



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ingeniería

Tesis para obtener el grado académico de
Doctor en Ingeniería

ESTUDIO Y VALIDACIÓN DE MEDICIONES DE PRESIÓN DE
VAPOR DE AGUA INTEGRADO EN LA ATMÓSFERA

Epeloa Javier Eduardo

Director: Amalia Margarita Meza
Coodirector: José Alberto Bava

A mis seres queridos, por su incondicional apoyo en todos los momentos de mi vida.

Prefacio

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. La misma contiene los resultados de los estudios desarrollados bajo la dirección de la Dra. Amalia Margarita Meza, la codirección del Dr. José Alberto Bava y la colaboración del grupo TRIACLE perteneciente a la Facultad de Astronomía y Ciencias Geofísicas de la Ciudad de La Plata.

Epeloa Javier Eduardo.
e-mail: jepeloa@gmail.com
Sitio Web: <http://www.ing.unlp.edu.ar>
La Plata, Enero de 2015.

Agradecimientos

A mis directores, Amalia M. Meza y José Alberto Bava, por su dedicación, paciencia y esfuerzo por hacer que mi trabajo sea cada día mejor.

Al grupo TRIACLE, por su buena onda de todos los días, por tener siempre un mate listo, por brindarme un espacio en el que me siento a gusto de trabajar.

A mi novia, por empujarme a lo largo de estos años a seguir adelante, sin importar lo difícil que parezca.

Resumen

La medición de vapor de agua tiene una importancia fundamental desde un punto de vista climatológico. Este gas es tanto un síntoma como una causa del efecto invernadero. Su medición resulta fundamental para la creación de modelos climáticos realistas, y para el estudio del comportamiento climático global.

Esta tesis pretende realizar un aporte a la medición de este parámetro, utilizando diferentes técnicas, como radiosondeos, posicionamiento global (GPS), y radiómetros de vapor de agua ubicados en satélites. Los resultados permiten estimar vapor de agua integrado (IPWV) desde distintas técnicas, resultando un importante aporte principalmente en regiones donde actualmente no se dispone de este dato.

Originalidad

Las ideas, desarrollos, y resultados obtenidos son originales del autor y del director de la Tesis, salvo explícita mención.

Índice general

Prefacio	v
Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Originalidad	xi
1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Contenidos	2
2. Generalidades	5
2.1. La atmósfera terrestre	5
2.2. El vapor de agua	9
2.3. Mediciones Meteorológicas Directas	10
2.3.1. Estaciones meteorológicas	10
2.3.2. Radiosondas	11
2.4. Mediciones Meteorológicas Remotas, o Sistemas de Teledetección	12
2.4.1. Procesamiento de la información en teledetección	14
2.5. Instrumentos de teledetección	15
2.5.1. El radiómetro de microondas	15
2.5.2. La técnica de Radio-ocultación	15
2.5.3. El Sistema de Posicionamiento Global GPS	16
3. Medición de vapor de agua utilizando radiosondas	19
3.1. La radiosonda y su utilización para medir IPWV	19
3.2. Cálculo del vapor de agua a partir de perfiles de radiosondeo	21
3.3. Integral de vapor de agua	24
3.4. Determinación de la incertidumbre en la estimación del IPWV	24
3.5. Determinación de la constante de respuesta de los sensores de radiosondas	29
3.5.1. Constante de respuesta del sensor de temperatura	29
3.5.2. Variación de la constante de respuesta con la altura, efecto en el sensor de temperatura	31
3.5.3. Constante de respuesta del sensor de humedad	32
3.6. Determinación de la altura utilizando mediciones de presión absoluta, su efecto en la estimación del IPWV	33

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo	35
4.1. Necesidad de un instrumento de radiosondeo de diseño nacional	35
4.2. Selección de sensores para el equipo de radiosondeo	36
4.2.1. Sensor de temperatura y humedad	37
4.2.2. Sensor de presión	38
4.3. Diseño electrónico del equipo de radiosondeo	40
4.3.1. Lectura del sensor de temperatura y humedad	42
4.3.2. Lectura del sensor de presión	44
4.4. Ensayos de validación de la etapa instrumental	45
4.4.1. Estación meteorológica	45
4.4.2. Resultados de la validación de los sensores	47
4.4.3. Ensayo del equipamiento instrumental, "Experiencia Centenario"	53
4.5. Diseño del enlace de Radiofrecuencia del equipo de radiosondeo	56
4.5.1. Sistemas embebidos de radiofrecuencia	57
4.5.2. Cálculo del enlace de Radiofrecuencia	58
4.6. Ensayo del módulo de radiofrecuencia	58
4.7. Construcción de una antena tipo YAGUI-UDA	61
4.8. Prototipo de Radiosonda Construido	63
4.9. Validación de los prototipos de radiosondeo	65
5. Medición de vapor de agua utilizando la Señal de posicionamiento global GPS	71
5.1. Retardo troposférico de la señal GPS	71
5.2. El factor de conversión Π	72
5.3. Incertidumbre en la determinación de IPWV desde la técnica GPS	72
5.3.1. La temperatura media de la atmósfera	73
5.4. Comparación de la estimación de IPWV con GPS frente a radiosondeos	76
5.4.1. Selección de estaciones de radiosondeo y GPS	76
5.4.2. Procesamiento y descarga de los datos	79
5.5. Resultados de la comparación entre técnicas	81
5.5.1. Resultados por año	82
5.5.2. Resultados de la comparación agrupando años	84
6. Medición de variables físicas en la atmósfera mediante técnicas de radiometría	87
6.1. La Radiometría	87
6.1.1. La temperatura equivalente de brillo	88
6.1.2. Temperatura de antena	89
6.1.3. La polarización	91
6.2. Esquema elemental de un radiómetro	92
6.3. La atmósfera en teledetección de microondas	93
6.4. Temperatura aparente de brillo observada por un radiómetro en órbita	96
6.4.1. Modelo de ajuste propuesto para obtener IPWV sobre tierra a partir de mediciones de temperatura de brillo	98
7. Estimación de IPWV utilizando el instrumento MWR del Satélite Argentino SACD/Aquarius	101
7.1. El instrumento MWR	101
7.1.1. Rango de medición de temperatura de brillo del instrumento MWR	102
7.2. Distribución Geométrica de los sensores del MWR	105

7.3. Datos del instrumento MWR	106
7.4. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de radiosondadores	109
7.4.1. Resultados de la calibración del MWR utilizando radiosondas	112
7.5. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de la red Suominet-GPS	116
7.5.1. Resultados de la calibración del MWR utilizando la red Suominet-GPS	117
8. Conclusiones y trabajos a futuro	125
8.1. Instrumentos desarrollados	125
8.1.1. Estación meteorológica	125
8.1.2. Carga de Aplicación	126
8.1.3. Prototipo de radiosonda	126
8.2. Estimación de IPWV desde diferentes técnicas	127
8.2.1. Estimación de IPWV utilizando datos de posicionamiento global GPS	127
8.2.2. Estimación de IPWV en tierra con datos del instrumento MWR del SACD/Aquarius	127
A. Modelo Térmico del equipo de radiosondeo	129
B. Trabajo Publicado IEEEExplore	131
C. Software de descarga de Datos de Radiosondeo y comparación con GPS	137
D. Software de descarga y procesamiento de Datos del SACD/aquarius	165
E. Hojas de datos de sensores utilizados y radiosonda Vaisala	181

Índice de figuras

2.1. Constituyentes fundamentales en función de la altura. Fuente: The Solar-Terrestrial Environment An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere	7
2.2. Distribución promedio de vientos. Fuente COSPAR international reference atmosphere 1972 / compiled by the Committee for the COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA) of COSPAR Working Group 4.	7
2.3. Corriente en chorro vista desde la Estación Espacial Internacional. Fuente NASA.	8
2.4. Globos utilizados para transportar explosivos utilizando las corrientes en chorro	8
2.5. Distribución de sensores de una estación meteorológica típica	10
2.6. Diagrama termodinámico de Stüve. Fuente: Meteorología aplicada a la aviación. Manuel Ledesma - Gabriel Baleriola Editorial Paraninfo	12
2.7. Sistema de radiosondeo atmosférico	13
2.8. Técnica de radio-ocultación.	16
2.9. Estaciones de control GPS. Fuente NASA; http://visibleearth.nasa.gov/	17
3.1. Radiosondador Vaisala RS92™.	20
3.2. Radiosondador Viz Sippican™.	20
3.3. Hoja técnica de globos meteorológicos marca TOTEX™ utilizados comúnmente en radiosondas	21
3.4. Lanzamiento de Radiosonda donde se observa el devanador, y el paracaídas en color rojo.	22
3.5. Curvas de estados del agua.	23
3.6. Perfil de Radiosondeo de la estación SOCA	26
3.7. Valores de IPWV absolutos Estación SCCI, y dispersión de las mediciones	27
3.8. Error relativo estación SCCI	27
3.9. Valores de IPWV absolutos Estación SAEZ, y dispersión de las mediciones	27
3.10. Error relativo estación SAEZ	27
3.11. Valores de IPWV absolutos Estacion IMBT, y dispersión de las mediciones	28
3.12. Error relativo estación IMBT	28
3.13. Valores de IPWV absolutos Estación SOCA, y dispersión de las mediciones	28
3.14. Error relativo estación SOCA	28
3.15. Efecto de la variación de presión sobre la constante de retardo del sensor de temperatura	32
4.1. Radiosondeos públicos disponibles para la región de Sudamérica	36
4.2. Incertidumbre y rango de medición de los sensores SHT 71™ y SHT75™. Fuente: www.sensirion.com	37
4.3. Dimensiones físicas de los sensores SHT71™ y SHT75™. Fuente: www.sensirion.com	38
4.4. Sensor MPL115A2	38

