

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA**



**“Caracterización de meteoros, utilizando el radar VHF del  
Radio Observatorio de Jicamarca durante la presencia de  
ecos coherentes de Electrochorro Ecuatorial”**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO FÍSICO**

**Freddy Ronald Galindo Palomino**

**Lima – Perú**

**2007**

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se ha desarrollado un conjunto de algoritmos que permiten realizar la caracterización de ecos de meteoros en presencia o ausencia de ecos de electrochorro ecuatorial y/o ecos no especulares de meteoros. Esta técnica desarrollada es agresiva para ubicar ecos de meteoros y determinar los principales parámetros que permiten caracterizarlos. La técnica basa su funcionamiento en un proceso de selección manual, otorgándole al operario la decisión final de definir entre un eco de meteoro y un eco que no es de meteoro, para posteriormente determinar cada uno de los parámetros del meteoro (e.g., velocidad radial, rango inicial). Adicionalmente al proceso de caracterización, se analizaron técnicas para la remoción de ecos del electrochorro ecuatorial. Cabe resaltar, que justamente una de estas técnicas ha permitido identificar automáticamente más del 90% de los meteoros caracterizados manualmente. Los resultados obtenidos, permiten sentar la base para un futuro algoritmo automático. La validación de esta nueva herramienta para el procesamiento de ecos de meteoros, se ha realizado comparando los parámetros obtenidos en el experimento realizado el día 19 de Noviembre del 2002 y procesado con una técnica antigua (proceso automático conservador), con los parámetros obtenidos en el experimento realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005 y procesado con los algoritmos desarrollados en esta tesis (proceso manual). Los resultados obtenidos muestran un incremento en el número de meteoros observados, especialmente para tiempos donde el EEJ está presente. Se detectó un mayor número de meteoros de baja velocidad y se encontraron nuevas poblaciones de meteoros. La velocidad determinada de pulso a pulso mostró una diferencia menor a 2 km/s respecto a la velocidad obtenida del ajuste lineal del Rango vs. Tiempo. Adicionalmente, esta nueva técnica posibilita un análisis cuidadoso de cada meteoro. Todas estas características son ejemplos de la utilidad de esta nueva herramienta para el procesamiento de ecos de meteoros.

A mis queridos padres por su apoyo incondicional,  
por su cariño y por ser el soporte diario de mi vida.

A la señora Margarita quien confió en mí y desde el  
cielo siempre me brindó su apoyo.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jorge Chau por brindarme la oportunidad, confianza, libertad y motivación en la elaboración del presente trabajo de Tesis, a su vez por todo su apoyo y conocimientos brindados hacia mi persona. Un agradecimiento especial por ser mi asesor.

A Pablo Reyes y Karim Kuyeng, encargados del sistema de adquisición, por el apoyo brindado en la etapa de adquisición y la óptima realización de los experimentos de meteoros.

Al personal encargado de los transmisores, por el valioso tiempo brindado en cada uno de los experimentos de meteoros.

Al personal de IT, por su apoyo y confianza hacia mi persona, por sus sugerencias, por ayudarme a resolver dudas y sobre todo por crear un ambiente amigable que me permitió crecer profesionalmente y como persona.

Al personal del Radio Observatorio, por la confianza, apoyo y cariño brindado, todo este tiempo que estuve realizando el presente trabajo de Tesis, particularmente a los voluntarios que ayudaron al procesamiento de unas horas de datos.

A Marita Villaverde por su apoyo brindado en la preparación del presente trabajo de tesis.



# CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABLAS .....	xvi
LISTA DE TABLAS .....	xvi
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 2 FUNDAMENTO TEÓRICO .....	5
2.1 Conceptos básicos sobre meteoros. ....	5
2.1.1 ¿Qué es un meteorito? .....	5
2.1.2 Origen de los meteoroides .....	6
2.1.3 Lluvia de meteoros .....	7
2.1.4 Meteoros esporádicos .....	9
2.1.5 ¿Por qué se estudian los meteoros? .....	12
2.2 Técnicas de observación para el estudio de meteoros. ....	13
2.2.1 Observaciones visuales.....	13
2.2.2 Observaciones telescópicas .....	13
2.2.3 Video observaciones.....	14
2.2.4 Técnicas fotográficas.....	15
2.2.5 Observaciones con radar.....	15
Capítulo 3 EL ROJ Y CONCEPTOS BASICOS DE RADAR.....	17
3.1 La atmósfera sobre Jicamarca. ....	17
3.1.1 Ecos del electrochorro ecuatorial .....	19
3.1.2 Ecos de meteoros (“Meteor-head echoes”) .....	20
3.1.3 Ecos de la cola del meteorito .....	22
3.2 Conceptos básicos de radar.....	23
3.2.1 Concepto de RADAR .....	23
3.2.2 Ganancia de una antena de transmisión.....	26
3.2.3 Sección transversal de dispersión .....	27
3.2.4 Ecuación del radar .....	27
3.2.5 Conceptos relacionados con radar .....	29
3.2.5.1 Frecuencia base.....	29

3.2.5.2	Tiempo de repetición de pulso (PRT – Pulse Repetition Time).....	29
3.2.5.3	Longitud del pulso transmitido.....	31
3.2.5.4	Potencia transmitida .....	32
3.3	Procesamiento de señales de radar .....	33
3.3.1	Muestreo de señales en tiempo continuo.....	33
3.3.2	Teorema de muestreo de Nyquist.....	35
3.3.3	Transformada de Fourier .....	35
3.3.4	Convolución .....	36
3.3.5	Filtros digitales.....	37
3.3.6	Función de correlación cruzada.....	38
Capítulo 4	CONFIGURACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS DE METEOROS EN EL ROJ.....	40
4.1	Configuración de la antena para el experimento.....	40
4.2	Tipos de pulsos utilizados en experimentos para meteoro.....	44
4.3	Proceso de decodificación .....	53
4.4	Configuraciones Típicas de los Experimentos para Meteoro.....	58
Capítulo 5	DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ECOS DE METEOROS.....	61
5.1	Etapas de pre-procesamiento.....	62
5.1.1	Selección de muestras.....	62
5.1.1.1	Selección de canales .....	63
5.1.1.2	Selección de perfiles.....	63
5.1.1.3	Selección de rangos .....	63
5.1.2	Integración coherente en rango.....	64
5.1.3	Cálculo de funciones estadísticas .....	64
5.1.4	Selección de posibles meteoros .....	65
5.2	Etapas de post-procesamiento .....	67
5.2.1	Lectura y presentación gráfica de los posibles meteoros .....	67
5.2.2	Selección manual de meteoros .....	69
5.2.3	Cálculo de los principales parámetros del meteoro: .....	71
Capítulo 6	REMOCIÓN DE LOS ECOS DEL ELECTROCHORRO ECUATORIAL.....	87
6.1	Remoción de EEJ utilizando la Coherencia y velocidad Doppler.....	87
6.2	Filtrado de componentes DC .....	90

6.3 Filtrado Pasa Alto .....	92
Capítulo 7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	95
7.1 Comparación de Parámetros Directos .....	95
7.2 Comparación de Parámetros Inferidos .....	101
7.3 Distribuciones bivariantes: Velocidad respecto a otros parámetros.....	104
7.4 Distribuciones de meteoros alrededor del ápex.....	106
7.5 Comparación del estimado de la velocidad radial .....	107
7.6 Distribución de Meteoros sobre Jicamarca.....	108
Capítulo 8 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	110
8.1 Conclusiones.....	110
8.2 Trabajo a Futuro .....	112
APÉNDICE A: INTERFEROMETRÍA EN RADARES .....	114
APÉNDICE B: CÁLCULO DE PARAMETROS DEL METEORO DERIVADOS DE LA GEOMETRÍA DE LA TRAYECTORIA DEL METEORO DENTRO DEL HAZ DEL RADAR .....	117
APÉNDICE C: PROPAGACION DE ERRORES EN EL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS DERIVADOS DE LA GEOMETRIA DE LA TRAYECTORIA DEL METEORO.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	131

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Meteoroide, meteoro y meteorito.....	6
Figura 2	Cuando la tierra cruza la orbita de un cometa, las partículas liberadas del cometa, ingresan a la atmósfera atraídas por la gravedad, generando un incremento del número de meteoros que ingresan normalmente, denominado Lluvia de meteoros [ver <a href="http://faculty.swosu.edu/terry.goforth/publicinfo/meteorshowers/perseids/2004/perseid_meteor_shower.2004.htm">http://faculty.swosu.edu/terry.goforth/publicinfo/meteorshowers/perseids/2004/perseid_meteor_shower.2004.htm</a> ]. .....	8
Figura 3	Las seis fuentes de meteoros observadas en el cielo. Se ha utilizado un sistema de coordenadas eclípticas modificado para esta distribución, donde el eje horizontal representa la longitud (en grados) respecto a la posición del Sol y el eje vertical representa la latitud [Perrygo, 2001]. .....	10
Figura 4	Frecuencia de impacto de meteoroides con la Tierra como función de su tamaño. [ <a href="http://www.tulane.edu/~sanelson/geol204/impacts.htm">http://www.tulane.edu/~sanelson/geol204/impacts.htm</a> ] .....	11
Figura 5	Información almacenada en dos cámaras para un mismo meteoro. La Figura de la izquierda muestra la imagen obtenida al usar una cámara con un lente de 2.8/20mm y un amplificador de primera generación. La figura de la derecha muestra la imagen resultante al usar una cámara con una lente de 1.4/50mm y con un amplificador de segunda generación [imagen extraída de <a href="http://www.imo.net/video/example">http://www.imo.net/video/example</a> ] .....	14
Figura 6	Principio de dispersión de una onda de radio debido a la “cola” del meteoro. Las antenas observadas son utilizadas para la transmisión y recepción de la onda de radio [Imagen extraída de <a href="http://www.imo.net/node/95">http://www.imo.net/node/95</a> ]. .....	16
Figura 7	Geometría del recorrido (línea gruesa color rojo) del Electrochorro Ecuatorial. Este recorrido no coincide con el ecuador geográfico (línea color verde). .....	17
Figura 8	Atmósfera sobre Jicamarca, debajo de los 150 km de altitud [cortesía del Prof. E. Kudeki, 2005]. La escala de colores representa la intensidad de la relación señal a ruido en decibeles (dB) de los ecos observados. ....	18
Figura 9	Diagrama del Electrochorro Ecuatorial: Campos eléctricos y corrientes [Anderson et al., 2002] .....	20
Figura 10	Gráfico Rango vs. Tiempo. Este gráfico muestra la potencia recibida de las diferentes alturas muestreadas (La escala de grises representa la intensidad de la relación señal a ruido de los ecos recibidos en dB). Las líneas inclinadas representan	

ecos de meteoros. En la parte inferior del grafico se muestra la fecha y el tiempo inicial del bloque de datos, con una exactitud de milésimas de segundo (+500 ms). .....	21
Figura 11 Ecos no especulares de meteoro. La escala de grises representa la intensidad de la relación señal a ruido de los ecos recibidos en dB.....	23
Figura 12 Geometrías para generación de ecos de meteoro (a) y ecos especulares (b) [Elford, 2001]. Los gráficos muestran la trayectoria del meteoro dentro del lóbulo principal de energía. ....	23
Figura 13 Señal compleja obtenida en ausencia de un objeto que permita el retorno de la energía transmitida. El color negro representa la parte real y el color rojo la parte imaginaria. ....	24
Figura 14 Eco generado debido a la presencia de un objeto o blanco que obstruye la trayectoria de la onda electromagnética, produciendo retorno de energía. El color negro representa la parte real y el color rojo la parte imaginaria de la señal recibida.....	24
Figura 15 Esquema fundamental de un sistema de RADAR biestático. ....	25
Figura 16 Diagrama de un punto “A” definido mediante coordenadas polares.....	26
Figura 17 Solape en frecuencia. Notemos como una frecuencia Doppler fuera del intervalo válido es reducida a un valor aparente dentro de este intervalo. ....	31
Figura 18 Conceptos relacionados con radar: Tiempo de repetición de pulso, Ancho del pulso y frecuencia base.....	32
Figura 19 Relación entre la potencia pico y la potencia promedio. ....	32
Figura 20 Muestreo periódico de una señal continua, para dos diferentes frecuencias de muestreo .....	34
Figura 21 A la izquierda una señal con periodo de 0.25s, el eje horizontal es el tiempo y el eje vertical la amplitud. A la derecha su transformada de Fourier, el eje horizontal es la frecuencia y el eje vertical la amplitud del espectro.....	36
Figura 22 Forma de los filtros pasa baja (parte superior) y pasa alta (parte inferior), en el dominio de tiempo y en el dominio de frecuencia.....	38
Figura 23 Configuración de antenas utilizada para las observaciones de meteoros, los días 22 y 23 de Noviembre del 2005. Las letras A, B y C representan los tres cuartos de la antena utilizados para el proceso de recepción.....	40
Figura 24 Configuración para la transmisión y recepción en el experimento de meteoros de los días 22 y 23 de Noviembre del 2005 (Cortesía de G. Vera, Jefe de Operaciones del ROJ, 2005).....	42

Figura 25 Configuración de fase en cada módulo de la antena de Jicamarca, para el experimento realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005.....	43
Figura 26 Patrón de radiación de la antena para el experimento de meteoros. Los valores mostrados en las líneas de contorno corresponden a la ganancia (en dB) de la potencia transmitida por el patrón de la antena respecto a la potencia máxima transmitida. ....	44
Figura 27 De arriba hacia abajo, pulso corto, pulso largo no codificado y pulso largo codificado, en los tres casos el ancho de baudio es igual 0.15 km. El número de baudios utilizado en los pulsos largos es 13, siendo el código utilizado en el tercer caso, el código Barker 13 .....	45
Figura 28 La Figura de la izquierda y derecha muestran los RTIs obtenidos a partir del pulso largo codificado y pulso corto, respectivamente. Notemos como la intensidad del gráfico de la izquierda es menor, lo cual se relaciona directamente con el número de meteoros detectados.....	48
Figura 29 Al igual que en la Figura 28, pero en un instante de tiempo donde la potencia recibida del EEJ es bastante fuerte. Notemos la diferencia en la potencia recibida entre el pulso largo codificado (Gráfico de la izquierda) y el pulso corto (Gráfico de la derecha). ....	48
Figura 30 Los gráficos de la parte superior e inferior muestran el RTI para el pulso largo codificado y el pulso largo no codificado, respectivamente. Notemos como los niveles de SNR son bastante similares. ....	49
Figura 31 Grafico rango versus tiempo, para observar la relación entre el ancho del pulso transmitido y la resolución en rango, para determinar un blanco.....	50
Figura 32 Respuesta al filtro acoplado. Al lado izquierdo un pulso no codificado, al lado derecho un pulso codificado (Barker 4). ....	51
Figura 33 Proceso de decodificación aplicando dos pulsos de distinta forma. Al lado izquierdo tenemos el resultado para el pulso codificado con el código Barker 13 y al lado derecho considerando un pulso largo no codificado.....	52
Figura 34 Función de Ambigüedad para el código Barker 13.....	54
Figura 35 En el lado izquierdo: Resultado obtenido aplicando la decodificación estándar. A la derecha: Decodificación realizando la búsqueda del Doppler que genere la mejor decodificación. ....	54
Figura 36 Algoritmo utilizado por Chau y Woodman [2004] para la decodificación de datos de meteoros codificados.....	55

Figura 37 El gráfico de la izquierda muestra el espectro para determinar la frecuencia Doppler, al lado derecho su gráfico de contornos. El valor máximo del espectro permite identificar el valor del Doppler y la ubicación del meteorito .....	56
Figura 38 Secuencia de pulsos recibidos para el experimento híbrido realizado.....	59
Figura 39 Diagrama simplificado del proceso realizado para la caracterización de los ecos de meteorito. Al lado izquierdo, la etapa de pre-procesamiento y al lado derecho, la etapa de post-procesamiento.....	61
Figura 40 Cálculo del nivel de ruido. El gráfico muestra la potencia de la señal recibida en 215 muestras seleccionadas por el criterio de alturas.....	66
Figura 41 Interfase gráfica, que permite seleccionar los eventos de meteoritos .....	68
Figura 42 Eco de un meteorito presentado en dos ventanas gráficas distintas. Los datos deben ser primero unidos para luego procesarlos.....	68
Figura 43 Esquema de la región seleccionada. Esta máscara permite enlazar la información de las funciones estadísticas con la ubicación del meteorito determinado por esta región.....	69
Figura 44 Gráfica del SNR. La figura de la izquierda muestra un eco de meteorito en presencia de electrochorro ecuatorial y ecos no-especulares. La figura de la derecha muestra tres meteoritos para un intervalo de tiempo muy semejante.....	71
Figura 45 Criterio de selección para transformar el arreglo de datos de dos dimensiones a un arreglo lineal. Los rombos representan todos los valores válidos para la región seleccionada y los triángulos color rojo, representan los valores de máxima potencia por tiempo (o por perfil). .....	73
Figura 46 Criterio para eliminar aquellos valores fuera de la recta imaginaria que forman los ecos del meteorito en función del tiempo. Los triángulos corresponden a los valores de máxima potencia para cada instante de tiempo, y los cuadrados color rosado, representan los valores obtenidos luego de aplicar el criterio de limpieza. ....	73
Figura 47 Cálculo de la velocidad radial a partir del ajuste lineal realizado al RTI. ....	74
Figura 48 Distintos valores de la velocidad, luego de levantar la ambigüedad adicionando una cantidad $2\lambda n$ . Notemos que un valor se aproxima al valor obtenido del ajuste lineal. El color negro muestra la velocidad ambigua obtenida directamente de la fase de la auto-correlación y el color rojo muestra velocidades obtenidas para diferentes valores de "n". .....	76

Figura 49 El enrollado o salto en fase (o velocidad) es un problema que se presenta en el cálculo de la velocidad del meteoro, debido a la periodicidad de las funciones trigonométricas. ....	77
Figura 50 Cálculo de la velocidad radial mediante la técnica pulso a pulso después de haber eliminado el problema de enrollado. ....	78
Figura 51 Distribución de antenas utilizadas para el experimento realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005. ....	79
Figura 52 Salto o “enrollado” hallado en el cálculo de la dirección del meteoro, este problema se debe a que la fase calculada de la correlación, presenta un salto debido a la periodicidad de las funciones sinusoidales inversas. ....	81
Figura 53 Orientación determinada para un meteoro a partir de la fase de la función de correlación cruzada entre antenas, luego haber corregido el problema del salto. ....	82
Figura 54 Esquema geométrico utilizado para representar la trayectoria del meteoro en el haz transmitido por el radar. ....	83
Figura 55 Parámetros del meteoro. La gráfica de la izquierda muestra el RTI del meteoro, el gráfico central muestra la dirección del meteoro respecto al plano del radar y la figura de la derecha muestra el SNR y la velocidad Doppler (determinada de la técnica pulso a pulso). ....	85
Figura 56 Caracterización de meteoros. Determinación de los parámetros del meteoro para un caso en el cual la desaceleración es significativa. ....	85
Figura 57 Caracterización de meteoros. Determinación de los parámetros del meteoro para un caso en el cual la desaceleración es aproximadamente cero. ....	86
Figura 58 Caracterización de meteoros. Determinación de los parámetros del meteoro para un caso en el cual no se presenta desaceleración constante. ....	86
Figura 59 Discriminación entre los ecos de meteoros y ecos del EEJ. Para esto se definen valores umbrales para la coherencia y la velocidad Doppler. Las diferentes escalas mostradas relacionan el valor de la variable con un determinado color. ....	89
Figura 60 Aplicación del criterio para remover EEJ utilizando el Doppler y la coherencia. La escala de grises presenta todos los ecos detectados. La segunda capa (color amarillo) muestra solo ecos de meteoro. Notemos como el eco del meteoro queda bien definido, mientras que el EEJ y los ecos no especulares son removidos en su totalidad. ....	90

Figura 61 Al igual que en la Figura 60 las dos capas permiten distinguir entre ecos de meteoros y ecos de EEJ. Notemos que las características del meteoros, se mantienen constantes, a pesar del EEJ presente.....	90
Figura 62 RTI generado para una señal en presencia de ecos de EEJ. Observemos la presencia de ecos de meteoros.....	91
Figura 63 RTI generado para la señal mostrada en la Figura 60, luego de aplicar la técnica de filtrado de la componente DC.....	91
Figura 64 Eco de meteoros, eco no especular y ecos de EEJ, antes de realizar el filtro que consiste en restar la información de dos pulsos transmitidos consecutivamente. ...	92
Figura 65 Grafico resultante luego de haber realizado el filtro para los datos mostrados en la Figura 64 Notemos como la presencia de ecos de EEJ y ecos no especulares disminuye notablemente. ....	93
Figura 66 Espectro de la señal recibida del EEJ y un eco de meteoros intenso. Para un experimento realizado con pulso largo el día 25 de Abril del 2005 .....	94
Figura 67 Modo 0. Estadística del experimento del 19 de Noviembre del 2002 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: (a) Tiempo de inicio del evento, (b) rango inicial, (c) variación del rango, (d) duración del evento, (e) velocidad radial del RTI y (f) velocidad radial del proceso de decodificación.....	96
Figura 68 Modo 1. Estadística del experimento del 23 de Noviembre del 2005 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: (a) Tiempo de inicio del evento, (b) rango inicial, (c) variación del rango, (d) duración del evento, (e) velocidad radial del RTI y (f) velocidad radial del proceso de decodificación.....	98
Figura 69 Modo 0. Estadística del experimento del 19 de Noviembre del 2002 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: Aceleración radial, acimut, cobertura angular, SNR. ....	99
Figura 70 Modo 1. Estadística del experimento del 23 de Noviembre del 2005 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: Aceleración radial, acimut, cobertura angular, SNR. ....	100
Figura 71 Procesamiento automático (Modo 0). Estadísticas para los parámetros de meteoros inferidos de consideraciones geométricas: (k) ángulo de elevación, (l) velocidad absoluta, y (m) aceleración absoluta. Experimento del 19 de Noviembre del 2002 .....	101

Figura 72 Procesamiento manual (Modo 1). Estadísticas para los parámetros de meteoros inferidos de consideraciones geométricas: ángulo de elevación, velocidad absoluta, y aceleración absoluta. Experimento del 23 de Noviembre del 2005 .....	102
Figura 73 Trayectoria del meteoro dentro del haz de la antena. Notemos la diferencia en la variación del rango .....	103
Figura 74 Velocidad absoluta obtenida en función de los distintos parámetros determinados con el modo 0 (19 de Noviembre del 2002).....	105
Figura 75 Velocidad absoluta obtenida en función de los distintos parámetros determinados con el modo 1 (23 de Noviembre del 2005).....	105
Figura 76 Distribución de meteoros alrededor del ápex. La escala de colores representa el número de meteoros observados.....	106
Figura 77 Distribución de meteoros alrededor del ápex (escala logarítmica).....	106
Figura 78 Comparación de la velocidad obtenida por distintas técnicas. El gráfico de la izquierda muestra la comparación para los datos obtenidos con el procesamiento automático (experimento realizado el 19 de Noviembre del 2002), mientras que el gráfico de la derecha muestra la comparación para el procesamiento manual (experimento realizado el 23 de Noviembre del 2005). .....	107
Figura 79 Distribución de los meteoros observados con el radar VHF del ROJ [Imagen extraída de <i>Chau et al</i> , 2006] .....	109
Figura 80 Geometría de las señales recibidas por las antenas 1 y 2, producto de un objeto en el campo lejano para el radar. ....	114
Figura 81 Esquema geométrico utilizado para calcular el ángulo de elevación, velocidad absoluta y aceleración absoluta del meteoro. ....	117
Figura 82 Comportamiento de la incertidumbre del ángulo de elevación como función del ángulo de elevación. ....	124
Figura 83 Comportamiento de la incertidumbre del ángulo de elevación como función del valor del SNR. ....	125
Figura 84 Comportamiento de la incertidumbre de la velocidad absoluta como función del ángulo de elevación .....	127
Figura 85 Comportamiento de la incertidumbre de la velocidad absoluta como función del SNR. ....	128
Figura 86 Comportamiento de la incertidumbre en la estimación de la aceleración absoluta como función del ángulo de elevación.....	129

Figura 87 Comportamiento de la incertidumbre en la estimación de la aceleración absoluta como función del SNR (dB)..... 130

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Lluvias de meteoros [Información extraída <a href="http://www.imo.net/calendar/2006/tables">http://www.imo.net/calendar/2006/tables</a> ].	9
Tabla 2 Características de las fuentes de meteoros esporádicos según Perrygo (2001).	11
Tabla 3 Estimado de la potencia promedio que recibiría (en porcentaje) la antena para los distintos pulsos analizados.	47
Tabla 4 Parámetros del radar para el experimento (pulso codificado) realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005.	58
Tabla 5 Parámetros de radar para el experimento (pulso corto) realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005.	59
Tabla 6 Comparación de los parámetros del radar para los dos modos de operación...	60

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

El estudio de las lluvias de meteoros tuvo como punto de inicio la gran lluvia de meteoros conocida como Leónidas desarrollada el 13 de Noviembre de 1833. Esta lluvia despertó en los investigadores de la época, el interés de estudiar las denominadas lluvias de meteoros. La historia señala a William F. Denning como pionero y padre, del estudio y caracterización de meteoros, quién desarrolló una serie de campañas para el estudio de meteoros, fruto de esta paciente caracterización, publica en 1876 el primer catálogo de radiantes para una muestra de 900 meteoros observados entre 1872 y 1876. Con el transcurrir de los años las investigaciones realizadas dan cuenta de la relación existente entre una lluvia de meteoros y los cometas. Se establece que el origen de la lluvia de meteoros conocida como Leónidas tiene como cometa-padre al cometa 55P/Tempel-Tuttle y así también se relacionan otros cometas con las distintas lluvias de meteoros ya conocidas, permitiendo predecir la fecha en la cual una lluvia de meteoros se haría presente.

El uso de radares en el estudio de los meteoros comienza alrededor del año 1940, pero es en la década pasada, con el retorno del Leónidas, que este tópico llega a ser de gran interés para la comunidad científica a nivel mundial. Es así que comienza una carrera por definir la física del meteoro, por comprender los orígenes de las poblaciones que constantemente bombardean el planeta Tierra, por conocer la composición química de los meteoros, por investigar el origen de la vida o simplemente por disfrutar de un espectáculo tan hermoso como lo es una lluvia de meteoros. A los ya conocidos estudios realizados visualmente con instrumentos ópticos [e.g., *Brown, 1999; Brown, 1996*], así como los realizados con radares pequeños especulares [e.g., *Brown et al, 2005; Galligan y Baggaley, 2005; Holdsworth, 2005*], se adicionó las observaciones de meteoros con radares de antenas y potencias inmensas (HPLR de *High-Power Large Apertura*) [e.g., *Close, 2002a; Janches et al, 2003; Mathews, 2004; Chau y Woodman, 2004; Sato, 2000; etc.*]. Estos enormes instrumentos tienen la ventaja de detectar partículas de dimensiones comparables a un grano de arena.

Tal es el uso de estos radares en el estudio de meteoros, que en la última década se han desarrollado una serie de trabajos para optimizar los métodos de detección así como las técnicas de observación. Un claro ejemplo de este avance es el uso del concepto de interferometría para determinar la trayectoria del meteorito dentro del haz de iluminación de la antena. El Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), no fue ajeno a este tópico de investigación y empezó con sus campañas para la caracterización de los meteoros desde Noviembre de 1998. A diferencia de otros observatorios, la ubicación del Radio Observatorio de Jicamarca, tiene como privilegio encontrarse debajo del ecuador magnético, y estudiar fenómenos que únicamente se presentan en estas latitudes. El Electrochorro Ecuatorial (EEJ) y los ecos de 150km son claros ejemplos de estos fenómenos estudiados en el ROJ. Sin embargo, para el estudio de los meteoros, el EEJ es un fenómeno que limita su tiempo de investigación, pues éste se presenta justamente en el mismo rango de altura que los ecos generados por los meteoros que ingresan a la atmósfera. Otro fenómeno importante que limita el tiempo de estudio, son los llamados ecos no-especulares de meteoros los cuales ocurren en forma casi simultánea con los ecos de la cabeza de los meteoros [e.g., *Chapin y Kudeki, 1994*].

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo desarrollar un algoritmo para el procesamiento y estudio de los denominados ecos de meteoros, pues son estos ecos los que permiten determinar las características del meteorito, dado que el radar es sensible al plasma que se genera alrededor del meteorito al ingresar a la atmósfera. Debido a la gran cantidad de meteoros que se pueden detectar al día (más de 20,000 diarios), se creó en un principio un algoritmo bastante conservador para el procesamiento de meteoros, pero efectivo (al que llamaremos Modo 0), este algoritmo solamente procesaba aquellas señales recibidas donde la presencia del EEJ o ecos no-especulares, era casi nula o muy débil, eliminando así la información contenida en los intervalos de tiempos donde estos fenómenos están presentes [ver más detalles en *Chau y Woodman, 2004*]. Es justamente debido a esta limitación que se motiva el presente trabajo de tesis. Esto es generar un algoritmo que permita seleccionar meteoros en presencia de ecos coherentes del EEJ o de ecos no-especulares, o en ausencia de ellos.

El algoritmo generado para este fin tiene como base un proceso de selección manual, lo que permite extraer la información relacionada al meteorito seleccionado y

posteriormente determinar los parámetros del meteoro para caracterizarlo. Así también, durante el periodo de investigación se ha evaluado y experimentado diferentes configuraciones para experimentos de meteoros con radar, con la idea de optimizar los mismos. El procesamiento de los datos de radar para estudiar meteoros se divide básicamente en dos etapas:

- Etapa de pre-procesamiento. Preparamos los datos para la posterior caracterización del meteoro.
- Etapa de post-procesamiento. Seleccionamos manualmente el meteoro y determinamos los parámetros del meteoro.

Una vez caracterizados los meteoros, se ha procedido a comparar las estadísticas de los parámetros entre el Modo 0 (antiguo) y el Modo 1 (desarrollado en esta tesis).

El presente trabajo de Tesis se encuentra dividido como sigue: Primeramente en el Capítulo 2 definiremos los conceptos básicos de meteoros y las técnicas observación, en el Capítulo 3 describiremos la atmósfera sobre Jicamarca además de definir los conceptos básicos de radar y procesamiento de señales. Posteriormente en el Capítulo 4 presentamos una descripción de los experimentos de meteoros realizados en el ROJ, incluyendo los diferentes pulsos de transmisión utilizados y sus ventajas y desventajas. En el Capítulo 5 se describe la técnica utilizada para la caracterización de los ecos de meteoros, explicamos el proceso de selección manual utilizado para extraer la información de los ecos de meteoros, desarrollamos las ecuaciones para la extracción directa de algunos parámetros de los meteoros estudiados, desarrollamos la geometría de la trayectoria del meteoro en el haz de energía transmitido, lo cual permitirá derivar otros parámetros para la caracterización de los meteoros estudiados.

En el Capítulo 6, presentamos las técnicas desarrolladas para la remoción de EEJ, una de las cuales se ha utilizado para ayudar a identificar automáticamente los meteoros antes de su selección manual. Posteriormente en el Capítulo 7 se realiza una comparación de los resultados obtenidos con el proceso de caracterización del modo 0 y nuestro proceso manual de caracterización para meteoros (modo 1), para los experimentos realizados el 19 de Noviembre del 2002 y 23 de Noviembre del 2005, respectivamente. Finalmente en el Capítulo 8 presentamos el resumen de los resultados

y conclusiones obtenidos del presente trabajo de investigación. Además mencionamos algunas recomendaciones para trabajos futuros.

## Capítulo 2

### FUNDAMENTO TEÓRICO

En este Capítulo se presenta los conceptos básicos relacionados con el estudio de meteoros: concepto de meteoro, origen de los meteoros, técnicas de observación, entre otras definiciones.

#### 2.1 Conceptos básicos sobre meteoros.

A continuación se presentan los conceptos relacionados con el estudio de meteoros. Primeramente se describe brevemente la idea de meteoro y las posibles fuentes que originan los meteoros. Además, se explica el origen de las lluvias de meteoros y los llamados meteoros esporádicos.

##### 2.1.1 ¿Qué es un meteoro?

Un meteoro se define como un proceso de transferencia de energía observado cuando una partícula ingresa a la atmósfera a gran velocidad. Este proceso ocurre alrededor de los 80 y 120 km de altitud, producto de la alta concentración de moléculas y/o iones en esta región de la atmósfera. Cuando la partícula alcanza este rango de altura, encuentra en su trayectoria un mayor número de moléculas y/o iones, generándose colisiones entre la partícula que ingresa a la atmósfera y las partículas de la atmósfera, produciéndose una transferencia inmensa de energía. Estas colisiones producen una rápida desintegración de la partícula (son muy pocas las partículas que sobreviven el paso de la atmósfera y colisionan con la superficie terrestre), creándose una columna de partículas (denominado también rastro o cola) que se encuentran en un estado excitado e inestable. Esta energía absorbida es liberada rápidamente en intervalos de tiempo muy breves, produciéndose así un rayo de luz [e.g., *Ceplecha et al.*, 1998]. Este destello de luz o rastro de luz, se denomina “*meteoro*”. Otro nombre utilizado para

este proceso es “*Estrella fugaz*” (del inglés “*Shooting star*”). En el presente trabajo haremos uso de la palabra meteoros para mencionar a la partícula que produjo este fenómeno.

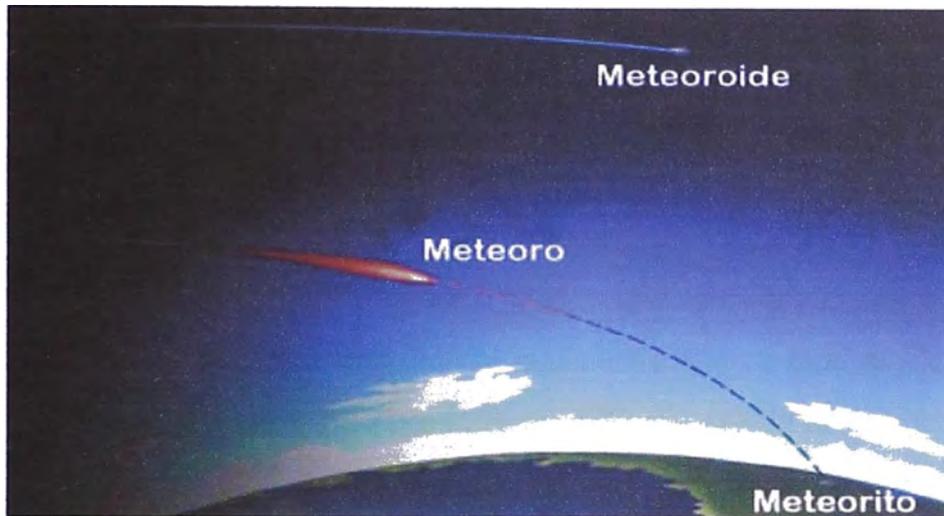


Figura 1 Meteoroida, meteoros y meteorito.

Dos definiciones relacionadas con el concepto de meteoros, son meteoroida y meteorito (ver Figura 1), aunque los tres conceptos estén ligados, los nombres hacen mención a diferentes etapas del movimiento de una partícula. Los llamados meteoroides corresponden a toda partícula que se encuentre en el espacio y estos son capturados por la atmósfera terrestre para generar los llamados meteoros. Si una partícula sobrevive al proceso de desintegración, e impacta en la superficie terrestre, recibe el nombre de meteorito.

### 2.1.2 Origen de los meteoroides

Los meteoroides en su mayoría parecen ser originados por cuerpos más grandes (e.g., Planetas o asteroides), los cuales fueron fragmentados como resultado de una colisión con otro cuerpo. Así también, el origen de algunos meteoroides se atribuye a partículas liberadas durante la formación del sistema solar (o restos que no fueron atraídos por los planetas en formación). Existe mucha evidencia que confirma que los asteroides dan origen a los meteoroides, pues existe bastante material encontrado en Tierra el cual presenta las mismas características que los asteroides. El cinturón de

asteroides ubicados entre Marte y Júpiter, consiste de 100,000 asteroides aproximadamente<sup>1</sup>. Colisiones entre los asteroides podrían haber fragmentado algunos cuerpos en pequeñas partículas, las cuales fueron expulsadas lejos del cinturón. Si consideramos que la fragmentación del asteroide, generó la suficiente energía para lanzar las partículas hacia la trayectoria de la Tierra, entonces es factible que los meteoritos encontrados en la Tierra tengan su origen o tengan como padres a los asteroides<sup>2</sup>. Otra fuente importante que da origen a los meteoroides son los cometas. Los cometas (en su mayoría) realizan órbitas elípticas alrededor del Sol, sufriendo un proceso de evaporación al aproximarse al Sol. Este proceso libera gases de la superficie del cometa debido al dióxido de carbono y hielo del cual está compuesto el cometa principalmente. Pequeñas partículas (rocas) están adheridas al dióxido de carbono y hielo, siendo liberadas mediante el proceso de evaporación, esto le genera al cometa una cola o rastro, la cual cuando es interceptada por la Tierra, da origen a las conocidas lluvias de meteoros [e.g., *Jenniskens*, 1998]. Otra fuente del origen a los meteoroides, son las partículas expulsadas de los planetas o satélites naturales, producto de una gran colisión con un objeto de dimensiones considerables. Algunos meteoritos encontrados poseen una composición química muy parecida a la de la Luna, lo cual indicaría que esas partículas fueron liberadas de la superficie de la Luna.

### 2.1.3 Lluvia de meteoros

Una lluvia de meteoros ocurre cuando la trayectoria de la Tierra intercepta la trayectoria de un cometa (ver Figura 2), debido a que el cometa deja una estela de partículas las cuales fueron desprendidas de éste. La cantidad de partículas que son visibles desde la Tierra en ese preciso momento se incrementa notablemente, respecto a las que comúnmente se observan en la atmósfera. Se dice entonces que se está dando una lluvia de meteoros.

---

<sup>1</sup> <http://www.tulane.edu/~sanelson/geol204/impacts.htm>

<sup>2</sup> [http://wapi.isu.edu/Geo\\_Pgt/Mod05\\_Meteorites\\_Ast/mod5.htm](http://wapi.isu.edu/Geo_Pgt/Mod05_Meteorites_Ast/mod5.htm)

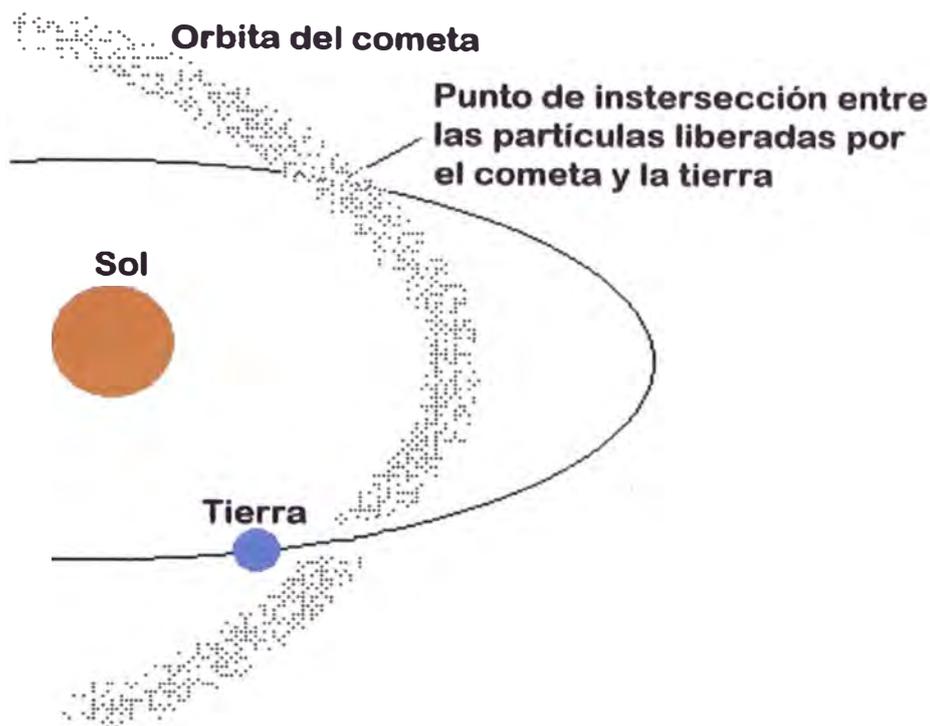


Figura 2 Cuando la tierra cruza la orbita de un cometa, las partículas liberadas del cometa, ingresan a la atmósfera atraídas por la gravedad, generando un incremento del número de meteoros que ingresan normalmente, denominado Lluvia de meteoros [ver [http://faculty.swosu.edu/terry.goforth/publicinfo/meteorshowers/perseids/2004/perseid\\_meteor\\_shower.2004.htm](http://faculty.swosu.edu/terry.goforth/publicinfo/meteorshowers/perseids/2004/perseid_meteor_shower.2004.htm)].

Como el paso de los cometas se realiza de manera periódica, el conocimiento sobre las lluvias de meteoros es bastante amplio. Se conoce así un gran número de lluvias que bombardean la Tierra periódicamente y el cometa padre que las originó. La Tabla 1 muestra algunas de las principales lluvias de meteoros que bombardean la Tierra anualmente y sus principales características. La primera columna indica el nombre de la lluvia de meteoros (estando entre paréntesis la abreviatura del nombre en inglés), el nombre está relacionado a la constelación más cercana al radiante de la lluvia, siendo el radiante de una lluvia de meteoros definido como un punto en el cielo, que se obtendría si se prolongara hacia atrás, todas las trayectorias de los meteoros. La segunda columna indica el intervalo de tiempo en el cual la lluvia de hace presente (periodo de actividad). La tercera columna muestra las coordenadas de la posición del radiante de una lluvia, normalmente durante el máximo, donde  $\alpha$  es la ascensión recta y  $\delta$  es la declinación. En la cuarta columna  $v_{\infty}$  representa la velocidad de entrada atmosférica o meteórica dada en km/s, donde las velocidades varían usualmente entre 11km/s (muy lentos) a 72km/s (muy rápidos). La quinta columna muestra el valor de la

tasa horaria cenital (THZ), definida como el número máximo calculado de meteoros que un observador podría ver idealmente bajo un cielo perfectamente claro y con el radiante ubicado directamente sobre su cabeza. Este valor es dado en términos de meteoros por hora.

Tabla 1 Lluvias de meteoros [Información extraída <http://www.imo.net/calendar/2006/tables>].

Lluvia	Período de Actividad	Radiante		V_infinito km/s	THZ
		$\alpha$	$\delta$		
Cuadrántidas (QUA)	Ene 01-Ene 05	230°	+49°	41	120
$\alpha$ -Centáuridas (ACE)	Ene 28-Feb 21	210°	-59°	56	6
$\delta$ -Leónidas (DLE)	Feb 15-Mar 10	168°	+16°	23	2
$\gamma$ -Nórmidas (GNO)	Feb 25-Mar 22	249°	-51°	56	8
Virgínidas (VIR)	Ene 25-Abr 15	195°	-04°	30	5
Líridas (LYR)	Abr 16-Abr 25	271°	+34°	49	18
$\eta$ -Acuáridas (ETA)	Abr 19-Mayo 28	338°	-01°	66	60
Sagitáridas (SAG)	Abr 15-Jul 15	247°	-22°	30	5
Junio Bootidas (JBO)	Jun 26-Jul 02	224°	+48°	18	var
Pegásidas (JPE)	Jul 07-Jul 13	340°	+15°	70	3
$\delta$ -Acuáridas Sur (SDA)	Jul 12-Ago 19	339°	-16°	41	20
$\alpha$ -Capricórnidas (CAP)	Jul 03-Ago 15	307°	-10°	23	4
$\delta$ -Acuáridas Norte (NDA)	Jul 15-Ago 25	335°	-05°	42	4
Perseidas (PER)	Jul 17-Ago 24	46°	+58°	59	100
$\kappa$ -Cígnidas (KCG)	Ago 03-Ago 25	286°	+59°	25	3
$\iota$ -Acuáridas Norte (NIA)	Ago 11-Ago 31	327°	-06°	31	3
$\alpha$ -Aurígidas (AUR)	Ago 25-Sep 08	84°	+42°	66	10
$\delta$ -Aurígidas (DAU)	Sep 05-Oct 10	60°	+47°	64	5
Píscidas (SPI)	Sep 01-Sep 30	5°	-01°	26	3
$\epsilon$ -Geminidas (EGE)	Oct 14-Oct 27	102°	+27°	70	2
Oriónidas (ORI)	Oct 02-Nov 07	95°	+16°	66	23
Táuridas Sur (STA)	Oct 01-Nov 25	52°	+13°	27	5
Tauridas Norte (NTA)	Oct 01-Nov 25	58°	+22°	29	5
Leónidas (LEO)	Nov 14-Nov 21	153°	+22°	71	20+
$\chi$ -Oriónidas (XOR)	Nov 26-Dic 15	82°	+23°	28	3
Púppidas/Vélidas (PUP)	Dic 01-Dic 15	123°	-45°	40	10
Monocerótidas (MON)	Nov 27-Dic 17	100°	+08°	42	3
$\sigma$ -Hídridas (HYD)	Dic 03-Dic 15	127°	+02°	58	2
Coma Berenícidas (COM)	Dic 12-Ene 23	175°	+25°	65	5
Úrsidas (URS)	Dic 17-Dic 26	217°	+76°	33	10

#### 2.1.4 Meteoros esporádicos

Los meteoros esporádicos son los meteoros que no pertenecen o no se relacionan con ninguna lluvia de meteoros [e.g., *Campbell-Brown y Jones, 2006* y sus referencias] y son estos los que constantemente bombardean la Tierra. Se cree que en su mayoría los meteoros esporádicos son partículas producidas de los asteroides y cometas. Siendo la acción de la gravedad y/o la radiación solar los factores por los cuales estas partículas se han dispersado a tal punto que no pueden ser reconocidas como procedentes de un

punto específico en el cielo [e.g., *Campbell-Brown y Jones, 2006*]. Sin embargo, su distribución alrededor de la Tierra no es totalmente al azar. Observaciones ópticas y de radares llamados especulares [e.g., *Jones y Brown, 1993*] muestran la existencia de seis fuentes bien definidas de actividad (ver Figura 3).

La primera fuente conocida como **Ápex** (El **ápex** es la dirección hacia donde apunta la Tierra debido a su movimiento de traslación), se encuentra centrada en el **Ápex** de la trayectoria de la Tierra, y a su vez se considera constituido por dos fuentes, el **Ápex del Norte (AN)** y **Ápex del Sur (AS)**. Dos fuentes conocidas como helio y antihelio se encuentran ubicadas muy cerca de los puntos helio y antihelio del plano de la eclíptica, el **Toroidal del Norte** y **Toroidal del Sur**, son las dos últimas fuentes de meteoros conocidas y están ubicadas encima y debajo del **Ápex**. La Tabla 2 resume las características de las seis fuentes de meteoros esporádicos según *Perrygo (2001)*.

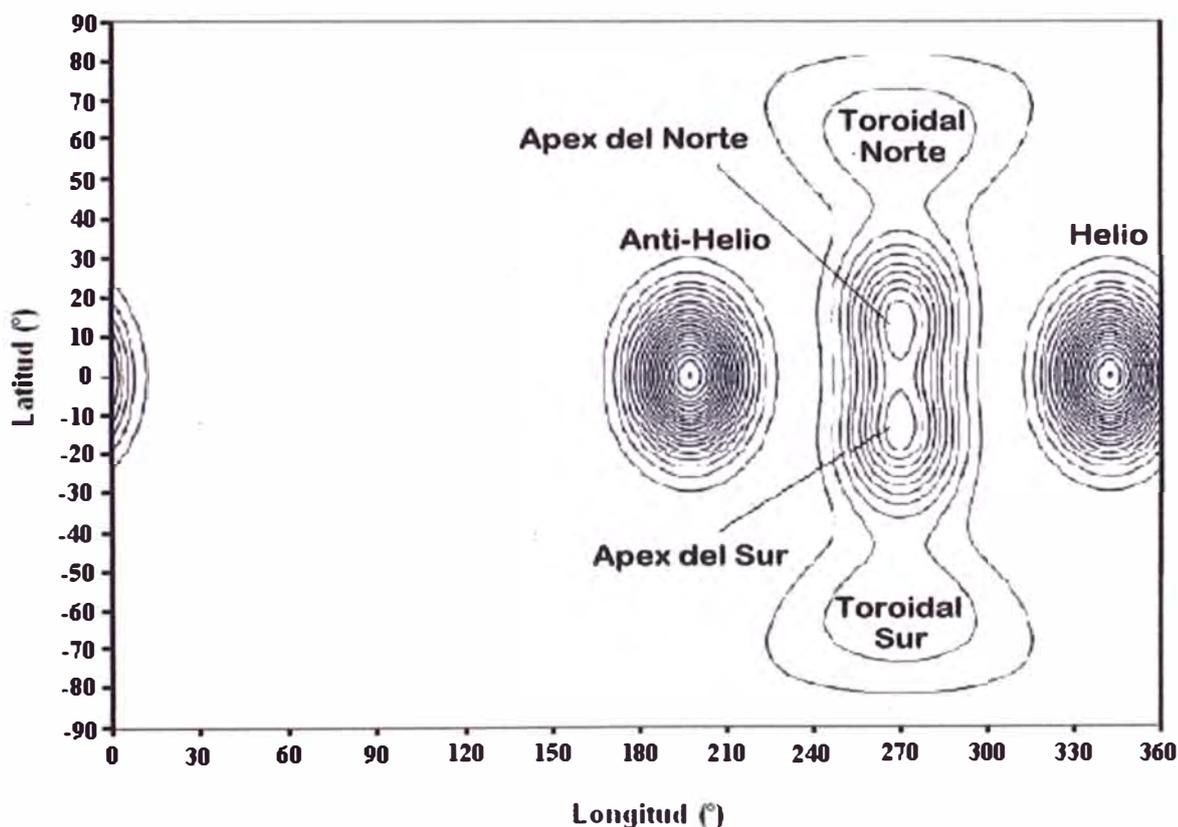


Figura 3 Las seis fuentes de meteoros observadas en el cielo. Se ha utilizado un sistema de coordenadas eclípticas modificado para esta distribución, donde el eje horizontal representa la longitud (en grados) respecto a la posición del Sol y el eje vertical representa la latitud [Perrygo, 2001].

