude could be verified to increase as the cloudiness increases. It was also verified that on clear days, with cloud absences, the receiver only registers noise. This is because the signal sent by the radar finds no obstacle in the space and the signal can not be reflected to the receiver.

The graphs and analyzes made confirm the existence of different scenarios by meteorological condition, which have their own characteristics that identify them.

A first spectral analysis of the signals obtained with the radar confirms that the fundamental frequencies that contain the information are around the 60 Hz band, this could be a disadvantage since it is necessary to guarantee a good signal-noise relation so that the collection of data is not affected by the inherent noise in the network.

Although the signal may be associated with many harmonics in addition to the fundamental frequency, only at least 3 are required to implement prediction methods with good accuracy.

A frequency analysis is much more robust, because it allows at the same time to classify the signal, to validate the origin of the information and to discriminate it from undesired non-stationary signals.

This research contributes to increase knowledge about the cloudiness behavior in the city of Manizales and, in the near future, allows the hydrological calibration of the experimental radar Eco-Nube, constructed from low cost materials with a conventional microwave, for the quantification of the cloudiness and estimation of the power of the signals registered during the rain events.

As a future work, it is proposed to explore the dynamics of the clouds through entropy and through multiscale analysis. This analysis would allow to reduce or eliminate the uncertainty that occurs in a physical phenomenon like this. In addition, the entropy method provides other important elements to understand the complexity of hydrological processes in a wide range of space scales.

REFERENCES

- Aguilar, D. P. R. (2008).** *Distribución normal prueba de normalidad*. Retrieved from <http://ley.exam-10.com/other/9550/index.html>
- Briceño, J. A. C. (2005).** *Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidrometeorológicos en Colombia*.
- Cantolla, A. U. (1984).** Nubosidad y nieblas en el observatorio de Igueldo en San Sebastián. *Lurralde: Investigación Y Espacio*, N° 7(ISSN 0211-5891), págs. 151–160.
- CORPOCALDAS, U. N. (2014).** *Gestión del riesgo de los desastres en Manizales. Manizales*.
- Fernández, F. M., Linares, J. P. L., & Gómez, J. A. P. (2006).** Red de estaciones meteorológicas para prevención de desastres en Manizales – Caldas (Colombia).
- Grajales Noreña, S., Romo Melo, L., Estrada Estrada J. y Vélez Upegui J. (2015).** Índice de nubosidad IN-ABC para la clasificación de señales de un radar pluviométrico experimental en la ciudad de Manizales. *Segundo Congreso Nacional de Ciencias Ambientales*. Pereira, Colombia: Red Colombiana de Formación Ambiental y Universidad Tecnológica de Perera.
- Grajales, S., Romo, L., Vélez, J. J., & Estrada, J. H. (2016).** Análisis de las Señales de un Radar Pluviométrico Experimental. *Boletín Ambiental*, 129, 1–12.
- Hank Zumbahlen. (2009).** Phase Response in Active Filters. *Analog Devices*, 43, 4.
- López, M., Miguel, C. De, Campiñez, R., & Telvent, M. (2006).** Desarrollo de Plataforma de Supervisión para Cuencas Hidrológicas. *Telvent*.
- Martínez Isodoro. (2015).** Termodinámica de la atmósfera. In *Environmental thermodynamics*.
- Miji, L., & Ujevi, N. (2008).** An optimal 3-point quadrature formula of closed type and error bounds, 42, 209–220.
- Ortiz, E., Tec, I., Públicas, O., Tecnología, S. L., Pujol, L., Civil, I., ... Università, T. (1960).** Combinación Bayesiana de datos pluviométricos e imágenes del Radar Meteorológico mediante Block Kriging y Filtro de Kalman . Aplicación en España.
- Rosengaus, M. (1999).** Utilizando Radar Meteorológico. *Ingeniería Del Agua*, 6(junio), 185–198.
- Suárez Hincapié J., Romo Melo L., Vélez Upegui J. y Chang P. (2015).**). Classification and space-time analysis of precipitation events in Manizales, Caldas, Colombia. En AGU Fall Meeting. San Francisco, EE.UU.

Índice alfabético

D

Densidad espectral de potencia, 50, 51, 63, 84, 88

E

Entropía, 35

Errores de estimación, 105

Escenarios de análisis

altamente nublado, 79

despejado, 77

nublado, 79

parcialmente nublado, 78

Estación meteorológica, 17

Estandarización, 59

F

Filtros, 62

butterworth, 62

chebyshev, 62

elíptico, 62

Fourier, 84

I

Intensidad, 31, 98

Interpolación, 57

M

Microondas, 26

N

Normalización, 59

Nubes, 8

clasificación, 10

formación, 8

medición, 12

P

Pluviómetro, 16

Precipitación, 13

formación, 13

medición, 16

R

Radar Eco Nube, 24

análisis de la información, 55

ancho de banda, 63

descripción de las señales, 56

estandarización, 56

filtros, 62

intervalo, duración e impulsos, 59

calibración, 49

centroide espectral, 51

densidad espectral de potencia, 51

densidad espectral de potencia al cuadrado, 52

IN-ABC, 72

- media, mediana y desviación estándar, 52
- funcionamiento, 27
- operación, 44
- partes, 26
- Radar meteorológico, 21
 - calibración, 31
 - calibración de la vecindad, 34
 - calibración de retraso, 34
 - calibración puntual, 33
 - coincidencia de distribuciones de probabilidad, 32
 - coincidencia de distribuciones de probabilidad en ventanas, 33
 - entropía, 35
 - errores, 37
 - integral tiempo-área, 32
 - fundamento físico, 22
 - radar pluviométrico, 24
 - tipos de radares, 23
- Reflectividad, 31, 50, 51, 91, 92
- Reflectividad-Intensidad, 88, 91, 95
- Regresiones, 52

S

- Submuestreo, 57