4.5. Diagrama de bloques interno del sensor de presión absoluta MPL115A2. Fuente: www.freescale.com	39
4.6. Diagrama en bloques del sistema de radiosondeo	40
4.7. Módulo GPS Lassen Sky II	41
4.8. Circuito electrónico, sección instrumental del equipo	42
4.9. Señal de inicio de lectura, sensor SHT75™. Fuente: www.sensirion.com	42
4.10. Secuencias de comandos, sensor SHT75™. Fuente: www.sensirion.com	43
4.11. Secuencia de lectura completa, sensor SHT75™. Fuente: www.sensirion.com	43
4.12. Diagrama de flujo de lectura, sensor MPL115A2	45
4.13. Prototipo construido de una estación meteorológica portátil	46
4.14. Prototipo en funcionamiento	46
4.15. Capsula protectora del sensor de temperatura y humedad	47
4.16. Prototipo instalado en el abrigo meteorológico donde se encuentra la estación Vaisala™	48
4.17. Curvas de temperatura medida: en azul temperatura medida por el prototipo y en rojo temperatura medida por la estación meteorológica Vaisala™	48
4.18. Diferencias de temperatura entre el Prototipo y la estación meteorológica Vaisala™	49
4.19. Curvas de humedad medida: en azul humedad medida por el prototipo y en rojo humedad medida por la estación meteorológica Vaisala™	49
4.20. Diferencias de humedad entre el Prototipo y la estación meteorológica Vaisala™	50
4.21. Curvas de presión medida: en azul presión medida por el prototipo y en rojo presión medida por la estación meteorológica Vaisala™	50
4.22. Diferencias de presión entre el Prototipo y la estación meteorológica Vaisala™	51
4.23. Carga de aplicación desarrollada para el ensayo de instrumental meteorológico en un vector de lanzamiento	53
4.24. Placa de la carga de aplicación desarrollada	54
4.25. Instrumento montado sobre el módulo de experimentos	54
4.26. Lanzamiento y separación de la ojiva del Vector	55
4.27. Cohete centenario al momento del despegue	55
4.28. Datos recuperados de la experiencia, a)-medición de temperatura, b)-medición de humedad.	56
4.29. Distancia máxima del enlace de RF	57
4.30. Módulo Xbee Pro 868™	57
4.31. Conexión de los módulos para la experiencia	59
4.32. Antena doble helice cuadrifilar desarrollada	59
4.33. Transmisor	59
4.34. Perfil del terreno	59
4.35. Esquema de construcción de una antena YAGUI-UDA	61
4.36. Simulación del diagrama de irradiación con FEKO™	62
4.37. Prototipo de la antena YAGUI-UDA para la frecuencia de 868Mhz	62
4.38. Prototipo de radiosondador	63
4.39. Prototipo de radiosondador	63
4.40. Prototipo de radiosondador por dentro	64
4.41. Placa de circuito impreso construida	65
4.42. Grupo de Trabajo momentos antes de lanzamiento	66
4.43. Curva de temperatura medida: en azul radiosonda Vailsala™ y en rojo prototipo de radiosonda	66

4.44. Curva de humedad medida: en azul radiosonda Vailsala™ y en rojo prototipo de radiosonda	67
4.45. Curva de presión medida: en azul radiosonda Vailsala™ y en rojo prototipo de radiosonda	67
4.46. Diferencia de temperatura entre radiosonda Prototipo y Vaisala™)	68
4.47. Diferencia de humedad entre radiosonda Prototipo y Vaisala™	68
4.48. Diferencias de presión entre radiosonda Prototipo y Vaisala™	69
5.1. Ajuste de T_m en la estación SAEZ, EZEIZA. Año 2007	74
5.2. Estaciones de radiosondeo (verde) y GPS(rojo) disponibles en la región de Sudamérica	77
5.3. Pares de estaciones GPS-Radiosondeo Seleccionadas	78
5.4. Diagrama de flujo del procesamiento Datos Meteorológicos	80
5.5. Diagrama de flujo de Descarga y comparación del IPWV con radiosondeo frente a GPS	81
5.6. Resultados estación MSCG	82
5.7. Resultados estación POVE	82
5.8. Resultados estación POLI	82
5.9. Resultados estación PEPE	82
5.10. Resultados estación IGM1	83
5.11. Resultados estación BOGT	83
5.12. Resultados estación BELE	83
5.13. Resultados estación FALK	83
5.14. Resultados estación IMBT	83
5.15. Resultados estación BOMJ	83
5.16. Resultados estación BDOS	84
5.17. Resultados estación POAL	84
5.18. Valores Promedio y desviación estándar para las estaciones en los 5 años de comparación	85
5.19. Diferencia entre técnicas (RAD-GPS) en funcion del IPWV medido. La curva negra representa el ajuste de la nube de puntos azules.	85
5.20. Error relativo entre técnicas (RAD-GPS) en funcion del IPWV medido. La curva negra representa el ajuste de la nube de puntos azules.	86
6.1. Superficie a una temperatura real T, con una temperatura de brillo equivalente T_b	89
6.2. Antena colocada en una cámara que simula un cuerpo a una temperatura T y su circuito equivalente. Fuente: Antenas Para Radiómetros En Ondas Milimetrica Con Haces Múltiples. Bava J.A.	90
6.3. Esquema en bloques elemental de un radiómetro	92
6.4. Bocina corrugada de microondas en la frecuencia de 36.5Ghz	93
6.5. Atenuación debida a los gases en la atmósfera. En rojo el aire húmedo, en azul aire seco. Fuente:Recomendación UIT P.676-7	94
6.6. Primeros picos de absorción del H2O.Fuente:Recomendación UIT P.676-7	95
6.7. Aportes de la señal vistos por un instrumento en órbita, considerando atmósfera de una sola capa libre de nubes. Adaptado de:Antenas Para Radiómetros En Ondas Milimetrica Con Haces Múltiples. Bava J.A.	97

7.1. Diagrama esquemático MWR-SACD. Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009	102
7.2. Referencia de calibración fría. Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009	103
7.3. Función de transferencia del radiómetro MWR. Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009	104
7.4. Valor de las cuentas del diodo de ruido para cada medición. Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009	104
7.5. Distribución Geométrica de los sensores. Fuente: Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009	105
7.6. Diagrama de tiempo de medición de las bocinas. Fuente CONAE	105
7.7. Distribución de los instrumentos de SACD-Aquarius. Fuente CONAE	106
7.8. Temperaturas de brillo en la frecuencia de 23.8 Ghz sobre el planeta Tierra	107
7.9. Concentración de vapor de agua sobre el Planeta Tierra	107
7.10. Órbita 87	107
7.11. Órbita 88	107
7.12. Órbita 89	108
7.13. Órbita 90	108
7.14. Efecto de la calibración de fondo de brillo en la traza del satélite	108
7.15. Recorrido de los haces para las horas 12 UTC en negro y 0UTC en blanco, en un rango de +-30minutos	110
7.16. Estaciones de radiosondeo seleccionadas sobre Norteamérica	110
7.17. Diagrama esquemático del procesamiento	111
7.18. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72215	112
7.19. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72235	113
7.20. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72340	113
7.21. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72249	114
7.22. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72248	114
7.23. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72317	115
7.24. Estaciones seleccionadas de la red Suominet para la calibración de los datos del MWR	116
7.25. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación BNFY117	
7.26. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación LSUA118	
7.27. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación AL30118	
7.28. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación SHRV119	
7.29. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación TXDA119	
7.30. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación TXDE120	
7.31. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación ARHP120	

- 7.32. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación MBOX121
- 7.33. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación COVG121
- 7.34. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación TXPA122

Índice de tablas

2.1. División en capas del modelo ISA	6
3.1. Coordenadas de las Estaciones de Radiosondeo seleccionadas para estimar la incertidumbre en el IPWV	25
4.1. Requerimientos de los sensores	36
4.2. Validación entre las mediciones de la estación meteorológica Prototipo y la de referencia Vaisala™	51
4.3. Mediciones del enlace de RF	60
4.4. Dimensiones de la antena YAGUI-UDA para la frecuencia de 868Mhz	61
4.5. Validación entre Prototipo de radiosonda y radiosonda Vaisala™	65
4.6. Estimación del vapor de agua, con los datos del radiosondeo Vaisala™, con la integral del perfil, y con los datos del prototipo	69
5.1. Estaciones GPS-Radiosondeo Seleccionadas	79
7.1. Coordenadas de las Estaciones de Radiosondeo	111
7.2. Constantes de calibración para cada estación a partir de datos de la técnica de radiosondeo	115
7.3. Coordenadas de las Estaciones GPS	117
7.4. Constantes de calibración para cada estación a partir de datos de la técnica GPS123	

Capítulo 1

Introducción

El estudio de la atmósfera terrestre en sus diferentes capas o estratos resulta muy importante para comprender y predecir el comportamiento del clima. Los distintos gases que conforman la atmósfera participan en diferentes roles dentro del ecosistema terrestre, favoreciendo o no el desarrollo de fenómenos que pueden ir desde una leve brisa hasta tornados o huracanes.