Tabla 2 Características de las fuentes de meteoros esporádicos según Perrygo (2001).

Fuente	Localización de la Fuente		Velocidad Promedio (km/s)
	Longitud	Latitud	
Helio	342°	0°	29
Antihelio	198°	0°	29
Apex del Norte	270°	+15°	55
Apex del Sur	270°	-15°	55
Toroidal Norte	270°	+60°	35
Toroidal Sur	270°	-60°	35

Consideraciones geométricas explican la variación temporal que sufre la cantidad de meteoros esporádicos que ingresan en la atmósfera, por esta razón ellos alcanzan un máximo diario en horas del amanecer (tiempo local). Estudios realizados por *Campbell-Brown y Jones (2006)*, sugieren además, una variación anual de la población de meteoros esporádicos que ingresan a la atmósfera, alcanzándose poblaciones más intensas de meteoros en la segunda mitad del año.

La Figura 4 hace referencia a la frecuencia con la cual un meteoroides ingresa a la atmósfera en función de su tamaño. Como se puede observar, la Tierra se encuentra constantemente bombardeada por partículas de dimensiones muy pequeñas, siendo estas partículas las que se detectan con radar.

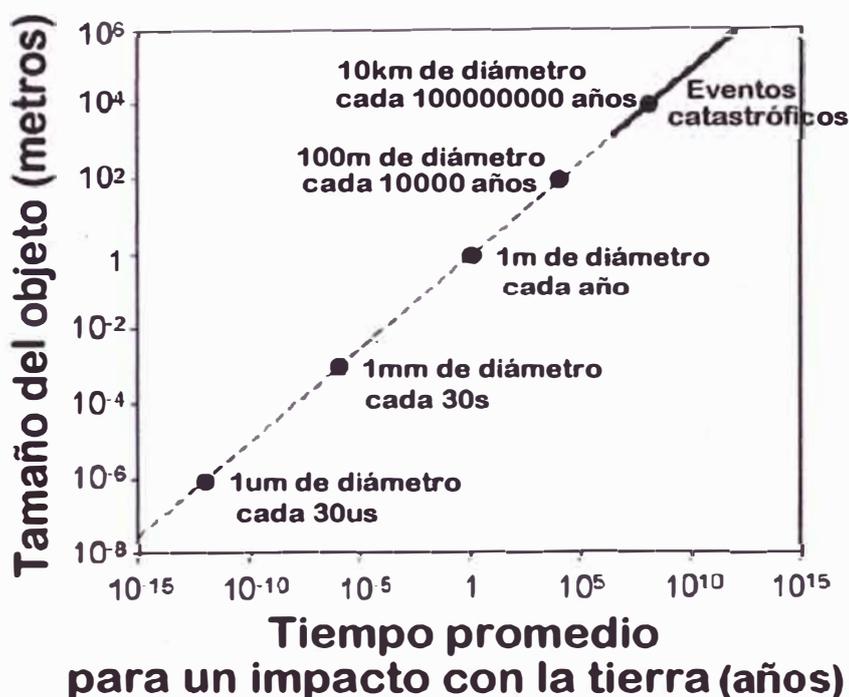


Figura 4 Frecuencia de impacto de meteoroides con la Tierra como función de su tamaño. [<http://www.tulane.edu/~sanelson/geol204/impacts.htm>]

### 2.1.5 ¿Por qué se estudian los meteoros?

Analizando el cuadro anterior, la probabilidad de que un meteorito de dimensiones considerables, colisione contra la Tierra es muy poco probable. Sin embargo, el peligro está latente, es por ello que los meteoros son considerados como una amenaza para la vida en la Tierra. Se cree que la extinción de los dinosaurios fue producto de una colisión entre la Tierra y un enorme meteorito, el cual generó un efecto global en gran escala, destruyendo la vida existente en ese momento<sup>3</sup>. Los científicos consideran al cráter ubicado en la península de Yucatán en México, como la prueba más confiable de este choque. Se especula que el tamaño del objeto que produjo tal cráter tenía un diámetro aproximado de 10km. Por lo tanto un constante estudio de los meteoros que ingresan a la Tierra permitiría estar alerta contra cualquier inminente peligro.

Los meteoros de dimensiones pequeñas también son considerados como amenazas, a pesar que la mayoría de ellos no llegan a tocar superficie terrestre. Sin embargo, por la cantidad de partículas que continuamente ingresan a la atmósfera terrestre y por las velocidades que ellos presentan, significan un gran peligro para los sistemas espaciales ubicados a grandes alturas, principalmente para los satélites [e.g., *Beech y Brown*, 1993]. Muchos de ellos sufren serios daños producto de las múltiples colisiones con pequeños meteoritos altamente energéticos, los cuales en el peor de los casos podrían causar la destrucción completa del satélite. Por esta razón, un estudio de las principales poblaciones de meteoros que ingresan a la Tierra, permite conocer su trayectoria, dando la posibilidad de proteger los sistemas (por ejemplo, plataformas espaciales [e.g., *Beech et al.*, 1995]), dirigiendo sus sistemas de seguridad en tales direcciones.

Otro tópico importante del estudio de meteoros (o correctamente hablando de meteoritos) se basa en la búsqueda del origen del Universo, debido a que muchas partículas que hoy deambulan en el espacio, son restos de partículas formadas en los primeros días del Universo. Otro tema importante es comprender el origen de la vida en la Tierra [e.g., *Jenniskens et al.*, 2000].

---

<sup>3</sup> <http://www.flag.wr.usgs.gov/USGSFlag/Outreach/craters/craterintro.pdf>

## 2.2 Técnicas de observación para el estudio de meteoros.

Esta sección describe las principales técnicas de observación para el estudio de meteoros. Primeramente hablaremos de las observaciones visuales, posteriormente mencionaremos variaciones de esta técnica (telescópicas, video y fotográfica). Finalmente describiremos el uso del radar en las investigaciones.

### 2.2.1 Observaciones visuales

Las observaciones visuales utilizan el ojo humano como instrumento para el monitoreo de lluvias de mediana y alta actividad. Los meteoros son contados y/o trazados en diagramas estelares gnomónicos, con el objetivo de reconocer la lluvia de meteoros. A pesar de que la exactitud de observaciones a simple vista es baja comparada con las observaciones de video o fotográficas, la gran cantidad de datos disponibles cada año, permite obtener resultados estadísticos de relevancia.

La forma más fácil de observar meteoros visualmente es a lo que se llama el "método de conteo". El observador anota los meteoros observados en cinta magnética o simplemente en una hoja de papel. Para ello, deberá indicar la magnitud estimada del meteoro y si pertenece o no a la lluvia observada (Ej. Perseidas o no Perseidas). Los periodos de visualización deben realizarse alrededor del máximo de actividad de la lluvia (15 a 20 meteoros por hora), de tal forma que se tenga una cantidad apreciable de información. El lugar de observación debe ser lo más oscuro posible a fin de poder observar los meteoros con mejor claridad. Se debe tener el material necesario para almacenar la información de los meteoros que se va observando. Otros factores importantes son la adaptación del ojo a la oscuridad y la ubicación del radiante de la lluvia de meteoros a fin de dirigir nuestros sentidos en esa dirección.

### 2.2.2 Observaciones telescópicas

Las observaciones telescópicas utilizan telescopios o binoculares para el estudio de meteoros. Aunque estos instrumentos poseen un campo de visión muy estrecho. Las observaciones telescópicas poseen cierta ventaja sobre las observaciones visuales (por ejemplo permite un mejor estimado de la trayectoria del meteoro, permite observar

meteoros de intensidades bajas, etc.) y además sirven como complemento de las observaciones visuales.

### 2.2.3 Video observaciones

Esta técnica empezó a ser utilizada a principios de 1970, extendiéndose su uso entre los aficionados de meteoros alrededor de 1987. Un sistema para video observaciones está constituido por lentes, un amplificador para la imagen y una cámara de video. Los lentes proyectan la luz del cielo en una pantalla sensible a la luz, esta señal es amplificada y la cámara almacena la imagen amplificada. A diferencia de otros métodos de observación, las observaciones con cámara de video, son mucho más exactas para la determinación de parámetros del meteoro tales como el tiempo, posición, luminosidad y velocidad. Además esta técnica permite obtener curvas de luz del meteoro, espectros del meteoro y otros rasgos. En la actualidad esta técnica representa la mejor manera de almacenar meteoros de muy baja luminosidad, sin embargo el enorme precio que implica el equipo hace que sea muchas veces inapropiada. La Figura 5 muestra el mismo meteoro observado con dos sistemas de cámara distintos.



Figura 5 Información almacenada en dos cámaras para un mismo meteoro. La Figura de la izquierda muestra la imagen obtenida al usar una cámara con un lente de 2.8/20mm y un amplificador de primera generación. La figura de la derecha muestra la imagen resultante al usar una cámara con una lente de 1.4/50mm y con un amplificador de segunda generación [imagen extraída de <http://www.imo.net/video/example>]

#### **2.2.4 Técnicas fotográficas**

Esta técnica no solamente es hermosa para el observador sino además proporcionan importante información que puede ser utilizada en los distintos análisis del meteorito. Sin embargo, la sensibilidad de la cinta fotográfica está limitada por la brillantez del meteorito a observar. La gran ventaja de esta técnica es la exactitud para obtener la posición del meteorito, lo que permite obtener resultados óptimos en la determinación de la altura, radiante, velocidad, la desaceleración y la masa.

La desaceleración permite conocer la composición de los meteoritos. Un estudio estadístico de las diferentes alturas de los meteoritos permite conocer los diferentes grupos de meteoritos que ingresan. La radiante y la velocidad producen la órbita heliocéntrica, lo que permite asociar un meteorito con un origen, un ejemplo es Perseidas asociado con el famoso cometa P/Swift-Tuttle, o el Leonidas asociado con el cometa P/Temple-Tuttle.

#### **2.2.5 Observaciones con radar**

Los radares representan una técnica ideal para realizar observaciones continuas de los meteoritos. El plasma generado alrededor y en la trayectoria del meteorito producto de las colisiones con las moléculas presentes en la atmósfera, permite reflejar hacia la Tierra, las ondas de radio transmitidas por una estación (transmisor). Estas ondas que retornan son recibidas por las estaciones (receptores) ubicadas en diferentes lugares (ver Figura 6). Las señales obtenidas del monitoreo, son almacenadas y procesadas, para estimar los parámetros del meteorito (velocidad, altura, desaceleración). A diferencia de las otras técnicas, las observaciones de radar permiten observar grandes cantidades de poblaciones de meteoritos. La dificultad en relación a las otras técnicas está en el conocimiento de técnicas y procesamiento de señales.

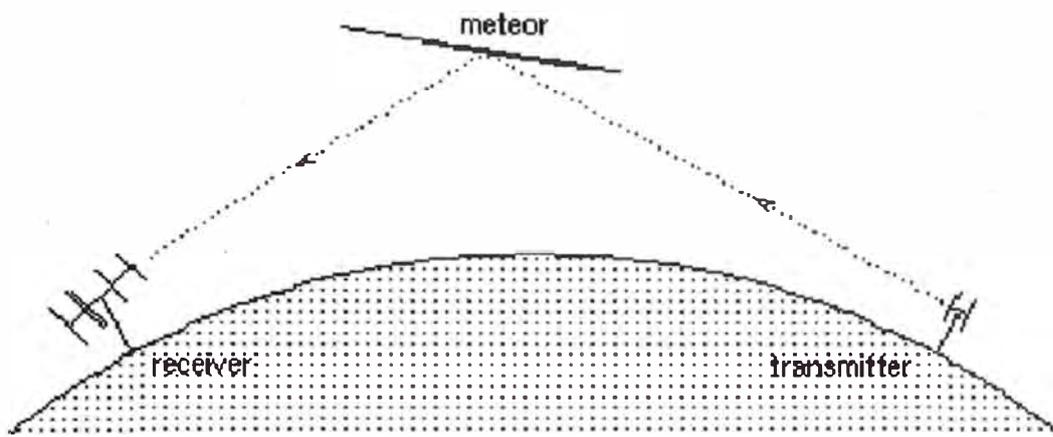


Figura 6 Principio de dispersión de una onda de radio debido a la “cola” del meteor. Las antenas observadas son utilizadas para la transmisión y recepción de la onda de radio [Imagen extraída de <http://www.imo.net/node/95>].

## Capítulo 3

### EL ROJ Y CONCEPTOS BASICOS DE RADAR

En este Capítulo se describe los principales ecos que se presentan alrededor de los 100 km de altitud, centrando la explicación de ecos en los ecos de EEJ y los ecos de meteoro. Además se definen conceptos básicos de radar y de procesamiento de señales que se han empleado en el desarrollo de este trabajo.

#### 3.1 La atmósfera sobre Jicamarca.

El Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) es el único radar de dispersión incoherente en el mundo ubicado en la latitud sur y debajo del ecuador magnético ( $11.95^{\circ}$  S,  $76.87^{\circ}$  W). Su inclinación magnética es de aproximadamente  $1^{\circ}$ , variando ligeramente dependiendo de la altura y la época del año. Esta característica, y la presencia de fenómenos peculiares a estas latitudes como el denominado Electrochorro Ecuatorial (EEJ del nombre en inglés “*Equatorial Electrojet*”), convierten al ROJ, en una fuente importante de conocimiento de la atmósfera. La Figura 7 muestra la geometría del EEJ. De esta Figura observamos que Perú y Brasil son los únicos países de América del Sur por donde pasa el EEJ en su recorrido.

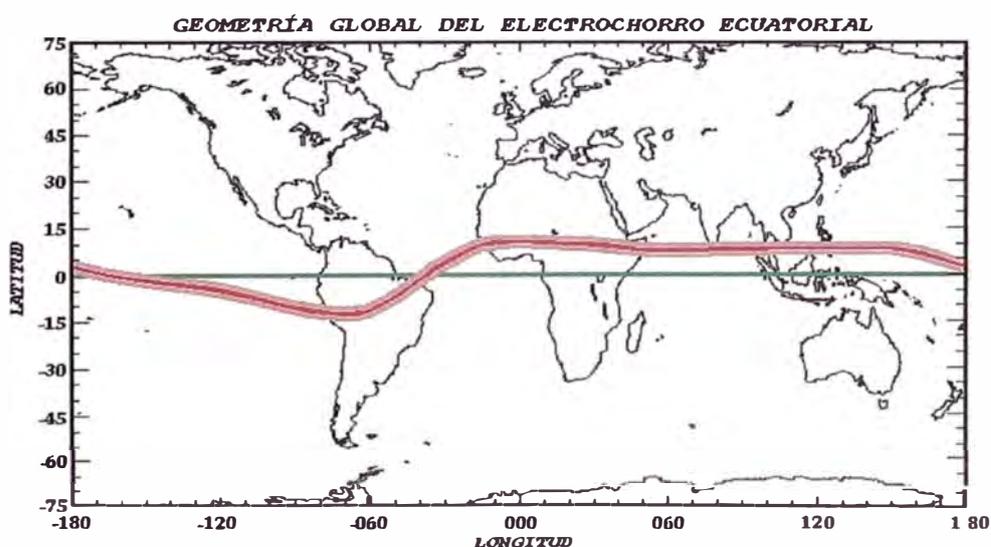


Figura 7 Geometría del recorrido (línea gruesa color rojo) del Electrochorro Ecuatorial. Este recorrido no coincide con el ecuador geográfico (línea color verde).

Hoy en día se realizan diferentes experimentos que permiten estudiar diferentes regiones de la atmósfera sobre Jicamarca: ecos de troposfera y estratosfera, turbulencia mesosféricas, Electrochorro ecuatorial, ecos de meteoros (ecos debido a la cabeza del meteorito, ecos especulares y ecos no especulares), irregularidades de 150 km, F-Esporádica (del inglés “*Sporadic-F*”), entre otros. La Figura 8 muestra los ecos que se estudian en Jicamarca debajo de los 150 km de altitud. De la Figura 8 se observa la presencia de ecos entre 5 y 35 km de altitud, estos ecos se deben a variaciones de temperatura y densidad en el aire [e.g., Woodman, 2002]. Entre los 35 a 60 km se presenta un vacío para aplicaciones de radar. Alrededor de los 80 km se presentan las turbulencias mesosféricas. Entre los 80 y 120 km se encuentra la región rica en presencia de meteoros (líneas verticales). Siendo la presencia del EEJ a estas alturas, un factor predominante para la investigación de meteoros.

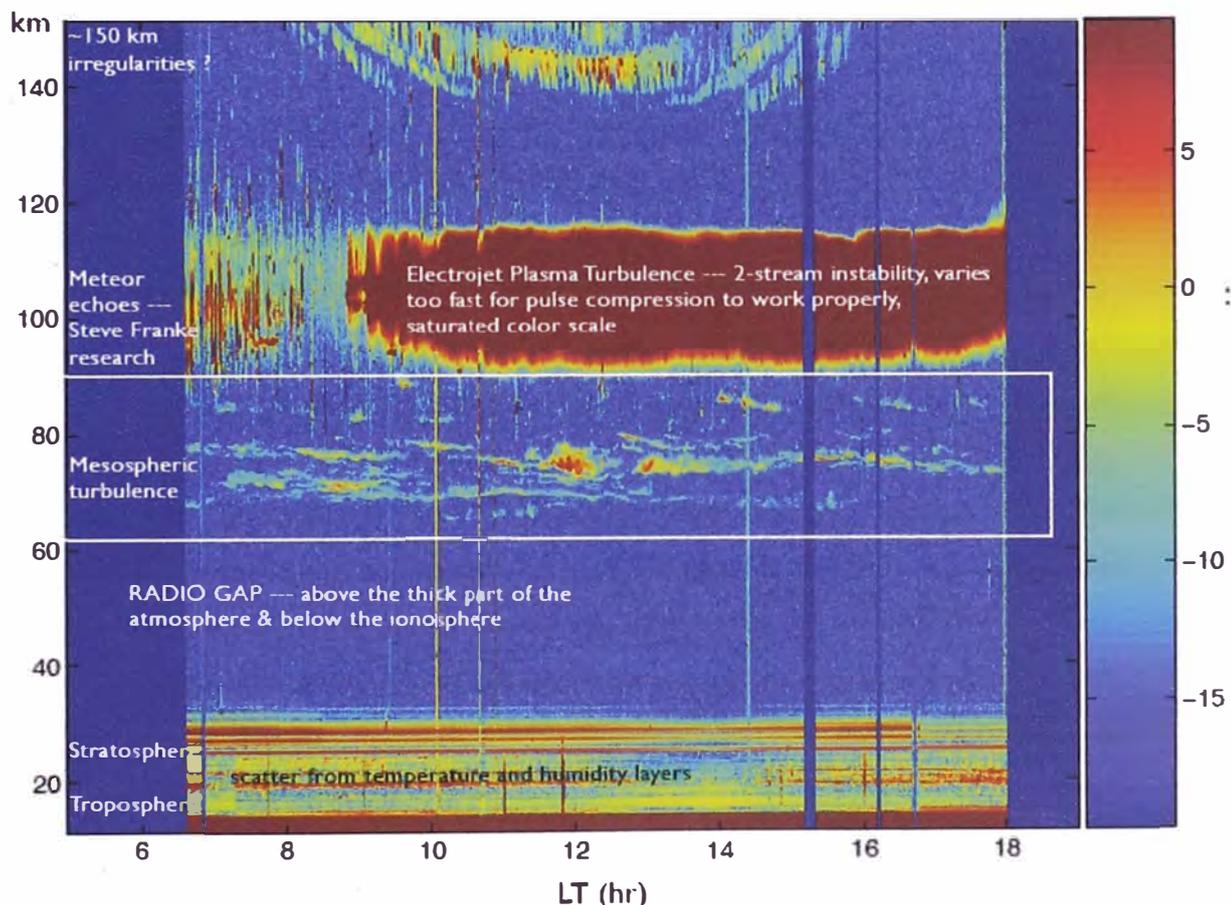


Figura 8 Atmósfera sobre Jicamarca, debajo de los 150 km de altitud [cortesía del Prof. E. Kudeki, 2005]. La escala de colores representa la intensidad de la relación señal a ruido en decibeles (dB) de los ecos observados.

### 3.1.1 Ecos del electrochorro ecuatorial

El electrochorro ecuatorial es una corriente de electrones que fluye a lo largo del ecuador geomagnético y esta confinada entre los 90 y 120 km de altitud, en una banda de 600 km de ancho en dirección norte-sur y centrado en el ecuador magnético [e.g., *Farley, 1985*]. El movimiento de los vientos neutros generan en la atmósfera corrientes que fluyen alrededor de los 100 a 130 km de altitud. El resultado de estas corrientes en latitudes bajas, es un campo eléctrico estático que se presenta desde las primeras horas de la madrugada hasta el crepúsculo y esta dirigido hacia el este. La intensidad de este campo eléctrico es aproximadamente de 0.5 mV/m, y es responsable de movimientos con velocidades de 20 m/s dirigidos hacia arriba en esta región. Como resultado de este campo eléctrico, dentro de  $\pm 2^\circ$  del ecuador magnético, aparece una corriente dirigida hacia el este, alrededor de los 100 y 110 km, conocida como electrochorro ecuatorial (EEJ) [e.g., *Richmond, 1979*].

La Figura 9 muestra el campo eléctrico dirigido hacia el este (flecha color amarillo), el campo eléctrico resultante, dirigido hacia arriba (flecha color rojo) y las corrientes asociadas (flechas color verde) con el electrochorro ecuatorial. El esquema muestra una vista hacia el norte del campo magnético. Si existe un campo eléctrico dirigido hacia el este, y este es perpendicular al campo magnético ( $B$ ), una corriente Hall es generada hacia abajo. Debido a la geometría particular de las líneas del campo magnético en el ecuador magnético, esta corriente Hall, produce un movimiento de electrones hacia arriba lo cual rápidamente polariza esta región de la ionósfera y produce un campo eléctrico (flecha roja). Este campo es 5 o 10 veces más intenso que el campo que lo produjo (flecha amarilla) y es este campo es el responsable de la corriente dirigida hacia el este, denominada electrochorro ecuatorial [e.g., *Anderson et al., 2002*]. La energía retornada al radar debido a este flujo de electrones recibe el nombre de eco del electrochorro ecuatorial.

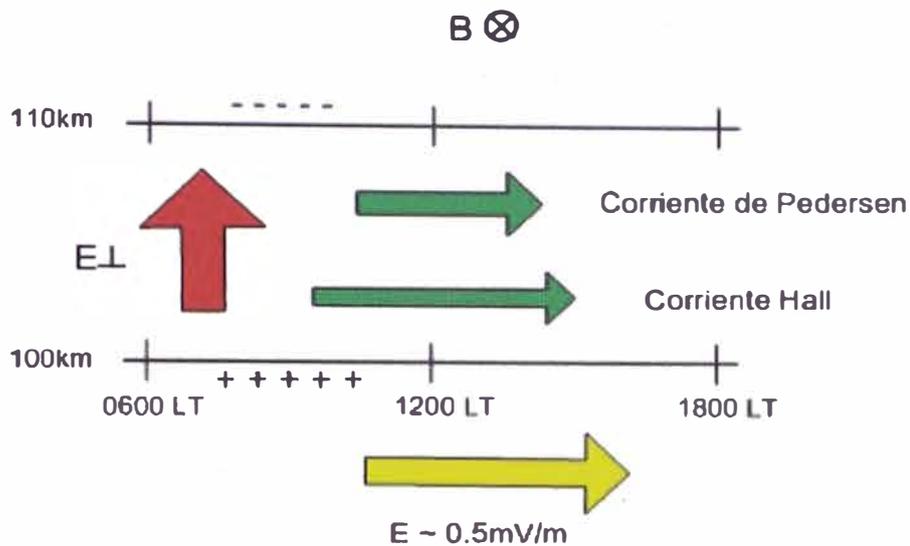


Figura 9 Diagrama del Electrochorro Ecuatorial: Campos eléctricos y corrientes [Anderson et al., 2002]

### 3.1.2 Ecos de meteoros (“Meteor-head echoes”)

Producto de las múltiples colisiones que sufre una partícula al ingresar en la atmósfera terrestre, se genera en la partícula un proceso de desintegración, y transferencia de calor. La transformación de la energía cinética en calor produce alrededor de la partícula columnas de material ionizado, comúnmente entre los 70 y 140km de altitud. Esto permite al radar detectar parte de la energía transmitida, como resultado de un proceso de reflexión o dispersión que se realiza entre el material ionizado y el haz de energía transmitido.

Ecos de corta duración detectados por radar, y denominados ecos de meteoro son generados por el material ionizado alrededor de la partícula, y que se mueve con la misma velocidad que la partícula. Esto permite estudiar propiedades inherentes del meteoro (posición, velocidad y desaceleración). En la actualidad el mecanismo físico del proceso de dispersión que genera este tipo de ecos aún no ha sido clarificado. Existen diferentes mecanismos posibles que explican este proceso. Un mecanismo considera el volumen de electrones generado alrededor del meteoro, lo suficientemente pequeño en comparación a la longitud de onda del haz transmitido [e.g., Close et al., 2002], lo cual produce un retorno coherente del pulso de energía transmitido y que es proporcional al número de electrones al cuadrado contenido en el volumen que genera el

retorno de la señal o eco. La Figura 10, presenta un gráfico de rango versus tiempo (RTI del inglés “range time intensity”), el cual representa los niveles de potencia que recibe el radar en las alturas muestreadas en función del tiempo. La línea recta mostrada es un eco de meteoro.

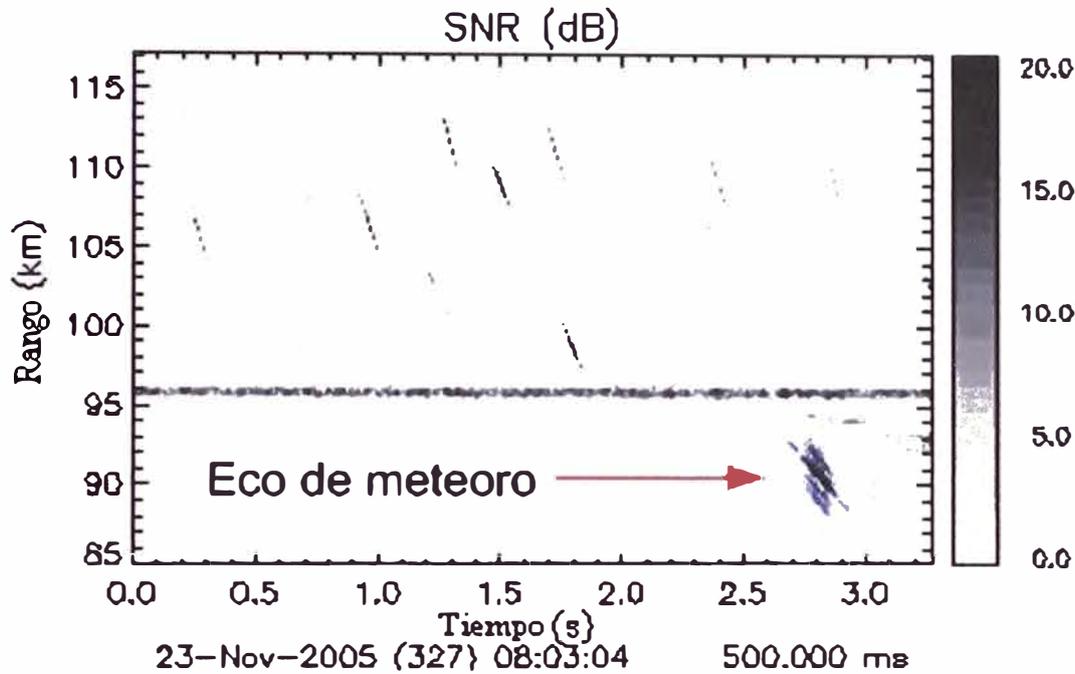


Figura 10 Gráfico Rango vs. Tiempo. Este gráfico muestra la potencia recibida de las diferentes alturas muestreadas (La escala de grises representa la intensidad de la relación señal a ruido de los ecos recibidos en dB). Las líneas inclinadas representan ecos de meteoros. En la parte inferior del gráfico se muestra la fecha y el tiempo inicial del bloque de datos, con una exactitud de milésimas de segundo (+500 ms).

Otra explicación del mecanismo que genera el eco del meteoro considera un proceso de dispersión muy denso, el cual ocurre cuando la frecuencia del plasma excede la frecuencia del radar. La densidad del plasma del eco del meteoro o frecuencia del plasma es definida por:

$$f = 9000\sqrt{n} \quad (1)$$

Donde  $f$  es la frecuencia del radar incidente (en Hz) y  $n$  es la densidad del plasma del eco del meteoro ( $\text{cm}^{-3}$ ). Bajo estas condiciones, podemos considerar al plasma como una esfera conductora de un volumen arbitrario [e.g., *Close et al.*, 2002].

### 3.1.3 Ecos de la cola del meteorito

Cuando un meteorito pequeño ( $< 10^{-5}$ kg) ingresa a la atmósfera comprendida entre los 70 y 140km de altitud, sufre un proceso denominado ablación, el cual produce una columna de partículas neutras energizadas y plasma. Esta columna se expande rápidamente hasta disminuir la velocidad de expansión y enfriarse debido a las colisiones. El radio de esta columna en el punto de transición de una rápida expansión cinética a una expansión lenta se denomina radio inicial. Una vez que la columna alcanza este radio inicial, la dinámica de expansión de la columna de partículas cargadas puede ser descrita aproximadamente como un fluido de plasma.

En alturas por encima de los 75 km de altitud y perpendiculares al campo geomagnético ( $B$ ), los electrones y los iones manifiestan un comportamiento distinto. Por esta razón el plasma de la cola del meteorito se expande luego de haber alcanzado el radio inicial. La diferencia de movilidad entre los iones y electrones genera un fuerte campo eléctrico “*ambipolar*”. Los electrones responden al campo resultante entre el campo geomagnético y el campo eléctrico ambipolar formado ( $E \times B$ ), generando un movimiento de electrones en dirección perpendicular a  $B$  y a la gradiente de densidad de la cola del meteorito. Este movimiento combinado con el movimiento diamagnético producido por el gradiente de densidad del plasma, producen inestabilidades en el plasma. Estas inestabilidades se convierten en ondas y luego turbulencia, creando perturbaciones en la densidad del plasma, visible para radares [e.g., *Oppenheim et al.*, 2001] y denominadas ecos no especulares de meteoritos (ver Figura 11). Otro eco generado por esta inestabilidad es denominado eco especular y se observa cuando el vector de onda de dispersión (diferencia entre los vectores de onda de transmisión y de onda de recepción) es perpendicular a la orientación de la cola del meteorito (ver Figura 12), siendo este tipo de ecos mucho más intenso que los ecos no-especulares [e.g., *Elford*, 2001].

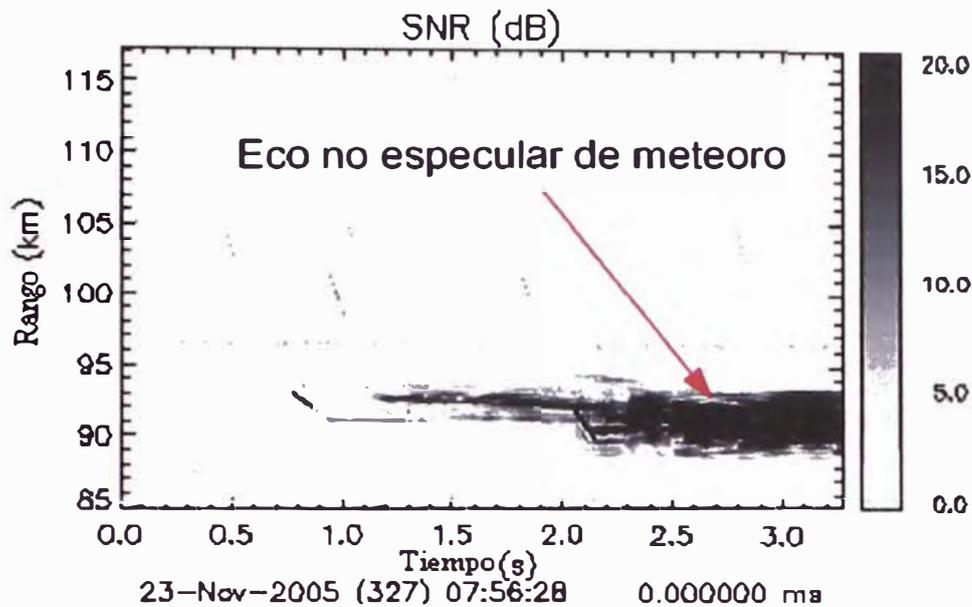


Figura 11 Ecos no especulares de meteor. La escala de grises representa la intensidad de la relación señal a ruido de los ecos recibidos en dB.

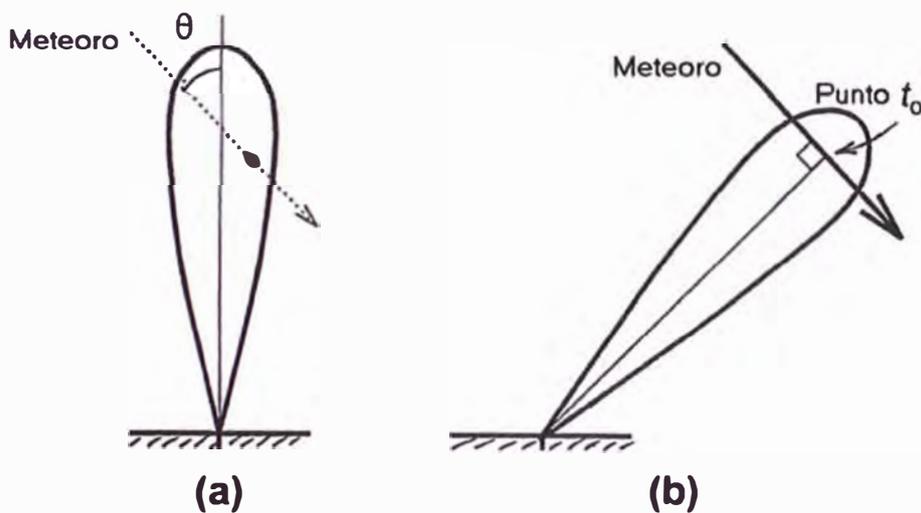


Figura 12 Geometrías para generación de ecos de meteor (a) y ecos especulares (b) [Elford, 2001]. Los gráficos muestran la trayectoria del meteor dentro del lóbulo principal de energía.

## 3.2 Conceptos básicos de radar

### 3.2.1 Concepto de RADAR

La palabra RADAR tiene su origen en la unión de los términos en ingles RAdio Detection And Ranging (Detección y ubicación mediante ondas de radio). Esto constituye para el hombre una extensión de su habilidad para observar y detectar

objetos, ya que los radares determinan la presencia y localización de objetos haciendo uso de ondas de radios [e.g., Berkowitz, 1965]. El concepto fundamental de un radar se basa en la propagación de ondas electromagnéticas en la atmósfera a la velocidad de la luz ( $\sim 3 \times 10^8$  km/s). Si se obstruye la trayectoria de propagación de la onda o se genera algún cambio en el medio de propagación, se generan ecos o retornos de ondas electromagnéticas que pueden ser detectados y que permiten tener información de la presencia de un objeto y/o de sus características. Las Figuras 13 y 14 muestran retornos de señal en ausencia y presencia de un objeto en la trayectoria de la onda transmitida.

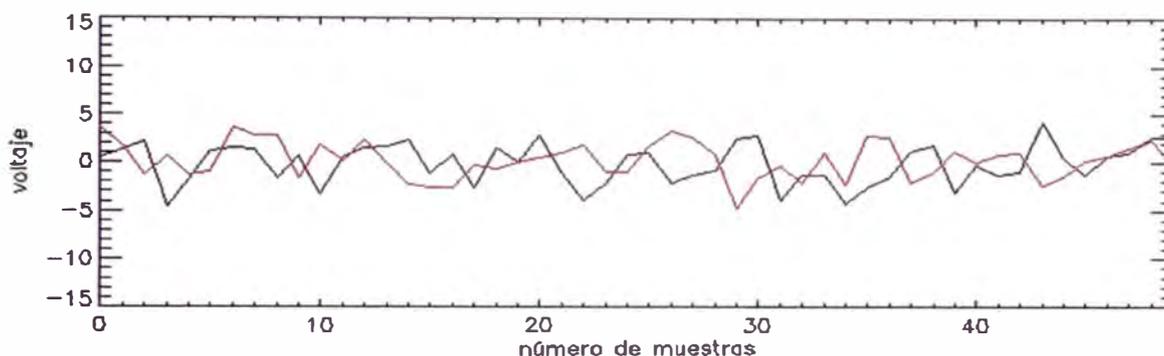


Figura 13 Señal compleja obtenida en ausencia de un objeto que permita el retorno de la energía transmitida. El color negro representa la parte real y el color rojo la parte imaginaria.

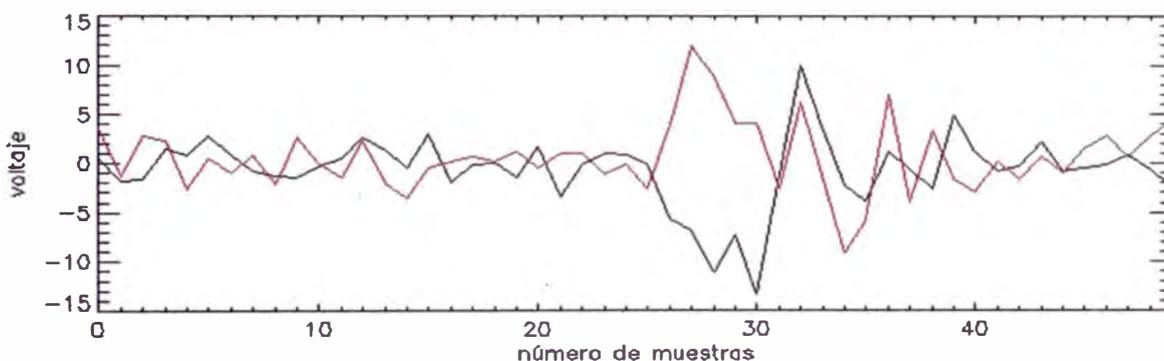


Figura 14 Eco generado debido a la presencia de un objeto o blanco que obstruye la trayectoria de la onda electromagnética, produciendo retorno de energía. El color negro representa la parte real y el color rojo la parte imaginaria de la señal recibida.

Conociendo además el tiempo entre la transmisión y la llegada del eco, se determina el rango del mismo. Se denomina radar monoestático como aquel sistema de radar que utiliza la misma antena para la transmisión y recepción, mientras que un radar biestático utiliza una antena para la transmisión y otra antena para la recepción (ver Figura 15).

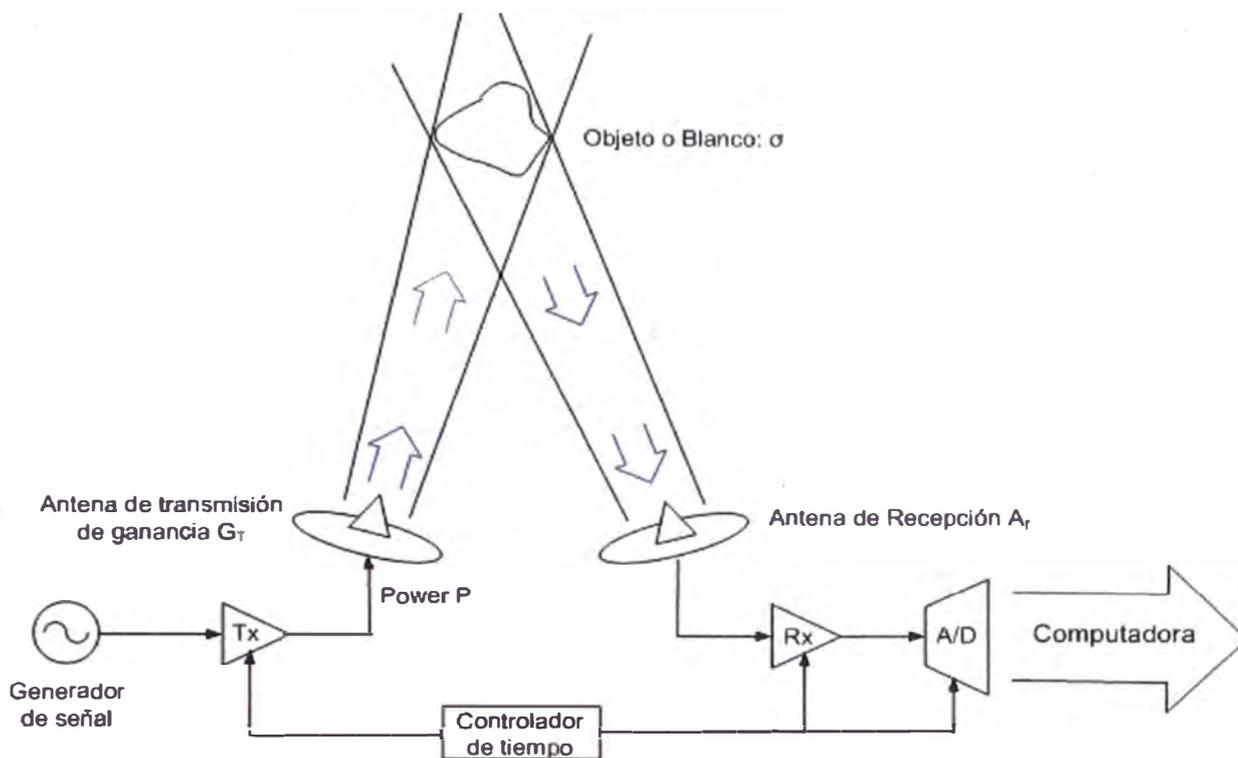


Figura 15 Esquema fundamental de un sistema de RADAR biestático.

El inicio de la tecnología de radares, se relaciona a descubrimientos científicos tales como la generación de campos magnéticos mediante la corriente, desarrollo de las ecuaciones que gobiernan el electromagnetismo por parte de James Maxwell, validación de estas ecuaciones por parte del físico alemán Heinrich Hertz en 1886, entre otros. Hertz además demostró que las ondas electromagnéticas son reflejadas por objetos metálicos, de manera análoga al proceso de reflexión que sufre la luz mediante un espejo. La primera observación usando las ideas de radar fue realizada en 1922 por el Dr. Albert Taylor del Laboratorio de Investigación Naval (Naval Research Laboratory - NRL), en Washington D.C. En estas observaciones el Dr. Taylor observó como algunas ondas electromagnéticas era retornadas al transmisor, debido a la presencia de un barco entre el transmisor y el receptor.

Alrededor de 1930 se realizaron investigaciones con aviones que pasaban a través del haz de ondas electromagnéticas transmitidas, lo cual generaba fluctuaciones en las señales. El uso del radar para propósitos militares permitió desarrollar simultáneamente tecnología que perfeccionaba las técnicas y conocimientos adquiridos en este campo. Es así que alrededor de 1940, el radar es usado como arma de guerra

defensiva pues permitía detectar naves de combate. A pesar que el radar fue inicialmente diseñado para uso militar con el transcurrir del tiempo se empezó a utilizar el radar para diferentes fines, expandiéndose su uso para fines científicos y/o de carácter civil. Algunos ejemplos son el uso del radar en exploraciones de la superficie terrestre y estudios del tiempo o meteorología.

### 3.2.2 Ganancia de una antena de transmisión

La ganancia de una antena ( $G$ ) se define como la relación entre la potencia transmitida en una determinada dirección y la potencia transmitida por un radiador isotrópico (la potencia radiada es radiada homogéneamente en todas la direcciones) [e.g., *Wehner*, 1987]. Si  $\theta$  y  $\phi$  son los ángulos definidos en la Figura 16,  $P(\theta, \phi)$  la potencia radiada en la dirección establecida por estos ángulos y  $P_t$  la potencia total radiada por la antena, entonces la ganancia de la antena en la dirección  $(\theta, \phi)$  se define [e.g., *Thourel*, 1960] como:

$$G = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_t}{4\pi}} \quad (2)$$

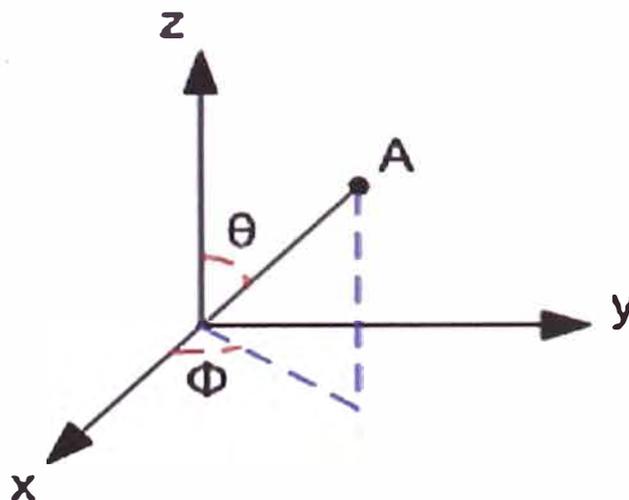


Figura 16 Diagrama de un punto "A" definido mediante coordenadas polares.

Muchas veces se asocia la ganancia de una antena con su directividad ( $D$ ), pues ambas se relacionan de manera proporcional ( $G = \eta D$ ), siendo la directividad definida como la relación entre la máxima potencia de radiación y la potencia promedio radiada. La ganancia de una antena se asocia también al área efectiva de una antena de recepción ( $A$ ) y con la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la onda electromagnética incidente:

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (3)$$

### 3.2.3 Sección transversal de dispersión

La sección transversal de dispersión ( $\sigma$ ) o simplemente sección transversal de un objeto, se define como el área aparente que intercepta la potencia transmitida y dispersa la energía recibida [e.g., *Wehner*, 1987], para producir una potencia de retorno en el receptor. Una forma de interpretar este concepto se basa en las características del proceso de dispersión mediante una esfera conductora. Para el caso de una esfera cuyo radio es mucho mayor que la longitud de onda de la onda electromagnética radiada,  $\sigma$  tendrá un valor aproximado al área física. La ecuación (4) define el concepto de sección transversal:

$$\sigma = \frac{\text{potencia radiada isotropicamente}}{\text{densidad de potencia incidente}} \quad (4)$$

### 3.2.4 Ecuación del radar

Para definir la ecuación del radar, analicemos la Figura 15. El transmisor emite un pulso de energía, con una potencia  $P$ , esta potencia es radiada por la antena de transmisión de ganancia  $G$ , concentrando la potencia transmitida en un haz de energía delgado (del inglés “narrow beam”), más que radiar en todas las direcciones (isotrópicamente).

A una distancia  $R_T$  (rango) de la antena de transmisión, la densidad de la potencia transmitida ( $DP_T$ ) o la potencia por unidad de área, se define como:

$$\frac{\text{Potencia}}{\text{Area}} = DP_T = \frac{PG}{4\pi R_T^2} \quad (5)$$

Un objeto ubicado dentro del haz emitido y que posea una sección transversal  $\sigma$  dispersará parte de la potencia que golpea sobre él. Esta potencia dispersada ( $PD_T$ ) es definida mediante la ecuación:

$$PD_T = \sigma \times DP_T = \sigma \times \frac{PG}{4\pi R_T^2} \quad (6)$$

Una fracción de la potencia dispersada retorna la antena de recepción, luego de recorrer una distancia  $R_r$  (distancia entre el blanco y la antena de recepción), cuando esta fracción de potencia alcanza la antena de recepción su densidad de potencia recibida ( $DP_r$ ) será:

$$DP_r = \sigma \times \frac{PG}{4\pi R_T^2} \times \frac{1}{4\pi R_r^2} \quad (7)$$

Si el área efectiva de la antena de recepción es  $A$ , la potencia que recolecta o potencia recibida es igual a:

$$P_r = A \times \sigma \times \frac{PG}{4\pi R_T^2} \times \frac{1}{4\pi R_r^2} \quad (8)$$

La ecuación (8) es la denominada ecuación fundamental para radares, o simplemente ecuación del radar. Si consideramos un radar monoestático la ecuación del radar se reduce a:

$$P_r = A \times \sigma \times \frac{PG}{(4\pi)^2 R^4} \quad (9)$$

Otra forma de expresar esta ecuación del radar es utilizando la definición de ganancia de una antena:

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2}$$

Por lo tanto la ecuación del radar se puede reescribir [e.g., *Berkowitz*, 1965] como:

$$P_r = \sigma \times G^2 \times \lambda^2 \times \frac{P}{(4\pi)^3 R^4} \quad (10)$$

### 3.2.5 Conceptos relacionados con radar

#### 3.2.5.1 Frecuencia base

Es la frecuencia a la cual el pulso de energía transmitido es generado. La relación entre la frecuencia base ( $f$ ) y la longitud de la onda transmitida ( $\lambda$ ) es la relación:

$$c = \lambda f \quad (11)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz, y tiene un valor aproximado  $c = 3 \times 10^8 \text{ km/s}$ .

A mayor frecuencia base, menor la longitud de la onda transmitida. Por esta razón más pequeña es la antena requerida para definir la forma del patrón de radiación. El ROJ trabaja a una frecuencia de 50 Mhz, longitud de onda transmitida de 6 m y teniendo un área aproximada de 300 m x 300 m.

#### 3.2.5.2 Tiempo de repetición de pulso (PRT – Pulse Repetition Time)

El PRT o también conocido como IPP (del inglés *Inter Period Pulse* – Periodo entre pulsos) se define como el tiempo de espera o retardo para la transmisión del siguiente pulso (respecto al anterior). Su valor depende de la ubicación del objeto a

estudiar. En otras palabras, si el blanco se encuentra a una determinada distancia del radar, se requiere de un tiempo mínimo para que el pulso transmitido viaje hacia el blanco y retorne. Siendo este tiempo el tiempo necesario para que se complete el ciclo de detección del objeto. La selección de un IPP óptimo evita recibir señales de rangos mayores (ambigüedad en rango), y evita que la señal de retorno sea opacada por un pulso transmitido.

El máximo valor de distancia o rango para detectar un blanco, depende del IPP. Por ejemplo si el estudio tiene un rango máximo de 120 km y considerando que el pulso transmitido tiene suficiente energía, implicaría que la onda viaje de ida 120 km para alcanzar un objeto ubicado en este rango y recorra igual cantidad para el retorno. En otras palabras la onda de energía transmitida requiere de 240 km o 1.6 ms (en tiempo) para retornar al radar y ser detectada. Por lo tanto, se requiere de un IPP cuyo valor sea mayor a 1.6 ms como mínimo.

La inversa del IPP es la frecuencia de repetición de pulso (PRF-Pulse Repetition Frequency), y se define como el número de pulsos transmitidos por unidad de tiempo.

$$PRF = \frac{1}{IPP} \quad (12)$$

El muestreo periódico de datos presenta un problema denominado solape (del inglés “*aliasing*”), tanto en rango como en frecuencia. El solape en rango se debe a la recepción de ecos que provienen de alturas mayores a las muestreadas. Los ecos son recibidos en uno de los periodos de recepción, por lo que se considera como si fuera un eco originado del rango que se está analizando. Para evitar este problema se aumenta el valor del IPP, sin embargo este aumento genera un problema en la frecuencia máxima de muestreo, o denominado solape en frecuencia. De manera similar al solape en rango, este problema se origina al considerar frecuencias fuera del valor máximo (Frecuencia Nyquist igual a  $\frac{1}{2} * IPP$ ). Estos valores son reducidos al rango permitido, por lo tanto su valor real es equivocado. La Figura 17 ilustra esta idea.

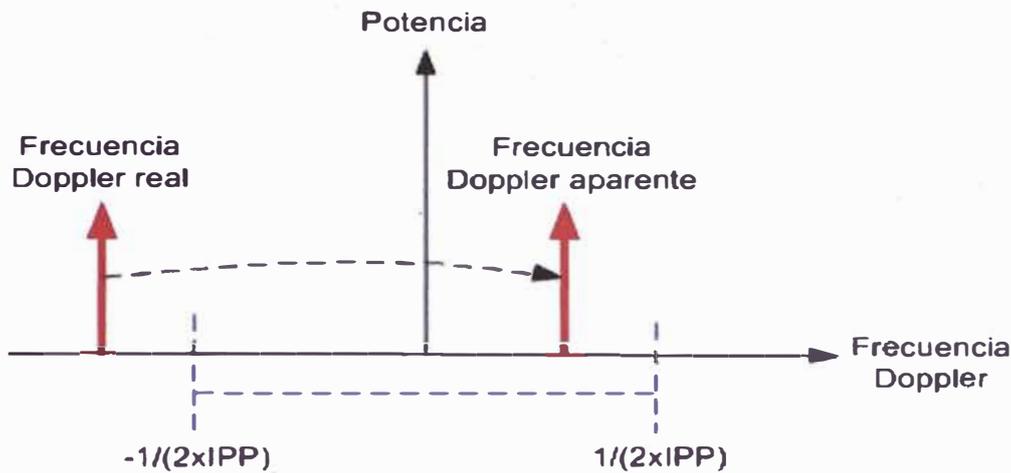


Figura 17 Solape en frecuencia. Notemos como una frecuencia Doppler fuera del intervalo válido es reducida a un valor aparente dentro de este intervalo.

### 3.2.5.3 Longitud del pulso transmitido

La longitud del pulso (del inglés *Pulse Width*-PW) es definido como la duración del pulso transmitido, comúnmente expresada en kilómetros o microsegundos. Este concepto está relacionado con la resolución en rango ( $\Delta R$ ) para la detección del objeto. Para un radar monostático la ecuación (13) expresa esta relación.

$$\Delta R = c \times \tau \quad (13)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $\tau$  es la longitud del pulso transmitido.

De la relación anterior podemos observar que una disminución en la longitud del pulso permite determinar de manera más exacta, la ubicación del objeto, pero sacrificando la potencia de transmisión. Esto se debe a que la longitud del pulso transmitido se relaciona de manera proporcional a la potencia transmitida, un pulso más corto significa transmitir menos tiempo y por lo tanto menos potencia. Por lo tanto es importante definir un ancho de pulso que permita determinar el objeto con la máxima exactitud y con suficiente potencia para ser detectado. La Figura 18 ilustra los conceptos de frecuencia base, IPP y longitud de pulso.

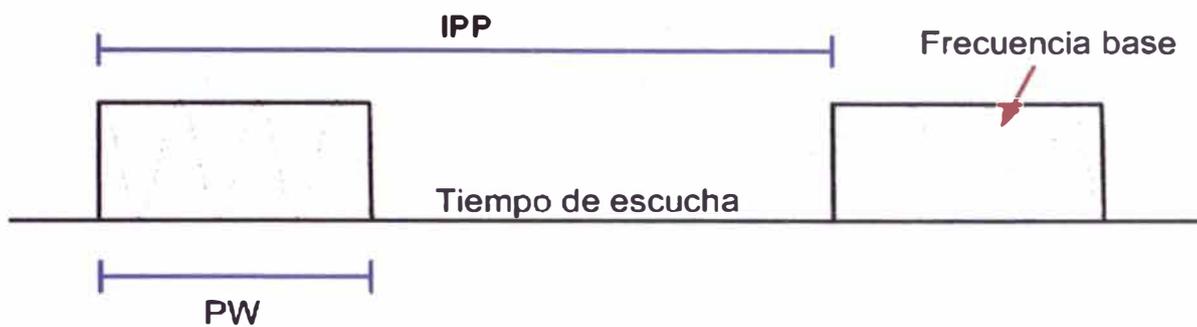


Figura 18 Conceptos relacionados con radar: Tiempo de repetición de pulso, Ancho del pulso y frecuencia base.

### 3.2.5.4 Potencia transmitida

La potencia útil de un transmisor, es la potencia que irradia en los pulsos emitidos y se denomina potencia pico. Sin embargo es muy común medir la potencia como una potencia promedio relativa al IPP y esto se debe a que el transmisor opera en un intervalo de tiempo muy corto en comparación al tiempo de espera para la recepción de ecos. Por esta razón la potencia promedio respecto a un IPP es menor que la potencia pico del transmisor, la siguiente ecuación establece la relación entre el IPP, PW, potencia promedio y potencia pico.

$$\frac{\text{potencia\_promedio}}{\text{potencia\_pico}} = \frac{PW}{IPP} \quad (14)$$

La Figura 19 representa gráficamente esta relación

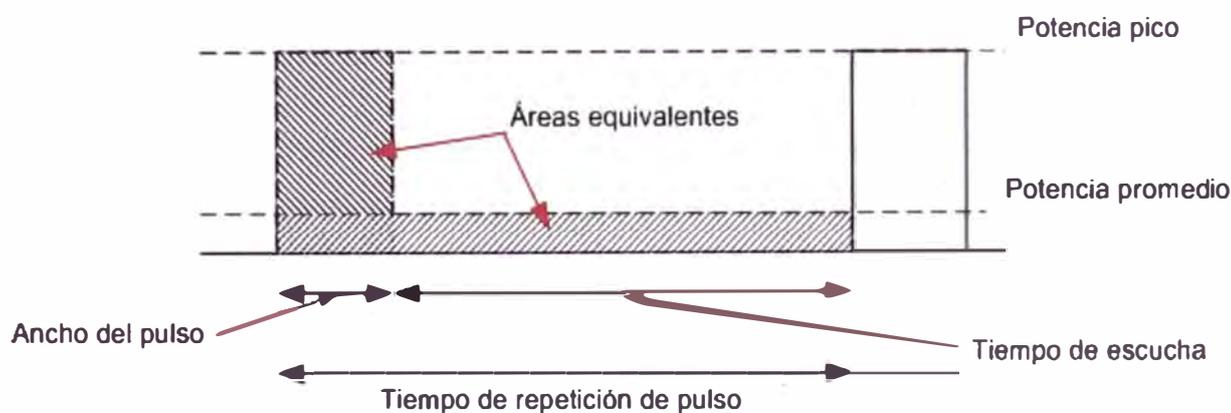


Figura 19 Relación entre la potencia pico y la potencia promedio.

El ciclo de operación de un transmisor puede ser descrito en términos de la relación de la duración del pulso y el tiempo necesario para la transmisión del siguiente pulso. Esta relación se denomina ciclo de trabajo (“*duty cycle*”) y se define:

$$duty\_cycle = \frac{PW}{PRT} = \frac{potencia\_promedio}{potencia\_pico} \quad (15)$$

### 3.3 Procesamiento de señales de radar

Esta sección describe los conceptos básicos para el procesamiento de señales de meteoros. Describiremos conceptos tales como muestreo, frecuencia Nyquist, transformada de Fourier, convolución. Conceptos importantes para el procesamiento de señales de radar.

#### 3.3.1 Muestreo de señales en tiempo continuo

Una señal en tiempo discreto es el resultado de muestrear una señal en tiempo continuo, siendo el muestreo, capaz de representar la forma exacta de la señal en tiempo continuo [e.g., *Oppenheim y Schaffer, 2000*]. La forma típica de obtener una representación en tiempo discreto de una señal en tiempo continuo es mediante el muestreo periódico, si consideramos una señal continua  $S_c(t)$ , se obtiene una secuencia de muestras  $S[n]$  mediante la relación:

$$S[n] = S_c(nT) \quad (16)$$

Donde  $n$  es un número entero,  $T$  es el periodo de muestreo y su inversa,  $f_s = 1/T$  se denomina frecuencia de muestreo, la Figura 20 ilustra este proceso para dos distintos valores de frecuencias de muestreo.

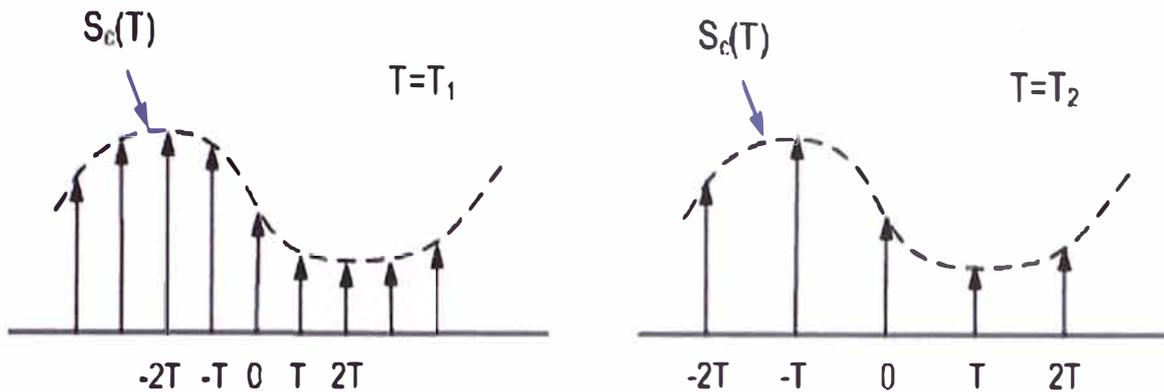


Figura 20 Muestreo periódico de una señal continua, para dos diferentes frecuencias de muestreo

La operación de muestreo en general es no invertible, es decir dada la salida  $S[n]$  no es posible, en general, reconstruir  $S_c(t)$ , debido a que existen muchas señales posibles en tiempo continuo que pueden producir la misma secuencia de muestras de salida. Esta ambigüedad inherente al proceso de muestreo, se puede eliminar restringiendo las señales de entrada al sistema de muestreo. Para ilustrar este problema consideremos dos señales:

$$S_1(t) = \cos(2\pi(10)t)$$

$$S_2(t) = \cos(2\pi(50)t)$$

Si muestreamos ambas señales con una frecuencia de 40Hz, las señales obtenidas en tiempo discreto son:

$$S_1(t) = \cos(2\pi(10)\frac{T}{40}) = \cos(\frac{\pi}{2}n)$$

$$S_2(t) = \cos(2\pi(50)\frac{T}{40}) = \cos(\frac{5\pi}{2}n)$$

Pero analizando  $S_2$ , vemos que la fase es la misma que  $S_1$  pero con una vuelta adicional, por lo cual  $S_1(n) = S_2(n)$ . Por lo tanto estas dos señales son indistinguibles, esta ambigüedad entre las señales muestreadas se debe al valor de la frecuencia de muestreo. La frecuencia de 50Hz se dice que es un alias de la frecuencia de 10Hz, por

esto es importante conocer la frecuencia máxima que presenta la señal a muestrear, a fin de eliminar la ambigüedad con adecuado valor de muestreo.

### 3.3.2 Teorema de muestreo de Nyquist

Sea una señal  $S_c(t)$  de banda limitada, esta señal estará determinada de forma única por sus muestras  $S[n] = S_c(nT)$ , si se cumple que:

$$f \geq 2f_{\max} = f_N \quad (17)$$

La frecuencia de muestreo  $f$  es igual o mayor que el doble de la máxima frecuencia  $f_{\max}$  presente en la señal a muestrear o también denominada frecuencia Nyquist  $f_N$  [e.g., Proakis y Manolakis, 1988].

### 3.3.3 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier, es una herramienta matemática que permite descomponer una señal (dominio de tiempo) en componentes sinusoidales o también denominados armónicos (dominio de frecuencia). Para una señal  $x(t)$  unidimensional y continua en el tiempo, la transformada de Fourier  $X(f)$  se define como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \times e^{-i2\pi ft} dt \quad (18)$$

Donde  $i = \sqrt{-1}$ . Simbólicamente la transformada se escribe como  $X(f) = F\{x(t)\}$ .

La transformada inversa ( $x(t) = F^{-1}\{X(f)\}$ ) se define como:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \times e^{i2\pi ft} dt \quad (19)$$

Este par de ecuaciones permite transformar una señal del dominio de tiempo al dominio de frecuencia (y viceversa), mostrando la misma información desde un punto de

vista distinto. Dependiendo del tipo de señal que se utilice, ya sea discreta o continua, la transformada de Fourier sufre modificaciones en su representación matemática. Para mayor información de la Transformada de Fourier, revisar *Oppenheim y Schaffer* (2000), o *Proakis y Manolakis* (1988). La Figura 21 ilustra este concepto.

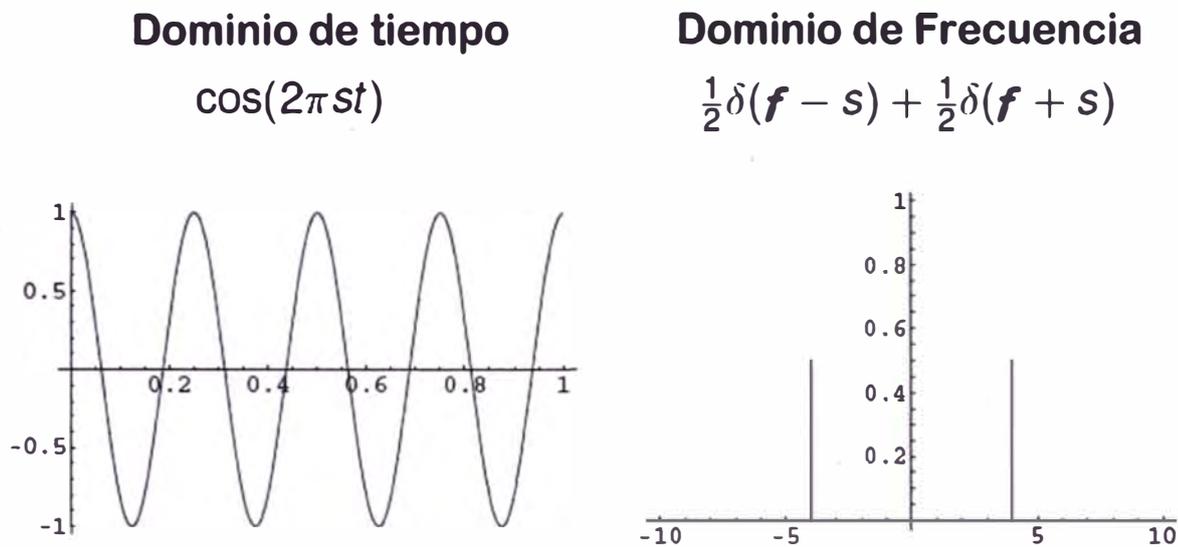


Figura 21 A la izquierda una señal con periodo de 0.25s, el eje horizontal es el tiempo y el eje vertical la amplitud. A la derecha su transformada de Fourier, el eje horizontal es la frecuencia y el eje vertical la amplitud del espectro

### 3.3.4 Convolución

La convolución es una operación matemática (multiplicación, suma e integración) entre dos números para producir un tercero. Para señales, la convolución toma dos señales de entrada (señales de entrada  $f(\tau)$  y  $h(\tau)$ ) y produce una tercera (señal de salida  $g(\tau)$ ) [e.g., *Smith*, 1999], la ecuación 21 define la relación entre estas tres señales. El símbolo  $\otimes$  representa la convolución y la convolución de dos señales se escribe como:

$$g(\tau) = f(\tau) \otimes h(\tau) \quad (20)$$

Matemáticamente la convolución se define:

$$g(\tau) = f(\tau) \otimes h(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} f(t)h(\tau - t) \quad (21)$$

### 3.3.5 Filtros digitales

Los filtros digitales de manera similar a los filtros analógicos, se utilizan para separar y/o restaurar señales [e.g., *Smith*, 1999]. La separación es necesaria cuando la señal estudiada es contaminada con alguna otra señal (interferencia, ruido u otras señales) y la restauración se realiza si la señal fue distorsionada de alguna manera. El uso de filtros digitales en comparación a los filtros analógicos, permite lograr mejores resultados y tener un fácil manejo de los mismos (un filtro digital se modifica fácilmente).

Para definir un filtro digital se debe conocer ya sea su respuesta a un impulso, o su respuesta a un paso, o su respuesta en frecuencia, debido a que cada una de estas respuestas contiene la información completa del filtro. Esto permitiría conocer como se comporta el filtro en diferentes circunstancias. Una forma para implementar un filtro es mediante la convolución de la señal de entrada con la respuesta al impulso del filtro digital. Otra manera de implementar un filtro es denominada filtro recursivo. Para el caso de un filtro por convolución, cada muestra de la señal de salida es el resultado de darle un peso a cada muestra de la señal de entrada y sumar todos estos valores. En el caso de un filtro recursivo, se define un conjunto de valores iniciales y los siguientes valores se determinan de manera recursiva.

El diseño y utilización de un filtro digital depende de la información que se desea extraer. Es importante establecer el dominio de trabajo o la región que contiene la información importante para el proceso (dominio de tiempo o dominio de frecuencia), debido a que un filtro con buena respuesta en un dominio genera un mal resultado en el otro, siendo imposible optimizar el filtro para ambos dominios. Los filtros básicos son pasa baja, pasa alta, pasa banda, y de rechazo. El filtro pasa bajo, rechaza las señales de alta frecuencia, y permite el paso de las señales de baja frecuencia. El filtro pasa alto

realiza lo opuesto, rechaza las señales de frecuencias bajas y permite el paso de señales con alta frecuencia. El filtro pasa banda limita las señales a un conjunto de frecuencia o banda de frecuencia, mientras que el filtro de rechazo realiza una operación contraria, es decir rechaza las señales contenidas en una banda de frecuencias y deja pasar las demás señales.

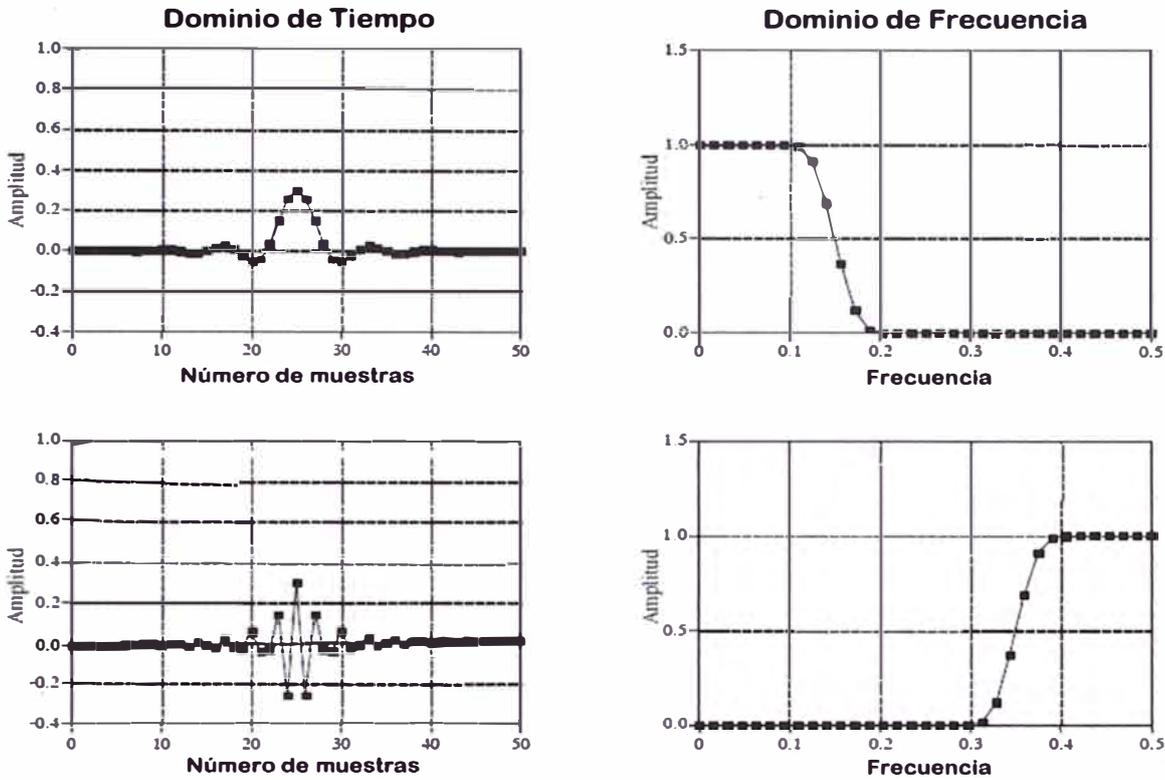


Figura 22 Forma de los filtros pasa baja (parte superior) y pasa alta (parte inferior), en el dominio de tiempo y en el dominio de frecuencia.

Dependiendo del diseño del filtro y su utilidad, cada uno tendrá una característica distinta (rizado, atenuación, valor umbral, etc.). La Figura 22 muestra la forma de los filtros pasa bajo y alto en el dominio del tiempo y en el dominio de frecuencia.

### 3.3.6 Función de correlación cruzada

La correlación cruzada es una herramienta que permite medir el grado de similitud entre dos señales dependiente del tiempo  $f(t)$  y  $g(t)$ , en diferentes desplazamientos de tiempo  $\tau$ . Se define [e.g., Proakis y Manolakis, 1988]:

$$\rho_{fg}(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} f(t)g(t-\tau) \quad (22)$$

Donde,  $\tau$  es el cambio en tiempo (o también denominado “lag”) de una señal respecto a la otra o en otras palabras es el retardo de una función respecto a la otra y  $\rho_{fg}$  representa la correlación de la función  $f(t)$  con la función  $g(t)$ . La forma continua de esta expresión se escribe como:

$$\rho_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-\tau)dt \quad (23)$$

Para el caso en que la segunda función sea igual a la primera función, la función de correlación se denomina función de autocorrelación y las expresiones anteriores se escriben como:

$$\rho_{ff}(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau) \quad (24)$$

$$\rho_{ff}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau)dt \quad (25)$$

La expresión matemática de la correlación haciendo uso del concepto de convolución es:

$$\rho_{fg}(\tau) = f(\tau) \otimes g(-\tau)$$

Esta ecuación es muy importante pues permite manipular la correlación entre dos señales, utilizando las propiedades de la convolución.

## Capítulo 4

# CONFIGURACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS DE METEOROS EN EL ROJ

En este Capítulo describiremos primero la configuración de antena utilizada para los experimentos de meteoros. Posteriormente desarrollaremos una comparación de los pulsos utilizados, para finalizar haciendo un resumen de las configuraciones típicas de radar de Jicamarca para estudios de meteoros.

### 4.1 Configuración de la antena para el experimento.

Para las observaciones de meteoros en el ROJ, se utiliza el área total del arreglo de antenas (300 m x 300 m) para el proceso de transmisión del pulso de energía. En recepción se utilizan tres o cuatro de los cuatro cuartos del arreglo de antenas (cada uno con un área de aproximada de 150 m x 150 m), con receptores digitales para cada una de las antenas. La distribución de las tres antenas (o canales) de recepción en la antena de Jicamarca, es ilustrada en la Figura 23.

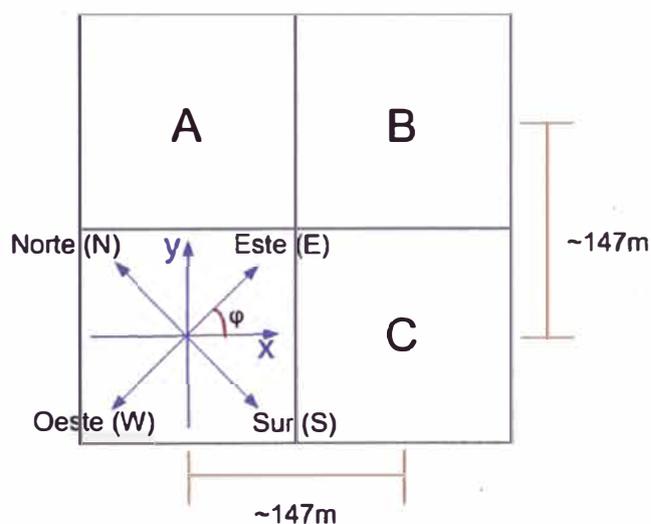


Figura 23 Configuración de antenas utilizada para las observaciones de meteoros, los días 22 y 23 de Noviembre del 2005. Las letras A, B y C representan los tres cuartos de la antena utilizados para el proceso de recepción.

Las letras A, B y C representan los tres cuartos de antenas utilizados para la recepción. Esta distribución ha sido establecida de tal forma que podamos determinar la ubicación del meteoro dentro del haz de la antena, mediante el uso de interferometría. Para este fin se define, el eje “x” positivo en la dirección sureste y el eje “y” positivo en la dirección noreste, tal como se indica en la Figura 23. De la Figura 23 se observa además que “xy” representa un plano que se encuentra rotado respecto a la línea oeste-este un ángulo aproximado  $51.06^\circ$ . Las distancias mostradas (aprox. 147m) en la Figura 23, son las distancias aproximadas entre los centros de los cuartos de antenas, en la dirección “x” e “y”. La selección de solo tres de los cuatro cuartos de la antena de Jicamarca, será justificada en la sección 5.2.3.

La polarización de la antena para la transmisión y la recepción, fue una polarización lineal en la dirección de noreste. La Figura 24 muestra el esquema de las líneas utilizadas en la transmisión (Tx) y recepción (Rx) de pulso a pulso. Las líneas en color rojo representan el proceso de transmisión. Los pulsos “Ups” y “Dns” mostrados en el diagrama, representan la potencia transmitida para las polarizaciones arriba (UP) y abajo (DOWN) de la antena de Jicamarca. Notemos la diferencia de los pulsos mostrados, esto significa que toda la potencia es transmitida en la polarización arriba, siendo aproximadamente cero la potencia transmitida en la polarización abajo. La polarización arriba se define en la dirección del eje “y”, mientras que la polarización abajo se define en la dirección “x” (ver Figura 23).

H1 y H2 corresponden a los híbridos, donde la potencia recibida de los dos transmisores (Tx1 y Tx3), es adicionada en una salida y restada en la otra salida, de forma tal que se obtenga la máxima potencia de salida para la antena en la polarización arriba. Luego esta potencia es repartida a los cuatro cuartos de la antena, mediante los interruptores SYL y SYR (del inglés “switch yard Left (SYL)” y “switch yard right (SYR)”), tal como lo indica la Figura 24. Los rectángulos 0,  $\frac{1}{4}$ , o  $\frac{1}{2}$ , representan las compensaciones en fase que se realiza en cada cuarto de antena, con el objetivo de lograr que las señales sean transmitidas en fase en cada uno de los cuartos de la antena. En  $W_u$ ,  $W_d$ ,  $N_d$ ,  $N_u$ ,  $E_u$ ,  $E_d$ ,  $S_d$  y  $S_u$  los subíndices “u” y “d” corresponden a la polarización arriba y abajo respectivamente, y las letras W, N, E y S corresponde los cuartos oeste, norte, este y sur de la antena del ROJ.

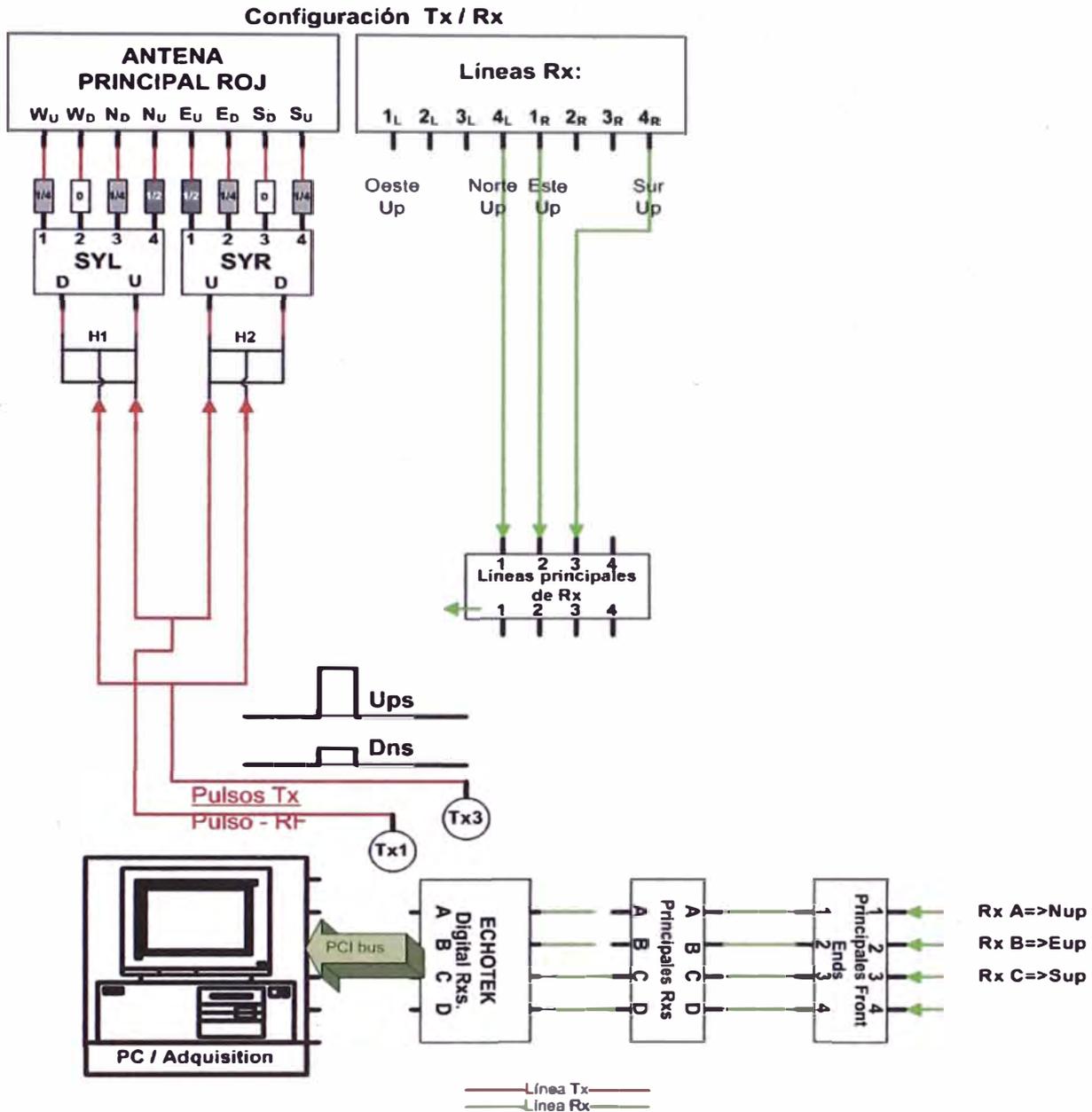


Figura 24 Configuración para la transmisión y recepción en el experimento de meteoros de los días 22 y 23 de Noviembre del 2005 (Cortesía de G. Vera, Jefe de Operaciones del ROJ, 2005)

Para la recepción (líneas color verde), se suelen utilizar tres de los cuatro cuartos de la antena, en la polarización arriba: norte-up, este-up y sur-up de la antena. Estas líneas de recepción corresponden a las antenas A, B y C respectivamente, mostradas en la Figura 24. Estas tres líneas de recepción, son recibidas en los canales 1, 2, y 3, de la tarjeta de adquisición, los voltajes de los tres canales son digitalizados y luego

almacenados como voltajes complejos (Amplitud en fase –Amplitud en cuadratura). La denominación utilizada para estos voltajes complejos almacenados es “dato crudo”.

Para definir el patrón de radiación de la antena, se varía la fase de los módulos de la antena, jugando con las longitudes de sus cables de alimentación (RG-17), la configuración de cables se muestra en la Figura 25. Esta configuración permite tener el haz transmitido en una orientación casi perpendicular al plano de la antena, estando fuera de la vertical en un ángulo de  $1.46^\circ$  en la dirección del eje “y” (Orientación On-Axis) [Ochs, 1965]

**POSICIÓN DE LA ANTENA "ON AXIS"**  
Dec. -12.88o/HA=>4m 37s W

**Diagrama de fase utilizado  
en la Antena de Jicamarca**

Cuarto del Norte				Cuarto del Este			
4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2
4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2
4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2
4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2	4/2
Cuarto del Oeste				Cuarto del Sur			
5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3
5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3
5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3
5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3	5/3

Figura 25 Configuración de fase en cada módulo de la antena de Jicamarca, para el experimento realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005.

La simbología utilizada en la Figura 25, para las distribuciones de cables en los módulos de la antena, es un par de números (ver Figura 25: ejemplo 4/2 o 5/3), donde el número superior indica la longitud de cable adicionado a la polarización arriba del módulo en cuestión, mientras que el número inferior indica el cable adicionado a la polarización abajo, ambos en metros. Una vez adicionado el cable correspondiente a la

configuración deseada, se obtiene el patrón establecido (en nuestro caso ON-AXIS). La Figura 26 muestra el patrón de radiación en configuración para meteoros.

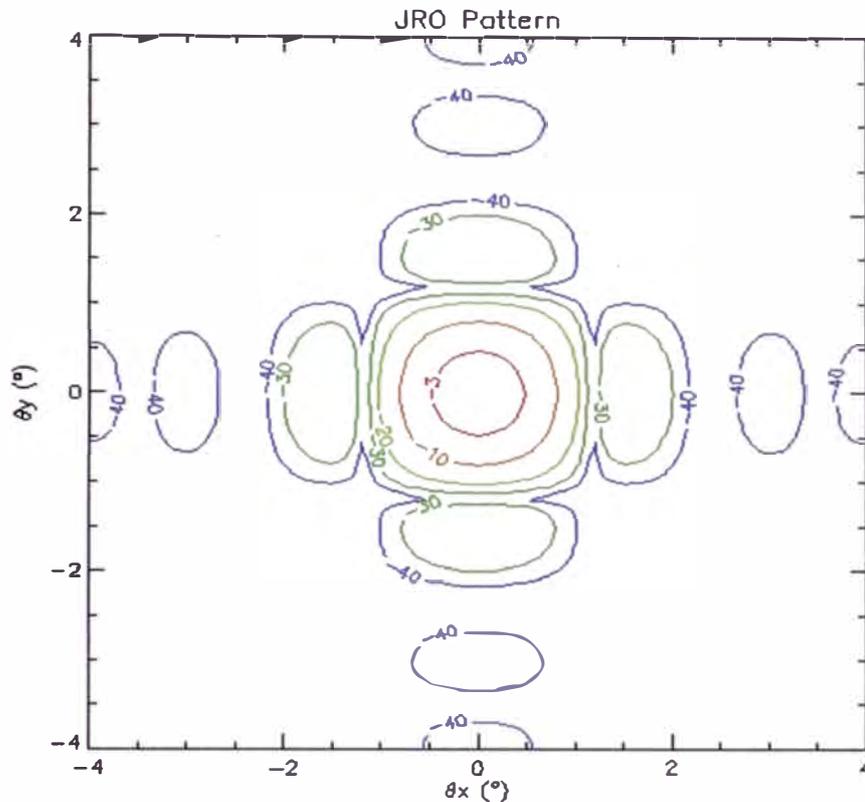


Figura 26 Patrón de radiación de la antena para el experimento de meteoros. Los valores mostrados en las líneas de contorno corresponden a la ganancia (en dB) de la potencia transmitida por el patrón de la antena respecto a la potencia máxima transmitida.

## 4.2 Tipos de pulsos utilizados en experimentos para meteoros.

Definir el tipo de pulso a utilizarse en un experimento para radar, significa definir un pulso, que permita detectar la mayor cantidad de objetos posibles y obtener simultáneamente una buena resolución en rango. Para definir este pulso óptimo para experimentos de meteoros, se analizaron tres tipos de pulsos. Estos pulsos fueron: pulso corto, pulso largo no codificado y pulso largo codificado. La Figura 27 muestra estos tres tipos de pulso. La amplitud de estos pulsos es igual a 1 y el ancho del baudio es 150m. Siendo el baudio la longitud del valor digital (0 o 1) transmitido.

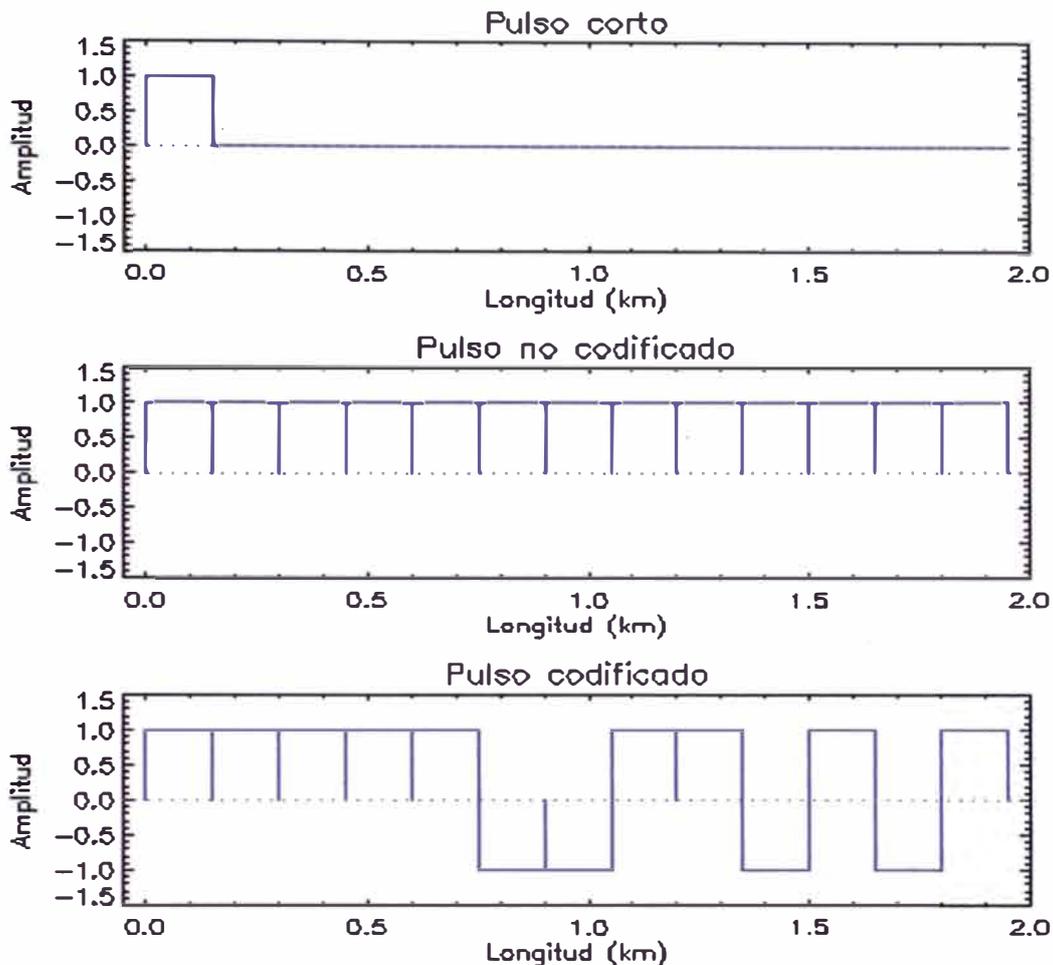


Figura 27 De arriba hacia abajo, pulso corto, pulso largo no codificado y pulso largo codificado, en los tres casos el ancho de baudio es igual 0.15 km. El número de baudios utilizado en los pulsos largos es 13, siendo el código utilizado en el tercer caso, el código Barker 13

El análisis de la potencia recibida, es un factor que está relacionado directamente al número de meteoros observados, a mayor potencia transmitida, mayor será la población observada y viceversa. Bajo este criterio, lo más óptimo sería transmitir siempre con la máxima potencia. Sin embargo el valor de la potencia recibida no depende exclusivamente de la potencia transmitida. Si recordamos la ecuación fundamental para radares (Ecuación 8), hay varios factores que influyen. Siendo el más importante la llamada sección transversal, pues mientras mayor sea este valor mayor será la cantidad de energía que retorne a las antenas receptoras. Por lo tanto si el objeto a estudiar presenta una sección transversal de dimensiones considerables. No será necesario transmitir toda la potencia del radar, pues los ecos obtenidos de este objeto, retornarán suficiente energía para ser detectados. En el caso de los meteoros [Close et al., 2005; Close et al., 2002; Hunt et al., 2003] su sección transversal es muy pequeña

por lo que transmitir la mayor cantidad de potencia es importante [Mathews, 2004]. En el ROJ, la potencia transmitida es aproximadamente de 2MW.

Un análisis del ciclo de trabajo (“*duty cycle*”) permite tener un estimado de la cantidad de potencia que se recibe en cada uno de los pulsos mostrados en la Figura 27. Claramente inferimos de la longitud (o tiempo de duración) de estos pulsos que la potencia transmitida con los pulsos largos será mucho mayor que la potencia transmitida con el pulso corto. Por lo tanto la potencia recibida será mayor en ambos casos con respecto al pulso corto, para un mismo IPP.

Utilizaremos la ecuación del radar (Ecuación (9)) y el nivel de ruido ( $N$ ) para verificar la relación entre la energía recibida y el número de baudios o longitud del pulso emitido (energía transmitida). El nivel de ruido esta gobernado por la ecuación (26):

$$N = K_B TB \quad (26)$$

Donde  $K_B$  es la constante de Boltzman ( $K_B = 1.38^{-23} J / K$ ),  $T$  es la temperatura del sistema y  $B$  representa el ancho de banda (proporcional a la inversa del ancho del pulso). Utilizando la ecuación (26) y la ecuación del radar (Ecuación (9)), tenemos que el  $SNR$  es igual a:

$$SNR = \frac{\overline{P_R}}{N}$$

$$SNR = \frac{\frac{A \sigma G}{(4\pi)^2 R^4} \overline{P_T}}{K_B TB} \quad (27)$$

Donde  $P_T$  : Potencia promedio transmitida

De manera compacta la ecuación (27) se puede escribir estableciendo una relación entre el  $SNR$  y la energía transmitida, donde la constante de proporcionalidad ( $C$ ) considera a los demás términos de la relación, como inalterables. Tenemos entonces que:

$$SNR = C \overline{P_T} \quad (28)$$

La ecuación del ciclo de trabajo para el radar (Ecuación (15)) establece la relación entre la potencia promedio transmitida y la potencia pico transmitida, mediante la siguiente relación:

$$\frac{\overline{P_T}}{P_{peak}} = \frac{\tau}{IPP} \quad (29)$$

Donde  $P_{peak}$  es la potencia pico transmitida,  $\tau$  duración o longitud del pulso y  $IPP$  es el tiempo entre dos pulsos consecutivos.

Despejando la potencia promedio transmitida de la ecuación (28) y reemplazando este valor en la ecuación (29) obtenemos la relación:

$$SNR = \frac{C \tau}{IPP} P_{peak} \quad (30)$$

Para los tres tipos de pulsos mostrados en la Figura 27, consideramos que la potencia pico transmitida es la misma para los tres tipos de pulso (y considerada como unitaria) y  $C$  es igual a la unidad, tenemos que la potencia promedio recibida para cada tipo de pulso en porcentaje es:

Tabla 3 Estimado de la potencia promedio que recibiría (en porcentaje) la antena para los distintos pulsos analizados.

Tipo de pulso	$C$	$\tau$	$IPP$	$P_{peak}$	$SNR$
Pulso Corto	1	1*0.15km	60km	1	0.25%
Pulso Largo no codificado	1	13*0.15km	60km	1	3.25%
Pulso largo codificado	1	13*0.15km	60km	1	3.25%

Esta comparación no es tan rigurosa, desde el punto de vista de la ecuación del radar. Debido a que la ecuación del radar requiere para su manejo conocer el patrón de radiación de la antena, las pérdidas generadas por el sistema de transmisión, el área transversal efectiva del objeto a detectar, entre otros factores. Pero desde un punto de vista analítico, el cálculo anterior, nos permite estimar el porcentaje de energía o potencia que en promedio recibirá el radar. Esta referencia es importante pues nos da una idea de cuanta potencia se debe transmitir para obtener ecos por encima del nivel del ruido. En las Figuras 28 y 29 mostramos dos ejemplos donde comparamos el SNR determinado del pulso largo codificado (izquierda), con el SNR obtenido con el pulso corto (derecha). La Figura 30 compara el SNR para entre el pulso largo codificado y el pulso largo no codificado. En todas la figuras la intensidad de la señal esta definido por un color de escala de grises utilizada.