La atmósfera terrestre es un sistema complejo donde los gases que la integran interactúan entre sí. Sus constituyentes fundamentales presentan una concentración que varía dependiendo de la altura de observación.

En las capas más bajas de la atmósfera se encuentra el gas de vapor de agua, que representa un componente clave en la determinación y predicción de los cambios climáticos. Este gas es tanto un síntoma como una causa del efecto invernadero. [1]

El agua continuamente se evapora y condensa transportando calor alrededor de la Tierra y entre la superficie y la atmósfera. Entender el comportamiento del vapor de agua es de vital importancia para la formulación de modelos climáticos realistas.[1], [2].

Existen actualmente numerosas técnicas que permiten obtener el valor de este gas, entre las más conocidas pueden citarse los radiosondeos utilizando globos meteorológicos, las técnicas satelitales empleando la señal de posicionamiento global (GPS) [3], los radiómetros de vapor de agua [4], y la radio-ocultación [5]. Tanto los radiosondadores, como la radio-ocultación son las únicas técnicas que permiten medir perfiles de vapor de agua, mientras que las otras estiman el parámetro integrado de vapor de agua precipitable (Integrated Precipitable Water Vapor-IPWV).

Esta tesis tiene como objetivo determinar la concentración del IPWV en la atmósfera, utilizando instrumental meteorológico desarrollado específicamente, y técnicas satelitales como GPS, y radiómetros de vapor de agua, que permiten estimar este gas en regiones donde no se dispone de este dato.

Los radiosondadores son los únicos instrumentos que miden in-situ las variables físicas de la atmósfera necesarias para estimar el vapor de agua. Estos dispositivos se elevan utilizando globos, y permiten confeccionar perfiles de temperatura, humedad relativa y presión entre otras variables.

Debido a la escasez de estimaciones de IPWV en Argentina, se planteó la necesidad de desarrollar un equipo de radiosondeo y una estación meteorológica. Ambos instrumentos representan una alternativa nacional a equipos importados de costo elevado y difícil acceso.

Utilizando las mediciones de IPWV de radiosondadores, fue realizada una comparación con los datos de IPWV obtenidos mediante GPS en la región de Sudamérica. Esto permitió comprobar la calidad de las estimaciones de IPWV con esta técnica. Este trabajo fue realizado en conjunto con la Lic. Clara Bianchi, quien fue la encargada de procesar la red GPS para

obtener los retardos troposféricos necesarios para la estimación del IPWV.

En el último capítulo de esta tesis, se emplean los datos de temperatura de brillo provistos por el radiómetro de microondas (MWR) del satélite SACD/Aquarius, efectuándose una calibración que permite estimar vapor de agua sobre tierra en regiones acotadas. Esto resulta uno de los aspectos innovadores de este trabajo, ya que se utiliza un instrumento que actualmente mide sobre mar, para obtener estimaciones de IPWV en tierra. Esta tesis combina la investigación y el desarrollo tecnológico con la investigación básica, presentado aportes innovadores a la estimación del IPWV.

1.1. Objetivo General

El objetivo general de esta tesis es obtener mediciones de vapor de agua integrado (IPWV) en la atmósfera terrestre utilizando diferentes técnicas de medición, implementando software para la interpretación de los datos y desarrollando instrumental meteorológico específico para la estimación de este gas.

1.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta tesis pueden resumirse en los siguientes items:

- Desarrollo de una estación meteorológica portátil, validación de mediciones.
- Diseño de un equipo de Radiosondeo para la obtención del IPWV.
- Cálculo del IPWV a partir de datos de radiosondeo, desarrollo de software específico.
- Estudio de los errores en la estimación del IPWV, a partir de datos de radiosondeo.
- Comparación de la técnica de medición GPS, implementación de software específico.
- Calibración del Instrumento MWR a bordo del Satélite Argentino SACD/Aquarius para obtener mediciones de IPWV sobre tierra, desarrollo de software específico.

1.3. Contenidos

Los contenidos de esta tesis se dividen en 8 Capítulos donde se abordan las diferentes temáticas de investigación básica y aplicada que integran este manuscrito

El Capítulo 2 presenta las diferentes técnicas de medición más utilizadas en la atmósfera terrestre. Se detallan las estaciones meteorológicas y los radiosondeos como las técnicas clásicas de medición in-situ, para luego abordar las mediciones con sistemas de teledetección como el radiómetro de microondas, la radio-ocultación y la señal de posicionamiento global GPS.

El Capítulo 3 desarrolla la técnica de medición del IPWV a partir de instrumentos de radiosondeo, mostrando las ecuaciones y errores para el cálculo de este parámetro.

En el Capítulo 4 se muestran los pasos seguidos para el desarrollo, construcción y validación de un equipo de radiosondeo. El desarrollo de este instrumento, permitió también implementar una estación meteorológica portátil, cuyas mediciones fueron comparadas con

la estación meteorológica de la Ciudad de La Plata. Ambos instrumentos se construyeron con el propósito de obtener las variables físicas necesarias para la estimación del IPWV.

El Capítulo 5 aborda la medición del IPWV con la técnica GPS. Se realiza una breve descripción de la técnica desde el punto de vista de los retardos troposféricos calculados, para luego validar en la región de Sudamérica los resultados, comparándolos con las estimaciones de radiosondeos.

En los Capítulos 6 y 7 se aborda la medición de IPWV desde la técnica de radiometría satelital, mostrando los modelos semi-empíricos utilizados para calibrar en tierra el radiómetro de microondas MWR del satélite SACD/Aquarius.

En el Capítulo 8 se describen las conclusiones de esta tesis doctoral, y los trabajos que se están desarrollando y se preveen realizar continuando las líneas de investigación de esta tesis.

Capítulo 2

Generalidades

2.1. La atmósfera terrestre

La atmósfera es la región gaseosa que recubre el planeta tierra en su capa más externa. Presenta características extraordinarias que permiten la vida en el planeta. Sirve como escudo protector de las radiaciones letales ultravioletas provenientes del sol, y permite mantener la temperatura regulada sobre la superficie terrestre. Las características actuales de la atmósfera surgen de millones de años de evolución y fueron afectadas por diferentes eventos.

El desarrollo de la vida estuvo restringido desde sus principios y por casi 2000 millones de años a los océanos. El fitoplacton mediante la fotosíntesis fue el principal responsable del aporte de oxígeno (O₂) y permitió posteriormente el desarrollo de organismos sobre la superficie terrestre [6]. La actividad volcánica de la tierra también modificó en gran parte la composición de la atmósfera, aportando emanaciones de gases como el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂) y en menor medida dióxidos de sulfuro (SO₂) [7].

La composición actual de la atmósfera fue y es modificada continuamente por los seres vivos que habitan la tierra, el desarrollo tecnológico de las últimas décadas ha provocado el aumento en las emanaciones de dióxido de carbono, lo que es objeto actual de estudio.

La atmósfera terrestre esta formada por numerosos gases, estableciendo un sistema en un complejo equilibrio. Todos los constituyentes que conforman los estratos de la atmósfera, tienen distintos roles en el ecosistema y producen efectos que pueden ser analizados por separado.

Existen varios modelos que permiten estudiar la atmósfera, los hay de gran complejidad en los que se puede determinar las variables en función de grillas geográficas de gran precisión, y modelos promedios globales, que caracterizan un comportamiento estándar de la atmósfera.

Entre los modelos grillados de asimilacion pueden citarse el ERA-Interim [8], con resoluciones espaciales de 80 Km con 60 niveles verticales desde la superficie hasta presiones de 0.1hpa y NCEP-NCAR R1 [9] entre muchos otros. Estos modelos se basan en datos observacionales de numerosas bases de datos mundiales para obtener las diferentes estimaciones de los parámetros que ofrecen.

Entre los modelos de comportamiento medio, uno ámpliamente utilizado es la Atmósfera Internacional Estándar (International Standart Atmosphere-ISA) [10].

Para describir a la atmósfera se utilizará la división en capas del modelo ISA, que se observa en la Tabla (2.1), mencionando las características principales de cada región, como son los constituyentes fundamentales, el rango de temperaturas y presiones y si existen fenómenos de recombinación debido a la actividad solar.

En los primeros kilómetros, y hasta los 10Km a 12 Km se encuentra la capa denominada tropósfera, en ella esta presente en mayor concentración el vapor de agua, un gas de gran

2. Generalidades

Tabla 2.1. División en capas del modelo ISA

Modelo de capas ISA					
Capa	Nombre	Alt. Geopotencial MSL [m]	Variación de temperatura C/Km	Temperatura de inicio de capa [K]	Presión de inicio de capa [Pa]
0	tropósfera	0.0	-6.5	288.15	101325
1	Tropopausa	11000	0	216.65	22632
2	Estratósfera	20000	1	216.65	5474.9
3	Estratósfera	32000	2.8	228.65	868.02
4	Estratopausa	47000	0	270.65	110.91
5	Mesósfera	51000	-2.8	270.65	66.939
6	Mesósfera	71000	-2	214.65	3.9564
7	Mesopausa	84852	0	186.87	0.3734

importancia desde un punto de vista climatológico [1], [2]. En la Figura (2.1) se observa una gráfica de los constituyentes fundamentales en función de la altura, Puede observarse que el aire en la tropósfera está compuesto principalmente por moléculas de nitrógeno y oxígeno [11].

En la tropósfera la temperatura del aire desciende linealmente en aproximadamente 6.5 C° por cada kilómetro. Los vientos suelen ser variables dándose los casos extremos de huracanes o tornados con velocidades máximas de hasta 500km/h.

A partir de los 12 km y hasta aproximadamente los 20 Km se encuentra una región llamada tropopausa, compuesta principalmente por aire seco con temperaturas que se mantienen constantes en aproximadamente -60C°. Está conformada principalmente por moléculas de óxido de nitrógeno y óxido de carbono con poca presencia de moléculas de agua.

En la Tropopausa, existen las corrientes llamadas en chorros. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), estas corrientes son desplazamientos de aire fuertes y estrechos concentrados a lo largo de un eje casi horizontal en la alta tropósfera o en la estratósfera, caracterizados por una fuerte cizalladura vertical y horizontal del viento. Presentando uno o dos máximos de velocidad, la corriente en chorro discurre, normalmente, a lo largo de varios miles de kilómetros, en una franja de varios centenares de kilómetros de anchura y con un espesor de varios kilómetros.

Estas corrientes fueron descubiertas en la segunda guerra mundial, y los primeros en utilizarlas fueron los japoneses para lanzar explosivos mediante globos que eran arrastrados hasta Estados Unidos o Canadá, recorriendo más de 7000km.

En la Figura (2.2) se observa una distribución de vientos promedio en función de la altura para la latitud de 45° Norte en el mes de junio.

A medida que la altura aumenta el aire se hace mucho más liviano y la presión disminuye. Por encima de la tropopausa y a partir de los 20 Km hasta los 32 Km aproximadamente se encuentra la estratósfera. En esta región se encuentra el ozono (O3) que filtra los dañinos rayos ultravioleta (UV) provenientes del sol. Sin el ozono no podría existir la vida sobre la tierra.

En la estratósfera la temperatura, al contrario de lo que sucede en la tropósfera aumenta. Este aumento de temperatura se debe a la absorción por parte del ozono de los rayos ultravioletas. El proceso de absorción crea y destruye permanentemente el ozono estableciendo un complejo equilibrio, donde la cantidad de este gas se mantiene aproximadamente constante.

Pueden resumirse dos procesos relacionados con el ozono y la radiación UV, el primero

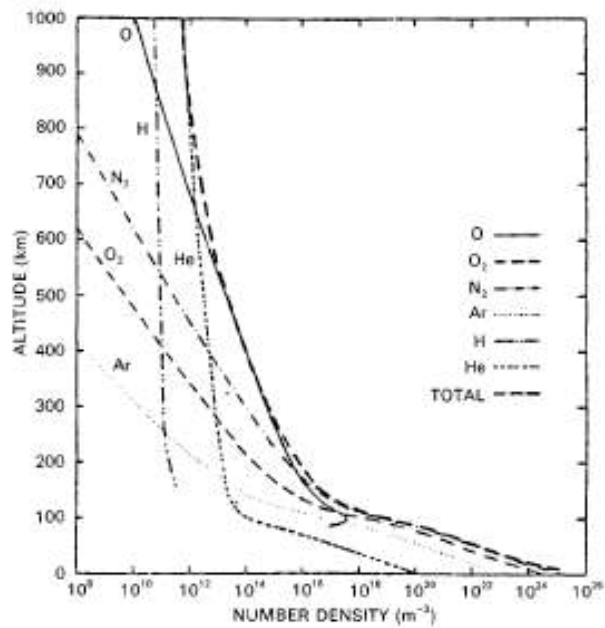


Figura 2.1. Constituyentes fundamentales en función de la altura. Fuente: The Solar-Terrestrial Environment An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere

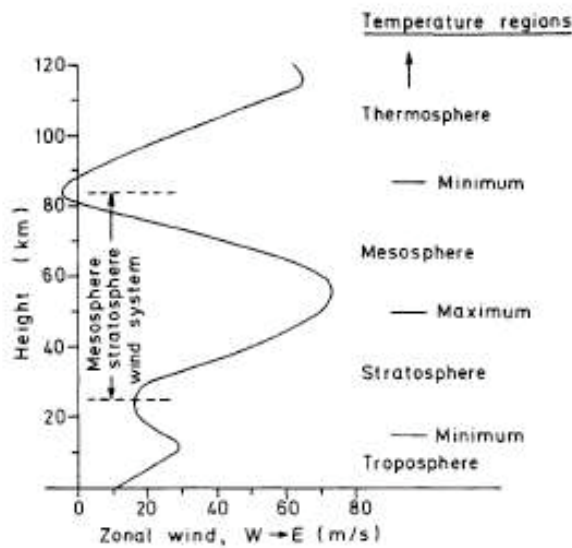


Figura 2.2. Distribución promedio de vientos. Fuente COSPAR international reference atmosphere 1972 / compiled by the Committee for the COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA) of COSPAR Working Group 4.

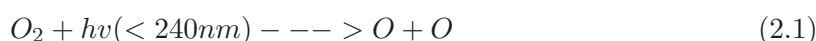


Figura 2.3. Corriente en chorro vista desde la Estación Espacial Internacional. Fuente NASA.

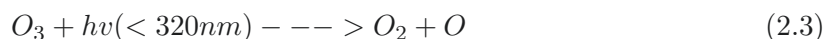


Figura 2.4. Globos utilizados para transportar explosivos utilizando las corrientes en chorro

es la creación de este gas según la siguiente reacción:



Este proceso es la creación de ozono, y se explica dado que la energía de radiación electromagnética en la región ultravioleta puede dividir una molécula de oxígeno en sus dos átomos, para luego combinarse con oxígeno y formar ozono. Esta reacción suele acompañarse de una molécula de transporte M que no se consume en la reacción. El segundo proceso es la destrucción del O₃,



En este conjunto de reacciones el átomo de oxígeno libre formado en las reacciones de tipo (2.1) encuentra una molécula de oxígeno, lo que es más probable, dada su mayor abundancia, que encontrar una de ozono; y se une a ella formando un nuevo ozono (2.2). Este sistema de reacciones es muy interesante porque en (2.1) se absorben radiaciones de longitud de onda en el UV, mientras que en (2.3) radiaciones de longitud de onda mayor, estableciendo un equilibrio entre la formación y destrucción de este gas.

Luego de la estratósfera a partir de los 47Km sucede una región de transición llamada estratopausa, de unos 4km de espesor. En esta capa la temperatura se mantiene aproximadamente constante, hasta que ocurre una nueva inversión a alturas mayores en las siguientes capas.

Si se continua ascendiendo, se observa una zona denominada mesósfera, que se extiende desde los 50 km hasta los 70km aproximadamente. En esta región el aire es muy poco denso, concentrándose solamente el 0.1 % del total de la atmósfera.

A medida que se asciende en la mesósfera, y de manera similar que en la tropósfera, la temperatura comienza a disminuir hasta valores de -70C° o -80 C°. Este descenso en la temperatura se debe a la baja densidad del aire, y a la absorción de la radiación reflejada en la superficie de la tierra, producida por el CO₂ presente en capas inferiores. La región alta de la mesósfera, y la mesopausa (capa siguiente), es la región del planeta tierra donde pueden registrarse las temperaturas más bajas conocidas por el hombre. Los vientos en la mesósfera son fuertes y zonales con dirección este-oeste.

A partir de los 84 km se encuentra una región denominada mesopausa, en la que comienzan a manifestarse fenómenos de ionización. Se considera como una capa de transición hacia la termósfera exterior del planeta tierra. En ella, la temperatura nuevamente se mantiene constante hasta la próxima inversión de temperatura, donde comienza a ascender debido a los fenómenos de ionización de capas superiores.

Por encima de los 100Km comienzan a verse fuertemente los efectos del medio sol-tierra, donde interactúan las partículas cargadas del sol con el campo magnético terrestre, produciendo fenómenos electromagnéticos debido a la generación de cargas eléctricas.

En el estudio del clima terrestre las capas ionizadas de la atmósfera parecerían no tener influencia, no obstante hoy en día se estudian fenómenos asociados que relacionen la actividad solar en la ionosfera con eventos climáticos en la baja atmósfera. Siendo la atmósfera un sistema complejo, es posible que fenómenos de capas superiores, estén vinculados con los de capas superficiales y viceversa.