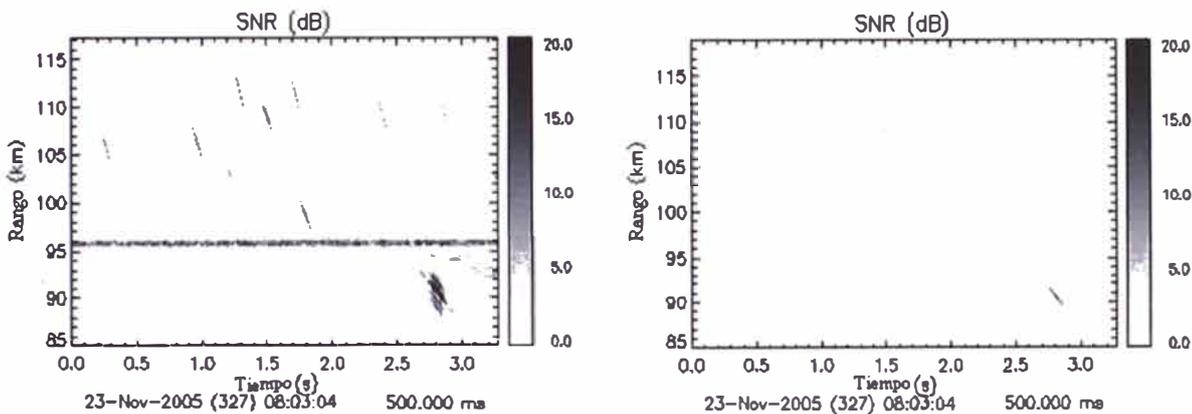


Figura 28 La Figura de la izquierda y derecha muestran los RTIs obtenidos a partir del pulso largo codificado y pulso corto, respectivamente. Notemos como la intensidad del gráfico de la izquierda es menor, lo cual se relaciona directamente con el número de meteoros detectados.

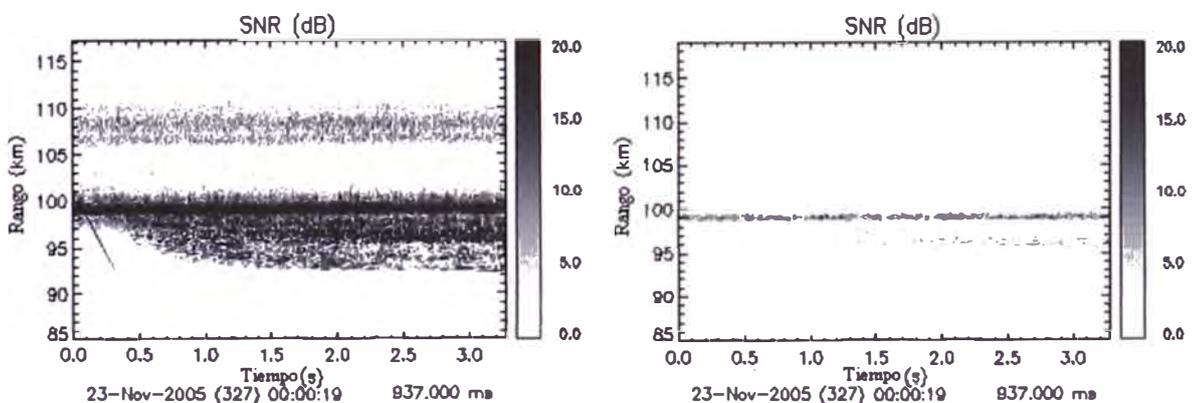


Figura 29 Al igual que en la Figura 28, pero en un instante de tiempo donde la potencia recibida del EEJ es bastante fuerte. Notemos la diferencia en la potencia recibida entre el pulso largo codificado (Gráfico de la izquierda) y el pulso corto (Gráfico de la derecha).

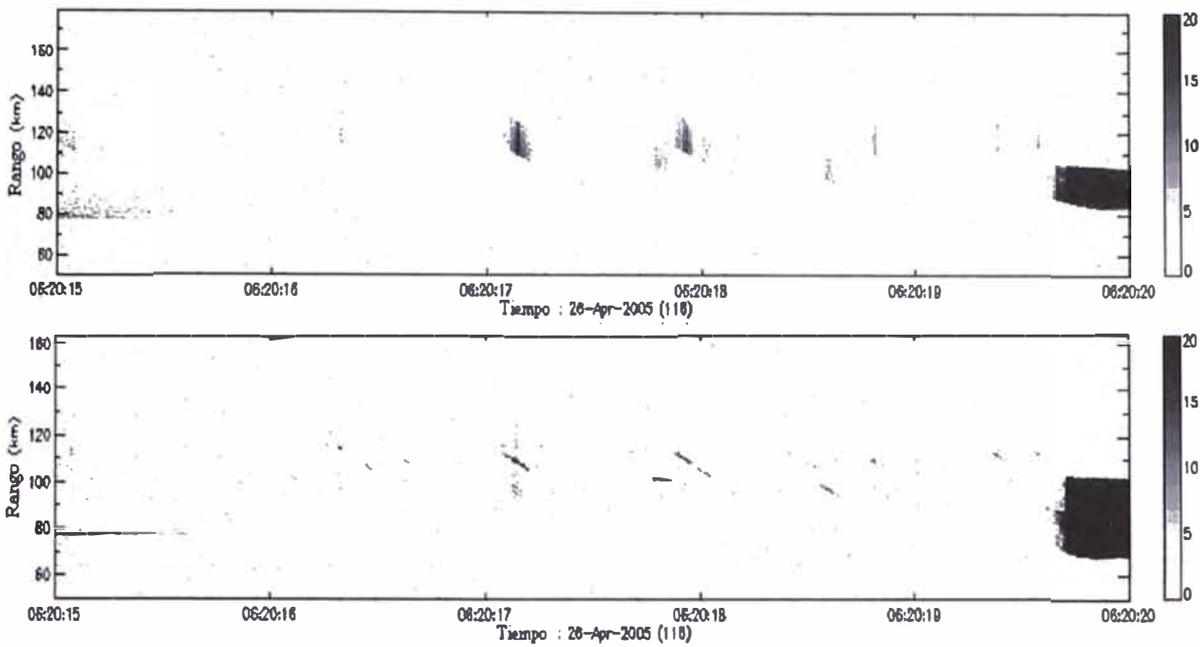


Figura 30 Los gráficos de la parte superior e inferior muestran el RTI para el pulso largo codificado y el pulso largo no codificado, respectivamente. Notemos como los niveles de SNR son bastante similares.

Como observamos de estos gráficos y de las ecuaciones desarrolladas, el pulso largo codificado y el pulso largo no codificado permiten recibir una mayor cantidad de energía (o potencia) por lo tanto estos dos tipos de pulso detectan un mayor número de meteoros respecto al pulso corto. Entonces si quisiéramos definir un experimento de radar en función a la potencia recibida, ambos pulsos largos dan buenos resultados. Sin embargo no solo la potencia recibida define un experimento de radar, además es importante, establecer un pulso que permita ubicar el objeto con la mejor resolución posible.

La resolución en rango para un experimento de radar se relaciona de manera directa al ancho del pulso transmitido (longitud o tiempo de transmisión). Por lo tanto la mejor resolución se obtendrá cuando la longitud del pulso sea menor. Por esta razón el pulso corto posee gran ventaja sobre el pulso largo para determinar la ubicación del objeto. La Figura 31 muestra dos pulsos transmitidos. El gráfico de la izquierda representa un pulso corto y el gráfico de la derecha representa un pulso largo (e igual a cuatro veces el pulso corto transmitido). Se infiere de esta Figura que la resolución aumenta de manera proporcional al ancho del pulso transmitido.  $R_0$ , representa en los

gráficos la altura analizada,  $\Delta R$  el ancho o resolución en rango (Ver ecuación (13)) para detectar un objeto a una altura  $R_0$  y  $t_1$  ancho o duración del pulso transmitido.

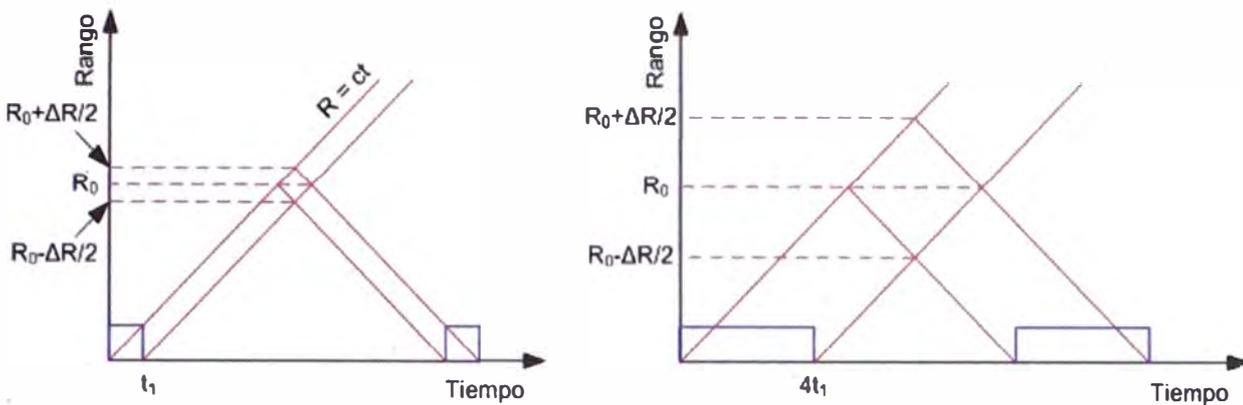


Figura 31 Grafico rango versus tiempo, para observar la relación entre el ancho del pulso transmitido y la resolución en rango, para determinar un blanco.

Considerando los pulsos de la Figura 27, tenemos que el pulso corto presenta mejor resolución, siendo su ancho o resolución del pulso corto transmitido igual a 150m (o  $1\mu s$ ). Para los pulsos largos de la Figura 27, la resolución es 13 veces la resolución del pulso corto. En general la resolución de un pulso largo de N baudios, es N veces más grande que la resolución de un pulso corto, con el mismo ancho de baudio. Para ambos pulsos largos de la Figura 27 la resolución es igual a  $13 \times 150m$  (ó  $13 \times 1\mu s$ ), con lo que obtenemos una resolución de 1950m (ó  $13\mu s$ ). Estos resultados claramente indican que para ubicar un objeto la mejor opción es el uso del pulso corto. Sin embargo la longitud del pulso no es la única variable que define la resolución en la ubicación de objetos con radar, otro factor importante, como se mencionó anteriormente es la potencia transmitida.

De la Figura 27, notamos que la forma del pulso largo codificado es diferente a la forma del pulso largo no codificado. Para el caso de un pulso codificado el filtro acoplado se realiza utilizando un filtro de recepción con igual forma que el baudio de transmisión. A diferencia del pulso largo no codificado, el pulso largo codificado comprime la energía de N baudios en un baudio, con lo cual se mejora la resolución, sin sacrificar potencia [e.g., Skolnik, 1970]. La Figura 32 ilustra el comportamiento de pulso largo codificado y lo compara al comportamiento de pulso largo no codificado, el cual se puede considerar como un pulso codificado en donde todos los baudios se transmiten en +1. Notemos como la respuesta del pulso largo sin codificar y codificado alcanzan la

misma amplitud máxima, pero la resolución o su comportamiento es distinto. Produciendo una mejor resolución en el pulso codificado.

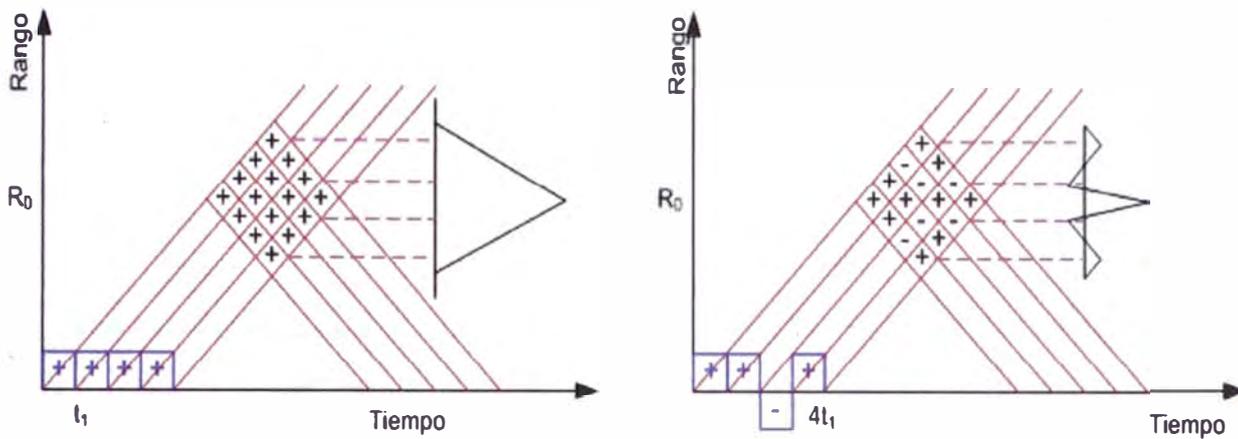


Figura 32 Respuesta al filtro acoplado. Al lado izquierdo un pulso no codificado, al lado derecho un pulso codificado (Barker 4).

En el análisis de ecos de meteoros, el filtro acoplado no se realiza con el mismo código debido a su alto valor Doppler. En este caso se acopla con una ventana igual al ancho del pulso y los datos adquiridos son procesados digitalmente con un proceso especial denominado “decodificación”. Este proceso será explicado en la sección 4.3. Este proceso de decodificación realiza una búsqueda de la frecuencia Doppler que optimice la decodificación, de esta manera se obtiene una mejor resolución en rango y se determina la frecuencia Doppler del objeto que produjo el eco, en nuestro caso un meteoro.

Si aplicamos el proceso de decodificación al pulso largo no codificado y al pulso largo codificado, obtendremos resultados similares a los mostrados en la Figura 32. Para esto consideremos un pulso largo no codificado que posee igual número de baudios que el pulso largo codificado y el pulso codificado es un Barker 13. Estos dos pulsos se pueden representar digitalmente como:

Pulso largo no codificado: pulse-largo = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]

Pulso largo codificado: Pulso-codificado = [1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1]

La Figura 33 muestra los resultados luego de aplicar el proceso de decodificación. Notemos como ambos resultados, alcanzan su máximo de decodificación en la misma ubicación. La diferencia entre estos dos gráficos es la distribución de la energía.

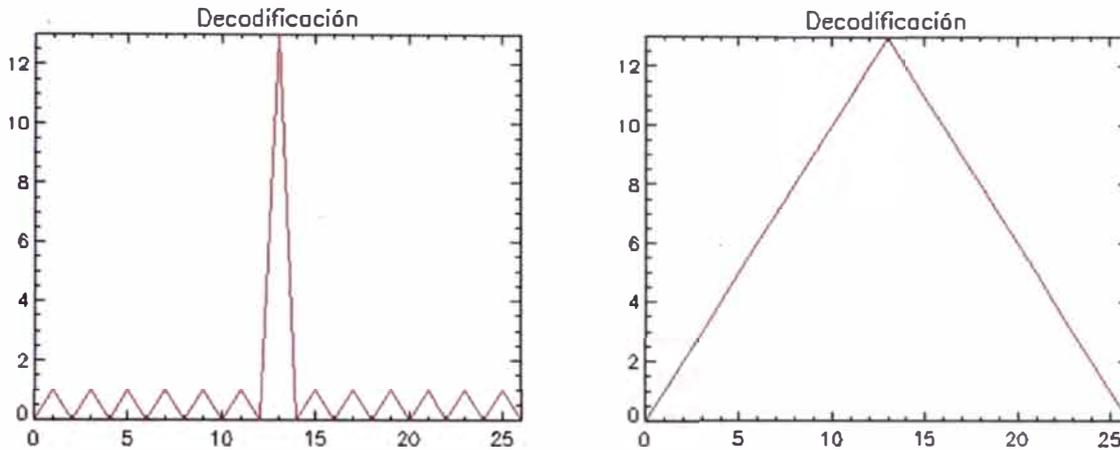


Figura 33 Proceso de decodificación aplicando dos pulsos de distinta forma. Al lado izquierdo tenemos el resultado para el pulso codificado con el código Barker 13 y al lado derecho considerando un pulso largo no codificado.

Para el pulso codificado la energía se concentra alrededor del índice número 13, creándose además picos alrededor del pico máximo, cuya amplitud es mucho menor que la amplitud del pico máximo (la diferencia entre el pico principal y los picos secundarios o laterales es de 22.3dB). Además, esta compresión de energía permite determinar con mejor precisión el rango del cual se generó el eco. En el caso del pulso largo notamos como la energía abarca un mayor ancho, generando un estimado del rango del eco con menor resolución.

Como observamos de los resultados anteriores la resolución y la potencia recibida son dos variables importantes que definen un experimento de radar, siendo ambas condiciones satisfechas con el pulso largo codificado, por lo tanto si tenemos que establecer que tipo de señal nos conviene transmitir la respuesta es un pulso largo codificado, siendo el código utilizado el Barker 13 pues este presenta mayor ganancia entre el lóbulo principal y los lóbulos laterales. Esta decisión se justifica aun más si recordamos que los ecos de meteoros que queremos estudiar se confunden con ecos del EEJ o de las colas de meteoros.

### 4.3 Proceso de decodificación

El proceso de decodificación (o también denominado “Compresión de Pulso”) permite concentrar la energía dispersada en N baudios, en un solo baudio, obteniéndose una resolución comparable a la obtenida con el pulso corto y una potencia recibida comparable con la potencia del pulso largo no codificado. El proceso de decodificación estándar se basa en la convolución de la señal recibida con el conjugado complejo del código utilizado.

$$v_{out} = v_{in}(t) \otimes c^*(t) \quad (32)$$

Donde la señal recibida es  $v_{in}(t)$  (o voltaje complejo recibido),  $c(t)$  es el código utilizado,  $v_{out}(t)$  la señal decodificada (o voltaje decodificado) y  $*$  representa el conjugado complejo.

Este proceso es válido si la señal a decodificar presenta un valor Doppler bajo, caso contrario la señal resultante del proceso de decodificación sufre una distorsión dependiente del valor Doppler de la señal recibida. Los diferentes valores obtenidos para una señal decodificada en distintos valores Doppler es lo que se denomina “Función de Ambigüedad” [e.g., *Skolnik*, 1970].

La Figura 34 muestra el diagrama de contornos de la potencia obtenida después de aplicar el proceso de decodificación para el código Barker 13. Esta potencia obtenida es función del Doppler y el rango. La Figura 34 muestra que para un Doppler cero (eje “y”), la decodificación (eje “x”) genera un pico central y lóbulos laterales pequeños. Si el valor Doppler es alto la decodificación del código Barker 13 presenta dos o cuatro picos. Resultado que puede interpretarse de manera incorrecta. Para corregir este problema, se realiza una búsqueda del valor Doppler que genera la mejor decodificación, obteniéndose no solo una buena decodificación, sino además se determina la velocidad radial del objeto que produjo el eco. La Figura 35 muestra dos gráficos rango vs. Tiempo, obtenidos luego de aplicar el proceso de decodificación. El gráfico de la izquierda muestra la potencia obtenida luego de aplicar la decodificación estándar y el gráfico de la derecha muestra el resultado de aplicar la búsqueda Doppler.

Función de Ambigüedad: Código Barker 13

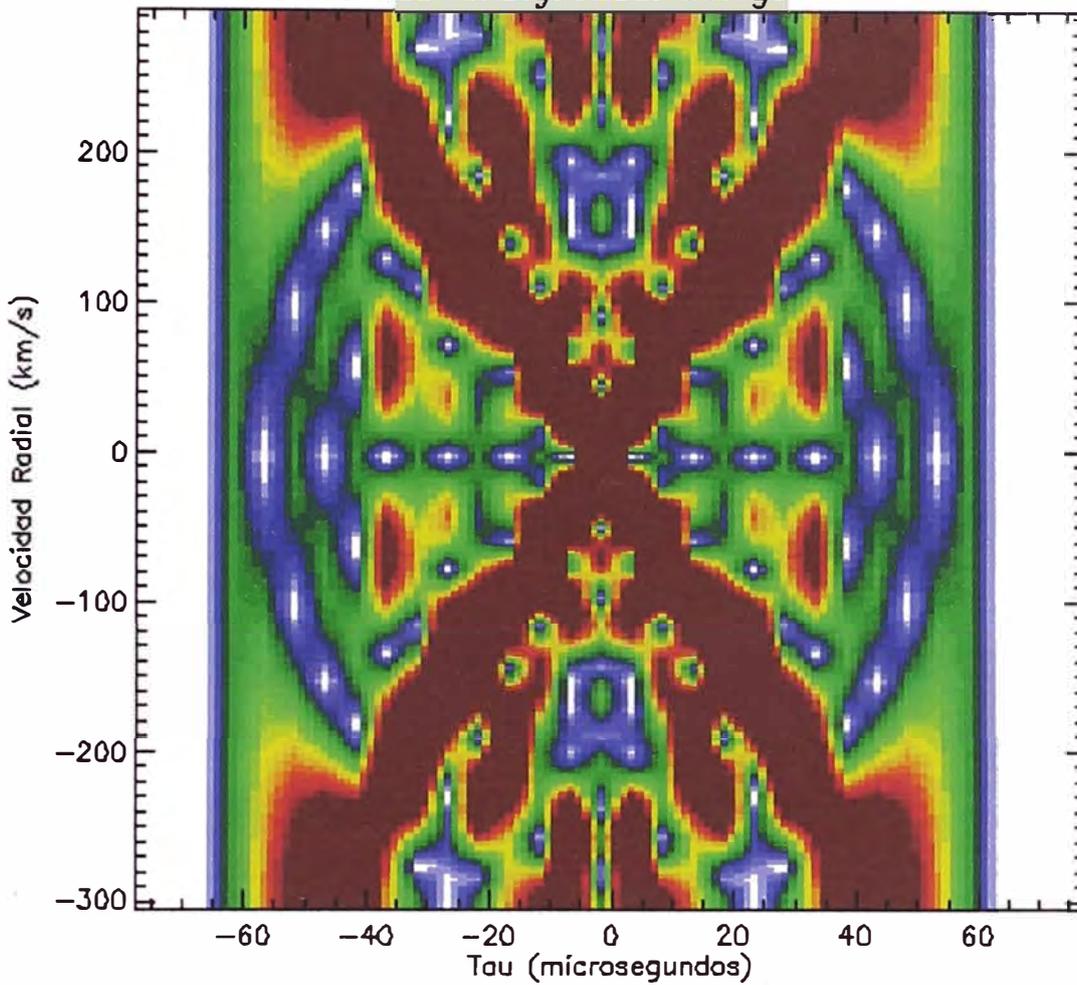


Figura 34 Función de Ambigüedad para el código Barker 13.

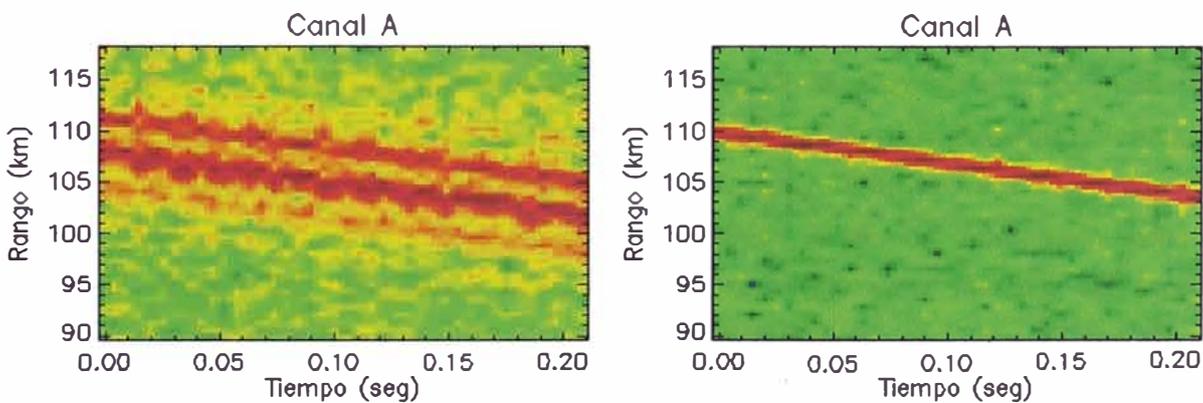


Figura 35 En el lado izquierdo: Resultado obtenido aplicando la decodificación estándar. A la derecha: Decodificación realizando la búsqueda del Doppler que genere la mejor decodificación.

## Proceso de decodificación utilizado por Chau y Woodman (2003)

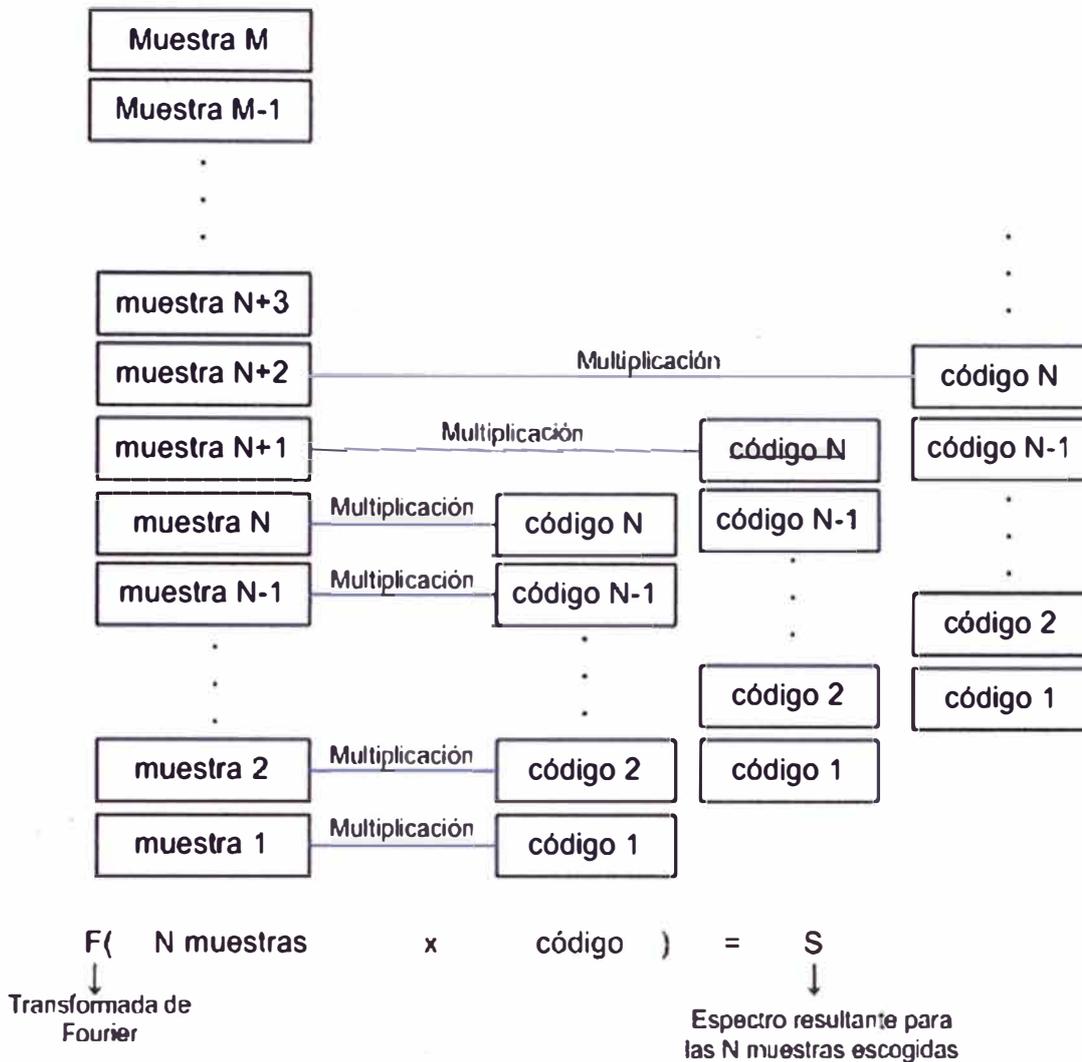


Figura 36 Algoritmo utilizado por Chau y Woodman [2004] para la decodificación de datos de meteoros codificados.

*Chau y Woodman* [2004] utilizaron un algoritmo de decodificación el cual tomaba  $N$  muestras, siendo  $N$  el número de baudios del código utilizado, y decodificaba estas muestras con el código utilizado pero desplazado una velocidad Doppler. Este proceso se repetía para diferentes valores de Doppler y para los diferentes rangos de alturas. Analizando todos los rangos de altura y las velocidades Doppler, la ubicación del valor máximo del espectro resultante nos permitía determinar la frecuencia Doppler. Las Figuras 36 y 37 muestran el esquema de este algoritmo utilizado y, el gráfico de espectro y contorno respectivamente.

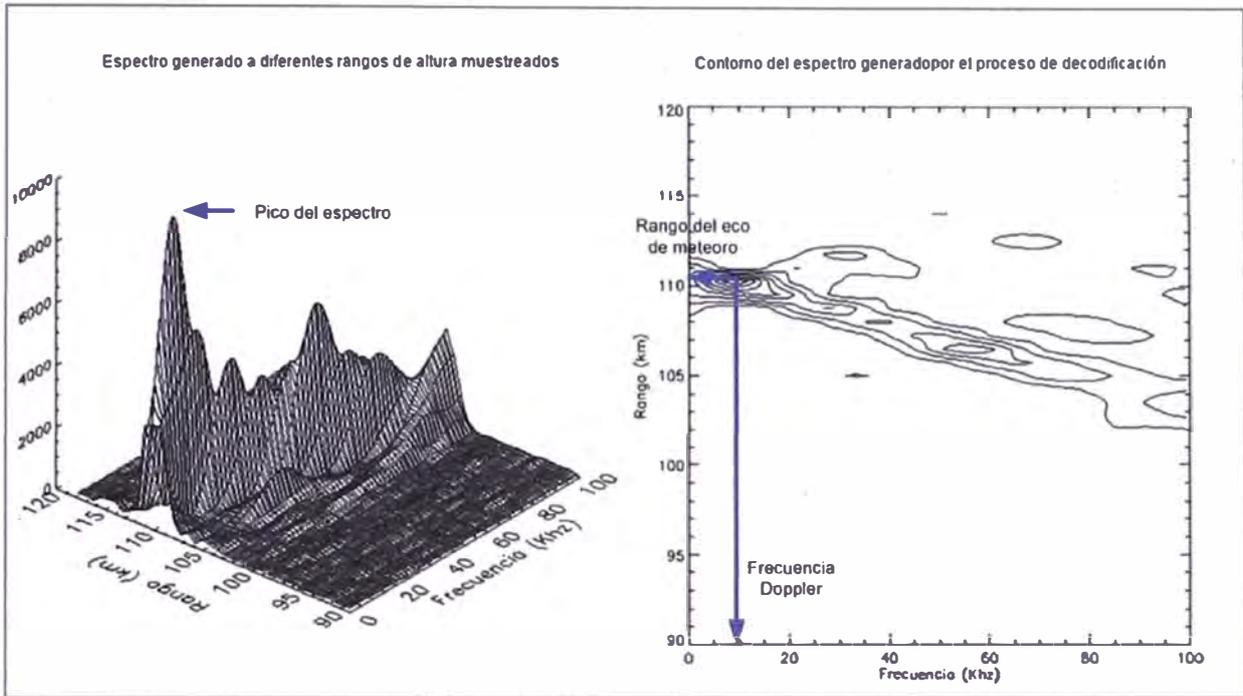


Figura 37 El gráfico de la izquierda muestra el espectro para determinar la frecuencia Doppler, al lado derecho su gráfico de contornos. El valor máximo del espectro permite identificar el valor del Doppler y la ubicación del meteoro

El problema de este algoritmo es el tiempo de procesamiento que emplea para la decodificación de los datos de meteoros. Por esta razón se diseñó un nuevo algoritmo, que permite ahorrar tiempo de decodificación. Este nuevo algoritmo se basa en la expresión matemática de la decodificación, la cual es modificada mediante herramientas matemáticas (transformada de Fourier), para obtener finalmente una expresión simplificada y fácil de implementar. A continuación mostramos el desarrollo matemático del nuevo proceso de decodificación.

Como la señal recibida ( $v_{in}(t)$ ) es la señal transmitida ( $v(t)$ ) convolucionada con el código utilizado y esto multiplicado por un factor exponencial complejo  $2\pi f_d$ , debido al Doppler del meteoro ( $f_d$ ), la señal recibida se escribe como:

$$v_{in}(t) = (v(t) \otimes c(t))e^{j2\pi f_d t} \quad (33)$$

Reemplazando la ecuación (33) en la ecuación (32) y reordenando términos tenemos:

$$v_{out}(t) = v(t)e^{j2\pi f_d t} \otimes (c(t) \otimes c^*(t)) \quad (34)$$

Utilizando la transformada de Fourier ( $F\{\}$ ), y sus propiedades. La ecuación (34) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} F\{v_{out}(t)\} &= F\{v(t)e^{j2\pi f_d t}\}F\{c(t)\}F\{c^*(t)\} \\ F\{v_{out}(t)\} &= V_{out} = V(f - f_d)xC(f)xC^*(f) \quad (35) \end{aligned}$$

Si utilizamos el siguiente reemplazo  $f' = f - f_d \rightarrow f = f' + f_d$ , la ecuación (35) se expresa de la siguiente forma:

$$V_{out} = S(f')xC(f' + f_d)xC^*(f' + f_d) \quad (36)$$

Finalmente para obtener el voltaje decodificado, tomamos la transformada inversa de Fourier ( $F^{-1}\{\}$ ) de la ecuación (36), lo cual resulta en:

$$v_{out} = F^{-1}\{S(f')xC(f' + f_d)xC^*(f' + f_d)\} \quad (37)$$

La importancia de la ecuación (37) radica en el término  $C(f' + f_d)xC^*(f' + f_d)$ , el cual no depende de la señal recibida, sino depende del código utilizado. Por lo tanto para el desarrollo de un algoritmo para el procesamiento de datos de meteoros, esta información se determina una sola vez y se almacena en memoria. Esto permitiría tener disponible esta información para todas las aplicaciones en la cual sea requerida. Esta información predefinida, por lo tanto permite optimizar el algoritmo, disminuyendo el tiempo de procesamiento, en una proporción de 7:1 aproximadamente.

En resumen, el proceso de decodificación, permite estimar la velocidad Doppler del meteoro y detectar la ubicación del mismo con una buena precisión y suficiente potencia.

#### 4.4 Configuraciones Típicas de los Experimentos para Meteoro

El radar del ROJ debido a su diseño en módulos, permite utilizar parte de la antena o toda la antena para la transmisión. Para el proceso de recepción se puede definir sectores de la antena para ser utilizados como receptores independientes. La facilidad de seleccionar diferentes configuraciones de la antena convierte al radar del ROJ en una herramienta versátil para diferentes investigaciones. En el experimento realizado el 22 y 23 de Noviembre del 2005, se transmitieron dos tipos de pulsos (experimento híbrido): pulso corto y pulso codificado (Barker 13), los cuales formaban la secuencia de pulsos: corto, codificado, codificado, corto; en la transmisión y corto, corto, codificado, codificado para recepción. Por esta razón, el procesamiento de ecos de meteoros, se divide, en datos obtenidos con el pulso codificado y datos obtenidos del pulso corto. Los resultados obtenidos con ambos tipos de pulsos, serán presentados en el Capítulo 7. La configuración del radar para el pulso corto y codificado del experimento realizado el 22 y 23 de Noviembre del 2005, se muestra en las Tablas 4 y 5. La Figura 38 ilustra la secuencia de pulsos recibidos en el experimento.

Tabla 4 Parámetros del radar para el experimento (pulso codificado) realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Periodo de Repetición de pulso o IPP	60.0km (400 us)
Ancho del Pulso	1.95km (13 us)
Pulso	Código - Barker 13
Muestreo	0.15km (1 us)
Rango inicial	85.0km
Número de muestras	256
Número de canales	3
Potencia pico transmitida	2MW

Tabla 5 Parámetros de radar para el experimento (pulso corto) realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005.

Parámetro	Valor
Periodo de Repetición de pulso o IPP	60.0km (400 us)
Ancho del Pulso	0.15km (1 us)
Pulso	Corto
Muestreo	0.15km
Rango inicial	85.0km
Número de muestras	256
Número de canales	3
Potencia pico transmitida	2MW

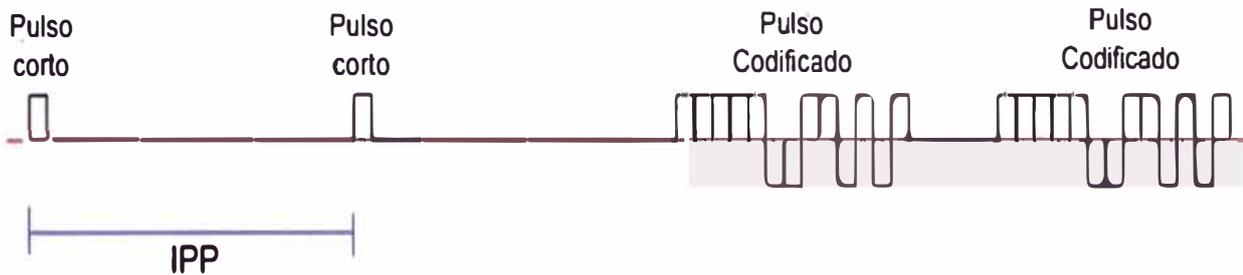


Figura 38 Secuencia de pulsos recibidos para el experimento híbrido realizado.

La Tabla 6 muestra los parámetros de operación descritos en el experimento actual fruto de esta tesis (e.g., 22 y 23 de Noviembre del 2005) y los compara con los parámetros de los experimentos anteriores (e.g., 19 de Noviembre del 2002). Denominaremos Modo 0 y Modo 1, a los experimentos del año 2002 y 2005 respectivamente. La principal diferencia de estos dos modos de operación son: (a) resolución en rango, (b) velocidad Nyquist para la velocidad determinada de la técnica pulso a pulso, (c) ciclo de trabajo, (d) tipo de receptores usado (analógico en el Modo 0 y digital en el Modo 1), y (e) procesamiento manual y automático. La descripción del procesamiento en el Modo de operación 1 es tema del presenta trabajo de Tesis y será explicado en Capítulo 5.

Tabla 6 Comparación de los parámetros del radar para los dos modos de operación

<b>Parámetro</b>	<b>Modo 0</b>	<b>Modo 1</b>
Periodo de Repetición de pulso (km)	200	60
Tipo de pulso	Código - Barker 13	Código - Barker 13
Muestreo (km)	0.75	0.15
Ancho del Pulso (km)	9.75	1.95
Rango de Altura muestreado (km)	80-130	80-120
Tiempo de Muestreo ambiguo ( $\mu$ s)	5	1
Nyquist (km/s)	$\pm 1.125$	$\pm 3.750$
Potencia Transmitida (MW)	2	2
Ciclo de Trabajo (%)	4.875	3.25
Número de Receptores	4	3
Receptores	Analógicos	Digitales
Fecha	19 de Noviembre 2002	23 de Noviembre 2005
Procesamiento	Automático	Manual

## Capítulo 5

### DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ECOS DE METEOROS

En este Capítulo detallamos la técnica que hemos implementado en el ROJ para detectar ecos de meteoros. Básicamente la técnica consiste de dos partes fundamentales: (1) pre-procesamiento y (2) post-procesamiento. Como se podrá notar más adelante, en la etapa de pre-procesamiento se ha incluido los procesos que demandan mayor tiempo de procesamiento. Mientras que en la etapa de post-procesamiento se ha agrupado los procesos que si bien son más rápidos, demandan un mayor cuidado y experimentación.

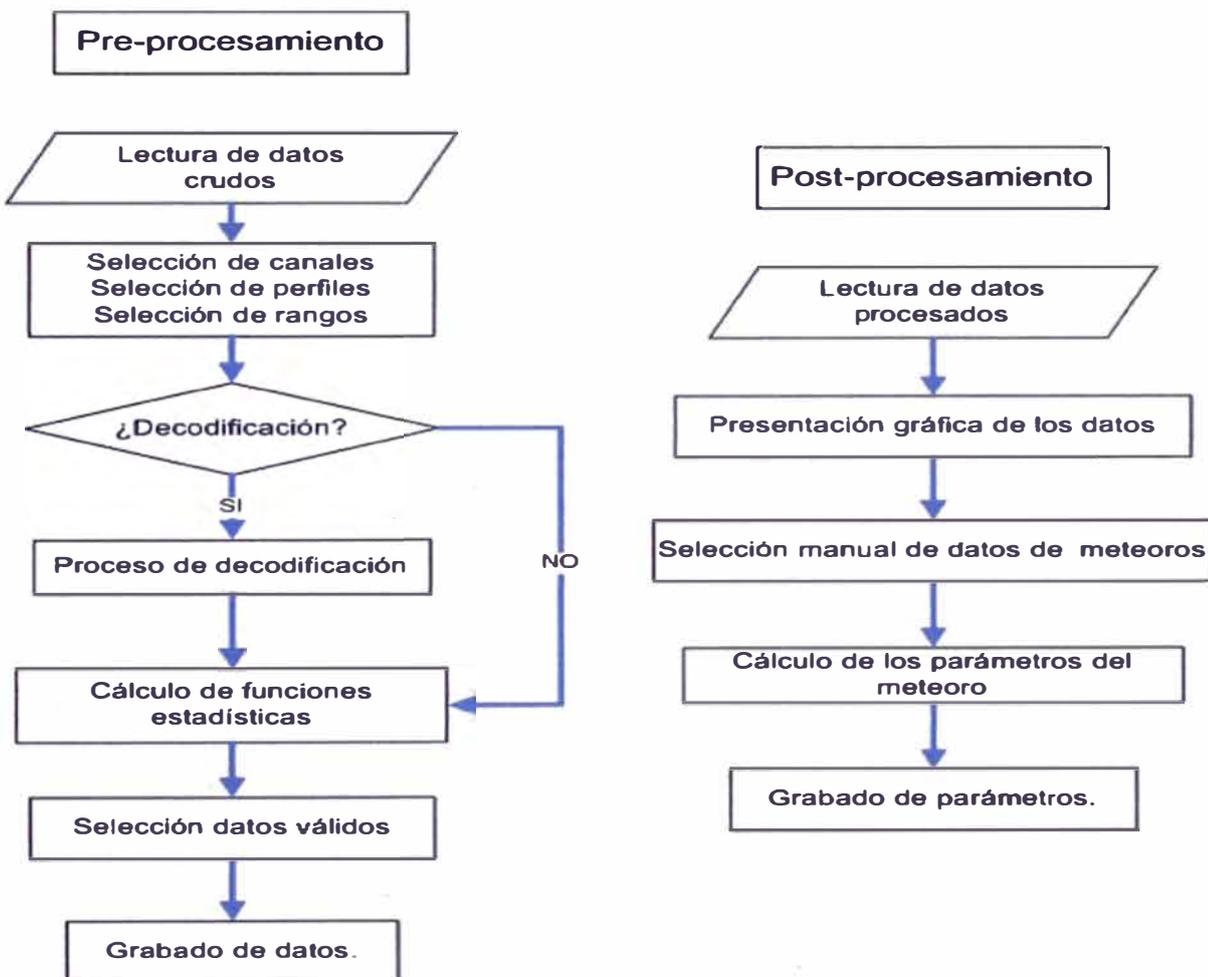


Figura 39 Diagrama simplificado del proceso realizado para la caracterización de los ecos de meteorito. Al lado izquierdo, la etapa de pre-procesamiento y al lado derecho, la etapa de post-procesamiento.

En la Figura 39 se muestran los esquemas para las dos etapas. La “Etapa de Pre-procesamiento” lee los datos crudos y prepara un conjunto de variables (datos procesados) para la caracterización del meteoro. La segunda etapa, utiliza los datos procesados y determina los parámetros del meteoro.

## 5.1 Etapa de pre-procesamiento

La etapa de pre-procesamiento está caracterizada por la manipulación de los datos crudos (voltajes complejos). A diferencia de los datos procesados (grabados para un determinado proceso), la gran ventaja de trabajar con datos crudos, es que permiten estudiar y/o probar nuevas técnicas y/o perfeccionar las existentes. Logrando optimizar el procesamiento de las señales estudiadas y/o permitiendo analizar nuevas técnicas para una mejor estimación de las variables a estudiar en un determinado experimento. Por esta razón el banco de datos de experimentos de meteoros del ROJ, están almacenados como datos crudos. La desventaja de los datos crudos respecto a los datos procesados es la cantidad de espacio que se requiere para almacenar la información en este formato. Esta desventaja se entiende fácilmente pues los datos crudos almacenan, no solamente ecos de meteoros sino además señales no deseadas (e.g., ruido, ecos del electrochorro ecuatorial, etc.). Más adelante presentaremos la relación entre el espacio utilizado por los datos crudos y los datos procesados y notaremos como la etapa de pre-procesamiento, permite reducir el espacio utilizado.

### 5.1.1 Selección de muestras

Si analizamos el diagrama de flujo para la etapa de pre-procesamiento mostrado en la Figura 39, observamos que luego de la lectura de los datos crudos se procede a la selección de las muestras ya sea por canales, perfiles y/o rangos. Cada selección se justifica en función a las características del experimento.

### **5.1.1.1 Selección de canales**

Si el experimento utiliza más canales de recepción que los necesarios, se escogen aquellos canales que interesan para el procesamiento. Un ejemplo se presenta cuando se utiliza los cuatro cuartos de la antena como receptores. En este caso se selecciona tres de los cuatro canales para procesar los datos. La razón de seleccionar tres canales será explicada en la sección 5.2.3. Otro ejemplo se presenta cuando se transmite con dos polarizaciones perpendiculares. Por ejemplo transmitiendo un pulso largo no codificado en una polarización y un pulso codificado en la otra, la información de una polarización es recibida con ciertos canales (e.g canales A, C y E), mientras que la información de la otra polarización se recibe con otros canales (e.g canales B, D y F). Por lo tanto, dependiendo del tipo de pulso que se desee procesar se escoge los canales respectivos, ya sea para procesar el pulso largo no codificado o el pulso largo codificado.

### **5.1.1.2 Selección de perfiles**

Al igual que la selección de canales. Una selección de los datos por perfiles, equivale a seleccionar los datos generados por el mismo tipo de pulso transmitido (o los pulsos que se desea trabajar) como es el caso de los experimentos en la que se transmiten secuencias de pulsos con diferentes anchos (experimentos híbridos). Estos experimentos son posibles gracias a los recientes avances tecnológicos en los sistemas de radar del ROJ. Por ejemplo la secuencia que hemos empleado ha sido: pulso corto, pulso largo codificado, pulso largo codificado y pulso corto. Como la recepción se realiza con los mismos canales, el procesamiento debe elegir que tipo de pulso procesará, por lo tanto debemos definir un parámetro de entrada que permita seleccionar los perfiles adecuados para el procesamiento.

### **5.1.1.3 Selección de rangos**

El rango para las investigaciones de ecos de meteoros oscila entre los 80 a 120 km de altura aproximadamente. Sin embargo en muchos casos el IPP utilizado para el

muestreo en rango permite estudiar rangos mayores al intervalo de investigación, e.g., cuando se quieren estudiar otros ecos. Por tal razón la selección en rangos permite utilizar la región de interés en un estudio cualquiera, en nuestro caso, el rango de investigación está centrado alrededor de los 100 km de altitud. Debido a que es justamente en esta región donde se detectan la mayor cantidad de meteoros.

### 5.1.2 Integración coherente en rango.

Preparar los datos crudos para su lectura no solamente implica las selecciones explicadas anteriormente, muchas veces es necesario realizar un filtro en altura o equivalentemente promediar en altura. Esto se realiza por ejemplo cuando el ancho de baudio transmitido es sobre-muestreado o mejor dicho muestreado con un ancho de muestreo ( $\Delta H$ ) que equivale a la mitad del baudio transmitido. Esto generaría un número de muestras igual al doble del número de baudios transmitidos, por lo que previo al procesamiento se promedia las dos muestras correspondientes a un baudio transmitido.

### 5.1.3 Cálculo de funciones estadísticas

Una vez que la información de los datos crudos es leída, se procede a calcular funciones estadísticas que caracterizan los ecos de meteoro en la etapa de post-procesamiento. Estas variables son la potencia, la función de auto-correlación y la función de correlación cruzada. En el caso de un pulso largo codificado se determina adicionalmente la velocidad Doppler obtenida del proceso de decodificación.

Las expresiones matemáticas para el cálculo de las funciones estadísticas son:

- Potencia:

$$P_i = \langle V_i(r,t)V_i^*(r,t) \rangle \quad (38)$$

$$i = 0 : n-1$$

- Correlación cruzada:

$$\rho_{i,j} = \langle V_i(r,t)V_j^*(r,t) \rangle \quad (39)$$

$$i, j = 0 : n-1$$

- Auto-correlación:

$$\rho_{i,i} = \langle V_i(r,t)V_i^*(r,t+\tau) \rangle \quad (41)$$

$$i = 0 : n-1$$

Donde.  $i, j$ : Índices de los diferentes canales de recepción utilizados.

$V_i$ : Voltaje complejo del canal  $i$  y decodificado si hubiera sido necesario.

$\tau$ : Tiempo de retraso, igual a un IPP.

$n$ : Número de canales.