2.2. El vapor de agua

El vapor de agua atmosférico juega un papel predominante en el equilibrio radiativo y el ciclo hidrológico [12] A causa de sus frecuentes cambios de fase, conduce a la formación de nubes y la transferencia de calor latente de los océanos [13]. Este gas es un elemento principal en los procesos termodinámicos de la atmósfera, y también es responsable de la absorción en un número de bandas del espectro electromagnético [12]. El vapor de agua se limita casi exclusivamente a la troposfera, y la mayor parte de la cantidad media global se limita a los primeros 2 Km a 4Km de la atmósfera terrestre. Su distribución es muy variable, ya que se produce continuamente en algunas regiones y se destruye en otras. También tiene un complejo patrón de distribución diaria [13].

El vapor de agua integrado (IPWV) es la forma más común de estimar el contenido de vapor de agua en la atmósfera. Esta medición se obtiene si se considera el volumen de agua líquida que ocuparía el vapor de agua condensado en un cilindro de $1m^2$ de base y altura vertical infinita. Así, el IPWV está definido como la altura del agua líquida que podría resultar de la condensación de todo el vapor de agua contenido en una columna desde la superficie de la tierra hasta el tope de la atmósfera [14], sus unidades son milímetros utilizando esta definición.

Valores de 60 mm o más son comunes en regiones tropicales, mientras que en regiones secas suele ser menor a 10 mm. Las mediciones correspondientes al Aeropuerto de Ezeiza en su estación de radiosondeo SAEZ arrojan valores del orden de 25 mm en promedio.

En los próximos capítulos de esta tesis se abordarán las diferentes técnicas para la estimación de este gas, utilizando radiosondadores (Capítulos 3 y 4), la señal de posicionamiento global GPS (Capítulo 5) y los radiómetros de microondas (Capítulo 6 y 7).

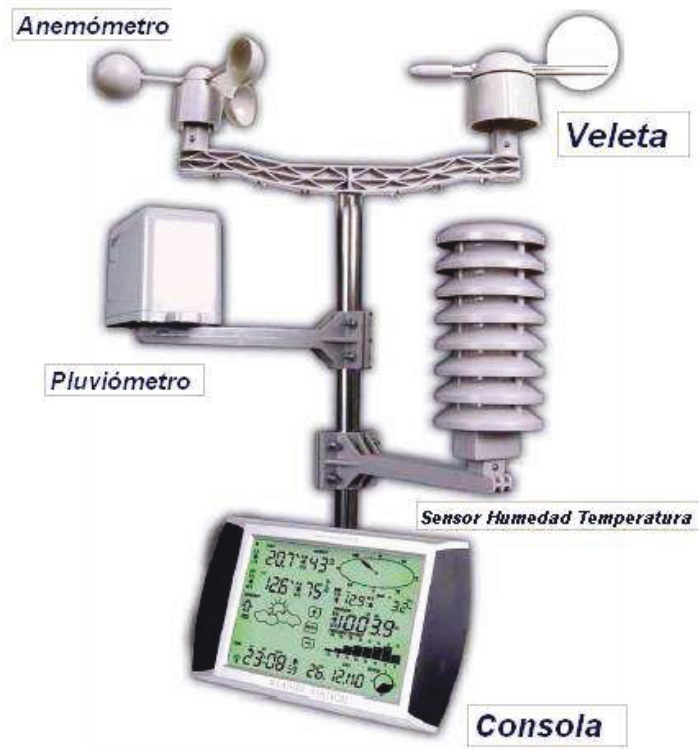


Figura 2.5. Distribución de sensores de una estación meteorológica típica

2.3. Mediciones Meteorológicas Directas

Existen numerosos instrumentos que permiten determinar parámetros físicos de la atmósfera y la superficie terrestre. Puede efectuarse una división, considerando aquellos que realizan mediciones directas de las variables físicas (in-situ), o aquellos que no tienen contacto directo con el observable y estiman al mismo mediante algún fenómeno físico asociado. A continuación se detallan los instrumentos meteorológicos con sensores in-situ, haciendo hincapié en los utilizados en el desarrollo de esta tesis doctoral.

2.3.1. Estaciones meteorológicas

Una estación meteorológica es un equipo electrónico que dispone de sensores que miden diferentes variables físicas. Los sensores más comunes que pueden encontrarse en una estación meteorológica son:

- Termómetro: mide la temperatura del aire.
- Psicrómetro o higrómetro: mide la humedad relativa del aire.
- Barómetro: mide la presión atmosférica.
- Anemómetro: permite determinar la velocidad de los vientos.
- Pluviómetro: permite determinar la cantidad de precipitación líquida.
- Heliógrafo: determina la cantidad de horas de luz solar.
- Piranómetro: mide la radiación solar (directa mas difusa).
- Veleta: este dispositivo permite determinar la dirección del viento.

En la Figura (2.5) se observa la distribución típica de los sensores de este tipo de instrumentos.

Todos los sensores traducen la variable física a medir en una señal eléctrica equivalente. En el caso de los sensores de temperatura, humedad y presión los más utilizados vinculan la variación de la capacidad de un material dieléctrico sensible, en una tensión que puede ser interpretada por un circuito electrónico.

Las estaciones meteorológicas modernas disponen de conectividad con redes inalámbricas, lo que permite monitorearlas remotamente en tiempo real y permitiendo descargar el dato de sus mediciones sin la necesidad de llegar hasta el lugar donde se encuentran instaladas.

Estos instrumentos son generalmente autónomos y requieren de un mínimo de mantenimiento. En lugares de difícil acceso se las suele instalar utilizando paneles solares y baterías, de forma que no necesiten de un tendido eléctrico para su funcionamiento.

Las estaciones meteorológicas son instrumentos claves, ya que proveen datos sinópticos superficiales que resultan fundamentales para técnicas y procedimientos de medición en meteorología. Estos instrumentos aportan dato de temperatura superficial necesario para la estimación de IPWV utilizando radiómetros de microondas desde satélites, y también de presión superficial que permite el cálculo de la constante de conversión de retardo troposférico a vapor de agua integrado en la técnica GPS.

2.3.2. Radiosondas

Una radiosonda es un dispositivo electrónico elevado mediante globos meteorológicos que permite determinar parámetros atmosféricos y transmitirlos a un aparato receptor fijo en tierra.

El dispositivo es sujeto a un globo lleno de helio o hidrógeno que lo eleva a través de la atmósfera. El globo estalla cuando alcanza una altura aproximada de 30 Km debido a la falta de presión del aire externo. Las radiosondas modernas se comunican por radio con un ordenador que almacena todas las variables en tiempo real.

Las variables más importantes medidas por las radiosondas modernas son:

-Presión.

-Altura.

Posición geográfica (Latitud/Longitud).

Temperatura.

Humedad relativa.

Velocidad y dirección del viento.

Algunas también miden la concentración de ozono, y se las denomina ozonosondas.

Estos dispositivos tienen un peso aproximado de 250 gramos y su principal fabricante es la empresa Vaisala™ ubicada en Finlandia.

Las radiosondas permiten confeccionar perfiles de la atmósfera, que resultan fundamentales en el estudio del clima y la generación de pronósticos meteorológicos. Los primeros equipos de radiosondeo solo eran capaces de medir velocidad de vientos, pero actualmente son cada vez más amplias las funcionalidades que disponen.

La disminución del tamaño de los equipos de posicionamiento global GPS, permitió introducir los circuitos necesarios para utilizar esta tecnología dentro de las radiosondas. Hoy en día la mayoría de los equipos comerciales disponen de un módulo GPS que permite determinar con exactitud la trayectoria de ascenso a un costo reducido.

Los perfiles de radiosondeo permiten confeccionar diagramas de Stüve como el de la Figura (2.6) que permiten determinar entre otros parámetros la energía de la atmósfera y su estabilidad; la formación de nubes convectivas o de desarrollo vertical, el paso de frentes y la aparición de congelamiento y turbulencias.

Otra variable importante obtenida con los radiosondeos es la determinación de perfiles de vapor de agua, tema fundamental de esta tesis y que será tratado en capítulos posteriores.

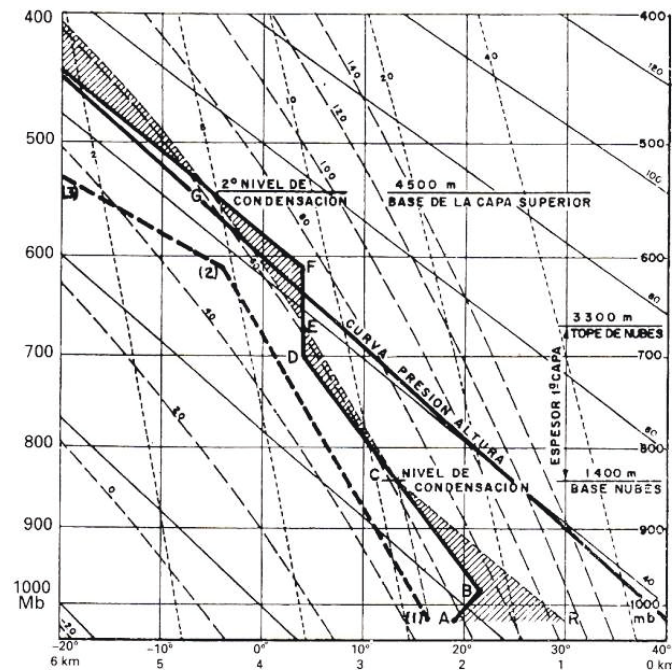


Figura 2.6. Diagrama termodinámico de Stüve.
Fuente: Meteorología aplicada a la aviación. Manuel Ledesma - Gabriel Baleriola Editorial Paraninfo

En la Figura (2.7) se observan los componentes del sistema de radiosonda. Esta compuesto por una antena receptora omnidireccional en tierra, conectada a un equipo receptor, que generalmente esta sintonizado en la banda meteorológica de 403Mhz, junto con una computadora con software específico para el procesamiento de la información.

Mediante el GPS ubicado en el instrumento de radiosondeo se determina la posición (latitud y longitud) y velocidad del radiosondador en tiempo real, en intervalos de 1 segundo aproximadamente. La altura se mide utilizando el sensor de presión, dado que dispone de una mayor precisión que la que brinda el GPS simple frecuencia. El alcance depende de la sensibilidad del receptor y la potencia emitida por el radiosondeo, pero generalmente suelen ubicarse hasta en un radio de 300Km desde la estación donde fue lanzado.

Los equipos de radiosondeo presentan el inconveniente que se pierden en cada medida, por lo que es una técnica cara y también limitada especialmente a lugar donde se efectuó la medición.

Tanto las estaciones meteorológicas, como los radiosondadores son fundamentales en la meteorología. A continuación se mencionarán instrumentos que no realizan mediciones in-situ, sino que realizan estimaciones de variables físicas midiendo algún parámetro integrado en lo que se llama teledetección.

2.4. Mediciones Meteorológicas Remotas, o Sistemas de Teledetección

La teledetección o detección remota puede definirse como la adquisición de información a distancia desde instrumentos que no tienen contacto directo con la variable física que se

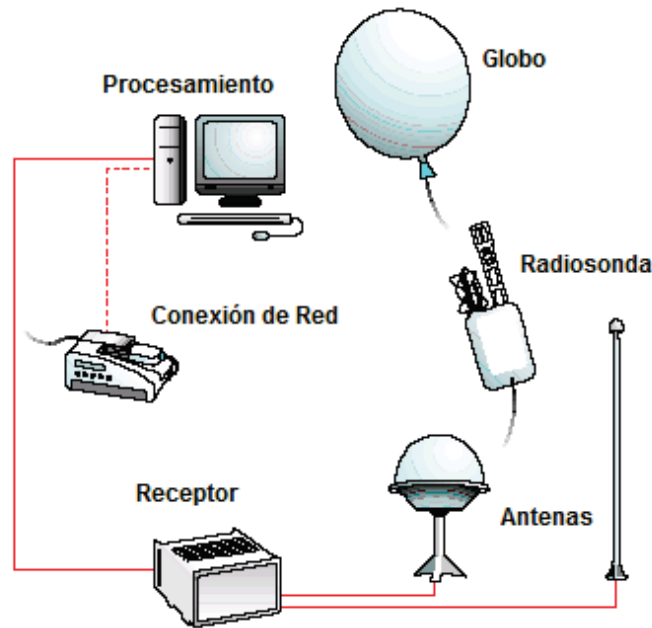


Figura 2.7. Sistema de radiosondeo atmosférico

esta midiendo [15]. Desde un comienzo esta técnica estaba referida a la captura de imágenes de la superficie terrestre, desde aviones o globos a gran altura. Con el advenimiento de los satélites y sondas espaciales, esta técnica cobró gran importancia, permitiendo la captura de imágenes e información desde otros planetas dentro del sistema solar.

El año que simboliza la entrada de la teledetección en la era moderna es 1957 con el lanzamiento del satélite Sputnik, primer satélite artificial puesto en órbita alrededor de la Tierra por la Unión Soviética.

La observación sistemática de la Tierra desde el espacio se inicia en el año 1960 con el lanzamiento del satélite TIROS-I (Television Infrared Observation Satellite), primer satélite meteorológico con una cámara de televisión de baja resolución, que permitía a los meteorólogos discriminar entre nubes, agua, hielo y nieve. La familia de satélites TIROS, rebautizados como NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) a partir de 1970, sigue todavía en actividad. El vuelo tripulado Apolo 9 (1969) realizó la primera experiencia de fotografía orbital multispectral para el estudio de los recursos terrestres.

Los resultados obtenidos en el estudio de recursos naturales terrestres con los datos de los primeros satélites meteorológicos y las misiones espaciales tripuladas, impulsaron el desarrollo por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) del programa ERTS (Earth Resources Technological Satellite) conocido también como LANDSAT (Land Satellite).

El primer satélite específicamente dedicado a teledetección es el norteamericano LANDSAT 1 que fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 y estuvo operativo hasta principios de 1978. El último de la serie, el LANDSAT 7 se lanzó al espacio el 15 de abril de 1999.

A partir de los datos suministrados por los LANDSAT, son numerosos los países que han decidido disponer de medios propios de teledetección. Entre estos destacan los satélites SPOT Francés, RADARSAT Canadiense, el MOS de Japón, el IRS de la India y el ERS de la Agencia Espacial Europea.

Actualmente, hay en órbita decenas de satélites de observación de la Tierra que generan

miles de imágenes cada día para aplicaciones de uso civil y militar.

El principio de la teledetección es similar al de la visión, resulta de la interacción de tres elementos fundamentales: una fuente de energía, un objetivo o escena y un sensor que capte la información.

Los radiómetros embarcados en satélites miden la radiación electromagnética reflejada en la superficie terrestre y posteriormente reenvían esta información mediante un enlace de radiofrecuencia a una red de estaciones de recepción que se encarga de recibir y almacenar estos datos.

En el caso de los instrumentos en órbita, muchos radiómetros utilizan como fuente de energía el Sol, midiendo la radiación reflejada sobre la superficie en lo que se conoce como teledetección pasiva.

La observación con teledetección pasiva en regiones tropicales no resulta simple, a causa de la frecuente presencia de densas coberturas de vegetación en estas zonas. Asimismo son difíciles de observar las regiones polares durante los periodos invernales, debido a la reducida iluminación solar que reciben.

La teledetección activa se basa en la emisión de radiación electromagnética para analizar la reflexión de la misma sobre el medio en estudio. A los sistemas de teledetección activa se los conoce como Radio Detection and Ranging, (RADAR) "detección y medición de distancias por radio".

Los sistemas de RADAR en órbita permiten atravesar la cobertura de nubes lo que facilita la obtención de imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas.

Aunque las imágenes generadas con teledetección activa son más difíciles de analizar, complementan los datos de los sistemas de teledetección pasiva y ofrecen información adicional sobre otros aspectos como la topografía del terreno.

2.4.1. Procesamiento de la información en teledetección

La teledetección se implementa mediante un problema de regresión inverso, es decir, conociendo la variable física que se desea medir mediante alguna técnica, se calcula un modelo, que a partir de las mediciones del sensor de teledetección permita llegar al observable buscado.

Una analogía para entender esto es tratar de determinar el tipo de animal por sus pisadas. Así por ejemplo, ya que es imposible medir directamente la temperatura en las capas altas de la atmósfera, sí es posible medir las emisiones de un cierto espectro de especies químicas conocidas (CO₂) en esa región. La frecuencia de dicha emisión se puede relacionar con la temperatura de esa zona a través de varias relaciones termodinámicas.

El procesamiento de los datos de teledetección fue estandarizado por la NASA en el año 1986 [16], en lo que formó parte de su sistema de observación terrestre. Los datos entregados por los instrumentos son catalogados en niveles según este estándar:

-Nivel 0: La información se encuentra a máxima resolución, eliminando elementos duplicados e incluyendo los errores de transmisión y el estado interno de todos los componentes internos del sistema.

-Nivel 1a: La información se encuentra ordenada cronológicamente, con anotaciones auxiliares y coeficientes de calibración radiométricos y geométricos. También se incluyen los parámetros de georeferencia computados, pero sin aplicar al nivel 0 de información. Este nivel es totalmente reversible al nivel 0.

-Nivel 1b: La información del nivel 1a ha sido procesada a unidades de detección; la información del nivel 0 es ya irrecuperable.

-Nivel 2: Variables geofísicas derivadas determinadas a la misma resolución y localización que la información del nivel 1.

-Nivel 3: Las variables son mapeadas uniformemente en "grids" espacio-temporales.

-Nivel 4: Resultado de los análisis de niveles inferiores (variables que no han sido medidas pero si han sido derivadas de esas medidas).

Los niveles 0 y 1a, permiten determinar en profundidad las características del instrumento y su funcionamiento interno, mientras que desde el nivel 1b en adelante los resultados pueden ser utilizados científicamente.

2.5. Instrumentos de teledetección

Existen hoy en día gran cantidad de instrumentos que permiten determinar características de la atmósfera y la superficie terrestre a partir de la medición del espectro electromagnético en diferentes longitudes de onda. Se realizará una breve descripción de cada uno de ellos realizando hincapié en los que fueron utilizados a lo largo de esta tesis.

2.5.1. El radiómetro de microondas

La radiometría es el campo de la ciencia y de la ingeniería relacionado con la medición de la radiación electromagnética, más específicamente, la medición de la energía de radiación electromagnética no coherente.