$*$ : Conjugada compleja

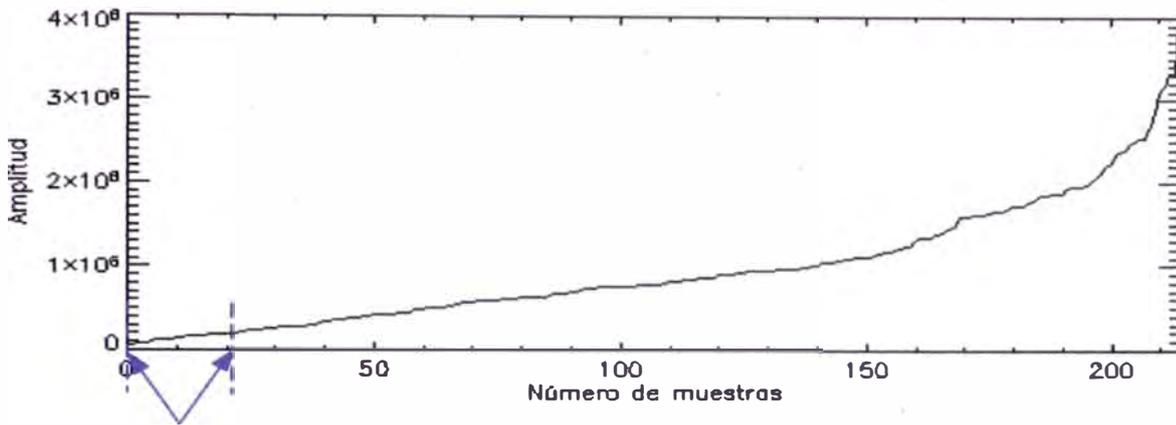
$\langle \rangle$ : Representa promediado en tiempo

La promediación en el tiempo es un parámetro que ingresa el usuario indicando el número de perfiles a integrar. En la mayoría de casos hemos utilizado entre dos y cuatro promediaciones. Si el usuario está interesado en estudiar los ecos de las colas de meteoros, se recomienda usar más puntos de promediación, puesto que estos ecos ocurren en un tiempo mayor.

#### 5.1.4 Selección de posibles meteoros

Para la selección de meteoros, hemos utilizado un criterio simple basado en el SNR. Para ello, es necesario estimar el ruido. A continuación describimos como se estima el ruido y el SNR y posteriormente, el criterio de selección de posibles meteoros.

1. Ordenar la potencia obtenida en forma creciente a su valor (ver Figura 40), de tal manera que la señal correspondiente al ruido se ubique en las primeras ubicaciones (baja potencia).



Región utilizada para calcular el nivel de ruido en la señal recibida

Figura 40 Cálculo del nivel de ruido. El gráfico muestra la potencia de la señal recibida en 215 muestras seleccionadas por el criterio de alturas.

2. Seleccionar un porcentaje de los datos de menor valor.
3. Calcular el nivel de ruido a partir de estos valores. Más detalles de este procedimiento se pueden ver en *Hildebrand y Sekhon [1974]*.

El valor del nivel del ruido nos permite definir la relación señal a ruido (SNR), lo cual permite discriminar, haciendo uso de un valor umbral o valor de corte, entre los ecos con posible señal de meteoro, de aquellos considerados como ruido. El valor umbral elegido para esta etapa es de 0 dB. El SNR se define en la ecuación (41):

$$SNR = 10 \times \log_{10} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n P_n}{n} - noise \right] \quad (41)$$

Donde  $\sum_{i=1}^n P_n / n$  representa el promedio de la potencia recibida en  $n$  canales utilizados,  $noise$  es el nivel de ruido determinado de esta potencia promedio. Es importante mencionar que el  $SNR$  se expresa en decibeles.

Este criterio de discriminar señales en función a un valor umbral, permite seleccionar aquellos ecos que probablemente sean ecos de meteoros, ecos de electrochorro ecuatorial o ecos no-especulares de meteoros. Por lo tanto esta selección permite discriminar entre la información válida y la señal producto del ruido, para luego

grabar solamente esta información válida. Este procedimiento permite ahorrar espacio de almacenamiento en comparación al espacio que ocupan los datos crudos. A continuación mostramos dos ejemplos donde comparamos el espacio utilizado para almacenar los datos crudos y los datos procesados para pulsos largos codificados.

Experimento: 22 y 23 de Noviembre del 2005

$$\frac{\text{datos\_crudos}}{\text{datos\_procesados}} = \frac{242.2Gb}{25.05GB} = 9.66$$

Experimento: 11 de Agosto del 2005

$$\frac{\text{datos\_crudos}}{\text{datos\_procesados}} = \frac{203.15GB}{20.1GB} = 10.1$$

Esto permite concluir que la etapa de pre-procesamiento, permite disminuir el espacio utilizado para almacenar los datos en una proporción de 10 a 1, en promedio.

## 5.2 Etapa de post-procesamiento

La etapa de post-procesamiento analiza las variables estadísticas relacionadas a cada meteoro. Esta relación meteoro-variables, se define utilizando la interfase gráfica diseñada para este trabajo de tesis. Esta interfase permite seleccionar los meteoros desde un grafico, para luego determinar sus parámetros.

### 5.2.1 Lectura y presentación gráfica de los posibles meteoros

Esta etapa define la selección del evento, lo cual permite manipular directamente los datos de cada evento seleccionado y determinar los parámetros del meteoro a partir de estos datos. Para lograr este objetivo utilizamos una interfase gráfica para usuarios, la cual permite la selección manual de los meteoros (ver Figura 41). Esta interfase esta dividida en dos ventanas principales. La del lado izquierdo muestra la gráfica de la información de un bloque de datos. Es en esta ventana donde se selecciona los

meteoros. La ventana del lado derecho permite previsualizar la región seleccionada. La interfase además permite observar algunas variables del proceso de selección, tal como las coordenadas del evento seleccionado y el número total de meteoros que han sido seleccionados del gráfico. Un problema presente en el procesamiento manual se debe a la presentación gráfica de los datos, en muchos casos el ecos del meteorito comienza en una ventana gráfica, continuando el eco en la siguiente ventana gráfica, por lo tanto la información de estas dos selecciones debe ser unificada antes de determinar los parámetros. La Figura 42 ilustra este problema.

Interfaz para la selección manual de los eventos de meteoros

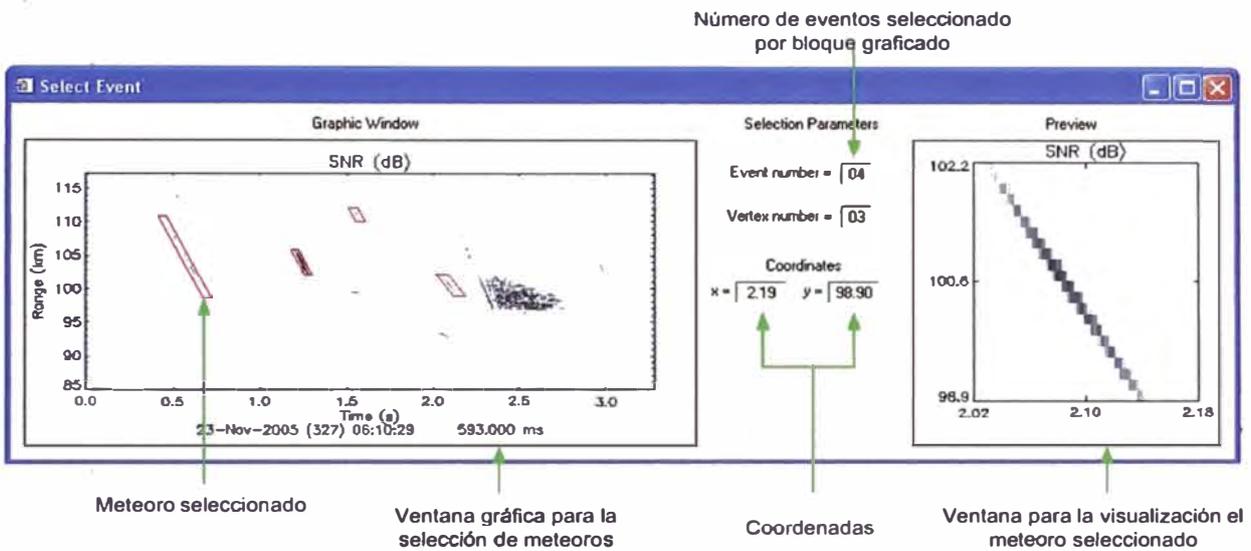


Figura 41 Interfase gráfica, que permite seleccionar los eventos de meteoros

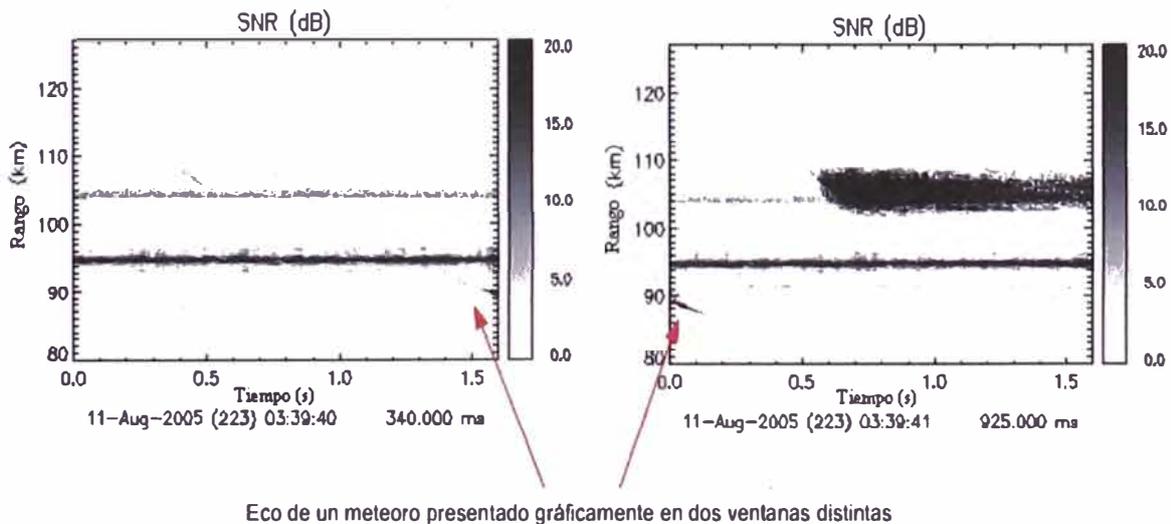


Figura 42 Eco de un meteorito presentado en dos ventanas gráficas distintas. Los datos deben ser primero unidos para luego procesarlos.

### 5.2.2 Selección manual de meteoros

Para la selección del meteoro a partir del gráfico, se utilizan herramientas GUI (*Graphical User Interface*) controladas con eventos de ratón. Un clickeo al botón izquierdo del ratón permite definir un vértice de la región (paralelogramo) a escoger. La rutina de selección sólo necesita 3 de los 4 vértices del paralelogramo (ver Figura 43), dos de los cuales necesariamente deben ser los extremos del paralelogramo, el cuarto vértice es calculado y entonces se define la región o máscara para la selección de los datos del meteoro escogido.

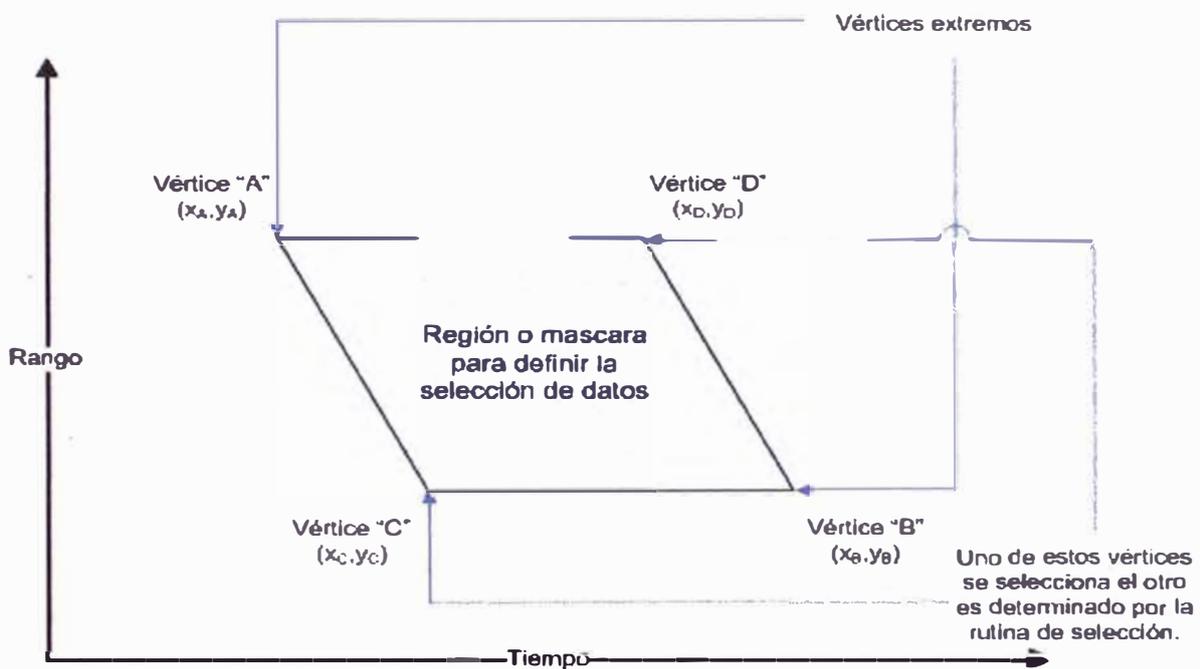


Figura 43 Esquema de la región seleccionada. Esta máscara permite enlazar la información de las funciones estadísticas con la ubicación del meteoro determinado por esta región.

Las siguientes ecuaciones definen el algoritmo para escoger los datos pertenecientes a la región seleccionada:

$$y \geq m_{AC}x + b_{AC}$$

$$y \leq m_{DB}x + b_{DB}$$

$$y \geq y_{\min}$$

$$y \leq y_{\max}$$

Donde  $m_{AC}$  : pendiente de la recta AC

$m_{DB}$  : pendiente de la recta DB y además  $m_{DB} = m_{AC} = m$

$$b_{AC} = (y_A - mx_A)$$

$$b_{DB} = (y_D - mx_D)$$

$$y_{\min} = y_C \wedge y_{\min} = y_B$$

$$y_{\max} = y_A \wedge y_{\max} = y_D$$

En nuestro caso la letra “y” representa el rango en el cual se encuentra el meteoro, y “x” el intervalo de tiempo del mismo.

Una vez seleccionado el meteoro, este se visualiza en la ventana de la derecha con el fin de verificar que se ha realizado una buena selección. En el caso de que la selección no sea buena, se hace clickeo al botón central del ratón, con lo cual la información no es almacenada, dándonos la posibilidad de volver a seleccionar los datos. Si hay más meteoros por seleccionar, esto se hace de manera continua, y cuando todos los posibles meteoros del gráfico han sido seleccionados. Se utiliza el botón derecho del ratón para indicar a la rutina que la selección ha finalizado y se debe empezar a calcular los parámetros de cada meteoro seleccionado.

La ventaja de la selección manual sobre del procesamiento automatizado realizado por *Chau y Woodman* (2004) en la selección de los meteoros son:

- La selección manual permite extraer meteoros en presencia de EEJ (ver Figura 44), a diferencia del proceso realizado por *Chau y Woodman* [2004], el cual eliminaba los datos si existía presencia de electrochorro ecuatorial. Por lo tanto la selección manual permite un incremento del número de meteoros caracterizados.
- La selección manual de meteoros permite extraer meteoros ubicados en intervalos de tiempo similares, y en diferentes rangos de altura (ver Figura 44). *Chau y Woodman* [2004] por otro lado, seleccionaban sólo un meteoro por

tiempo (mayor potencia), pero en muchos de los casos, las señales estudiadas presentan más de un eco de meteoro por tiempo. Al igual que el ítem anterior la selección manual ha permitido un incremento de la población de meteoros estudiada.

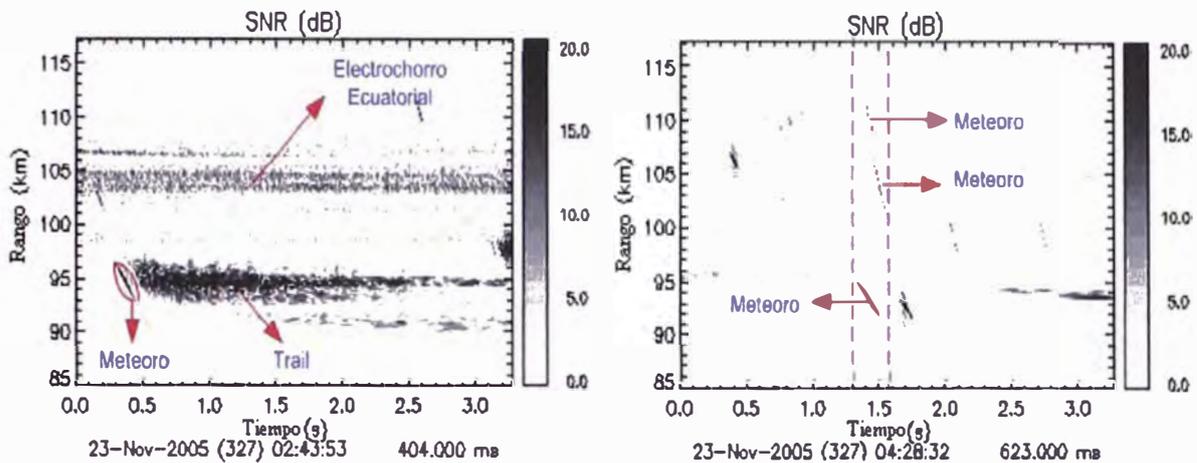


Figura 44 Gráfica del SNR. La figura de la izquierda muestra un eco de meteoro en presencia de electrochorro ecuatorial y ecos no-especulares. La figura de la derecha muestra tres meteoros para un intervalo de tiempo muy semejante.

Por otro lado, la gran desventaja del proceso manual es justamente ser manual, lo cual implica un tiempo de procesamiento grande (en promedio se detectan más de 20,000 meteoros por día) y depende bastante de la habilidad del operador a manipular los datos y por tanto añade una componente subjetiva no deseada de error.

### 5.2.3 Cálculo de los principales parámetros del meteoro:

Establecida la máscara o la región que contiene al meteoro, se seleccionan los datos correspondientes a este meteoro, en otras palabras se selecciona los valores de potencia, auto-correlación y correlación cruzada correspondientes al meteoro seleccionado.

De la potencia seleccionada se determina el SNR lo cual permite observar la presencia de ecos con mayor claridad. Estableciendo un valor crítico o umbral del SNR (al igual que en la etapa de pre-procesamiento), se permite seleccionar las señales que

probablemente fueron generados por ecos de meteoros. Este valor umbral para la etapa de post-procesamiento es de 5dB. Por encima de este valor los ecos serán considerados como válidos, y aquellos con valores menores a 5dB no serán considerados. Los valores válidos del SNR obtenidos corresponden a una matriz de datos de dos dimensiones, siendo requerido en los cálculos un arreglo lineal de datos. Por tal razón el algoritmo debe convertir el arreglo bidimensional en un arreglo lineal sin perder la información que permita caracterizar el meteorito. Para esto el algoritmo toma para un instante de tiempo aquella señal que presenta mayor SNR. Una vez seleccionado el máximo SNR por tiempo, se elimina aquellos valores que se encuentran fuera de la recta imaginaria que forman los datos. Las Figuras 45 y 46 ilustran este proceso.

En la Figura 45 observamos que después de haber transformado la información bidimensional (rombos color negro) a unidimensional (triángulos color rojo), existen ecos fuera de la recta imaginaria que forman los ecos. Este problema se presenta cuando la señal estudiada presenta no solo ecos de meteoros sino además existen ecos no-especulares de meteoros o ecos de Electrochorro. Para la Figura 45 la selección se realizó en presencia de ecos no-especulares cuyo SNR es comparable o mayor al SNR del eco del meteorito presente en la misma Figura, por tanto al seleccionar el mayor SNR por perfil de alturas, se estaría seleccionando un valor relacionado con la cola y no con el meteorito en sí. Es importante realizar una buena selección cuando se presenten estos casos, debido a que una mala selección, podría resultar en un mal estimado de los parámetros del meteorito, debido a que la señal seleccionada podría ser el resultado de una mezcla entre ecos del meteorito y ecos no especulares.

En la Figura 46 el criterio utilizado para eliminar los valores fuera de la recta imaginaria que forman los datos, es la distancia entre el valor obtenido del ajuste y el valor real, eliminando el de mayor diferencia, siempre y cuando presente un valor mayor al umbral establecido. Eliminado el valor “malo”, este proceso se repite hasta que los valores reales y del ajuste presenten una diferencia menor al valor umbral. Los valores obtenidos además sirven de máscara para transformar los valores de la función de auto-correlación y correlación cruzada escogidos mediante el proceso manual, en arreglos lineales (para la función de correlación cruzada, se transforma cada pareja de datos).

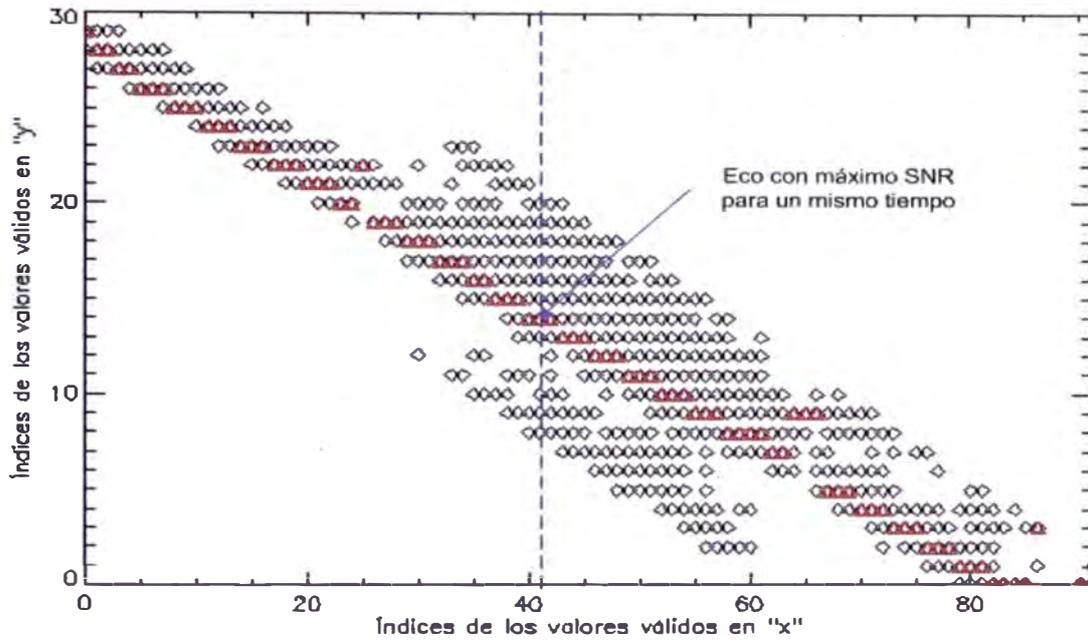


Figura 45 Criterio de selección para transformar el arreglo de datos de dos dimensiones a un arreglo lineal. Los rombos representan todos los valores validos para la región seleccionada y los triángulos color rojo, representan los valores de máxima potencia por tiempo (o por perfil).

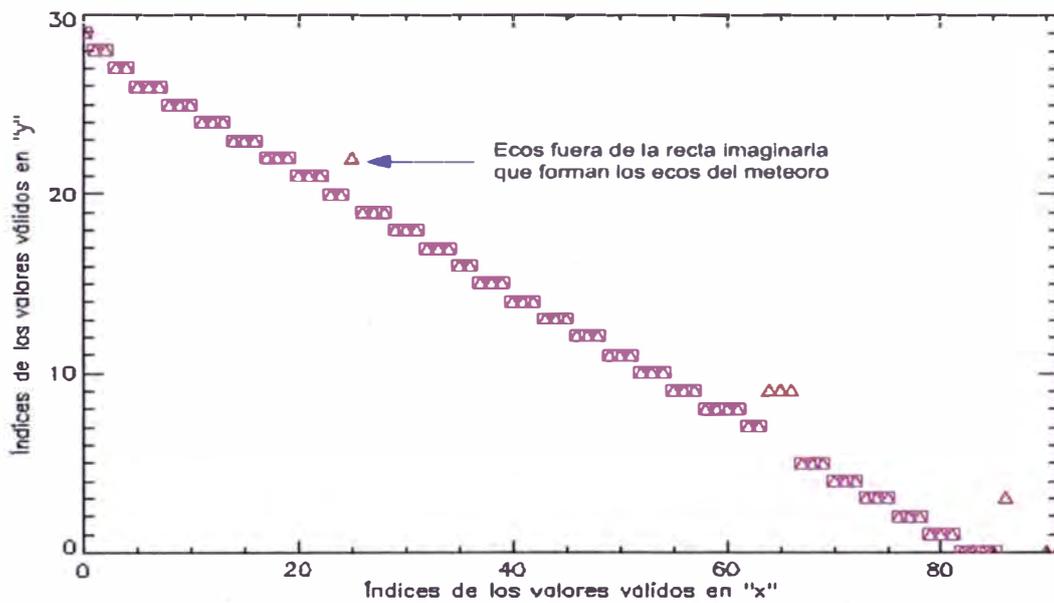


Figura 46 Criterio para eliminar aquellos valores fuera de la recta imaginaria que forman los ecos del meteoro en función del tiempo. Los triángulos corresponden a los valores de máxima potencia para cada instante de tiempo, y los cuadrados color rosado, representan los valores obtenidos luego de aplicar el criterio de limpieza.

Los datos obtenidos de las diferentes funciones estadísticas, luego del proceso de selección y ajuste lineal, permiten determinar de manera directa los siguientes parámetros:

- $R_0$  - Rango inicial de la trayectoria del meteoro (ver Figura 47). Esto corresponde al primer eco detectado para un meteoro.
- $\Delta R$  - Variación del rango del meteoro  $\Delta R$  en el intervalo detectado (ver Figura 47). Esto se determina como la diferencia del rango del eco final menos el rango del eco inicial.
- $\Delta t$  - Duración del evento de meteoro (ver Figura 47).
- $SNR$  - Relación señal a ruido. Estos valores son establecidos directamente de los datos seleccionados del SNR.
- Velocidad Radial ( $v_r$ ). La velocidad radial se determina de distintas maneras [e.g., *Chau y Woodman, 2004*; e.g., *Janches et al, 2000*], una de ellas es utilizando el gráfico del SNR (o RTI) y realizando un ajuste lineal (ver Figura 47, línea color azul) a los datos, donde la pendiente de la recta es la velocidad radial.

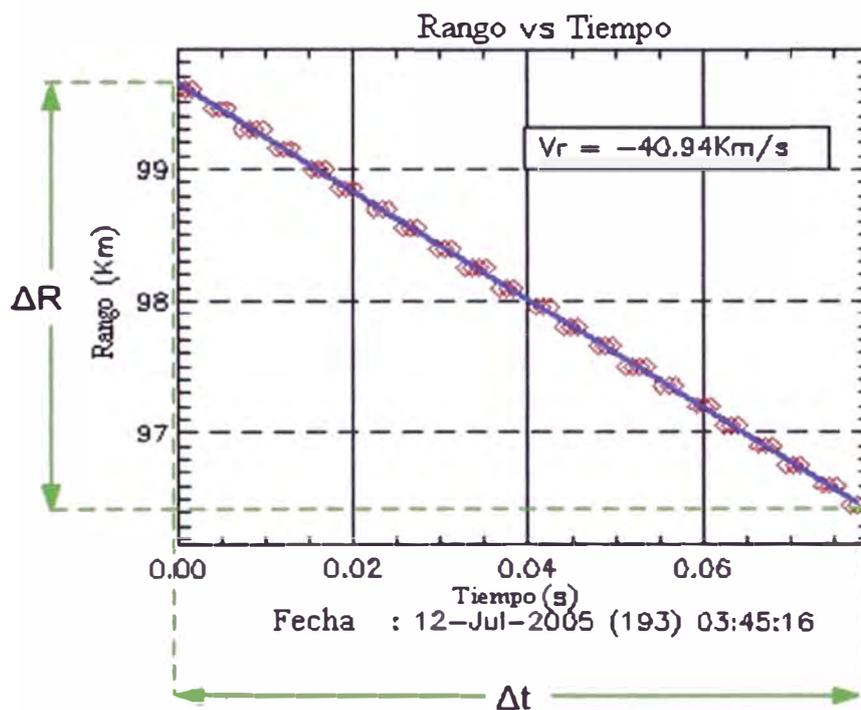


Figura 47 Cálculo de la velocidad radial a partir del ajuste lineal realizado al RTI.

El segundo método determina la velocidad radial utilizando la función de auto-correlación. A continuación explicamos la matemática de este método denominado técnica de pulso a pulso:

Definamos dos pulsos consecutivos (un IPP de diferencia en tiempo) recibidos por el mismo canal de recepción como (voltajes complejos ya decodificados):

$$v(t) = \exp(j(2\pi f_d t))$$

$$v(t + \tau) = \exp(j(2\pi f_d (t + \tau)))$$

Donde  $f_d$  Frecuencia Doppler de la señal recibida,  $\tau$  tiempo entre pulso y pulso (IPP) y  $t$  Tiempo de la señal.

De la ecuación (40), la auto-correlación la podemos escribir como:

$$acf = v(t) \times v^*(t + \tau)$$

Reemplazando  $v(t)$  y  $v(t + \tau)$  tenemos

$$acf = \exp(j(2\pi f_d t)) \times (\exp(j(2\pi f_d (t + \tau))))^*$$

$$acf = \exp(j(2\pi f_d t)) \times (\exp(-j(2\pi f_d (t + \tau))))$$

$$acf = \exp(j(2\pi f_d t - 2\pi f_d (t + \tau)))$$

$$acf = \exp(-j2\pi f_d \tau)$$

Sea  $\phi$  la fase de la auto-correlación, entonces:

$$\phi = -2\pi f_d \tau \quad (42)$$

Teniendo en cuenta que  $v_r = \frac{\lambda}{2} f_d$  obtenemos:

$$v_r = -\frac{\lambda}{4\pi\tau} \phi \quad (43)$$

La ecuación (43) permite determinar la velocidad del meteoro, una vez que se conoce la fase de la función de auto-correlación. Debido a que la fase determinada presenta la ambigüedad característica de las funciones trigonométricas, la velocidad

que determinamos con esta técnica es una velocidad ambigua. Si deseamos determinar la velocidad radial real del meteoro, tenemos que agregarle a la fase, una cantidad  $2\pi n$ , donde  $n$  es un número entero, y representa la cantidad de “vueltas” entre la velocidad determinada pulso a pulso y la velocidad real del meteoro. En nuestro caso podemos aproximar “ $n$ ”, comparando la velocidad radial obtenida del ajuste del Rango vs. Tiempo con la velocidad obtenida de la técnica pulso a pulso (ver Figura 48).

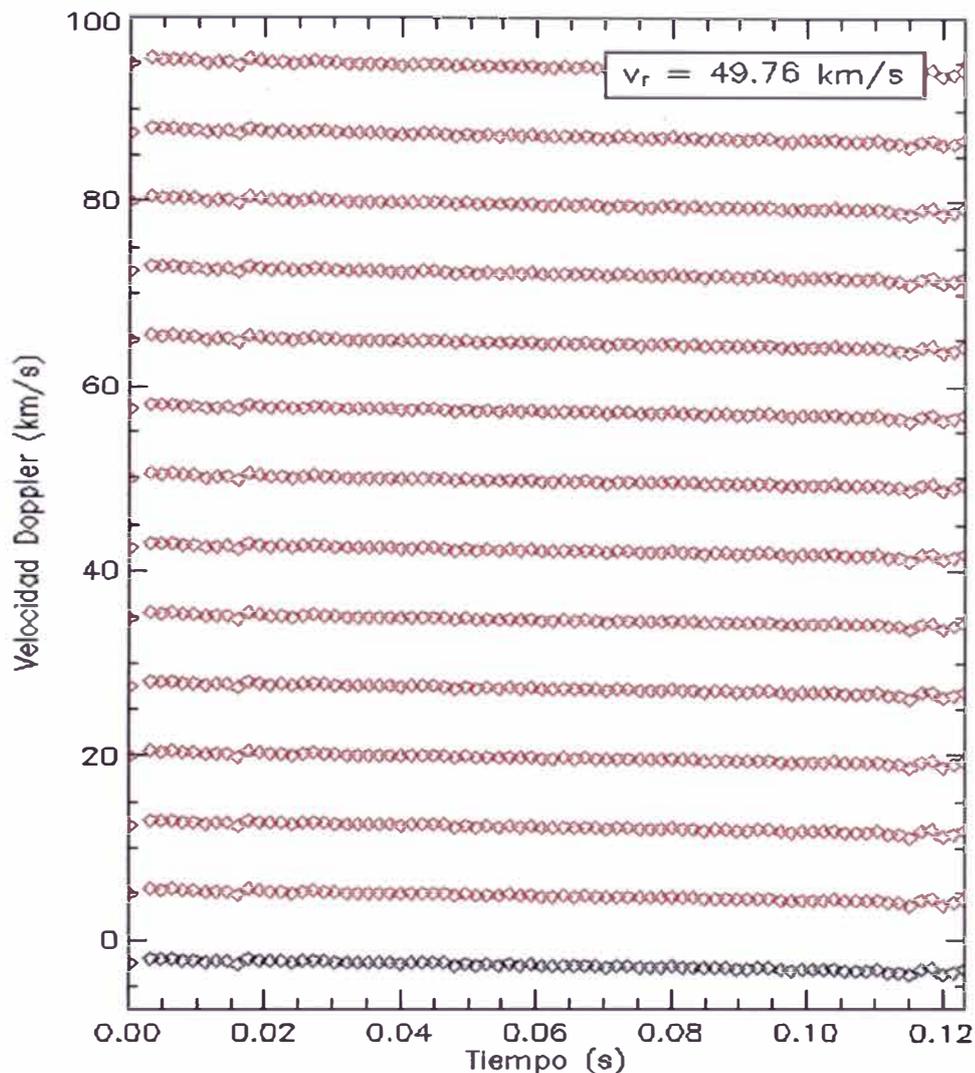


Figura 48 Distintos valores de la velocidad, luego de levantar la ambigüedad adicionando una cantidad  $2\pi n$ . Notemos que un valor se aproxima al valor obtenido del ajuste lineal. El color negro muestra la velocidad ambigua obtenida directamente de la fase de la auto-correlación y el color rojo muestra velocidades obtenidas para diferentes valores de “ $n$ ”.

Otro problema presente en el cálculo de la velocidad mediante la técnica pulso a pulso se presenta debido al salto de la fase o “enrollado de la fase” (ver Figura 49), al momento de determinar la fase de la función de auto-correlación. Si no se corrige esto, la velocidad determinada da un salto cuando la fase llega al valor de  $-\pi$ , luego del

salto la fase es  $\pi$ . La Figura 49 muestra el problema del “enrollado”, en el cálculo de la velocidad mediante la técnica pulso a pulso.

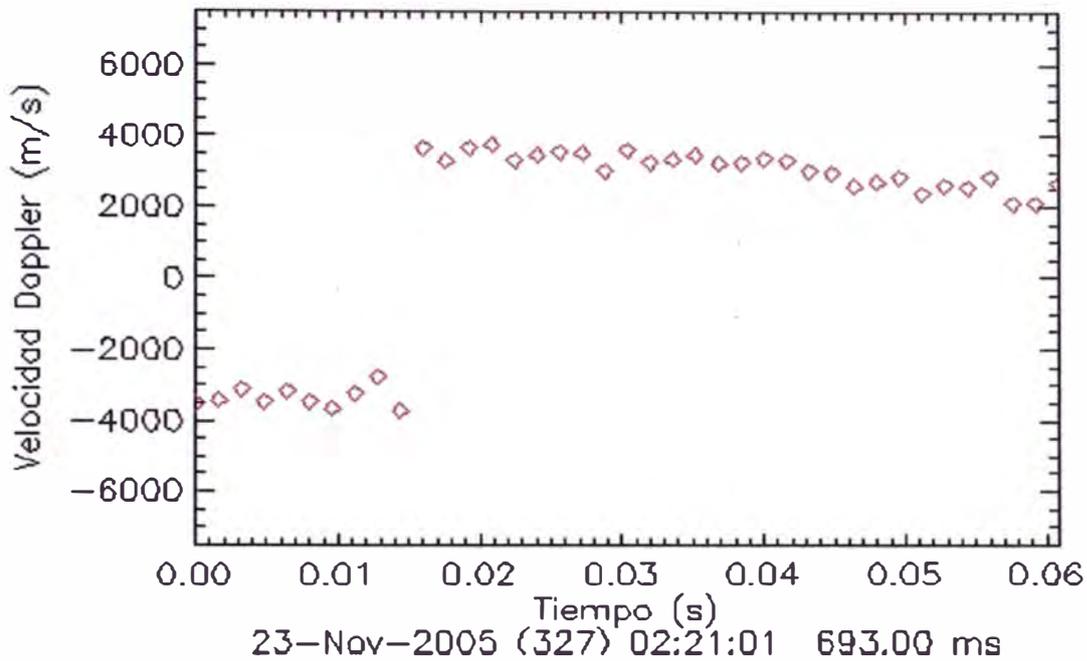


Figura 49 El enrollado o salto en fase (o velocidad) es un problema que se presenta en el cálculo de la velocidad del meteoro, debido a la periodicidad de las funciones trigonométricas.

Para eliminar el problema de enrollado se hace un “desenrollado” donde consideramos la diferencia de fase entre dos autocorrelaciones consecutivas, lo cual se puede interpretar matemáticamente como:

$$\Delta\phi = \text{Fase}(acf(t) \times acf^*(t + \tau)) \quad (44)$$

Una vez determinada la diferencia, se considera el primer valor de la fase de la auto-correlación como válido, y se determina los demás valores mediante la siguiente relación:

$$\phi_{n+1} = \phi_n + \Delta\phi_n \quad (45)$$

La Figura 50 muestra la velocidad Doppler estimada mediante la técnica pulso a pulso, luego de haber eliminado el problema de enrollado en la fase.

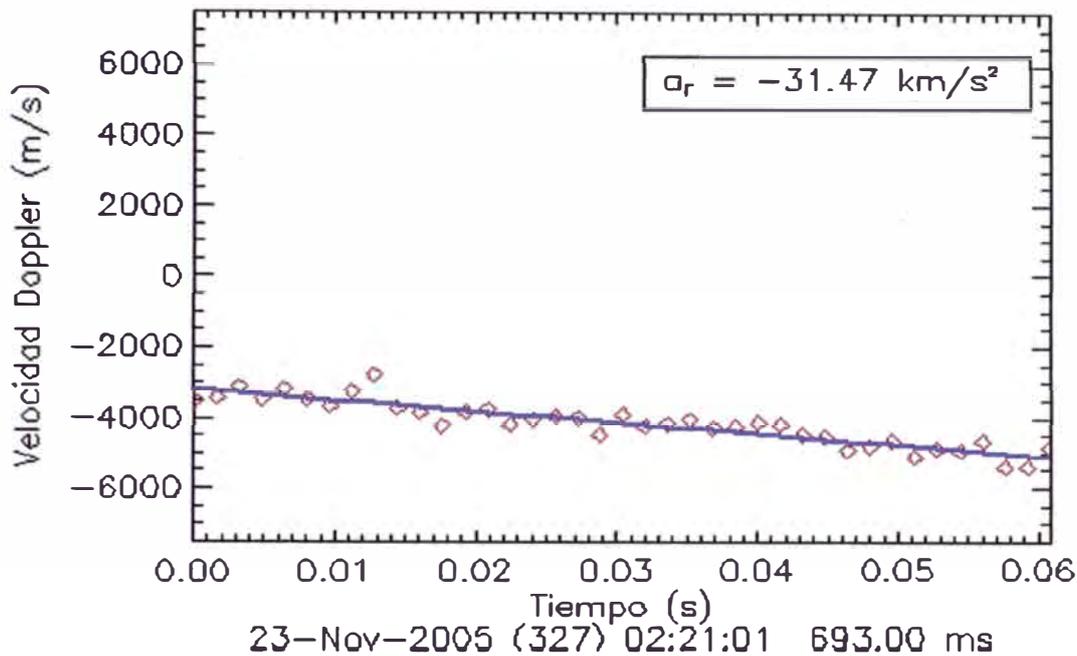


Figura 50 Cálculo de la velocidad radial mediante la técnica pulso a pulso después de haber eliminado el problema de enrollado.

- **Aceleración Radial ( $a_r$ ).** La aceleración radial se obtiene realizando un ajuste lineal a la velocidad obtenida de la técnica pulso a pulso (ver Figura 50), es decir la pendiente de la recta en azul.
- **Acimut ( $\phi$ ) y Cobertura angular promedio ( $\Delta\alpha$ ).** El acimut y la cobertura angular promedio, se determina a partir de la fase de la correlación cruzada entre los diferentes canales de recepción utilizados en el experimento. La fase de la correlación entre pares permite determinar la dirección (u orientación) del movimiento del meteoro respecto al plano del radar, usando el concepto de interferometría entre pares de antenas receptoras [e.g., Farley *et al.*, 1981]. La Figura 51 muestra la distribución de las antenas utilizadas en el experimento realizado en la noche del 22 de Noviembre y la madrugada del 23 de Noviembre del 2005, como parte de las campañas que se realizaron a nivel mundial para el estudio de la lluvia de meteoros conocido con el nombre de Leónidas (o del nombre en ingles “Leonids”).

Las letras N, W, E y S, representan la dirección del norte, oeste, este y sur geográfico respectivamente para el plano del radar. Las letras A, B y C son las distintas

antenas receptoras utilizadas en este experimentos, notemos que sólo se utilizan tres de lo cuatro cuartos de la antena para la recepción de ecos, la razón de esto se menciona más adelante. El plano “x-y” definido en el plano del radar, es el sistema de coordenadas establecido para definir la trayectoria del meteoro en el haz de energía del radar (o en el plano del radar).

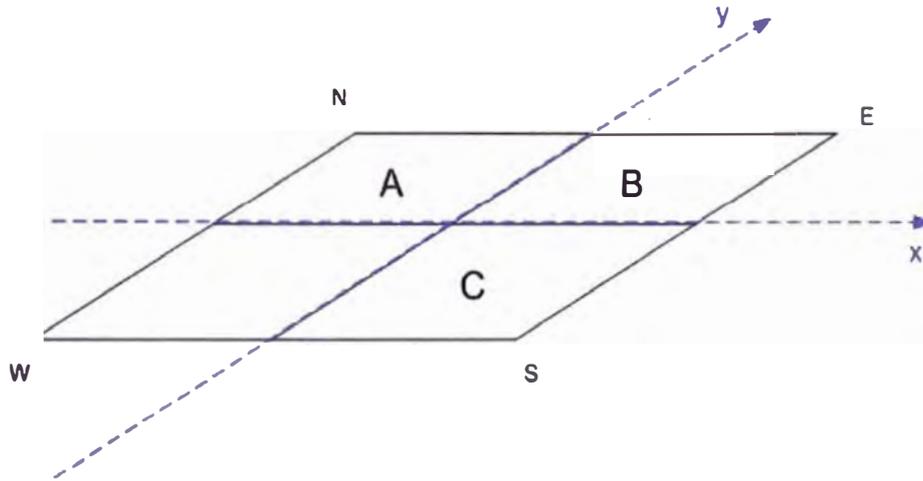


Figura 51 Distribución de antenas utilizadas para el experimento realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005.

La ecuación para determinar la ubicación angular de un meteoro haciendo uso de dos antenas, es:

$$\theta = \sin^{-1}\left(-\frac{\lambda}{2\pi d_{12}} \vartheta\right) \quad (46)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que forma la señal con la vertical,  $d_{12}$  es la distancia de separación de las antenas,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal y  $\vartheta$  es la diferencia de fase entre las señales recibidas por las antenas 1 y 2. Detalles del desarrollo Físico-Matemático del concepto de interferometría para determinar la ubicación del meteoro con dos antenas son presentados en el apéndice A.

La ecuación (46) permite definir la posición angular de un meteoro en una dirección, mediante un par de antenas receptoras, y la fase de la función de correlación

cruzada entre estas antenas. Si tomáramos a continuación una par de antenas cuya dirección sea perpendicular al par anterior (o si tomáramos solamente una antena que sea perpendicular a una de la antenas anteriores, formando un par con cualquiera de las anteriores), definiríamos la ubicación angular del eco del meteoro respecto a esta dirección, por lo que ambas direcciones permitirían determinar la ubicación del meteoro en el plano del radar. Es por esta razón que la distribución de antenas utilizada para el experimento de los días 22 y 23 de Noviembre del 2005, requirió solo 3 de los 4 cuartos de la antena de Jicamarca (ver Figura 51). En general se puede tomar tres antenas no colineales, pero el trabajar con 3 antenas que formen un diagrama similar al de la Figura 51 permite interpretar de manera más sencilla los resultados.

Para el experimento realizado los días 22 y 23 de Noviembre y la distribución de antena mostrada en la Figura 51, se toma como eje “x” la dirección de la recta entre la antenas A y B, siendo el eje positivo en el sentido de A hacia B, de la misma forma el eje “y” queda definido mediante la dirección de la recta entre las antenas B y C, definiendo la dirección positiva de este eje el sentido de B hacia C. El origen de este sistema de coordenadas es el centro de la antena.

Una dificultad para determinar la dirección del meteoro, se presenta en el cálculo de la fase de la correlación cruzada, al igual que en el cálculo de la fase la auto-correlación, la fase de la correlación cruzada presentaba en muchos casos el salto característico en la fase de funciones sinusoidales (o problema del enrollado) producto de su periodicidad. La Figura 52 muestra este problema en el cálculo de la dirección del meteoro.

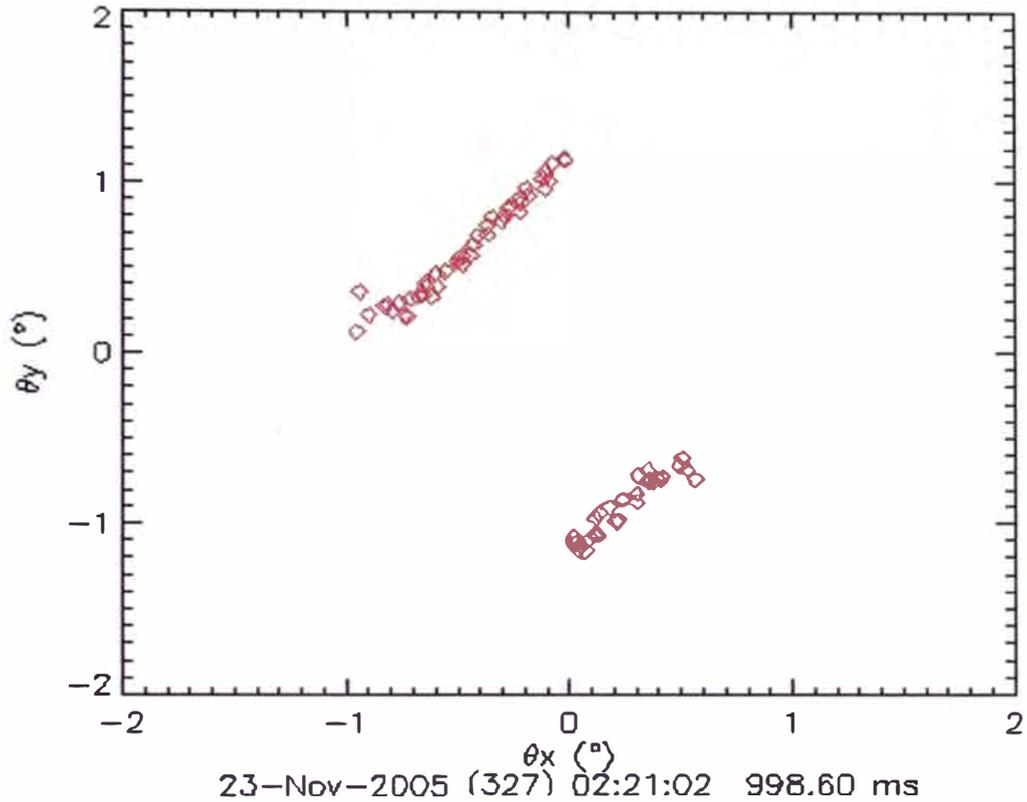


Figura 52 Salto o “enrollado” hallado en el cálculo de la dirección del meteoro, este problema se debe a que la fase calculada de la correlación, presenta un salto debido a la periodicidad de las funciones sinusoidales inversas.

Al igual que en el cálculo de la velocidad Doppler mediante la técnica pulso a pulso, este problema se resuelve con la misma idea, es decir consideramos válida la primera fase encontrada y determinamos la siguiente (segunda fase), aumentando a la primera fase, la diferencia de fase entre el segundo y el primero, para el tercero realizamos lo mismo pero la diferencia de fase es determinada entre el segundo y el tercero y así sucesivamente. Una vez levantada la ambigüedad, obtenemos la orientación del meteoro en el plano del radar. La Figura 53 muestra un ejemplo de la trayectoria de un meteoro luego de eliminar la ambigüedad.

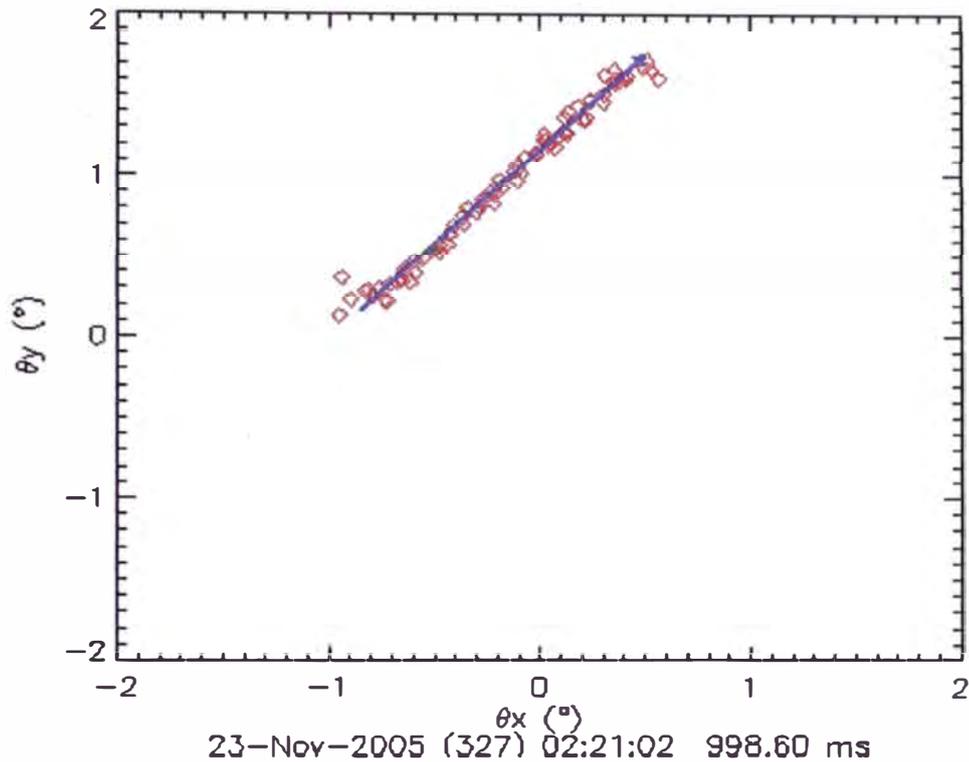


Figura 53 Orientación determinada para un meteoro a partir de la fase de la función de correlación cruzada entre antenas, luego haber corregido el problema del salto.

De la dirección del meteoro, el acimut se determina realizando un ajuste lineal a estos datos, siendo la pendiente la variable que se relaciona con el acimut mediante la siguiente ecuación.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta\theta_y}{\Delta\theta_x}\right) \quad (47)$$

Donde  $\Delta\theta_x$  y  $\Delta\theta_y$  son las variaciones angulares del meteoro en las direcciones “x” e “y” y cuya pendiente define el acimut  $\phi$ .

Otro factor importante que se determina, es la cobertura angular promedio ( $\Delta\alpha$ ), o equivalentemente el ángulo barrido por el meteoro desde su primer eco detectado hasta el último. De la Figura 53 la flecha color azul es un estimado de la cobertura angular promedio. La Figura 54 ilustra la geometría de la trayectoria de un

meteoro, de aquí notamos que un estimado de la cobertura angular es igual a  $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha_1$ , los  $\alpha_0$  y  $\alpha_1$  son definidos en del gráfico.

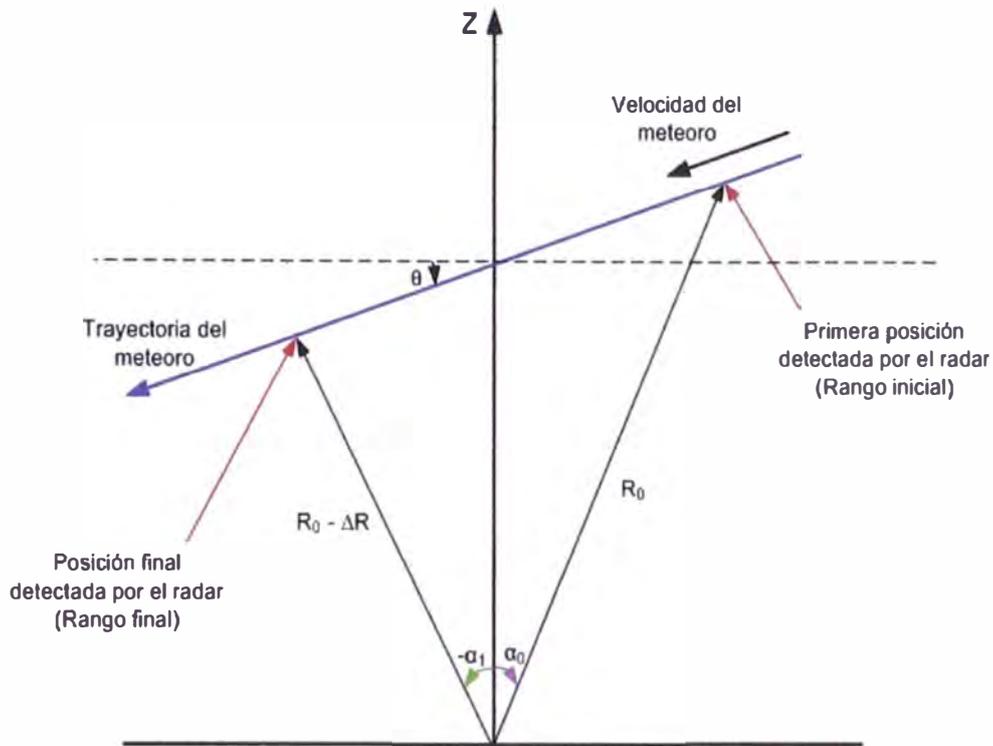


Figura 54 Esquema geométrico utilizado para representar la trayectoria del meteoro en el haz transmitido por el radar.

La ubicación del meteoro en un plano “x-y”, también permite determinar la cobertura angular promedio usando la siguiente relación:

$$\Delta\alpha = \sqrt{(\theta_{xf} - \theta_{xi})^2 + (\theta_{yf} - \theta_{yi})^2} \quad (48)$$

Donde  $\theta_{xf}, \theta_{xi}$  corresponden a los ángulos inicial y final respecto a la dirección en el eje “x”, y  $\theta_{yf}, \theta_{yi}$  corresponden a los ángulos inicial y final respecto a la dirección en el eje “y”.

A los parámetros anteriores determinados directamente de la potencia, auto-correlación y correlación cruzada anteriormente, debemos agregar tres parámetros más,

derivados de la geometría de la trayectoria del meteoro (ver Figura 54). El primer parámetro es el ángulo de elevación ( $\theta$ ) de la trayectoria del meteoro (Observar Figura 54). Es importante mencionar que este ángulo se define entre la trayectoria del meteoro y la paralela a la horizontal que pasa por Jicamarca. Los otros dos parámetros son la velocidad absoluta ( $v_{ABS}$ ), y la aceleración absoluta ( $a_{ABS}$ ) del meteoro. Las ecuaciones (49), (50) y (51) definen estos parámetros:

- Angulo de elevación:

$$\theta \approx \tan^{-1}\left(\frac{\Delta R}{R_0 \Delta \alpha}\right) \quad (49)$$

- Velocidad Absoluta:

$$v_{ABS} \approx \frac{v_r}{\sin \theta} \quad (50)$$

- Desaceleración Absoluta:

$$a_{ABS} \approx a_r + \frac{v_{abs} \Delta \alpha \cos \theta}{\Delta t} \quad (51)$$

Detalles del cálculo de los parámetros del meteoro derivados de la geometría de la trayectoria del meteoro dentro del haz del radar son presentados en el apéndice B.

Las Figuras 55, 56, 57 y 58 presentan gráficos, que muestran los parámetros del meteoro obtenidos a partir de la técnica explicada anteriormente. La figura (a) muestra un diagrama de rango vs. tiempo, (b) muestra la orientación del meteoro respecto al plano del radar y (c) muestra la velocidad obtenida de la técnica pulso a pulso, esta Figura además muestra el SNR para el meteoro analizado (su escala esta ubicada al lado derecho). En el primer panel se muestra el diagrama de rango versus tiempo. Además se presentan el valor de la velocidad radial ( $v_r$ ) obtenida mediante el ajuste lineal, velocidad absoluta ( $|v|$ ) y velocidad radial ( $v_{p2p}$ ) obtenida mediante la técnica de pulso

a pulso, después de haber agregado  $2\pi N$  a la fase de la ACF. La línea color verde representa el ajuste realizado. El segundo panel muestra el movimiento del meteoro sobre el patrón de radiación teórico de transmisión/recepción, los colores relacionan la ubicación del meteoro con el valor del SNR. El gráfico mostrado de fondo representa el patrón de radiación de la antena. La flecha color verde nos indica la dirección de movimiento. En la parte superior se muestra el valor de la cobertura angular ( $\Delta\alpha$ ) El ultimo panel presenta el grafico de la velocidad obtenida mediante la técnica pulso a pulso. La línea color verde representa el ajuste realizado a la velocidad. El valor del SNR se muestra de color naranja y el grafico superpuesto de color verde representa el patrón de radiación teórico de acuerdo a la trayectoria del meteoro. En la parte superior se muestra el valor de la aceleración radial ( $a_r$ ) y aceleración absoluta ( $|a|$ ).

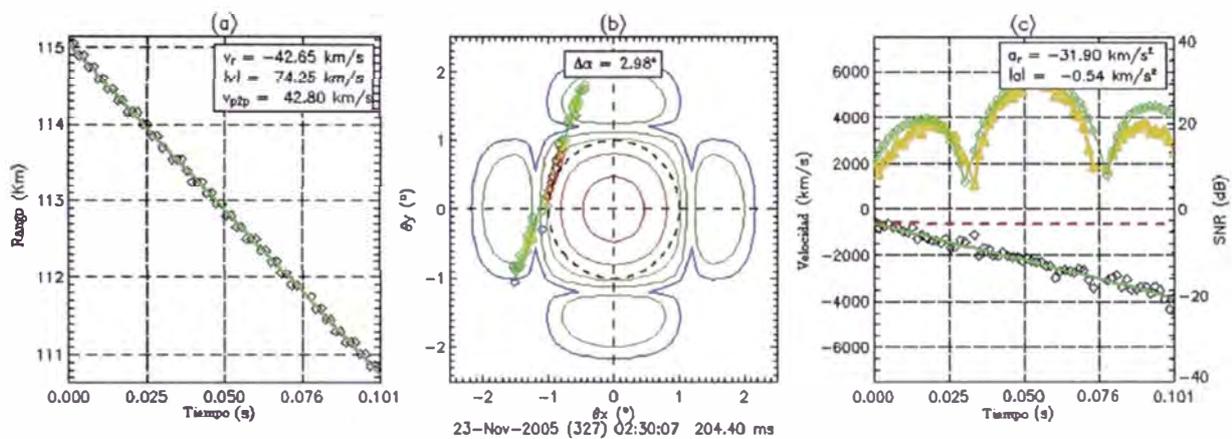


Figura 55 Parámetros del meteoro. La gráfica de la izquierda muestra el RTI del meteoro, el gráfico central muestra la dirección del meteoro respecto al plano del radar y la figura de la derecha muestra el SNR y la velocidad Doppler (determinada de la técnica pulso a pulso).

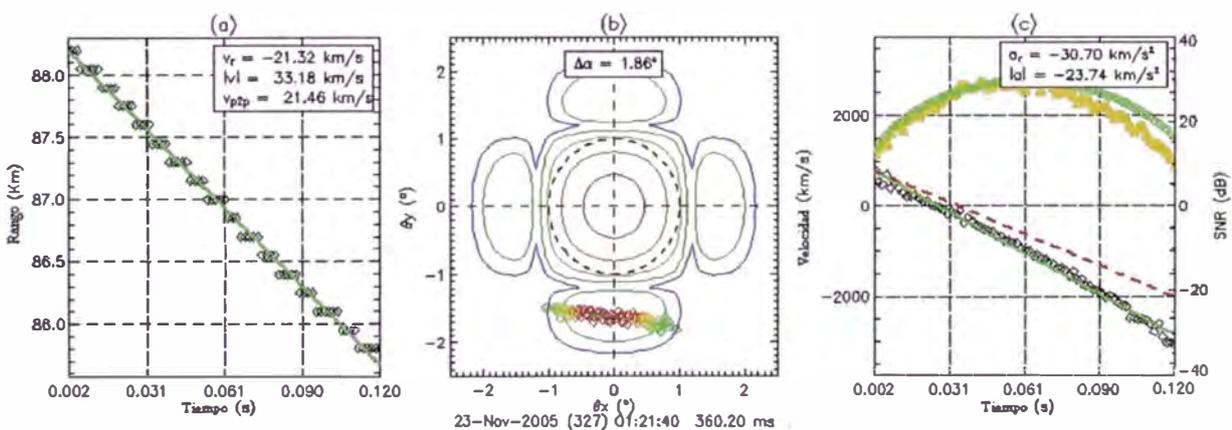


Figura 56 Caracterización de meteoros. Determinación de los parámetros del meteoro para un caso en el cual la desaceleración es significativa.

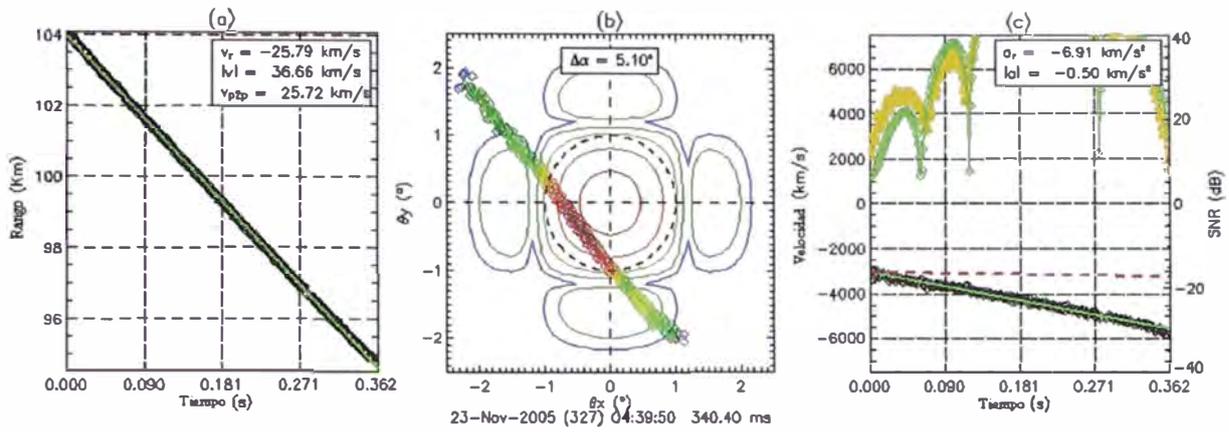


Figura 57 Caracterización de meteoros. Determinación de los parámetros del meteorito para un caso en el cual la desaceleración es aproximadamente cero

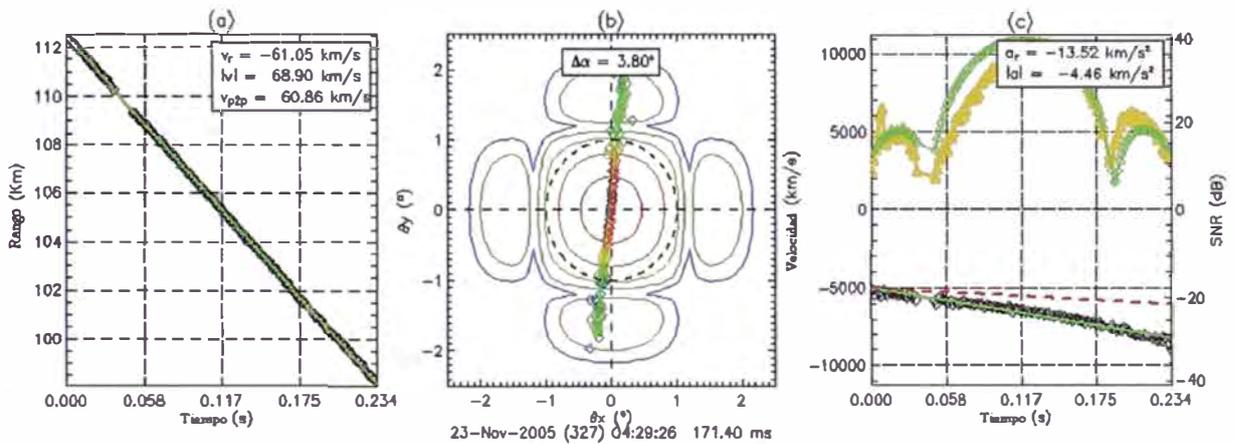


Figura 58 Caracterización de meteoros. Determinación de los parámetros del meteorito para un caso en el cual no se presenta desaceleración constante.

Determinado los parámetros del meteorito, estos valores se almacenan, para la posterior caracterización (estadística) de la población de meteoros que ingresan sobre la atmósfera de Jicamarca. El algoritmo de post-procesamiento almacena además la información de cada meteorito (potencia, auto-correlación, correlación cruzada, entre otras variables) evitando de esta manera tener que seleccionar nuevamente y permitiendo reanalizar cada uno de los meteoros si fuese necesario.

## Capítulo 6

# REMOCIÓN DE LOS ECOS DEL ELECTROCHORRO ECUATORIAL

Un punto importante dentro de los algoritmos desarrollados para el procesamiento de datos de meteoros, es definir una técnica para discriminar los ecos del EEJ. Esta técnica permitiría desarrollar un algoritmo robusto para una caracterización automática de los ecos de meteoros. Como mencionamos en capítulos anteriores, la selección manual permite esquivar la presencia del EEJ, extrayendo aquellos meteoros que se encuentran en rangos distintos al rango del EEJ. Sin embargo este proceso tiene los siguientes problemas: el tiempo empleado es excesivo, y la habilidad del operador para la selección de meteoros agrega una componente subjetiva de error. Por lo tanto plantear y definir una idea que permita discriminar el EEJ, fue parte importante del presente trabajo de tesis. Para este fin se analizaron tres técnicas, las cuales son descritas a continuación.

### 6.1 Remoción de EEJ utilizando la Coherencia y velocidad Doppler.

Esta técnica utiliza las características del eco del EEJ para discriminarlo, coherencia entre los canales de recepción y velocidad Doppler. Siendo el valor de la velocidad Doppler del EEJ la variable más importante, debido a que oscila entre -600 m/s y 600 m/s [e.g., *Farley*, 1985]. Mientras que la velocidad del meteoro presenta valores comúnmente en un rango de mayor valor. La Figura 59 ilustra esta idea. En los primeros 5 paneles se muestran los parámetros estándares como en anteriores gráficos. En el último panel se muestra la diferencia de fase del par BC, pero sólo de los meteoros identificados con este procedimiento. Notemos de la Figura 59, que a pesar de tener buena coherencia en los diferentes canales de recepción utilizados, tanto para los ecos de meteoros, ecos de EEJ y ecos no-especulares, la velocidad Doppler que caracteriza a

cada uno es bien definida (observar la escala de colores). En la Figura 59 hemos utilizado la siguiente relación para obtener ecos de meteoro solamente.

$$\begin{aligned}coh_{AB} &> 0.6 \\coh_{BC} &> 0.6 \\|v_{Doppler}| &> 500m/s\end{aligned}$$

El problema de este procedimiento, se debe al valor ambiguo de la velocidad Doppler obtenida de la técnica pulso a pulso, cuyo intervalo de posibles valores de velocidad está limitado por la velocidad Nyquist. Por esta razón, en muchos casos la velocidad ambigua del meteoro obtenida mediante al técnica pulso a pulso, se encuentra en el intervalo de la velocidad del EEJ, por lo tanto al discriminar estos valores, discriminaremos también parte de la información del meteoro. Si comparamos el número de meteoros identificados y seleccionados mediante el método manual, con el número de meteoros que se identificaría utilizando esta técnica, obtendríamos una población de aproximadamente el 90% de la población total observada directamente del gráfico del SNR. El procesamiento manual utilizó este criterio de remoción para facilitar la detección de los meteoros. Esto consistió en dibujar dos capas, la primera capa, en escala de grises contenía toda la información (e.g., meteoro, EEJ y ecos no especulares), mientras que una segunda capa en amarillo permitía detectar de manera sencilla los meteoros. Las Figuras 60 y 61 muestran dos ejemplos, de esta ayuda para detectar meteoros.

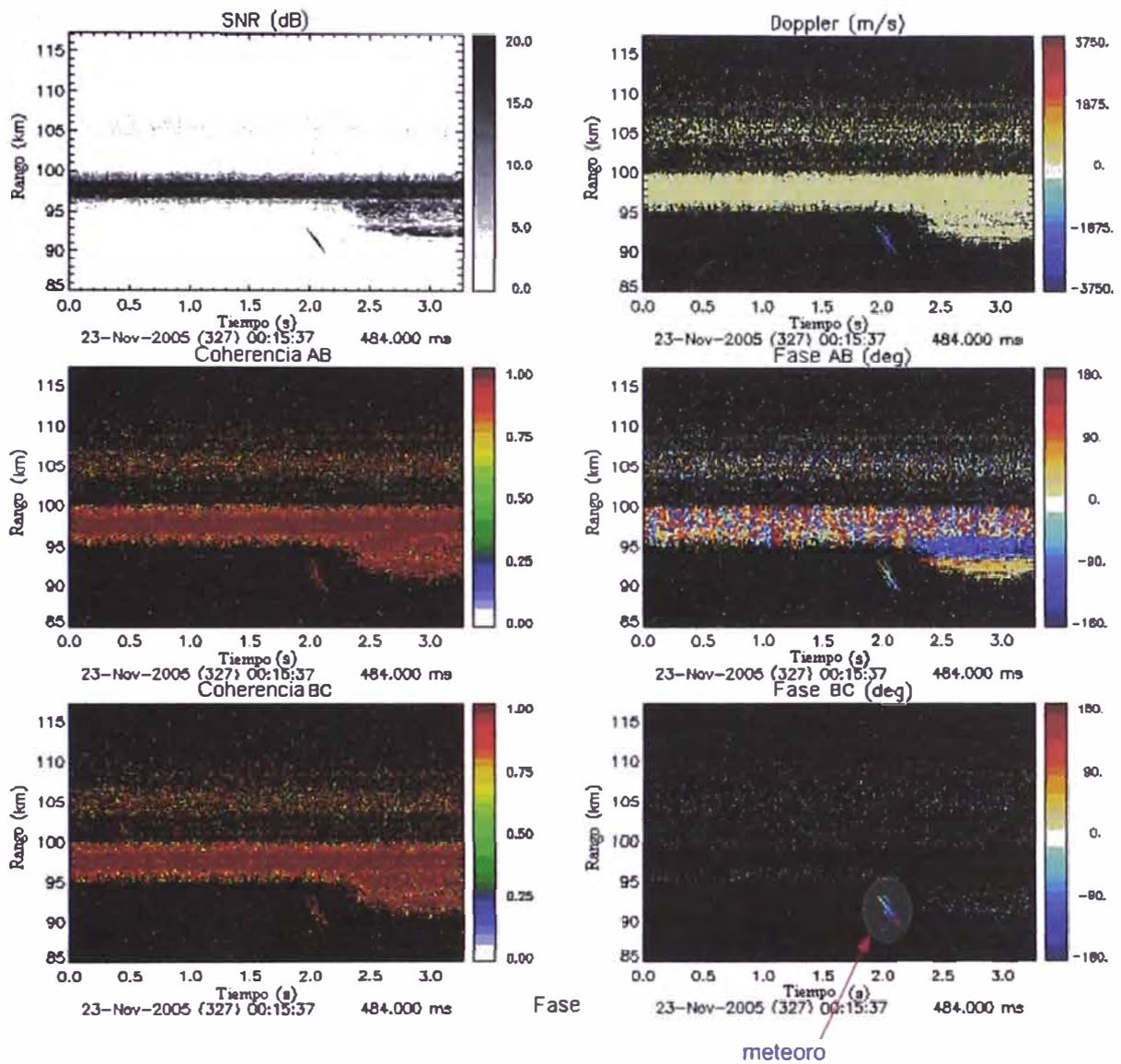


Figura 59 Discriminación entre los ecos de meteoros y ecos del EEJ. Para esto se define valores umbrales para la coherencia y la velocidad Doppler. Las diferentes escalas mostradas relacionan el valor de la variable con un determinado color.

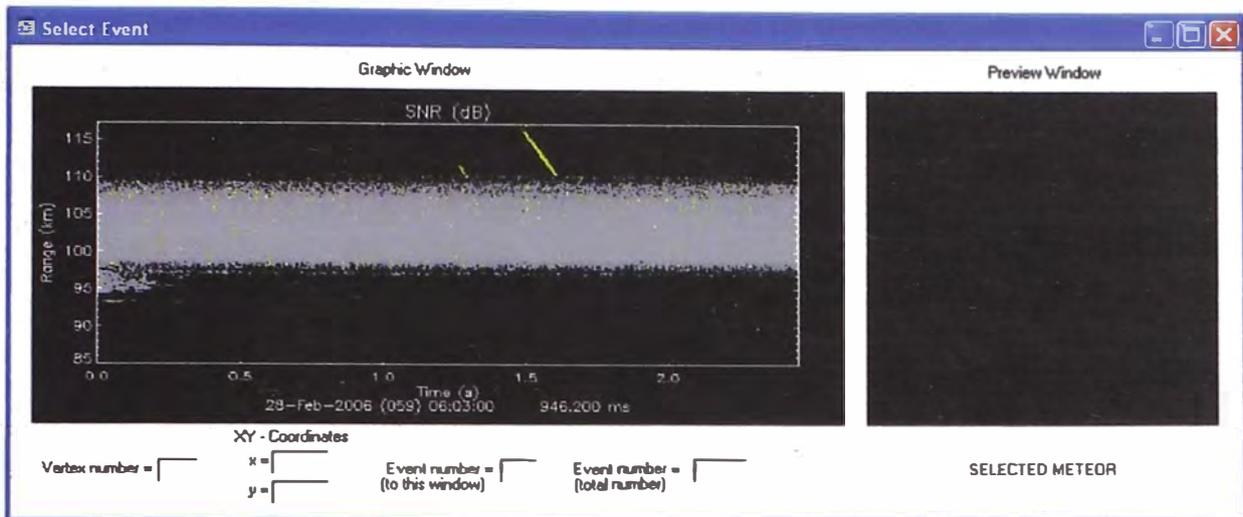


Figura 60 Aplicación del criterio para remover EEJ utilizando el Doppler y la coherencia. La escala de grises presenta todos los ecos detectados. La segunda capa (color amarillo) muestra solo ecos de meteoro. Notemos como el eco del meteoro queda bien definido, mientras que el EEJ y los ecos no especulares son removidos en su totalidad.

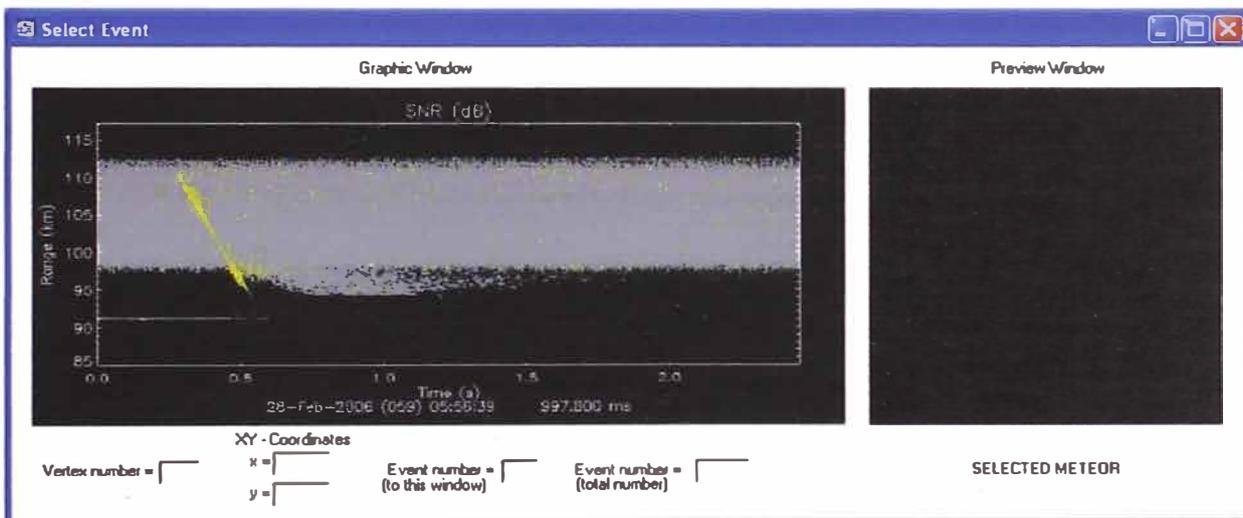


Figura 61 Al igual que en la Figura 60 las dos capas permiten distinguir entre ecos de meteoros y ecos de EEJ. Notemos que las características del meteoro, se mantienen constantes, a pesar del EEJ presente.

## 6.2 Filtrado de componentes DC

El segunda técnica analizada para discriminar los ecos de EEJ, aprovecha las características temporales del EEJ, las cuales se mantienen casi constante en el tiempo de IPP a IPP debido a su tiempo de correlación relativamente largo respecto a los IPP

típicos utilizados, sobretodo cuando estos son cortos, o mejor dicho el eco recibido del EEJ, es una función casi constante en el tiempo (o para dos pulsos transmitidos consecutivamente). Por otro lado las señales de los ecos de meteoros varían rápidamente en el tiempo. Si restamos la información de dos pulsos consecutivos gran parte de la señal del EEJ se eliminaría, obteniéndose solamente los ecos de meteoros. La Figuras 62, 63, 64 y 65 ilustran este proceso.

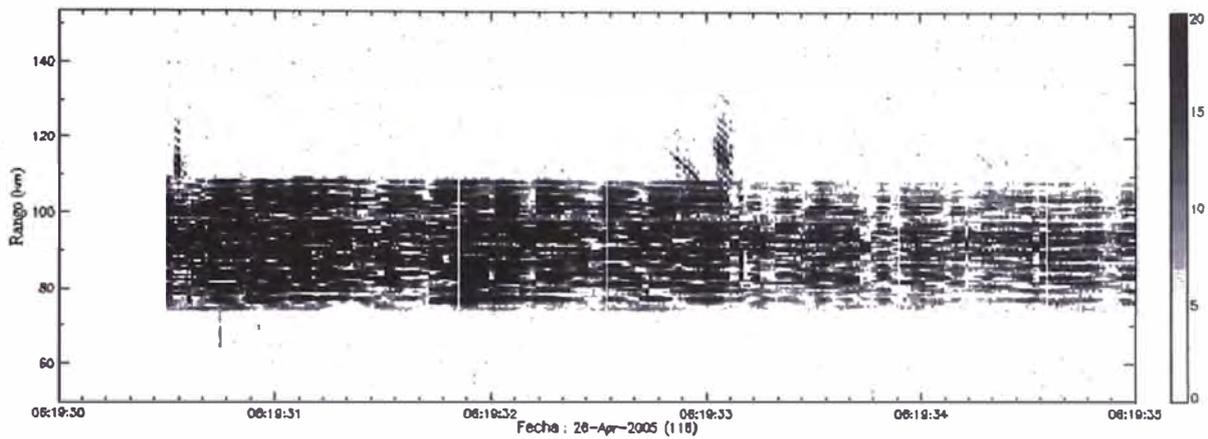


Figura 62 RTI generado para una señal en presencia de ecos de EEJ. Observemos la presencia de ecos de meteoros

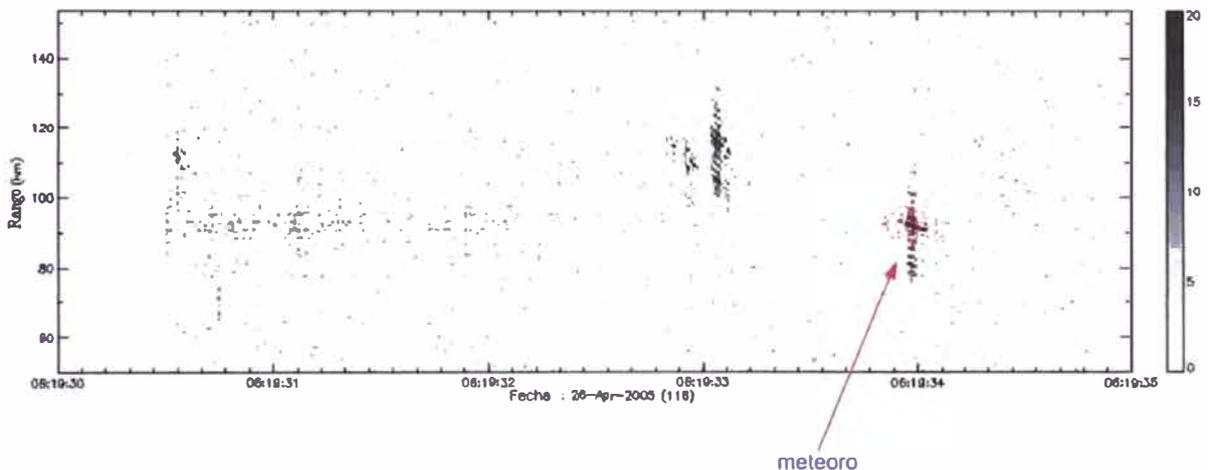


Figura 63 RTI generado para la señal mostrada en la Figura 60, luego de aplicar la técnica de filtrado de la componente DC.

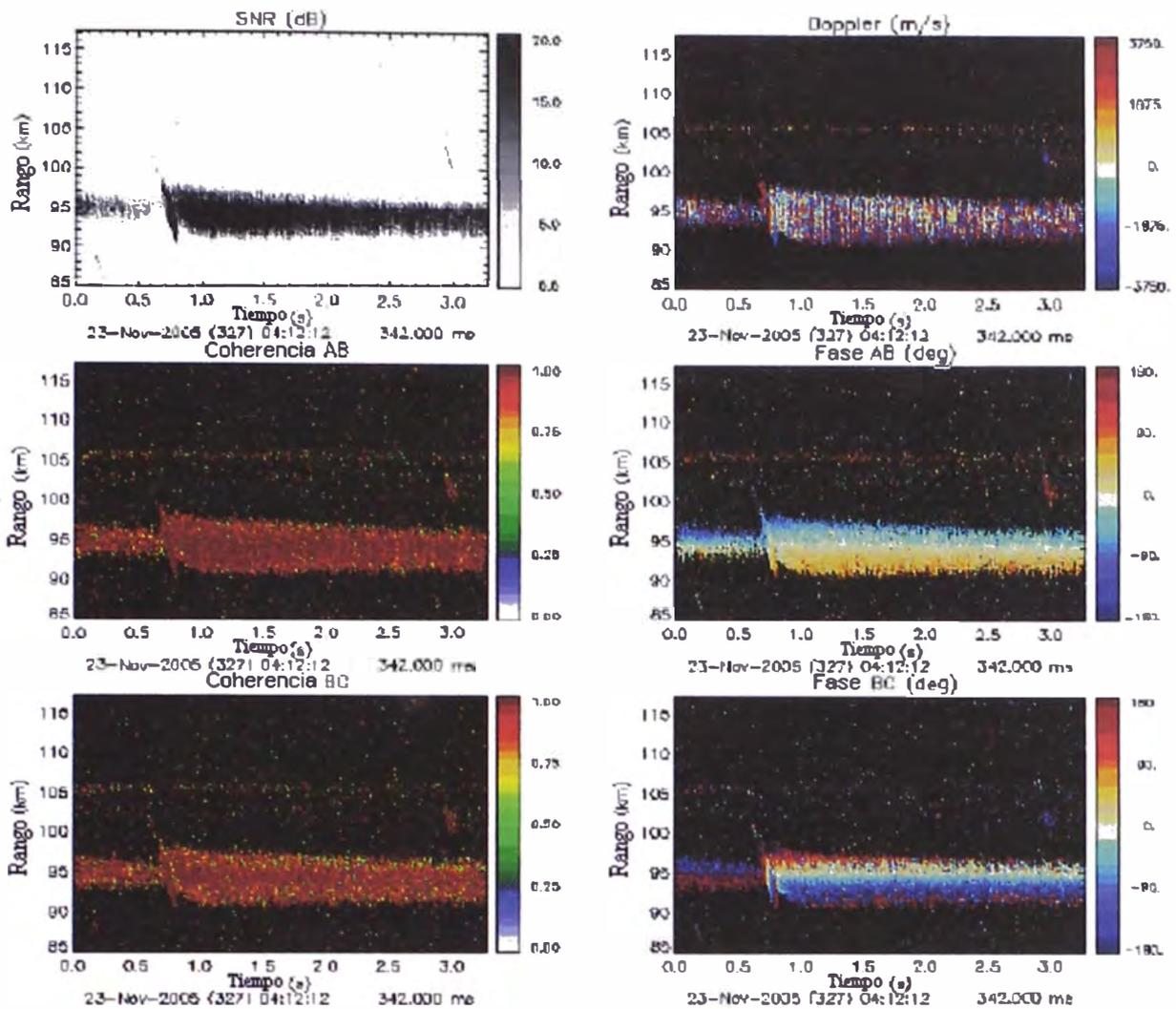


Figura 64 Eco de meteoro, eco no especular y ecos de EEJ, antes de realizar el filtro que consiste en restar la información de dos pulsos transmitidos consecutivamente.

### 6.3 Filtrado Pasa Alto

La tercera técnica analizada utiliza un filtro pasa alto para discriminar entre la señal del EEJ y la señal del meteoro [e.g., *Wen et al, 2005; Wen et al, 2005a*]. Esta discriminación aprovecha que la frecuencia Doppler del EEJ es menor que la frecuencia del meteoro. Por lo tanto idealmente se podría separar ambas señales mediante un filtro pasa alto. El problema de utilizar un filtro pasa alto, se debe a la potencia del espectro del EEJ respecto al espectro generado por el meteoro, debido a que su potencia es mayor en muchos casos solapa al espectro del meteoro. Por lo tanto al filtrar algunos armónicos del espectro del EEJ, los armónicos restantes aún tendrán la

energía suficiente para contaminar a los ecos de meteoros. Debido a este solapamiento, esta técnica no resulta útil para discriminar entre ambas señales, sobretodo cuando pulsos codificados son empleados. Las Figura 66 muestra el espectro del EEJ y un eco de meteoro fuerte, de un experimento en que pulsos sin codificar fueron empleados. Claramente podemos notar que el pico del espectro de EEJ es mayor al pico del eco del meteoro. Si bien el uso de pulsos no codificados o pulsos largos, permitirían filtrar las señales del EEJ, la resolución en rango se vería afectada.

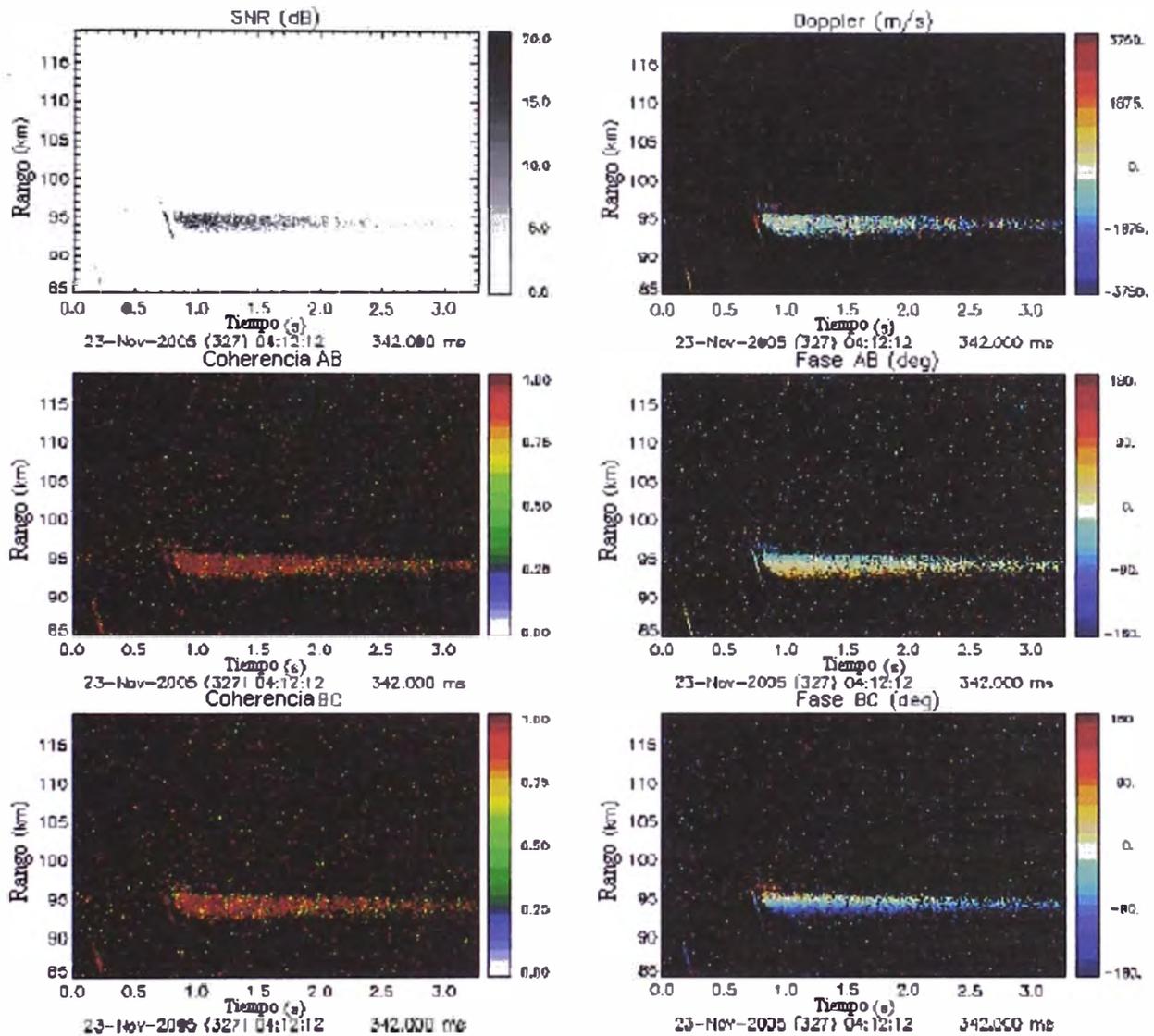


Figura 65 Grafico resultante luego de haber realizado el filtro para los datos mostrados en la Figura 64 Notemos como la presencia de ecos de EEJ y ecos no especulares disminuye notablemente.

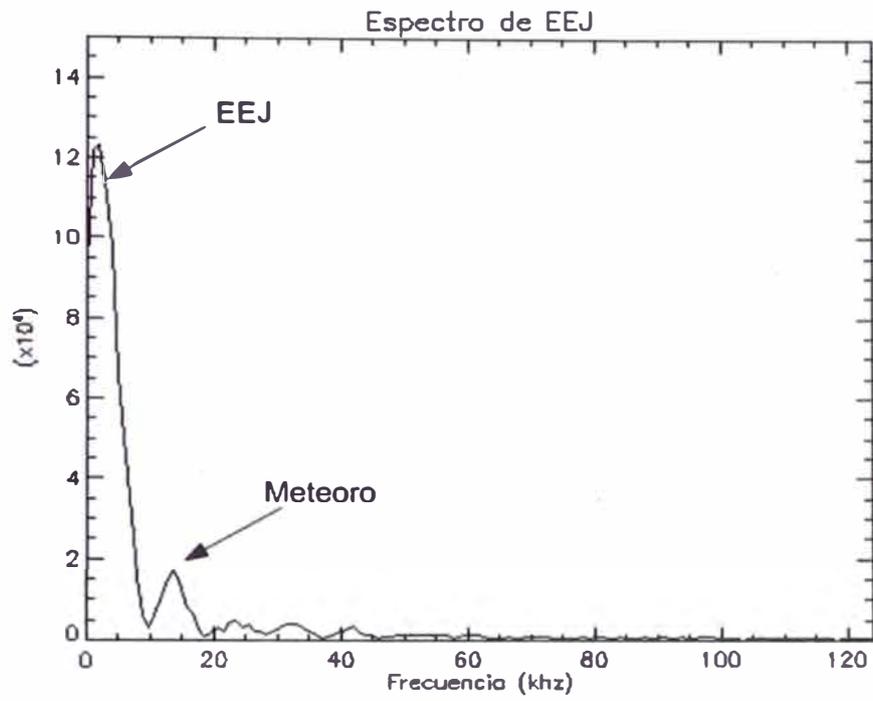


Figura 66 Espectro de la señal recibida del EEJ y un eco de meteoro intenso. Para un experimento realizado con pulso largo el día 25 de Abril del 2005

## Capítulo 7

### COMPARACIÓN DE RESULTADOS

El algoritmo manual como se ha mencionado en la sección 5.2 permite extraer meteoros en presencia de EEJ y/o ecos no especulares, por lo tanto una mayor y nueva población de meteoros ha podido ser caracterizada. Para comparar este nuevo algoritmo, con el algoritmo inicialmente desarrollado para la caracterización de meteoros, analizaremos los resultados obtenidos en el experimento del 19 de Noviembre del 2002, los cuales fueron procesados con el método antiguo (Modo 0); y los resultados obtenidos el 23 de Noviembre del 2005, procesados con el algoritmo nuevo (Modo 1). Si bien las fechas no son las mismas, se espera obtener resultados similares debido a que los experimentos se realizaron en los mismos periodos del año. En la Tabla 5 se encuentran las características de estos dos modos de operación.

En las secciones 7.1 y 7.2 se comparan los resultados obtenidos con los dos modos de operación, tanto para los parámetros determinados de manera directa de los datos, como para los parámetros inferidos mediante la geometría de la trayectoria del meteoro, respectivamente. Además se hace notar la importancia de desarrollar un estudio de errores para el cálculo de estos parámetros. Posteriormente la sección 7.3 muestra las distribuciones de velocidad respecto a otras variables. En la sección 7.4 se muestra la distribución de meteoros obtenida alrededor del ápex. La sección 7.5 presenta los resultados de las velocidades Doppler obtenidas mediante las diferentes técnicas, tanto para el modo 0 como para el modo 1. Finalmente en la sección 7.6 se presenta la distribución de meteoros observados por el radar de Jicamarca, para todas las campañas realizadas.

#### 7.1 Comparación de Parámetros Directos

En esta sección se comparan las distribuciones estadísticas obtenidas para los siguientes parámetros: Tiempo de inicio del evento, rango inicial, variación de rango,

duración del evento, velocidad radial obtenida del ajuste lineal del RTI, velocidad radial obtenida del proceso de decodificación, aceleración radial, acimut, cobertura angular y SNR.