El radiómetro de microondas, es un sistema de teledetección pasivo que permite estudiar el comportamiento de los gases que conforman la atmósfera y la superficie terrestre a partir de la medición de la señal electromagnética en diferentes longitudes de onda. La longitud de onda en la que se sintonizan, esta relacionada con la del fenómeno que se desee estudiar.

El instrumento esta construido a partir de una antena, que ilumina el área de interés, un amplificador que eleva la señal electromagnética, y finalmente de un sistema de detección, que mide la intensidad de la misma.

Los radiómetros pueden efectuar mediciones desde tierra, apuntando hacia el cielo, o desde instrumentos ubicados en órbitas alrededor de la tierra u otros planetas apuntando hacia la superficie.

2.5.2. La técnica de Radio-ocultación

La técnica de radio-ocultación se originó como un método para el estudio de las atmósferas de otros planetas. Se basa en el fenómeno de curvatura que sufre una señal electromagnética provocada por los gradientes de refractividad en la atmósfera. Esta desviación puede ser utilizada para inferir estos perfiles, con los que se puede deducir el contenido total de electrones en la ionosfera, así como variables termodinámicas (la presión atmosférica, temperatura, humedad, presión de vapor de agua) de la estratósfera hasta la capa límite superficial, con una resolución vertical cercana a 300 m. El uso de la radio-ocultación utilizando satélites GPS ha demostrado mejorar significativamente los modelos de pronóstico, y es un componente clave del sistema de observación operacional [17].

En la Figura (2.8) se observa la idea principal del funcionamiento de esta técnica. Un satélite GPS emite una señal que es capturada por otro satélite de órbita baja LEO. La curvatura de la señal medida por el satélite LEO, permite realizar una tomografía de la atmósfera atravesada, con lo que se realizan perfiles de los gases que la componen. La técnica de radio-ocultación es una importante herramienta para la confección de perfiles de la atmósfera terrestre y de otros planetas.

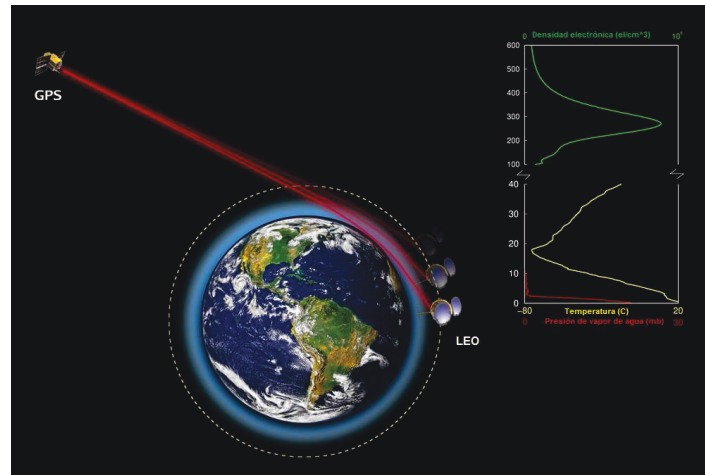


Figura 2.8. Técnica de radio-ocultación.

2.5.3. El Sistema de Posicionamiento Global GPS

Los instrumentos de posicionamiento global GPS desde sus inicios, son equipos desarrollados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, diseñados para apoyar los requerimientos de navegación y posicionamiento precisos con fines militares. En la actualidad es una herramienta importante para aplicaciones de navegación, posicionamientos de puntos en tierra, mar y aire. El sistema puede ser dividido en sub-sistemas o segmentos funcionales definidos como:

-Segmento Espacial:

Esta constituido por una constelación de satélites de navegación que orbitan la Tierra a una altitud de cercana a 20.000 kilómetros. A esta altitud, los satélites completan dos órbitas en poco menos de un día. La constelación consiste en 24 satélites alrededor de todo el mundo

Los satélites GPS transmiten dos señales de radio de baja potencia, llamadas "L1" y "L2". Cada señal GPS contiene tres componentes de información: un código pseudoaleatorio, los datos de efemérides de satélite y datos de almanaque. El código pseudoaleatorio identifica al satélite que transmite su señal. Los datos de efemérides de satélite proporcionan información sobre la ubicación del satélite en cualquier momento. El almanaque contiene información sobre el estado del satélite y la fecha y hora actuales. Para cada satélite, el tiempo es controlado por los relojes atómicos a bordo que son cruciales para conocer su posición exacta.

Las posiciones se obtienen mediante la determinación de las distancias a los satélites visibles. Este proceso se conoce como "trilateración". El momento de la transmisión de la señal en el satélite se compara con el momento de la recepción en tierra. La diferencia de estos dos tiempos indica cuánto tiempo tomó para que la señal viajara desde el satélite al receptor. Multiplicando el tiempo de viaje por la velocidad de la luz, es posible obtener la distancia con el satélite. La repetición del proceso desde tres satélites permite determinar una posición de dos dimensiones en la Tierra (es decir, la longitud y latitud). Un cuarto satélite es necesario para determinar la tercera dimensión, es decir la altura. Cuantos más satélites son visibles, más precisa es la posición del punto a determinar.

Las órbitas de los satélites GPS están inclinadas respecto al ecuador de la Tierra en alrededor de 55°. La distribución espacial de la constelación de satélites permite al usuario disponer de 5 a 8 satélites visibles en cualquier momento. El sistema está diseñado para asegurar que al menos cuatro satélites estarán visibles con una recepción configurada de la señal de 15 ° sobre el horizonte en un momento dado, en cualquier parte del mundo.



Figura 2.9. Estaciones de control GPS. Fuente NASA; <http://visibleearth.nasa.gov/>

-Segmento de Control:

Es una serie de estaciones de rastreo, distribuidas en la superficie terrestre que continuamente monitorea a cada satélite analizando las señales emitidas por estos y a su vez, actualiza los datos de los elementos y mensajes de navegación, así como las correcciones de reloj de los satélites.

Las estaciones se ubican estratégicamente cercanas al plano ecuatorial y en todas se cuenta con receptores con relojes de muy alta precisión. En la Figura (2.9) se observa su ubicación.

-Segmento de usuario:

Lo integran los receptores GPS que registran la señal emitida por los satélites para el cálculo de su posición, se obtienen las pseudodistancias entre cada satélite y el receptor. Observando al menos cuatro satélites en tiempo común; el receptor calcula las coordenadas X, Y, y altura dando la ubicación del receptor.

Existen diferentes fuentes de error que degradan la posición GPS, a continuación se citan algunos:

- 1.- Retrasos ionosféricos y troposféricos
- 2.- Errores en el reloj del Satélite y del receptor
- 3.- Efecto multitrayectoria
- 4.- Disponibilidad selectiva (S/A)

La técnica de medición de IPWV con GPS utiliza los retardos troposféricos e ionosféricos para determinar características del medio que atraviesa esta señal, desde el satélite, hasta el receptor en tierra. Es posible determinar características de la atmósfera alta ionizada, como de la baja atmósfera. Determinadas las posiciones y alturas de las estaciones, es posible extraer de la ecuación de observación estos retardos. Para esto se necesita procesar una red de estaciones y de-correlacionar el efecto de la atmósfera.

En el Capítulo 5 de esta tesis, se utilizará la determinación de los retardos troposféricos que sufre la señal de GPS, para estimar vapor de agua sobre tierra, vinculando este retardo con el IPWV en una región determinada.

Capítulo 3

Medición de vapor de agua utilizando radiosondas

En este capítulo se describirá la técnica de medición de vapor de agua utilizando radiosondas. Se presentarán las ecuaciones para el cálculo del IPWV, efectuando un análisis que permitirá cuantificar la incertidumbre en este parámetro debido a la precisión de medición de los sensores de la radiosonda. Este análisis será utilizado en el Capítulo 4 para el desarrollo de un equipo de radiosondeo, donde los sensores y componentes serán seleccionados para optimizar la estimación del IPWV.

3.1. La radiosonda y su utilización para medir IPWV

Como fue descrito en el Capítulo 2, una radiosonda es un equipo electrónico que se eleva mediante globos meteorológicos llenos de helio u hidrógeno hasta alturas máximas del orden de 30 Km. Estos equipos son los únicos que permiten medir perfiles de vapor de agua in-situ.

Se realizará una descripción más detallada de estos instrumentos para luego explicar las ecuaciones que permiten obtener el IPWV. En la Figura (3.1) se observa una radiosonda comercial de la marca Vaisala™, muy conocidas a nivel mundial.

Estos instrumentos cuentan con sensores de presión, temperatura y humedad relativa, aunque también los hay con sensores de ozono. El GPS que llevan incorporado permite determinar la ubicación (Latitud y Longitud) del instrumento en todo momento y calcular la velocidad de los vientos. El sensor de presión permite determinar la altura del sondeo con mayor precisión que la derivada desde GPS.

Las radiosondas disponen de un receptor en tierra que recibe la información de las mediciones. En el caso de las Vaisala™, su receptor marca DIGICORA™ cuenta con una antena del tipo patch, con una distribución en array, que le permite ser omnidireccional con ganancia en un gran ángulo, captando radiosondas con grandes desplazamientos horizontales.