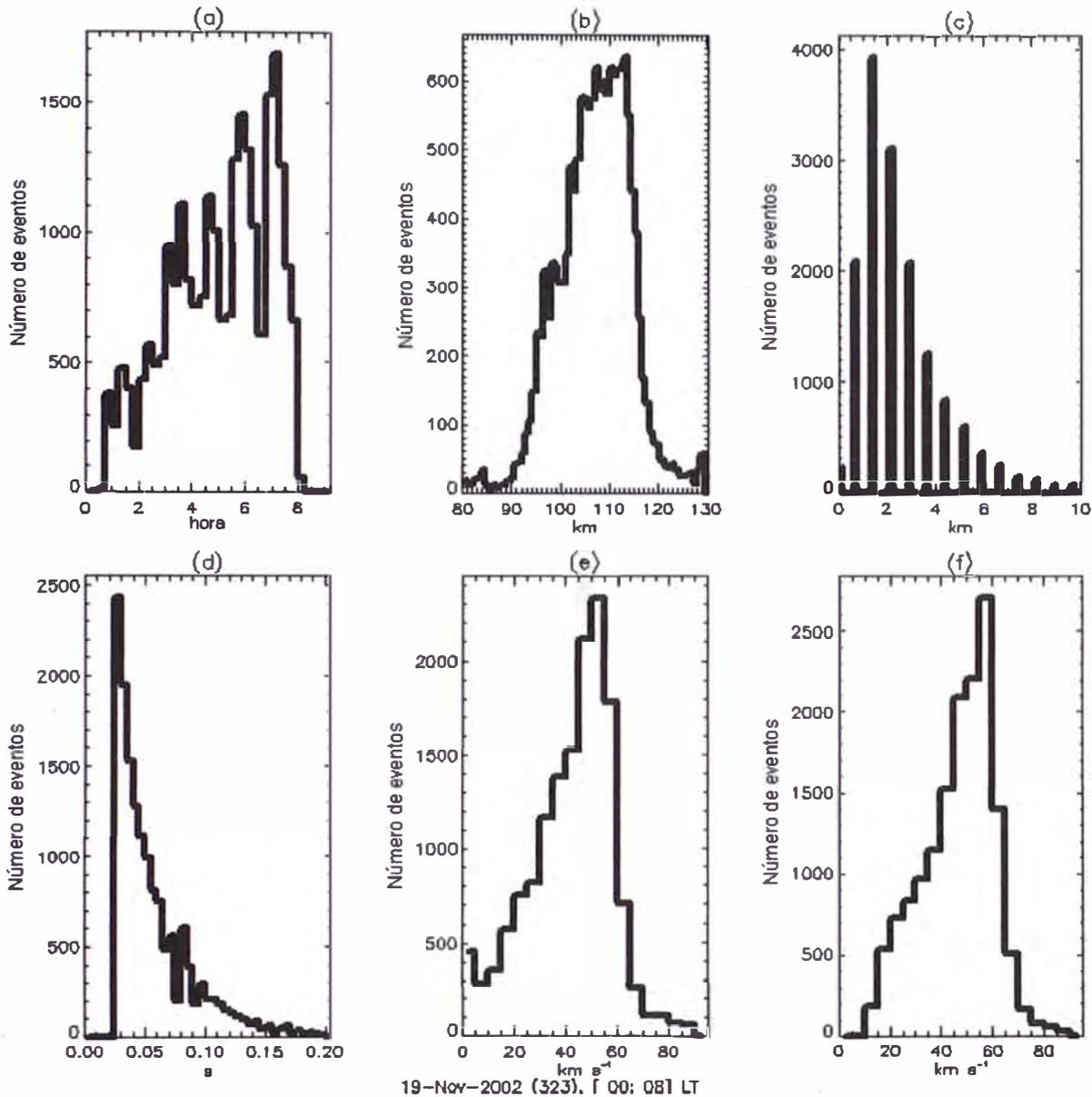


Figura 67 Modo 0. Estadística del experimento del 19 de Noviembre del 2002 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: (a) Tiempo de inicio del evento, (b) rango inicial, (c) variación del rango, (d) duración del evento, (e) velocidad radial del RTI y (f) velocidad radial del proceso de decodificación.

En el panel (a) de las Figuras 67 y 68 se muestra la distribución temporal de los meteoros, para un intervalo de 8 horas observados en ambos Modos de operación (entre las 00:00 horas y las 08.00 horas aproximadamente). En este tiempo el número de

meteoros observados fue de 12360 para el Modo 0, y de 23299 meteoros observados en el Modo de operación 1. Un incremento importante en el número de meteoros observados se da en primeras horas de la mañana. Claramente podemos ver, que la mayor cantidad de meteoros que ingresan a la atmósfera sobre Jicamarca se da alrededor de las 06:00 horas (hora local), este resultado está de acuerdo con otros resultados obtenidos (más detalles ver *Janches et al.*, 2003). Esto nos dice que la mayor cantidad de meteoros que ingresan a la atmósfera se da en las primeras horas de la mañana (hora local), que es justamente cuando el radar apunta cerca del ápex. Es importante comparar el número de meteoros observados, en el caso del Modo 0, su máximo valor es 1600 meteoros aproximadamente, en un intervalo de tiempo de 15 minutos, lo cual nos da un estimado de 106 meteoros por minutos, mientras que en el caso del Modo 1, el pico es de 1800 meteoros, dándonos un aproximadamente 120 meteoros por minuto. Si observamos nuevamente estos paneles notamos además que este máximo de población se mantiene constante por un intervalo de tiempo mucho mayor en el Modo 1. Las caídas de población mostradas en estos paneles, para ambos modos de operación, muestra el efecto que tiene la presencia del EEJ fuerte en las observaciones de meteoros, pero al parecer con menos influencia en el Modo 1.

El panel (b) de las Figuras 67 y 68 muestra la distribución del rango inicial para el modo 0 y el Modo 1, respectivamente. De estos gráficos observamos una distribución centrada alrededor de 110km en altura, lo cual significa, que es alrededor de esta región donde el meteoro genera suficiente plasma alrededor de él para generar los ecos y así mismo es alrededor de esta región que el meteoro se desintegra completamente. Notemos de los gráficos como por debajo de los 110km la cantidad de meteoros tiende rápidamente a disminuir. Esto concuerda con lo conocido respecto a los meteoros, pues estos en su mayoría estos se desintegran totalmente aproximadamente a 90km de altitud [e.g.; *Jones y Campbell-Brown*, 2005]. Para el gráfico del Modo 1, la ausencia de información arriba de los 120km, se debe al menor rango de muestreo utilizado en ese modo de operación (ver Tabla 5).

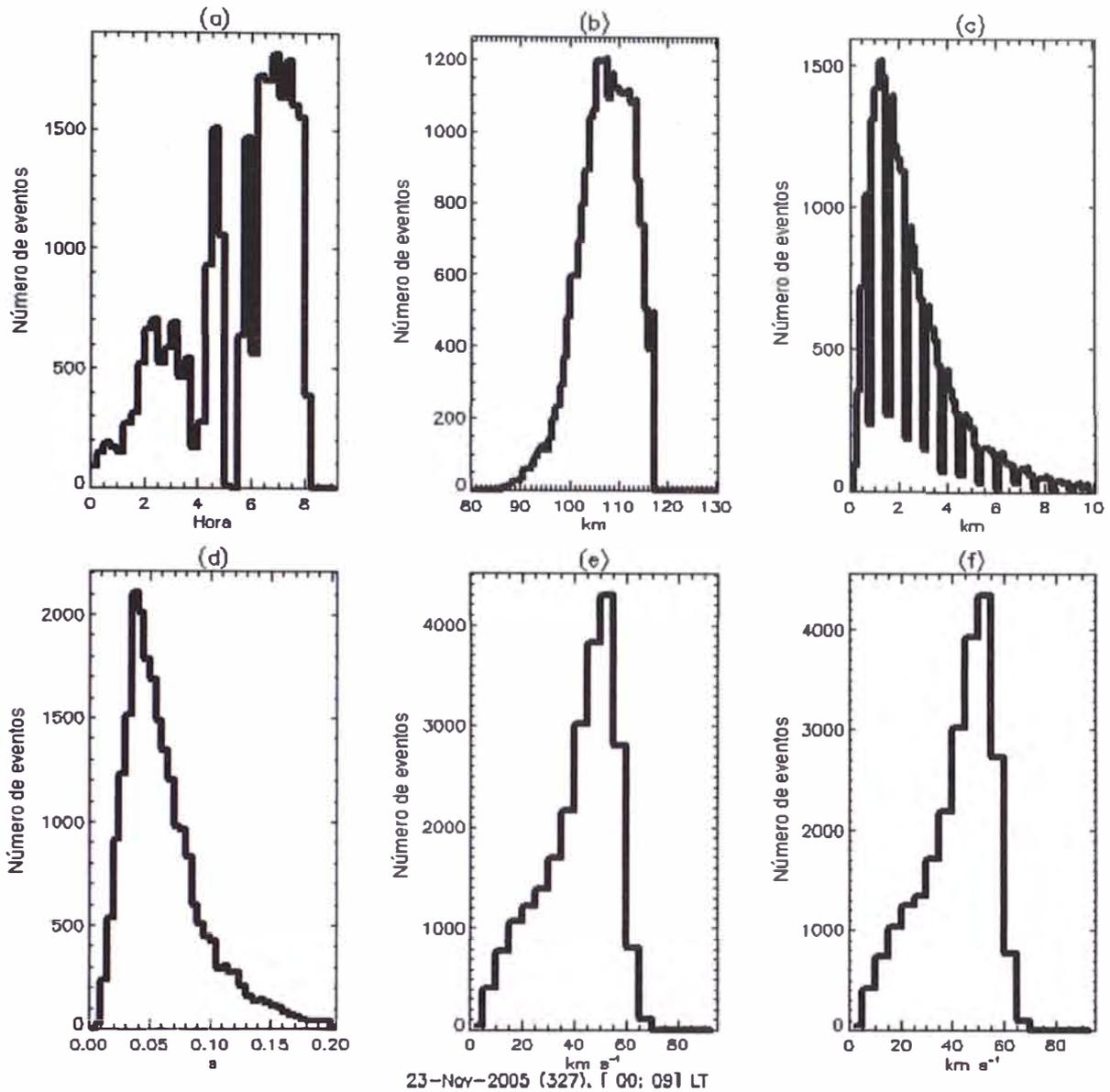


Figura 68 Modo 1. Estadística del experimento del 23 de Noviembre del 2005 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: (a) Tiempo de inicio del evento, (b) rango inicial, (c) variación del rango, (d) duración del evento, (e) velocidad radial del RTI y (f) velocidad radial del proceso de decodificación.

Los paneles (c) y (d) muestran la duración en rango y la duración en tiempo de los meteoros observados. Para ambos modos notamos que en su mayoría la población de meteoros que observamos, tienen una duración media de 50 ms. Esto significa que los meteoros observados son de dimensiones tan pequeñas que se desintegran rápidamente al ingresar a la atmósfera. Son muy pocos los meteoros que alcanzan una variación de rango mayor a 6 km o en tiempo mayor a 150 ms. La mayoría de ellos se limitan a variaciones de rango de 0.5 a 2.5km aproximadamente, o variaciones de tiempo de 2 a 75 ms.

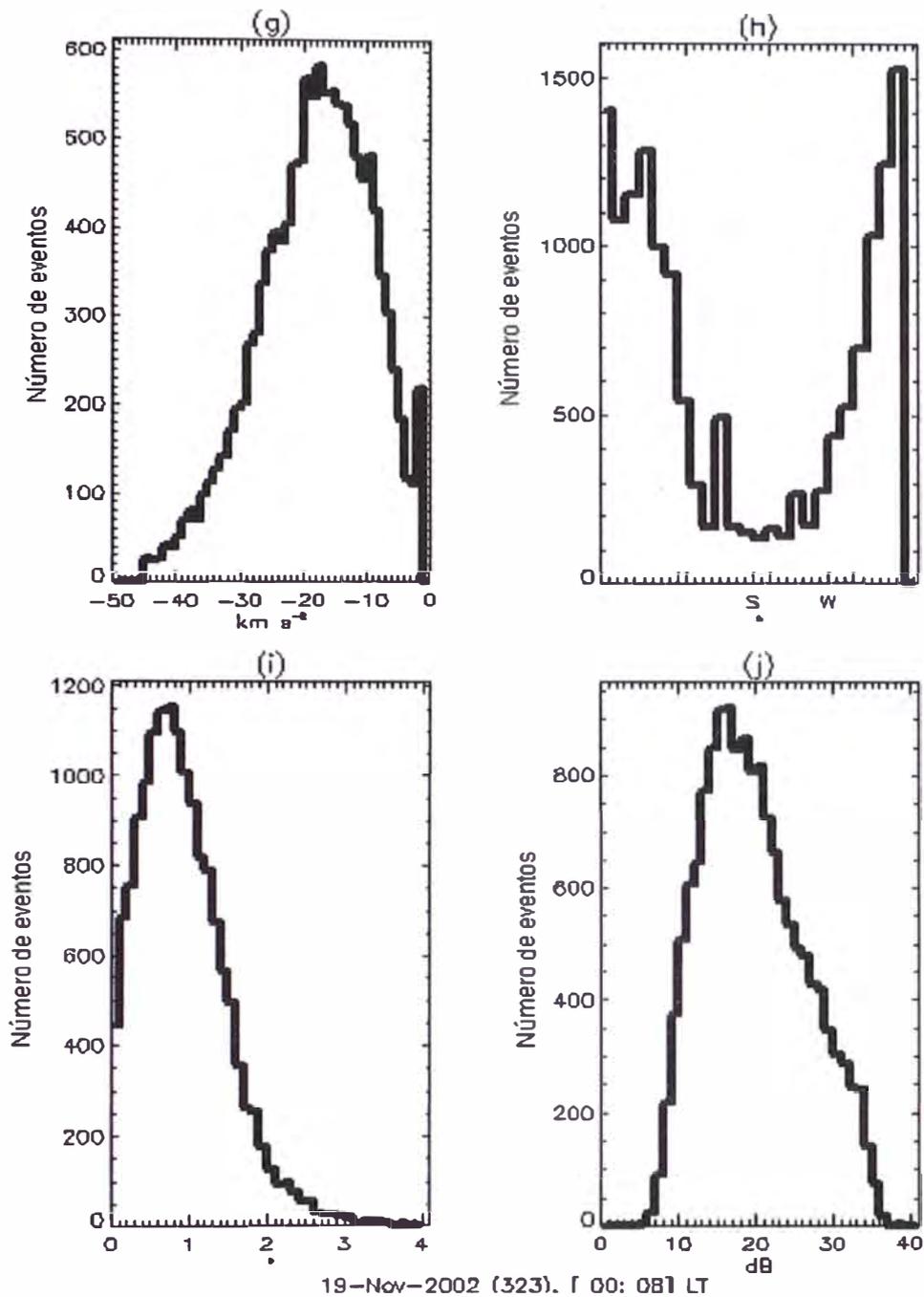


Figura 69 Modo 0. Estadística del experimento del 19 de Noviembre del 2002 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: Aceleración radial, acimut, cobertura angular, SNR.

El panel (e) presenta la distribución de la velocidad radial obtenida mediante un ajuste lineal al RTI. Esta distribución alcanza un máximo alrededor de los 50km/s en ambos procesos, y sus distribuciones son muy parecidas. Sin embargo las velocidades obtenidas del proceso de decodificación (panel (f)), no son muy parecidas, su máximo oscila alrededor de 60km/s pero la forma de las distribuciones son distintas, presentando el Modo 0 mayor población con velocidades entre 20 y 40 km/s.

El panel (g) de las Figuras 69 y 70 muestran la distribución para la aceleración radial obtenida. El Modo 0 y el Modo 1 presentan una media de  $-20 \text{ km/s}^2$ . El panel (h) de las Figuras 69 y 70 muestra la distribución del acimut para los meteoros detectados por el haz del radar. Esta distribución nos indica la dirección de acimutal de la trayectoria del meteorito. Claramente se observa en ambos modos de operación que la gran mayoría de meteoros que ingresan al radar, los hacen por la dirección noreste y noroeste.

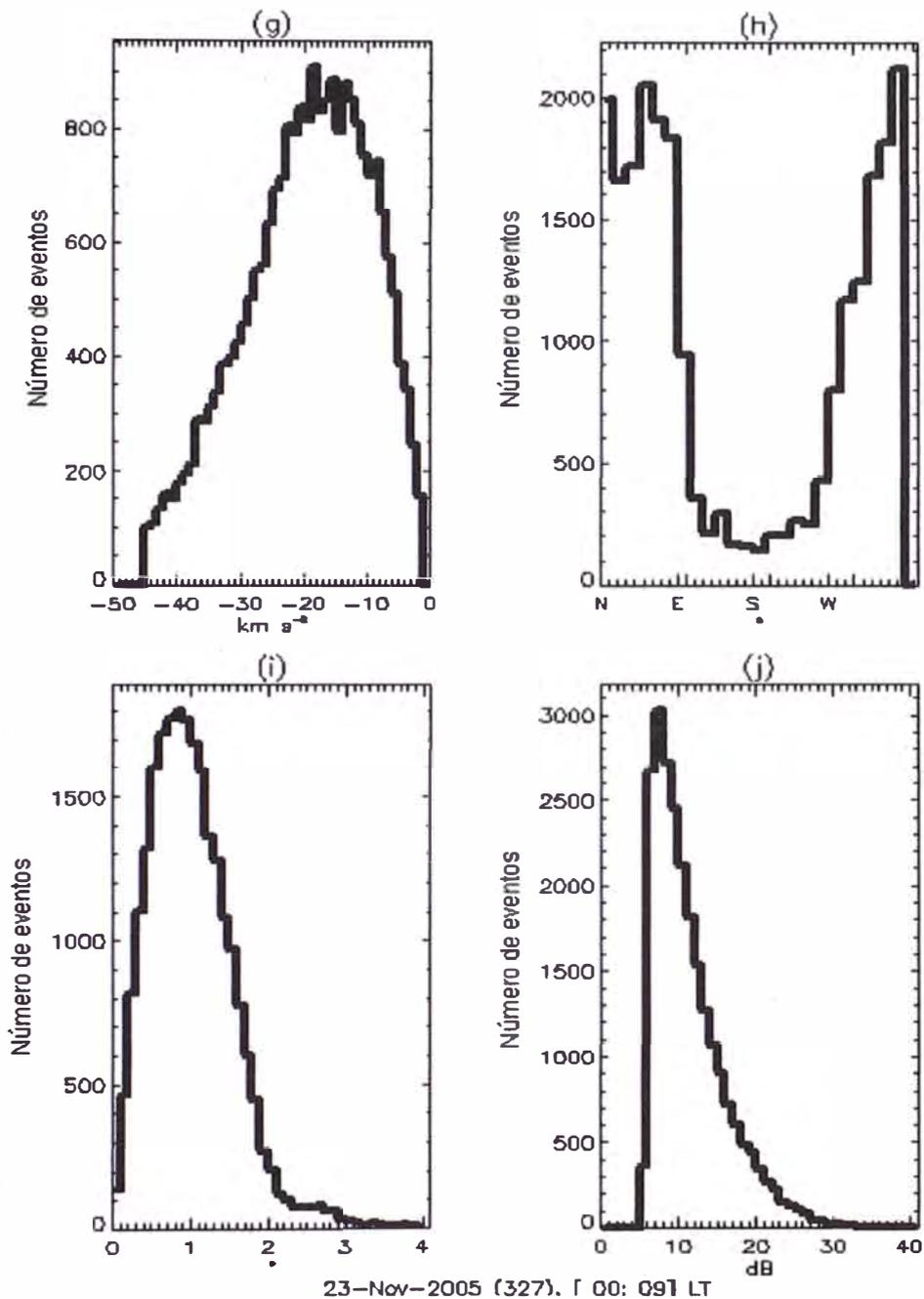


Figura 70 Modo 1. Estadística del experimento del 23 de Noviembre del 2005 entre las 00:00 y 08:00horas. Los gráficos muestran los siguientes parámetros: Aceleración radial, acimut, cobertura angular, SNR.

El panel (i) muestra la distribución para la cobertura angular. Este valor nos indica el cuanto ángulo barrido por el meteoro en su paso por el haz del radar. De ambos gráficos notamos que el valor promedio se encuentra alrededor de  $0.5^\circ$  a  $1.5^\circ$  de cobertura angular.

La distribución del SNR se muestra en el panel (j). Ambos experimentos muestra claramente una diferencia bien marcada, esto se debe a las diferencias en las características del experimento (ver Tabla 6) El valor mínimo de SNR utilizado en ambos experimentos es de 5dB. Notemos claramente como el SNR del primer caso se expande a valores más altos y los cuales están alrededor de 15dB, mientras que el SNR del segundo caso se limita a valores alrededor de 10dB.

## 7.2 Comparación de Parámetros Inferidos

A los parámetros inferidos directamente, se adicionaron tres parámetros determinados a partir de consideraciones geométricas (ecuaciones (49), (50) y (51)). Las Figuras 71 y 72 muestran las distribuciones de estos parámetros (velocidad absoluta, ángulo de elevación y aceleración absoluta).

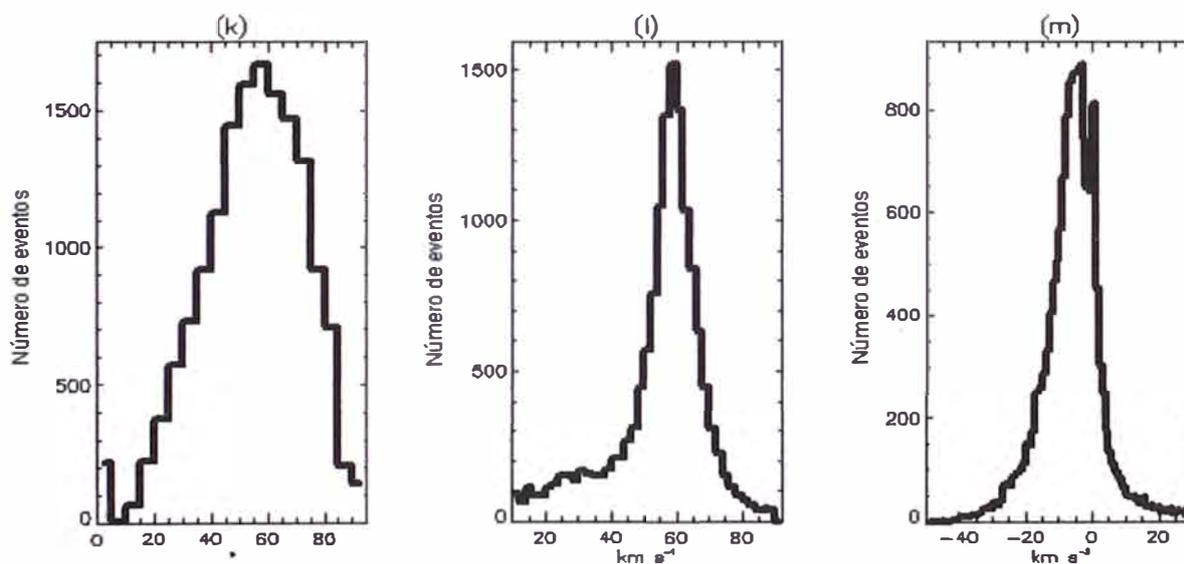


Figura 71 Procesamiento automático (Modo 0). Estadísticas para los parámetros de meteoros inferidos de consideraciones geométricas: (k) ángulo de elevación, (l) velocidad absoluta, y (m) aceleración absoluta. Experimento del 19 de Noviembre del 2002

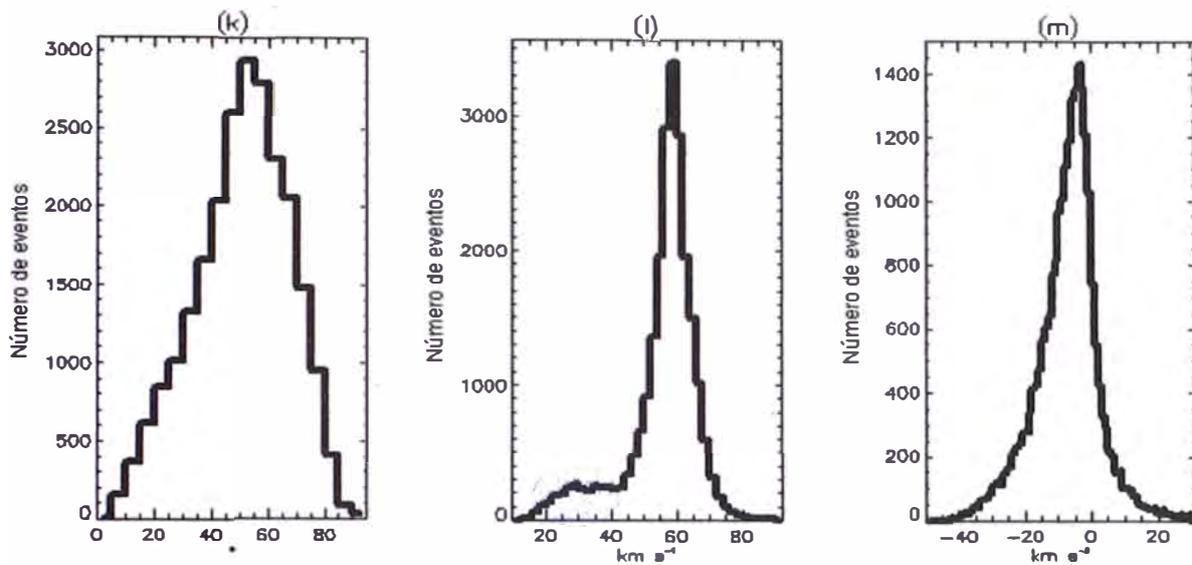


Figura 72 Procesamiento manual (Modo 1). Estadísticas para los parámetros de meteoros inferidos de consideraciones geométricas: ángulo de elevación, velocidad absoluta, y aceleración absoluta. Experimento del 23 de Noviembre del 2005

El panel (k) muestra la distribución del ángulo de elevación. Ambas Figuras muestran un comportamiento muy similar. Estos gráficos indican que la mayoría de meteoros ingresan al haz del radar con un ángulo de elevación alrededor de 50 ° a 55 °. Se puede notar una detección mayor de ecos debajo de los 20 grados en las observaciones de Noviembre del 2005.

El panel (l) de las Figuras 71 y 72 muestra la distribución de la velocidad absoluta. En ambos paneles la velocidad muestra un comportamiento bimodal, teniendo el pico máximo un valor alrededor de 60km/s, y presentándose además velocidades mayores a 72km/s, cuyo valor corresponde a la velocidad de escape del sistema solar. La segunda población observada corresponde a valores alrededor de los 30km/s. Los datos del experimento del 19 de noviembre del 2002, muestran esta población de una manera bastante ligera, pero los datos obtenidos del experimento del 23 de Noviembre del 2005 muestran claramente la presencia de esta población (ver Figura 72).

El panel (m) de las Figuras 71 y 72 muestran la distribución para la aceleración absoluta. Estos paneles muestran una media de  $-5 \text{ km/s}^2$ . Las aceleraciones radiales negativas se entienden como resultado de la fricción producida por las colisiones que realiza el meteoróide con la atmósfera, por lo que al ser observado por el radar, su velocidad disminuye conforme se mueve dentro del haz del radar [e.g., *Murad*, 2001]. La interpretación de las aceleraciones radiales positivas, se entiende si consideramos que el meteoróide no realiza una trayectoria lineal. Por ejemplo asumiendo una trayectoria parabólica dentro del haz del radar, esto se mostrará, como un incremento de su velocidad radial. La Figura 73 ilustra esta idea. Los radios vectores mostrados en los gráficos representan los rangos detectados por cada pulso transmitido. En el gráfico de la izquierda se observa como esta trayectoria lineal produce una disminución en la variación del rango del meteoro detectado, lo cual se considera como una disminución de la velocidad radial, mientras que en la figura de la derecha la trayectoria curva genera un incremento de la variación en rango por lo tanto se considera que la velocidad radial incrementa su valor de tal manera que pueda recorrer mayor distancia en un intervalo de tiempo igual.

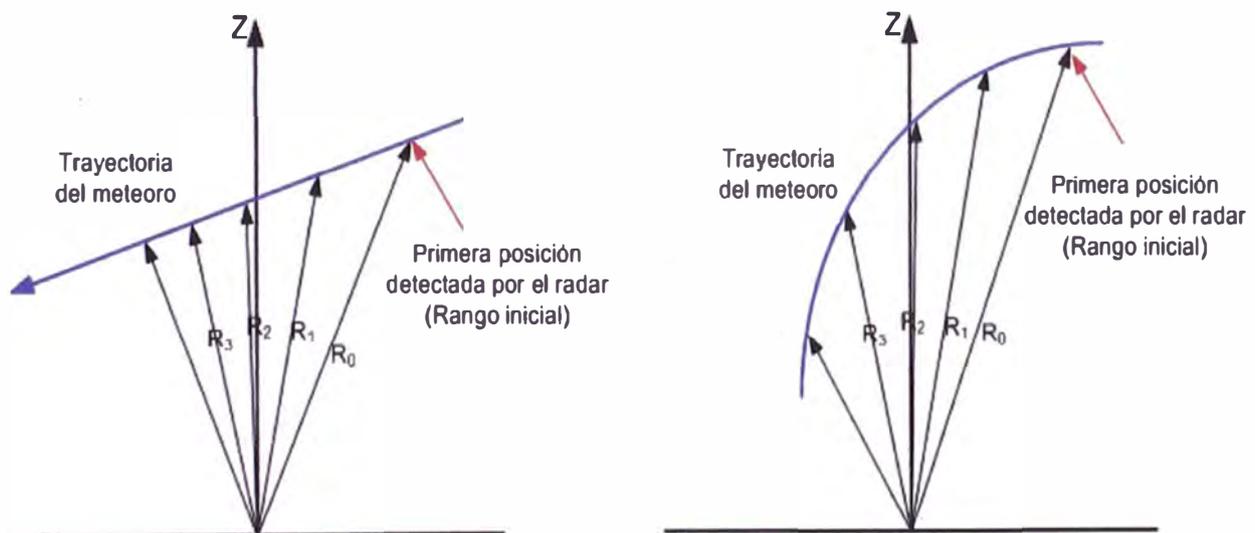


Figura 73 Trayectoria del meteoro dentro del haz de la antena. Notemos la diferencia en la variación del rango

La comparación realizada en esta sección, ha permitido validar y mostrar la utilidad de esta nueva herramienta para procesamiento de datos de meteoro. Sin embargo la falta de un estudio de errores en la estimación los parámetros del meteoro no permite darle una mejor interpretación a estos resultados. Como ejemplo tenemos la

interpretación geométrica de las aceleraciones positivas, por otro lado el conocimiento de la densidad atmosférica alrededor de los 100 km de altitud sugeriría solamente aceleraciones negativas. Por lo tanto un estudio riguroso de estos errores permitiría mejorar los resultados ya obtenidos. El apéndice C presenta los resultados de un estudio teórico para el cálculo de los parámetros inferidos.

### 7.3 Distribuciones bivariantes: Velocidad respecto a otros parámetros

Las Figuras 74 y 75 presentan comparaciones de la velocidad absoluta respecto a otros parámetros. En estas Figuras se muestran histogramas bidimensionales de la velocidad absoluta con los siguientes parámetros: (a) el tiempo de inicio del evento, (b) la aceleración absoluta, (c) la duración del evento, (d) el ángulo de elevación con el cual el meteoro ingresa, (e) la altura inicial, y (f) el SNR. La escala de colores mostrada en los diferentes gráficos representa el número de meteoros observados para determinado parámetro.

Claramente podemos ver de estos dos gráficos la similitud, obteniéndose contornos más definidos en los resultados obtenidos con el modo 1. El panel (f) presenta marcada diferencia debido a la potencia transmitida (tal como se explicó líneas arriba). Aunque no es parte del tema de tesis, algunos puntos resaltantes de estas gráficas son:

- Los meteoros más rápidos se observan alrededor del amanecer.
- Los meteoros más lentos vienen acompañados de una desaceleración mayor.
- Los meteoros más lentos se observan a menor altura.

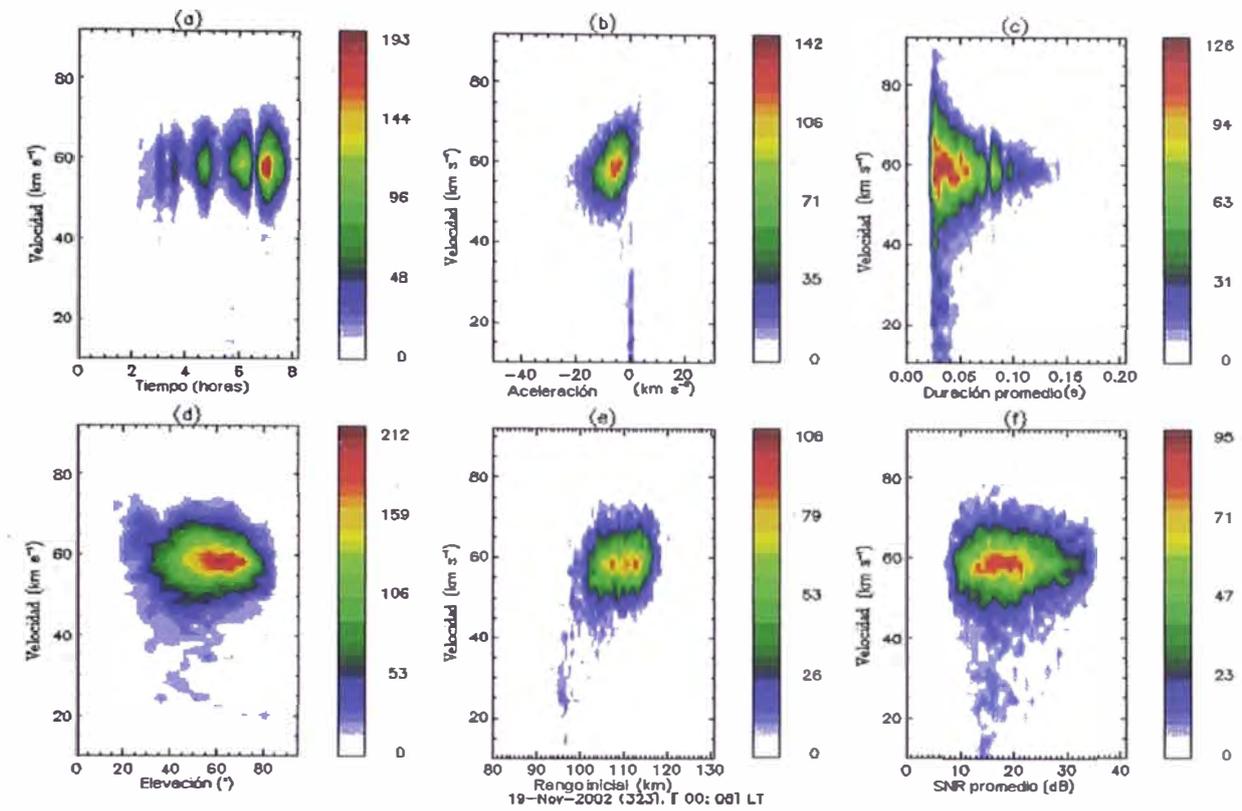


Figura 74 Velocidad absoluta obtenida en función de los distintos parámetros determinados con el modo 0 (19 de Noviembre del 2002).

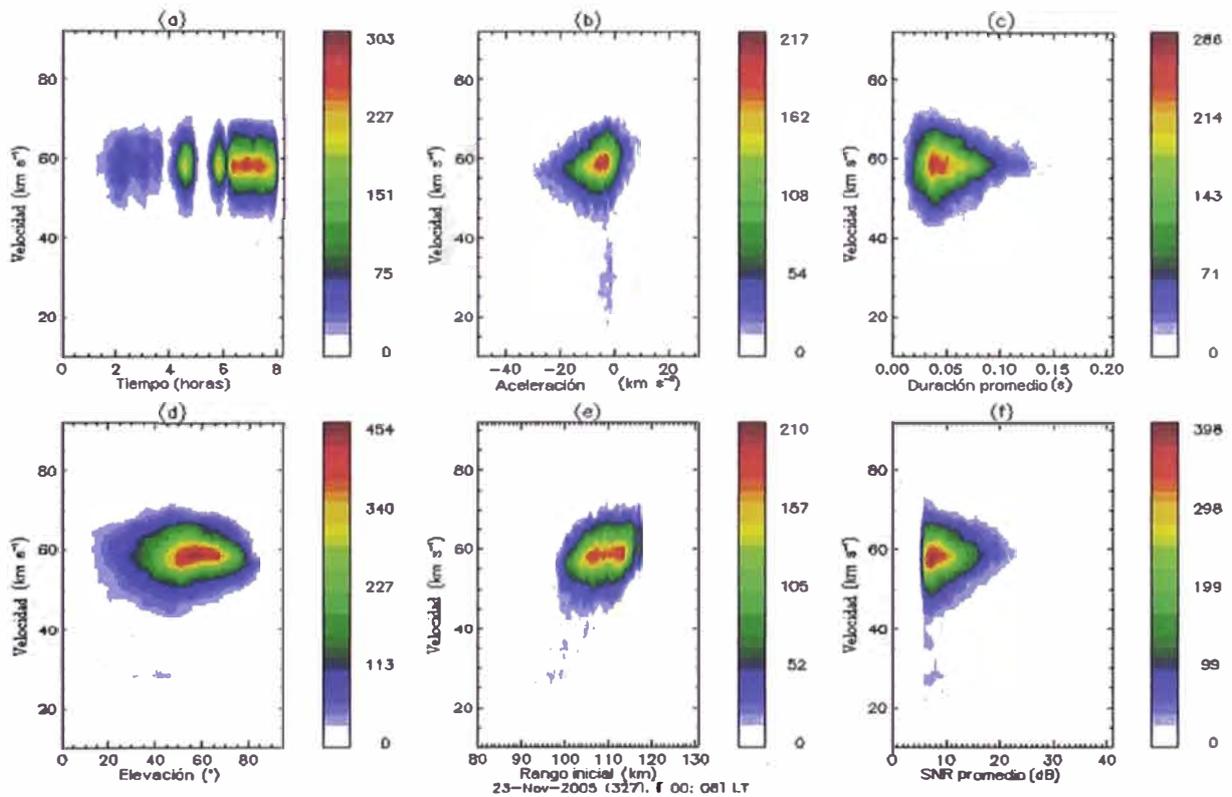


Figura 75 Velocidad absoluta obtenida en función de los distintos parámetros determinados con el modo 1 (23 de Noviembre del 2005).

## 7.4 Distribuciones de meteoros alrededor del ápex

La Figura 76 muestra la distribución alrededor del ápex obtenida con ambos procesos. La Figura 77 presenta los mismos resultados que la Figura 76, pero en escala logarítmica. Los resultados del experimento del 19 de Noviembre del 2002 muestran una población alrededor del ápex, mientras que los resultados obtenidos en el experimento del 23 de Noviembre del 2005, se observa dos fuentes principales de meteoros (ver Figura 77). La primera muestra y la más importante centrada alrededor del ápex y una segunda muestra en la parte inferior (indicada en círculo).

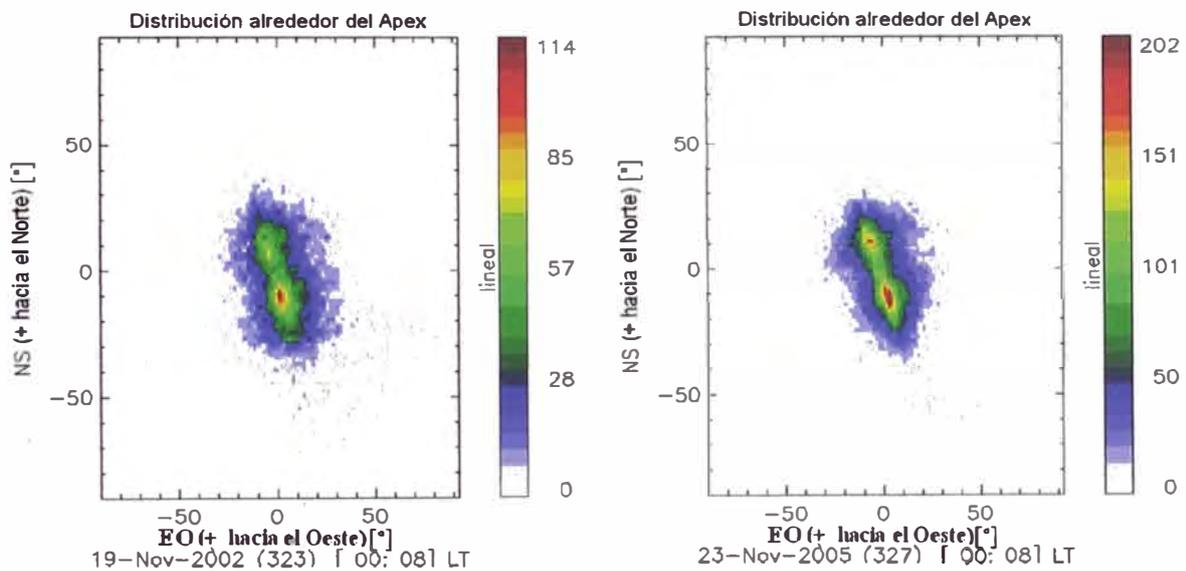


Figura 76 Distribución de meteoros alrededor del ápex. La escala de colores representa el número de meteoros observados.

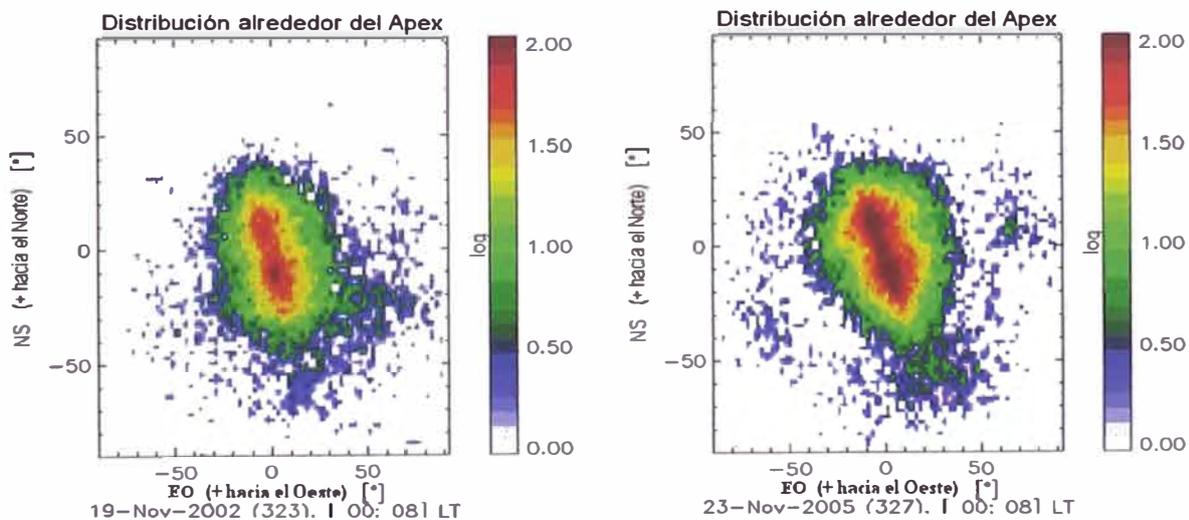


Figura 77 Distribución de meteoros alrededor del ápex (escala logarítmica)

## 7.5 Comparación del estimado de la velocidad radial

La Figura 78 muestra la comparación de las velocidades obtenidas del rango vs. tiempo con las velocidades Doppler. *Chau y Woodman* [2004] reportaron que la velocidad Doppler obtenida de la decodificación era mayor que la velocidad del rango vs. tiempo en aproximadamente 3-7 km/s. Una muestra de estos resultados se muestra en el panel de la izquierda. En el panel de la derecha hacemos una comparación similar pero para los datos del 23 de noviembre del 2005. En esta oportunidad dado el IPP más corto utilizado, se ha empleado la velocidad Doppler de pulso a pulso, el cual nos permite medir una velocidad ambigua, pero con una ambigüedad mayor (7km/s) al error de las velocidades de Rango vs. Tiempo (< 2 km/s). Se puede apreciar que la diferencia entre velocidades reportadas anteriormente prácticamente ha desaparecido.

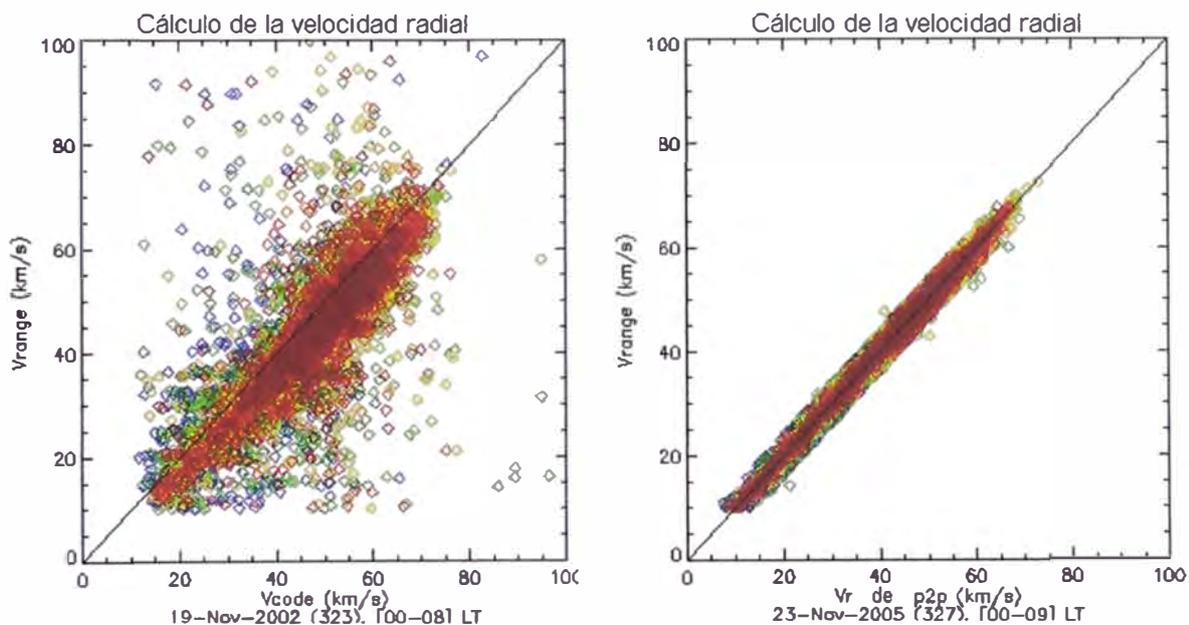


Figura 78 Comparación de la velocidad obtenida por distintas técnicas. El gráfico de la izquierda muestra la comparación para los datos obtenidos con el procesamiento automático (experimento realizado el 19 de Noviembre del 2002), mientras que el gráfico de la derecha muestra la comparación para el procesamiento manual (experimento realizado el 23 de Noviembre del 2005).

La discrepancia encontrada anteriormente aun queda pendiente su entendimiento. Con los resultados de Noviembre del 2005, podemos concluir que la velocidad obtenida del rango versus tiempo es igual a la velocidad Doppler obtenida de pulso a pulso. Sin embargo, recordemos que la velocidad obtenida del proceso de decodificación es obtenida con tiempos más cortos, dentro del tiempo de duración del pulso. De ser así, la diferencia reportada por *Chau y Woodman* [2004], podría deberse a que la velocidad Doppler medida en tiempos cortos es mayor a la velocidad Doppler medida con tiempos largos, lo cual implicaría que con el radar estaríamos midiendo la velocidad del plasma en frente del meteoro a tiempos más cortos [Dr. Ronald Woodman, comunicación personal, 2006]. Experimentos especiales para resolver este dilema se realizarán en un futuro no muy lejano.

## 7.6 Distribución de Meteoros sobre Jicamarca

La Figura 79 muestra la distribución de los meteoros observados con el radar VHF del ROJ, tomando al Sol como marco de referencia y después de haber removido la velocidad de la Tierra. Los colores utilizados representan la cantidad de meteoros observados en una región de un grado al cuadrado. Notemos que el marco ha sido rotado con el objetivo de mostrar las fuentes de meteoros de una manera más clara. Las líneas dibujadas sobre los datos corresponden a los modelos correspondientes a estas fuentes. De la Figura 79 observamos como el radar del ROJ no es muy sensible dada su ubicación geográfica a la población del toroidal del norte. Más detalles sobre las poblaciones observadas, se pueden encontrar en *Chau et al.* [2006].

Distribución de meteoros observados con el radar VHF del ROJ

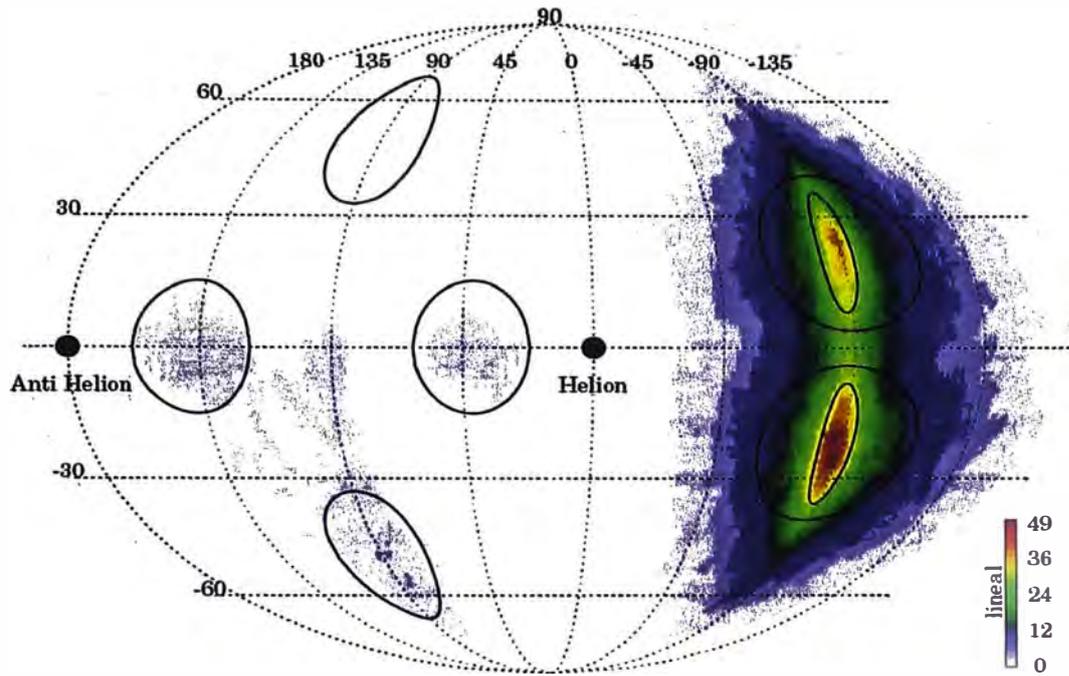


Figura 79 Distribución de los meteoros observados con el radar VHF del ROJ [Imagen extraída de Chau et al, 2006]

## Capítulo 8

### CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

#### 8.1 Conclusiones

El procesamiento de los datos del experimento realizado los días 22 y 23 de Noviembre del 2005 (modo 1) y los resultados obtenidos, permitieron validar los algoritmos de procesamiento y herramientas gráficas para la detección y caracterización de ecos de meteoros. El uso de una interfase gráfica para selección de meteoros convirtió a nuestro procesamiento en una herramienta amigable y de fácil manejo, pues no es requerido un conocimiento previo de las rutinas, para el procesamiento de los datos.

Como hemos mostrado en los Capítulos anteriores esta nueva técnica desarrollada (Modo 1), permite mejorar los resultados obtenidos con la técnica inicialmente desarrollada para este propósito. La observación de casi el doble de meteoros para épocas del año y tiempos similares con respecto al Modo 0 de observación, es una muestra clara de la utilidad de este nuevo proceso. Estas mejoras han permitido estudiar mayores y nuevas poblaciones, que anteriormente eran eliminadas debido a la presencia de ecos fuertes de electrochorro ecuatorial. Además se ha puesto de manifiesto la gran utilidad del radar VHF del Radio Observatorio de Jicamarca, que al ser usado en modo interferométrico, permita caracterizar mejor los meteoros, incluyendo su trayectoria respecto a un observador en tierra.

La etapa de pre-procesamiento de esta nueva técnica ha permitido desarrollar un algoritmo bastante amigable y de fácil manipulación, permitiéndole al usuario realizar futuras modificaciones sin tener que analizar varias líneas de código. Además esta etapa permite definir una herramienta para la compresión de datos. Esta herramienta prepara y almacena la información adecuada para la caracterización de meteoros, lo cual ahorra más del 90% en espacio de almacenamiento respecto a los datos crudos, por lo que se

espera que en las próximas campañas de meteoro la información sea almacenada directamente en este formato.

La etapa de post-procesamiento permite manipular y salvar de manera directa la información relacionada al meteoro, mediante el proceso de selección manual, derivando esto en la determinación de los parámetros del meteoro seleccionado. Por lo tanto, esta selección manual permite discriminar entre ecos de meteoros, ecos no-especulares y ecos de electrochorro ecuatorial de una forma sencilla y efectiva. Como hemos mencionado mediante esta discriminación se ha incrementado el número de meteoros estudiados y además analizado poblaciones que anteriormente eran solapadas por la presencia del electrochorro, con respecto al Modo 0 el cual era más conservador. Además la información almacenada por cada meteoro seleccionado permite volver analizar los datos las veces que sea necesario y/o estudiar con mayor cuidado un meteoro específico. Esto permitiría dar énfasis a los meteoros cuyos parámetros no son los más óptimos.

La estimación de los parámetros del meteoro, fue realizada de dos formas: (1) de manera directa de los datos seleccionados y (2) derivando la información de las medidas directas. Los datos determinados de manera directa para ambos procesos muestran alta correlación, esto permite confirmar la validez de los algoritmos desarrollados. En cambio para el caso de la información derivada de las consideraciones geométricas se muestra que con el modo 1:

- La velocidad obtenida ha permitido definir de manera más clara la presencia de nuevas poblaciones caracterizadas por tener valores bajos de velocidades geocéntricas.
- La aceleración obtenida muestra un incremento de las poblaciones con aceleraciones positivas.

Las técnicas desarrolladas para la remoción de electrochorro ecuatorial y ecos no especulares permitirán en un futuro cercano desarrollar algoritmos robustos y automáticos para la caracterización de meteoros. En particular la técnica de remoción del EEJ utilizando valores de coherencia y el Doppler.

## 8.2 Trabajo a Futuro

Los resultados mostrados en el presente trabajo de tesis muestran gran semejanza con otros resultados obtenidos en la caracterización de meteoros [Chau y Woodman, 2004]. Sin embargo, a pesar de haber mejorado el procesamiento inicial (Modo 0), aun quedan algunas labores y trabajos por desarrollar. A continuación sugerimos algunas actividades como trabajo futuro.

- Generar una interfase gráfica para el procesamiento de meteoros, que incluya ambos procesos y los diferentes parámetros que a estos procesos concierne; y que permita un manejo amigable y fácil para el usuario.
- Desarrollar un algoritmo óptimo para el proceso de decodificación, combinando la idea utilizada por Chau y Woodman [2004]; con la nueva forma de decodificar, en otras palabras tener la información del código, como una variable predefinida y realizar la decodificación tomando una cantidad de muestras igual al número de baudios del código utilizado.
- La principal dificultad de este nuevo algoritmo como ya se ha mencionado es la etapa de la selección manual de meteoros, por tal razón, generar un algoritmo automático y robusto será un punto importante a desarrollar. Para ello se debe estudiar la forma de utilizar alguno (o combinación de ellos) de los criterios mencionados en el Capítulo 6.
- Procesamiento cuidadoso de aquellos meteoros que exhiben velocidades mayores a la velocidad de escape del Sol a un 1 AU, es decir, aquellos meteoros que podrían provenir fuera del sistema planetario solar.
- Los resultados mostrados en el Capítulo 7 muestran la utilidad de esta nueva herramienta para procesamiento de señales de meteoro. Sin embargo, la falta de un análisis de los errores el cálculo de los diferentes parámetros del meteoro, no permiten darle una mejor validez a estos resultados. Por tal razón, realizar un

análisis detallado de estos errores permitiría dar una mejor interpretación de los resultados obtenidos. En el apéndice C se ha desarrollado un análisis teórico de los errores obtenidos en el cálculo de los parámetros inferidos para un meteoro. Es recomendable tener en cuenta estos errores en el uso futuro de los parámetros de meteoros medidos e inferidos.

## APÉNDICE A: INTERFEROMETRÍA EN RADARES

Para analizar el fundamento fisico-matemático del concepto de interferometría en radares, consideremos las señales  $v_1(t)$  y  $v_2(t)$ , como las señales recibidas en las antenas 1 y 2. La Figura 80 ilustra esta idea.

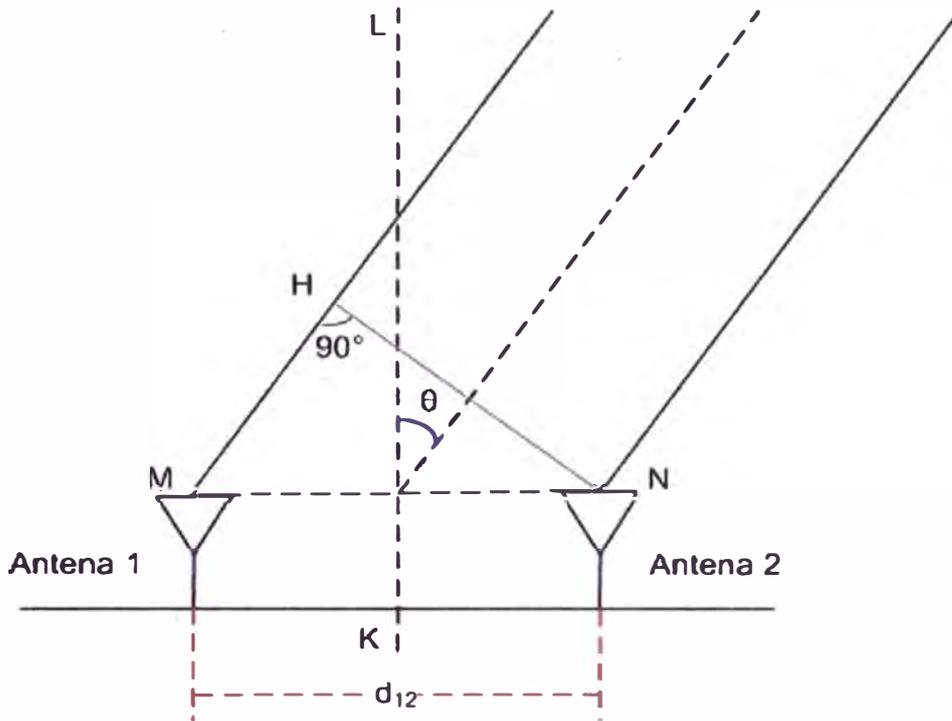


Figura 80 Geometría de las señales recibidas por las antenas 1 y 2, producto de un objeto en el campo lejano para el radar.

Las ecuaciones A.1 y A.2 representan la forma matemática de estas señales.

$$v_1(t) = A_1 \times \exp(j(2\pi f_d t + \phi_1)) \quad (\text{A.1})$$

$$v_2(t) = A_2 \times \exp(j(2\pi f_d t + \phi_2)) \quad (\text{A.2})$$

Del concepto de correlación cruzada tenemos que la correlación entre estos dos canales para un retraso (“lag”) cero es:

$$ccf = v_1(t) \times v_2^*(t) \quad (A.3)$$

Reemplazando las ecuaciones de  $v_1(t)$  y  $v_2(t)$  en la ecuación A.3 tenemos:

$$\begin{aligned} ccf &= A_1 \times \exp(j(2\pi f_d t + \phi_1)) \times A_2 \times \exp(j(2\pi f_d t + \phi_2))^* \\ ccf &= A_1 \times \exp(j(2\pi f_d t + \phi_1)) \times A_2 \times \exp(-j(2\pi f_d t + \phi_2)) \\ ccf &= A_1 \times A_2 \times \exp(j(2\pi f_d t + \phi_1) - j(2\pi f_d t + \phi_2)) \\ ccf &= A_1 \times A_2 \times \exp(j(\phi_1 - \phi_2)) \end{aligned} \quad (A.4)$$

Definamos la fase correlación cruzada como  $\mathcal{G}$ , de la expresión anterior tenemos que:

$$\begin{aligned} \mathcal{G} &= -(\phi_2 - \phi_1) \\ \mathcal{G} &= -\Delta\phi \end{aligned} \quad (A.5)$$

El resultado anterior nos dice que la fase de correlación cruzada es igual a la diferencia de fase entre las señales recibidas en los canales 1 y 2.

Consideremos nuevamente la Figura 80. Si consideramos que el eco es generado en el campo lejano respecto al radar, las señales 1 y 2 llegarían en forma paralela (o equivalentemente con un frente de onda plano) y formando un ángulo  $\theta$  con la vertical del plano del radar. Sea  $d_{12}$  la distancia entre las antenas 1 y 2. De la Figura 80 observamos que la diferencia de fase entre la señal recibida (del campo lejano o “*far field*”) en la antena 1 y la antena 2 es igual al segmento  $MH$ , donde  $H$  es el pie de la perpendicular trazada desde el vértice  $N$  a la recta que contiene los puntos  $M$  y  $H$ . Tenemos entonces que:

$$MH = d_{12} \sin(\theta) \quad (A.6)$$

Por lo tanto la diferencia de fase entre ambas señales queda definido como:

$$\mathcal{G} = -d_{12} \sin(\theta) \times \frac{2\pi}{\lambda} \quad (A.7)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda, de la señal recibida.

Despejando la ecuación A.7, tenemos que el ángulo de llegada ( $\theta$ ) de la señal (ángulo medido respecto a la vertical del plano del radar, línea  $LK$  en la Figura 80 es igual a:

$$\theta = \sin^{-1}\left(-\frac{\lambda}{2\pi d_{12}}\vartheta\right) \quad (\text{A.8})$$

Esta ecuación permite definir la ubicación del meteoro mediante el ángulo que forma la señal recibida con la vertical al plano del radar (línea  $LK$ ), en el plano formado por las antenas 1 y 2 (o equivalentemente en la dirección de la recta que une las antenas 1 y 2), y la señal recibida, debido a que la diferencia de fase entre estas señales es determinada de la fase de la correlación cruzada entre los canales 1 y 2. Un punto importante para determinar la ubicación del meteoro mediante interferometría es definir un sistema de coordenadas. Establecido este sistema los valores que determinados tendrán un signo dependiendo del sistema utilizado.

## APÉNDICE B: CÁLCULO DE PARAMETROS DEL METEORO DERIVADOS DE LA GEOMETRÍA DE LA TRAYECTORIA DEL METEORO DENTRO DEL HAZ DEL RADAR

Consideremos el esquema mostrado en la Figura 81, donde  $R_0$  representa el rango inicial del meteoro,  $\Delta R$  la variación en rango, las demás variables fueron definidas anteriormente en la Sección 5.2.3 “Cálculo de los principales parámetros del meteoro”.

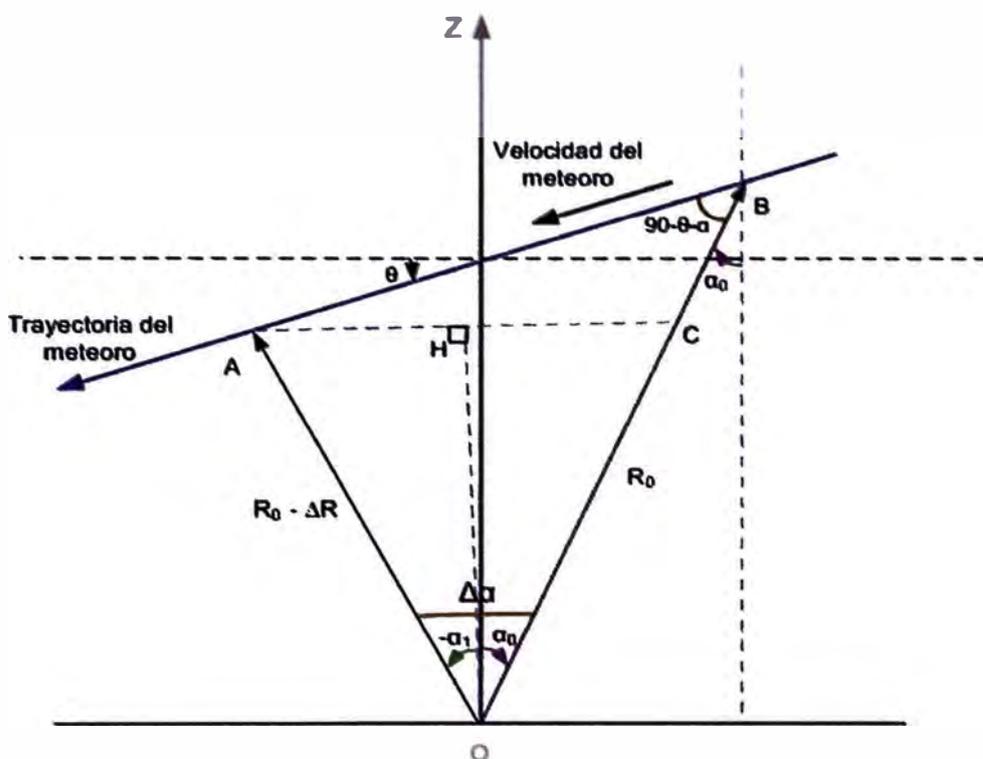


Figura 81 Esquema geométrico utilizado para calcular el ángulo de elevación, velocidad absoluta y aceleración absoluta del meteoro.

Consideremos el segmento  $\overline{OA} = \overline{OB}$ , tal que el segmento  $\overline{CB}$  representa la variación en rango ( $\Delta R$ ) para el meteoro detectado. Del esquema se puede observar que:

$$\angle ACB = 90 + \frac{\Delta\alpha}{2} \quad (\text{B.1})$$

$$\angle CAB = \theta - \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2} \quad (\text{B.2})$$

Aplicando la Ley de senos en el triángulo ABC, podemos establecer la siguiente relación:

$$\frac{\overline{CB}}{\sin(\theta - \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2})} = \frac{\overline{AC}}{\sin(90 - \theta - \alpha_0)} \quad (\text{B.3})$$

Donde  $\overline{AC} = 2(R_0 - \Delta R)\sin(\frac{\Delta\alpha}{2})$  y  $\overline{CB} = \Delta R$

Reemplazando estas expresiones en la ecuación (B.3), tenemos que:

$$\frac{\Delta R}{\sin(\theta - \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2})} = \frac{2(R_0 - \Delta R)\sin(\frac{\Delta\alpha}{2})}{\sin(90 - \theta - \alpha_0)}$$

Debido a que la cobertura angular promedio  $\Delta\alpha$  es pequeña, al igual que  $\alpha_0$  y  $\alpha_1$  (menores a  $1^\circ$ ), la ecuación anterior se simplifica a:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{\sin(\theta)} &\approx \frac{2(R_0 - \Delta R)(\frac{\Delta\alpha}{2})}{\sin(90 - \theta)} \\ \frac{\Delta R}{\sin(\theta)} &\approx \frac{(R_0 - \Delta R)(\Delta\alpha)}{\cos(\theta)} \\ \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)} &\approx \frac{\Delta R}{(R_0 - \Delta R)(\Delta\alpha)} \\ \tan(\theta) &\approx \frac{\Delta R}{(R_0 - \Delta R)(\Delta\alpha)} \quad (\text{B.4}) \end{aligned}$$

Además se puede realizar una aproximación adicional en los resultados sabiendo que  $R_0 \gg \Delta R$ , con lo cual se obtiene:

$$\tan(\theta) \approx \frac{\Delta R}{R_0 \Delta \alpha} \quad (\text{B.5})$$

$$\theta \approx \tan^{-1}\left(\frac{\Delta R}{R_0 \Delta \alpha}\right) \quad (\text{B.6})$$

Para determinar la velocidad absoluta, tengamos en cuenta que la velocidad que se determina por cualquier de las dos técnicas mencionadas anteriormente (ajuste del RTI o pulso a pulso), es la velocidad debido a la variación del rango determinado por el radar por lo tanto su dirección será radial. De la Figura 81 podemos notar que mientras la variación en rango sea  $\Delta R$ , el desplazamiento realizado sobre la recta  $\overline{AB}$  es igual a  $\Delta R / \sin \theta$  (ley de senos), es importante hacer notar que hemos considerado la aproximación para un ángulo de cobertura promedio pequeño. De esta forma:

$$v_r \approx \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (\text{B.7})$$

$$v_{ABS} \approx \frac{\frac{\Delta R}{\sin \theta}}{\Delta t} = \frac{\Delta R}{\Delta t \times \sin \theta}$$

Por lo tanto conociendo la velocidad radial, la velocidad absoluta queda determinada por la siguiente relación:

$$v_{ABS} \approx \frac{v_r}{\sin \theta} \quad (\text{B.8})$$

De una manera similar se determina la aceleración absoluta como:

$$a_{ABS} \approx a_r + \frac{v_{abs} \Delta \alpha \cos \theta}{\Delta t} \quad (\text{B.9})$$

El segundo término proviene de una aparente aceleración debido a la reducción del rango en función del tiempo en la trayectoria del meteoro.

# APÉNDICE C: PROPAGACION DE ERRORES EN EL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS DERIVADOS DE LA GEOMETRIA DE LA TRAYECTORIA DEL METEORO

La geometría utilizada para modelar el movimiento del meteoro dentro del haz de transmisión permite derivar tres parámetros para la caracterización del meteoro. Estos parámetros, ángulo de elevación, velocidad absoluta y aceleración absoluta, arrastran la incertidumbre contenida en las variables determinadas directamente. Por tal razón es importante estimar como se propagan estos errores en las variables inferidas, a fin de tener mayor confiabilidad en los parámetros estimados. A continuación se desarrolla un estudio teórico de la propagación de errores en estas variables.

## C.1 Análisis del Error en el Angulo de Elevación

La ecuación C.1 define en ángulo de elevación como una función del rango inicial, variación del rango y la cobertura angular

$$\tan(\theta) \approx \frac{\Delta R}{R_0 \Delta \alpha} \quad (\text{C.1})$$

Por esta razón la ecuación C.1 se puede escribir simbólicamente como:

$$\tan(\theta) \approx f(R_0, \Delta R, \Delta \alpha) \quad (\text{C.2})$$

El error en el ángulo de elevación ( $d\theta$ ) debido a las variables que definen este ángulo, se determina mediante la ecuación C.3:

$$\left| \frac{\partial \tan(\theta)}{\partial \theta} d\theta \right|^2 \approx \left| \frac{\partial f}{\partial R_0} dR_0 \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial (\Delta R)} d(\Delta R) \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial (\Delta \alpha)} d(\Delta \alpha) \right|^2 \quad (C.3)$$

Donde  $dR_0$ ,  $d(\Delta \alpha)$  y  $d(\Delta R)$  representan los errores para el rango inicial, cobertura angular y variación del rango respectivamente.

Reemplazando C.1 en la ecuación C.3 y desarrollando las derivadas parciales tenemos:

$$\begin{aligned} |\sec^2(\theta)d\theta|^2 &\approx \left| \frac{\Delta R}{R_0^2 \Delta \alpha} dR_0 \right|^2 + \left| \frac{1}{R_0 \Delta \alpha} d(\Delta R) \right|^2 + \left| \frac{\Delta R}{R_0 (\Delta \alpha)^2} d(\Delta \alpha) \right|^2 \\ d\theta &\approx \sqrt{\cos^4(\theta) \left[ \left| \frac{\Delta R}{R_0^2 \Delta \alpha} dR_0 \right|^2 + \left| \frac{1}{R_0 \Delta \alpha} d(\Delta R) \right|^2 + \left| \frac{\Delta R}{R_0 (\Delta \alpha)^2} d(\Delta \alpha) \right|^2 \right]} \quad (C.4) \end{aligned}$$

De la ecuación C.1 podemos despejar la variación en rango como función de las variables restantes. Reemplazando la variación en rango en la ecuación C.4 obtenemos la siguiente expresión para determinar el error en el ángulo de elevación.

$$\begin{aligned} d\theta &\approx \sqrt{\cos^4(\theta) \left[ \left| \frac{\tan(\theta)}{R_0} dR_0 \right|^2 + \left| \frac{1}{R_0 \Delta \alpha} d(\Delta R) \right|^2 + \left| \frac{\tan(\theta)}{\Delta \alpha} d(\Delta \alpha) \right|^2 \right]} \\ d\theta &\approx \sqrt{\left| \frac{\sin(\theta) \cos(\theta)}{R_0} dR_0 \right|^2 + \left| \frac{\cos^2(\theta)}{R_0 \Delta \alpha} d(\Delta R) \right|^2 + \left| \frac{\sin(\theta) \cos(\theta)}{\Delta \alpha} d(\Delta \alpha) \right|^2} \quad (C.5) \end{aligned}$$

El error del rango inicial y la variación en rango dependen del ancho del baudio ( $\Delta H$ ). Las ecuaciones C.6 y C.7 definen esta relación:

$$dR_0 = \frac{\Delta H}{2} \quad (C.6)$$

$$d(\Delta R) = \frac{\Delta H}{2} \sqrt{2} \quad (\text{C.7})$$

En los experimentos realizados los días 22 y 23 de Noviembre del 2005, el ancho del baudio utilizado fue de 0.15 km por lo tanto los errores del rango inicial y la variación en rango son 0.15 y 0.106 km respectivamente.

El error de la cobertura angular no se determina directamente. Por lo tanto se necesita inferir su valor a partir de las ecuaciones utilizadas para determinar la cobertura angular. La ecuación C.8 permite determinar la cobertura angular como función de la cobertura angular en el eje “x” y la cobertura angular en el eje “y”.

$$\Delta\alpha = \sqrt{(\alpha_x)^2 + (\alpha_y)^2} \quad (\text{C.8})$$

Consideremos que el meteoro se mueve en dirección paralela al eje “x”. Esta consideración permite simplificar la ecuación C.8 a una expresión más sencilla. La ecuación C.9 muestra el resultado de esta consideración.

$$\Delta\alpha = |\alpha_x| = |\alpha_{xf} - \alpha_{x0}| \quad (\text{C.9})$$

La cobertura angular en el eje “x” se define como la posición angular final menos la posición angular inicial. Siendo la posición angular ( $\alpha$ ) definida por la ecuación C.10

$$\sin \alpha = -\frac{\lambda \vartheta}{2\pi d} \quad (\text{C.10})$$

En la ecuación C.10,  $\vartheta$  es la fase diferencia de fase entre las señales recepcionadas por dos antenas (ver apéndice A),  $\lambda$  longitud de onda del radar,

$d$  distancia de separación entre las antenas de recepción. La ecuación C.11 define el error de la ubicación angular ( $d\alpha$ ) en función del error de la fase ( $d\vartheta$ ). Para el experimento de los días 22 y 23 de Noviembre del 2005 el valor de  $\lambda$  es 6 m, el valor de  $d$  es 147 m

$$d\alpha = \left| \frac{\lambda}{2\pi d \cos(\alpha)} d\vartheta \right| \quad (\text{C.11})$$

Woodman R.F y Hagfors T. (1965) definieron el error de la fase determinada de la correlación entre pares de antenas como:

$$d\vartheta = \sqrt{\frac{1}{2N} \times \frac{(1 + \frac{1}{SNR})^2 - |\rho_{12}|^2}{|\rho_{12}|^2}} \quad (\text{C.12})$$

Donde  $SNR$  es la relación señal a ruido para el meteoro detectado y  $\rho_{12}$  es la correlación normalizada entre las antenas utilizadas y  $N$  el número de antenas utilizadas para la correlación.

Por consiguiente, usando las ecuaciones C12 y C.11 el error de la posición angular queda determinado como función del SNR. La ecuación C.13 muestra el resultado de utilizar estas dos ecuaciones.

$$d\alpha = \left| \frac{\lambda}{2\pi d \cos(\alpha)} \times \sqrt{\frac{1}{2N} \times \frac{(1 + \frac{1}{SNR})^2 - |\rho_{12}|^2}{|\rho_{12}|^2}} \right| \quad (\text{C.13})$$

De la ecuación C.9 tenemos que el error de la cobertura angular es:

$$d(\Delta\alpha) = \sqrt{|d\alpha_{xf}|^2 + |d\alpha_{x0}|^2} \quad (C.14)$$

Por lo tanto usando la ecuación C.14 y C.13 definimos el error de la cobertura angular. Las Figuras 82 y 83 muestran el comportamiento del error del error en el ángulo de elevación como función del ángulo de elevación y el SNR

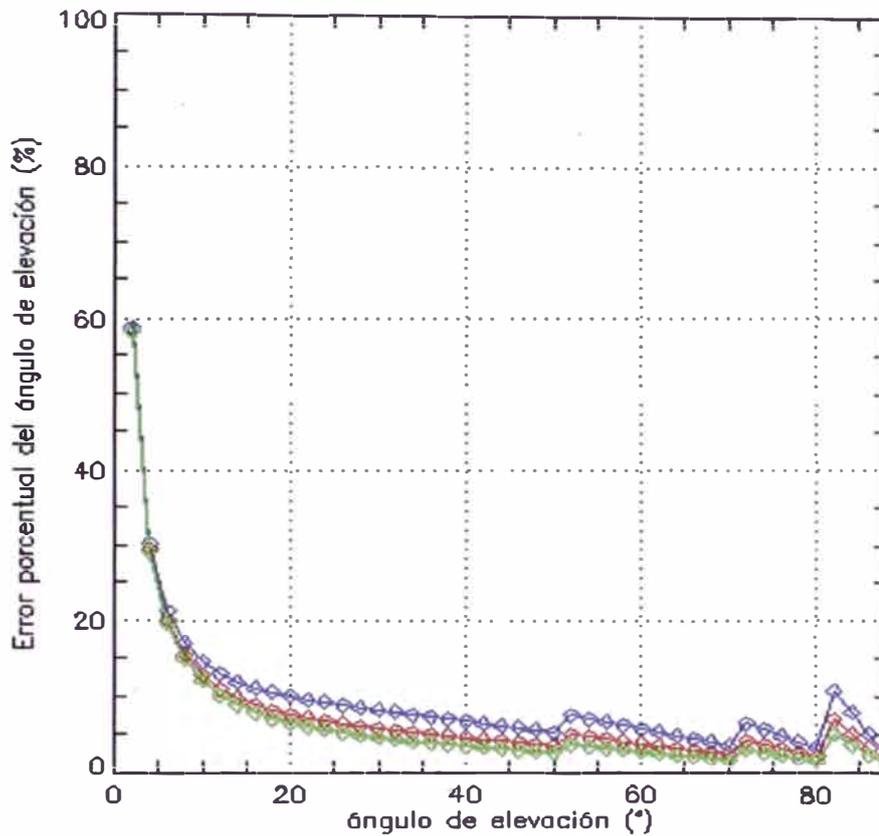


Figura 82 Comportamiento de la incertidumbre del ángulo de elevación como función del ángulo de elevación.

Los diferentes colores utilizados en la Figura 82 corresponden a distintos valores de SNR utilizados. El azul corresponde a 5 dB, rojo 10 dB, y verde 20 dB. Las discontinuidades observadas corresponden a distintos valores de cobertura angular utilizados dependiendo del ángulo de elevación. De la Figura 82 observamos que el error en el ángulo de elevación disminuye cuando el ángulo de elevación aumenta. Comportamiento similar se observa con el SNR.

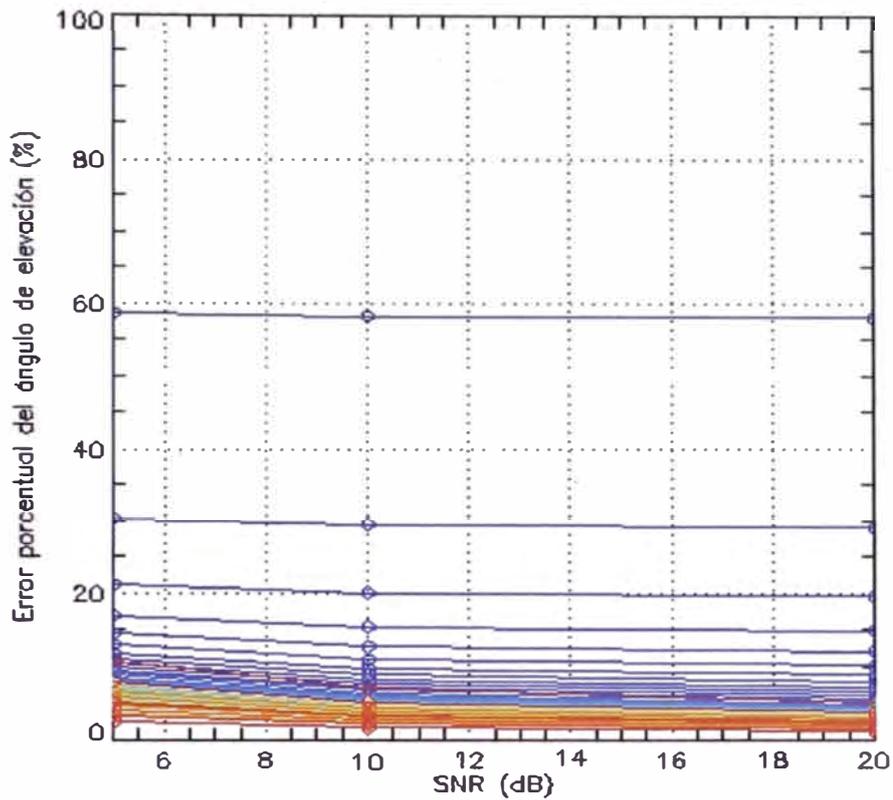


Figura 83 Comportamiento de la incertidumbre del ángulo de elevación como función del valor del SNR.

En la Figura 83 los diferentes colores corresponden a los diferentes valores de ángulo de elevación utilizados en el análisis. El azul oscuro corresponde al menor valor ( $0^\circ$ ) y el rojo al mayor valor ( $88^\circ$ ) utilizado en el análisis. Esta Figura muestra que el error tiende a disminuir cuando el SNR aumenta.

## C. 2 Análisis del Error en la Velocidad Absoluta

La ecuación C.15 define la velocidad absoluta,  $v$ , es la velocidad radial obtenida del ajuste lineal de los datos rango y tiempo,  $\theta$  es el ángulo de elevación.

$$v \approx \frac{v_r}{\sin(\theta)} \quad (\text{C.15})$$

El error se expresa matemáticamente como:

$$|dv|^2 \approx \left| \frac{\partial v}{\partial v_r} dv_r \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial \theta} d\theta \right|^2$$

$$dv \approx \sqrt{\left| \frac{1}{\sin(\theta)} dv_r \right|^2 + \left| \frac{v_r}{\sin^2(\theta)} \cos(\theta) d\theta \right|^2} \quad (C.16)$$

La variable  $dv_r$  representa el error obtenida en la estimación de la velocidad radial. Siendo la velocidad radial definida como:

$$v_r = -\frac{\lambda \vartheta}{4\pi\tau} \quad (C.17)$$

Donde  $\tau$  es el valor del IPP y  $\vartheta$  es la fase de la autocorrelación para un retraso de un IPP. De la ecuación C.17 tenemos por lo tanto que el error de la velocidad radial es:

$$dv_r = \left| \frac{\lambda}{4\pi\tau} d\vartheta \right| \quad (C.18)$$

El error de la fase queda definido por la ecuación C.12. Usando C.18 y C.16 tenemos que el error de la velocidad absoluta es:

$$dv \approx \sqrt{\left| \frac{\lambda}{4\pi\tau \sin(\theta)} dv_r \right|^2 + \left| \frac{v_r}{\sin^2(\theta)} \cos(\theta) d\theta \right|^2} \quad (C.19)$$

Las Figuras 84 y 85 muestran el comportamiento del error de la velocidad absoluta como función del ángulo de elevación y el SNR respectivamente.

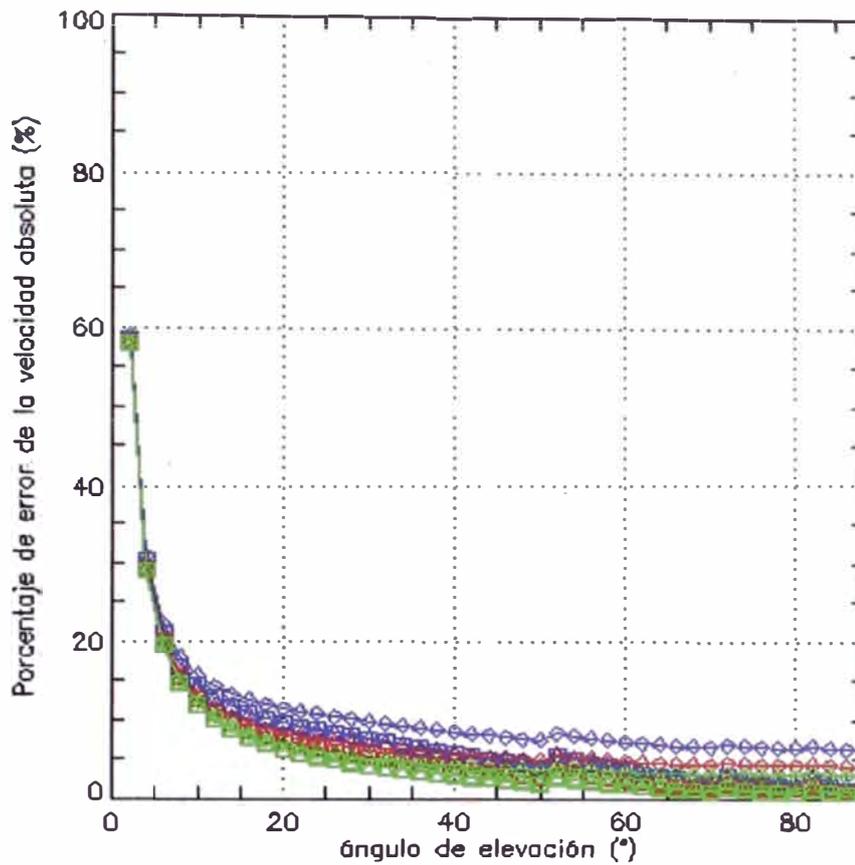


Figura 84 Comportamiento de la incertidumbre de la velocidad absoluta como función del ángulo de elevación

Los diferentes colores utilizados en la Figura 84 corresponden a distintos valores de SNR utilizados. El azul corresponde a 5 dB, rojo 10 dB, y verde 20 dB. Los distintos símbolos utilizados corresponden a distintas valores de velocidad utilizados. El Rombo corresponde a una velocidad radial de 10 km/s, el triángulo a 35 Km/s y cuadrado a 60 Km/s.

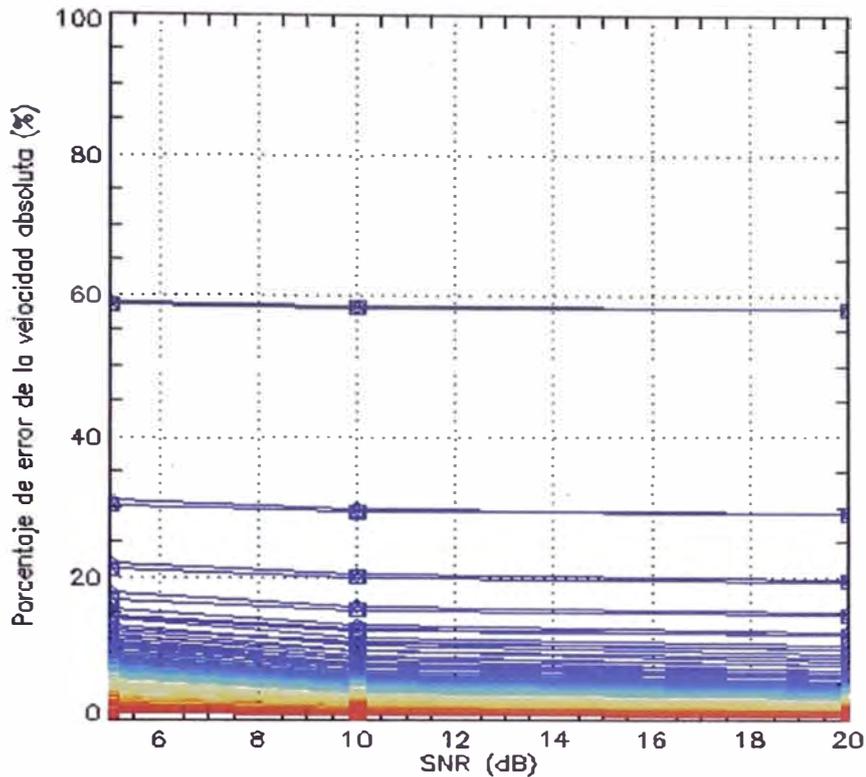


Figura 85 Comportamiento de la incertidumbre de la velocidad absoluta como función del SNR.

La Figura 84 muestra que el error tiende a disminuir conforme el valor del ángulo de elevación aumenta. Comportamiento similar muestra la Figura 85 disminuyendo el error conforme el valor del SNR aumenta.

### C.3 Análisis del Error en la Aceleración Absoluta

La ecuación C.20 define la aceleración absoluta,  $a$ , es la aceleración radial y  $\Delta t$  es la duración del meteoro.

$$a \approx a_r + \frac{v\Delta\alpha \cos(\theta)}{\Delta t} \quad (C.20)$$

La siguiente ecuación permite determinar el error en la aceleración absoluta:



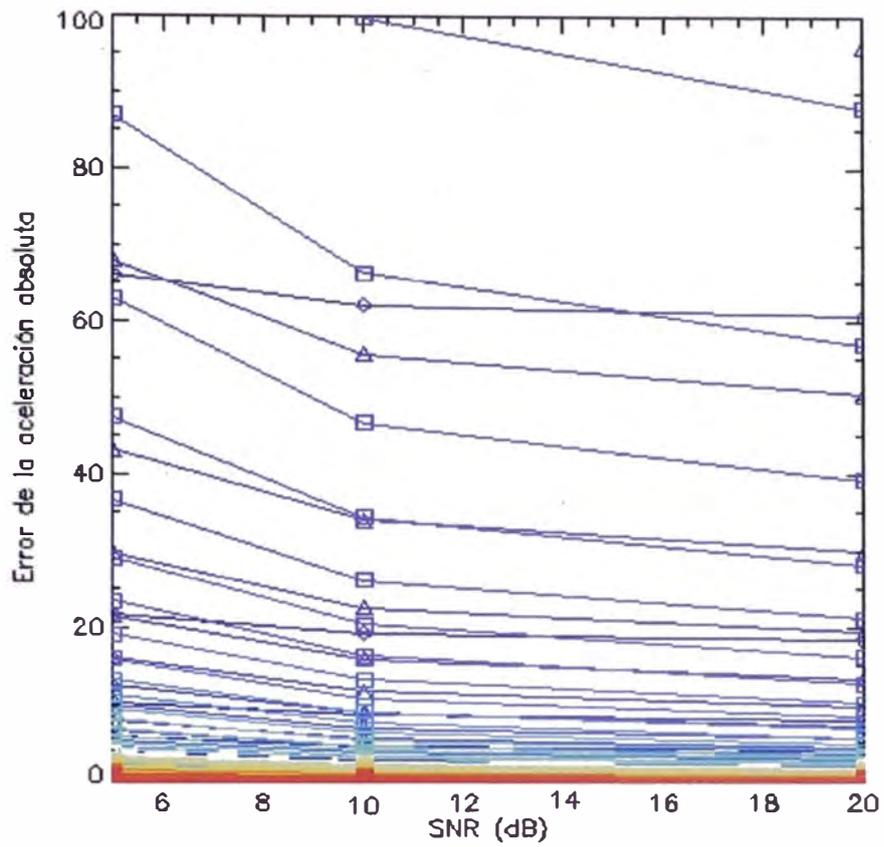


Figura 87 Comportamiento de la incertidumbre en la estimación de la aceleración absoluta como función del SNR (dB).

El error en la aceleración (ver Figura 86) disminuye conforme el ángulo de elevación aumenta, un comportamiento similar se observa en la Figura 87, el error en la aceleración absoluta disminuye al aumentar el SNR.

## BIBLIOGRAFÍA

Amez Guerrero A: *Patrón de Radiación y Posiciones de la Antena de Jicamarca*, Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico, 5-32, 1992.

Anderson D, Ángel A, Kiyohumi Y, Mutsumi I. y Kudeki E: *Estimating daytime vertical ExB drift velocities in the equatorial E-region using ground-based magnetometer observations*, Geophysical Research Letters, 29, 12, 2002.

Beech M. y Brown P: *Impact probabilities on artificial satellites for the 1993 Perseid meteoroid stream*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 262, L35-L36, 1993.

Beech M., Brown P. y Jones J: *The potencial Danger to space Platforms from meteor Storm Activity*, Q.J.R.astr.Soc, 36, I27-I52, 1995.

Berkowitz R.S.: *Modern Radar, analysis, evaluation, and system design*. John Wiley and Sons Inc., 3-11, 1965.

Brown P. y Rendtel J: *The Perseid Meteoroid Stream: Characterization of Recent Activity from Visual Observations*, Icarus, 124, 414-428, 1996.

Brown P: *The Leonid Meteor Shower: Historical Visual Observations*, Icarus, 138, 287-308, 1999.

Brown P., Jones J., Weryk R.J., y Campbell-Brown M.D: *The velocity distribution of meteoroids at the earth as measured by the Canadian meteor orbit radar (CMOR)*, Earth, moon, and Planets, 2005.

Campbell-Brown M.D y Jones J: *Annual Variation of sporadic radar meteor rates*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006.

Ceplecha Z, Borovicka J, Elford W.H, Revelle D, Hawkes R, Porubcan V y Simek M: *Meteor Phenomena and Bodies*, Space Science Reviews, 84, 327-471, 1998.

Chau J. y Woodman R: *Observations of meteor-head echoes using the Jicamarca 50Mhz radar in interferometer mode*, Atmospheric Chemistry and Physics, 4, 511-521, 2004.

Chau J., Woodman R. y Galindo F: *Sporadic meteors sources as observed by the Jicamarca high-power large-aperture VHF radar*, Icarus, submitted, 2006.

Chapin E. y Kudeki E: *Radar interferometric imaging studies of long-duration meteor echoes observed at Jicamarca*, Journal of Geophysical Research, 99, 8937-8949, 1994.

Close S, Oppenheim M, Hunt S, Dyrud L: *Scattering characteristics of high-resolution meteor head echoes detected at multiple frequencies*, Journal of Geophysical Research, 107, X1 – X13, 2002.

Close S. Hunt S.M, McKeen M, y Minardi M.J: *Characterization of Leonid meteor head echo data collected using the VHF – UHF Advanced Research Projects Agency Long – Range Tracking and Instrumentation RADAR (ALTAIR)*, Radio Science, 37, 2002a.

Close S, Oppenheim M, Durand D, Dyrud L: *A new method for determining meteoroid mass from head echo data*, Journal of Geophysical Research, 110, 2005.

Elford W.G: *Novel Applications of MST radars in meteors studies*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 63, 143-153, 2001.

Farley D.T, Ierkic H.M y Fejer B.G: *Radar interferometry: A new technique for studying plasma turbulence in the ionosphere*, Journal of Geophysical Research, 86, 1467-1472, 1981.

Farley D.T: *Theory of Equatorial Electrojet plasma waves: new developments and currents status*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 47, 729-744, 1985.

Galligan D.P. and Baggaley W. J: *The radiant distribution of AMOR radar meteors*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 359, 551-560, 2005.

Hildebrand P. H y Sekhon R. S: *Objective Determination of the Noise Level in Doppler Spectra*, Journal of Applied Meteorology, 13, 807-811, 1974.

Holdsworth D.A: *Angle of arrival estimation for all-ky interferometric meteor radar systems*, Radio Science, 40, RS6010, 2005.

Hunt S.M, Oppenheim M, Close S, Brown P.G, McKeen F, Minardi M: *Determination of the meteoroid velocity distribution at the Earth using high-gain radar*, Icarus, 2003.

Janches D, Mathews J.D, Meisel D.D y Zhou Q.H: *Micrometeor observations using the Arecibo 430MHz radar. Determination of the ballistic parameter from measured Doppler velocity and deceleration results*, Icarus, 145, 53-63, 2000.

Janches D, Nolan M, Meisel D, Mathews D, Zhou Q.H y Moser D: *On the geocentric micrometeor velocity distribution*, Journal of Geophysical Research, 105, 2003.

Jenniskens P: *On the dynamics of meteoroid streams*, Earth Planets Space, 50, 555-567, 1998.

Jenniskens P., Wilson M.A., Packan D., Laux C., Kruger C., Boyd I.D., Popova O., y Fonda M: *Meteors: A delivery mechanism of organic matter to the early earth*, 2000.

Jones J. y Brown P: *Sporadic meteor radiant distributions: orbital survey results*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 265, 524-532, 1993.

Jones J. y Campbell-Brown M.D: *The initial train radius of sporadic meteors*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 359, 1131-1136, 2005.

Kudeki E: *Backscatter radar remote sensing*, Class Notes, University of Illinois at Urbana-Champaign, 15-24, 1999.

Mathews J.D: *Radio Science issues surrounding HF/VHF/UHF radar meteor studies*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66, 285-299, 2004.

Murad E: *Physics and Chemistry of Meteoroids in the Upper Atmosphere*, Proceedings of the Meteoroids 2001 Conference, 2001.

Ochs G.R: *The large 50Mc/s dipole array at Jicamarca Radar Observatory*, National Bureau of Standards Report, 1965.

Oppenheim A. y Schafer R: *Tratamiento de señales en tiempo Discreto*, 2da Edición, Prentice Hall Iberia, 141-155, 2000.

Oppenheim M., Dyrud L., Close S. y Hunt S: *Theory and Simulation of Field-Aligned Irregularities in meteor trails*, 2001.

Proakis J. y Manolakis D: *Introduction to digital signal processing*, Macmillan Publishing Company, 23-31, 1988.

Perrygo C: *Meteor Flux variation with surface pointing direction*, NGST System Engineering, 2001.

Richmond A.D: *Ionospheric wind dynamo theory: A review*, J. Geomag. Geoelectr., 31, 287-310, 1979.

Sato T, Nakamura T y Nishimura K: *Orbit determination of meteors using the MU radar*, IEICE Trans. Commun., E83-B, 1990-1995, 2000.

Smith S: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal processing*, Second Edition, California Technical Publishing, 107-122; 261-274, 1999.

Skolnik: *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1970.

Thourel L: *The antenna*, John Wiley and Sons, 2-3, 1960.

Wehner D.R: *High Resolution Radar*, Artech House, Inc, 1987.

Wen C.H, Doherty J.F. y Mathews J.C: *Adaptive filtering for the separation of incoherent scatter and meteor signals for Arecibo observation data*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67, 1190-1195, 2005.

Wen C.H, Doherty J.F., Mathews J.C and Janches D: *Meteor detection and non-periodic bursty interference removal for Arecibo data*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67, 257-281, 2005a.

Woodman R.F: *MST and ST Radars and Wind Profiles*, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 1825-1832, 2002.

Información en internet:

Patrón de Radiación de la Antena de Jicamarca:

[http://jro.igp.gob.pe/programs/Over\\_JRO/html/over\\_jro.htm](http://jro.igp.gob.pe/programs/Over_JRO/html/over_jro.htm)