En la Figura (3.2) se observa una radiosonda de la marca VIZ Sippican™. Estas radiosondas se protegen utilizando cubiertas de material aislante térmico, que mantienen la temperatura en rangos seguros para los circuitos electrónicos.

En la Figura (3.3) se observa una hoja técnica de los globos utilizados para elevar radiosondas. Resulta fundamental una correcta selección de los mismos, para que el sondeo alcance la altura requerida.

A medida que el globo asciende la presión disminuye exponencialmente, por lo tanto su volumen crece hasta que estalla. Debe tenerse en cuenta el máximo diámetro que soporta antes de estallar para calcular la altura máxima de ascenso. Un calculo erróneo puede provocar que se pierda el equipo sin obtener la medición deseada.

3. Medición de vapor de agua utilizando radiosondas



Figura 3.1. Radiosondador Vaisala RS92™.

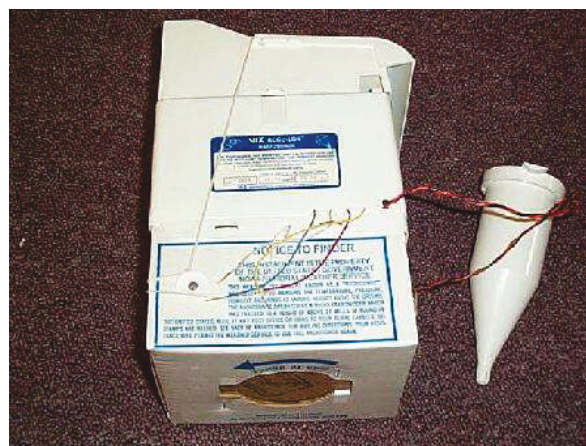


Figura 3.2. Radiosondador Viz Sippican™.

TOTEX CR type balloons made of Chloroprene

Reference		CR350	CR500	CR600	CR700	CR800	CR1000	CR1200	CR2000
Color		uncolored							
Average Weight	(gr)	350	500	600	700	800	1000	1200	2000
Neck Diameter	(cm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	5.0
Neck Length	(cm)	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	18.0
Flaccid Body Length	(cm)	124	151	167	179	193	215	237	319
Barely Inflated Diameter	(cm)	79	96	106	114	123	137	151	203
Payload	(gr)	500	500	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Recommended Free Lift	(gr)	870	950	1220	1250	1290	1360	1440	1700
Nozzle Lift	(gr)	1370	1450	2220	2250	2290	2360	2440	2700
Gross Lift	(gr)	1720	1950	2850	2980	3130	3410	3700	4800
Diameter at Release	(cm)	142	148	168	170	172	177	182	197
Volume at Release	(m ³)	1.5	1.7	2.4	2.5	2.6	2.9	3.1	4.0
Rate of Ascent	(m/min)	320	320	320	320	320	320	320	320
Diameter at Burst	(cm)	485	590	650	695	750	850	935	1185
Bursting Altitude	(km)	26.7	29.5	28.8	29.9	31.2	33.3	34.5	37.4

Figura 3.3. Hoja técnica de globos meteorológicos marca TOTEX™ utilizados comúnmente en radiosondas

Por lo general el globo se sujeta a la radiosonda utilizando un devanador. La función del devanador es la de incrementar la longitud de la línea que sujeta al instrumento en el ascenso. De esta forma se evita que pueda enredarse la radiosonda y provocar que el globo estalle, o también, que la antena quede en una posición que no permita una correcta recepción de la información. En la Figura (3.4) se observa una radiosonda sujeta al devanador, y en color rojo su paracaídas, que permite un descenso controlado cuando el globo estalle.

Los sensores de temperatura, humedad relativa y presión de estos equipos se construyen para lograr mediciones en condiciones extremas. Las temperaturas pueden ser tan bajas como -60°C . Medir humedad en esas condiciones resulta muy difícil ya que generalmente a -40°C los sensores comerciales suelen destruirse.

Los radiosondadores marca Vaisala™ utilizan sensores capacitivos para medir temperatura, humedad y presión. De esta manera la electrónica que traduce la medida es la misma para los tres sensores, simplificando los circuitos electrónicos internos. Precisiones comunes de medición son 0.1°C para temperatura, 2% a 3% para humedad y 1hPa para presión absoluta (Ver Apéndice E).

3.2. Cálculo del vapor de agua a partir de perfiles de radiosondeo

En esta sección se presentarán las ecuaciones que permiten el cálculo del IPWV a partir de los perfiles de temperatura, humedad relativa y presión absoluta que brindan los radiosondadores. Se determinará la vinculación entre la presión parcial de vapor de agua con los perfiles de radiosondeo, para luego integrar los mismos y obtener el IPWV.

Se partirá de la definición de la ecuación ideal de los gases:

$$P = \rho RT \quad (3.1)$$



Figura 3.4. Lanzamiento de Radiosonda donde se observa el devanador, y el paracaídas en color rojo.

Donde P es la presión en $[N/m^2]$, R es la constante de los gases con un valor de $286.7 [J/KgK]$, T es la temperatura en grados Kelvin y ρ es la densidad del aire en $[Kg/m^3]$. A partir de la Ecuación (3.1), puede despejarse la densidad en función de la presión P del gas, y de la temperatura T .

Considerando el caso del vapor de agua, debe poder determinarse la presión y temperatura de este gas para poder obtener su densidad según la Ecuación (3.1). A partir de la densidad del vapor de agua es posible determinar el IPWV como será tratado más adelante en esta sección. Se desarrollarán a continuación las expresiones que vinculan la densidad del vapor de agua, con los parámetros de temperatura, humedad relativa y presión medidos por un radiosondador.

El valor de temperatura en la cual el vapor de agua comienza a condensar es denominado punto de rocío (Dew Point). Si la temperatura es lo suficientemente baja se denomina punto de escarcha (Freezing Point), al congelar directamente de vapor a hielo. Existen modelos semi-empíricos que relacionan estas dos variables, uno ámpliamente utilizado es el de Wexler [18] [19], cuya expresión se observa en la Ecuación (3.2):

$$e_s = e^{\frac{C_1}{T_s^2} + \frac{C_2}{T_s} + C_3 + C_4 T_s + C_5 T_s^2 + C_6 T_s^3 + C_7 T_s^4 + C_8 \ln(T_s)} \quad (3.2)$$

donde T_s es la temperatura de punto de rocío en grados centígrados, e_s es la presión parcial de vapor de agua en saturación. Las constantes tienen los siguientes valores, $C_1 = -2991.272$, $C_2 = -6017.0128$, $C_3 = 18.876$, $C_4 = -0.028$, $C_5 = 0.17810^{-4}$, $C_6 = -0.8410^{-9}$, $C_7 = -0.44410^{-12}$, $C_8 = 2.858$. Estas constantes son válidas para temperaturas entre $-50^\circ C$ a $50^\circ C$ y presión a nivel del mar para el estado vapor-agua, mientras que tienen valores ligeramente distintos para vapor-hielo. Observando la Figura (3.5), se ve que la Ecuación (3.2) representa la línea que separa el agua líquida del vapor de agua.

Contrario a la ecuación de Dalton de las mezclas de gases, la dependencia del vapor de

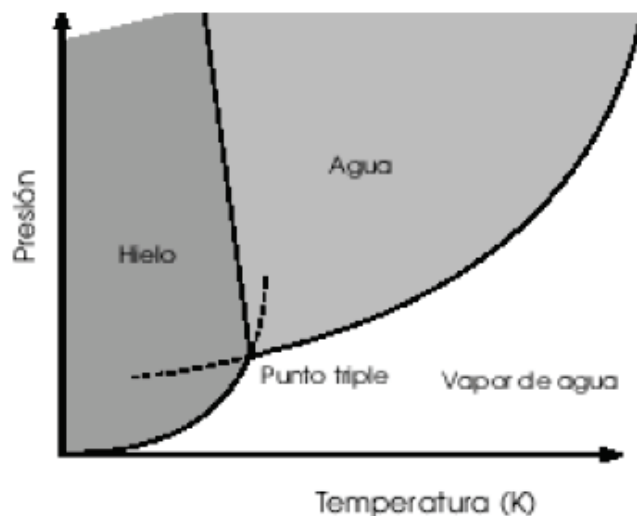


Figura 3.5. Curvas de estados del agua.

agua con la presión es muy débil. Se puede considerar este efecto definiendo una función que multiplique a la ecuación (3.2), y que dependa de la presión y la temperatura [20], quedando:

$$e_s = e_s(T)f(T, P) \quad (3.3)$$

Siendo $f(T, P)$ una función que depende de la presión y temperatura del medio atmosférico. La función $f(T, P)$ varía muy poco, teniendo un valor de 1.00395 a nivel del mar y temperatura de 0°C y de 1.00132 a una presión de 250hPa y misma temperatura. A presiones diferentes a la atmosférica, puede calcularse la presión de saturación de vapor de agua midiendo con un sensor adecuado la presión absoluta. Utilizando la Ecuación (3.3) puede escribirse que:

$$e_s = f(T, P)e^{\frac{C_1}{T_s^2} + \frac{C_2}{T_s} + C_3 + C_4T_s + C_5T_s^2 + C_6T_s^3 + C_7T_s^4 + C_8\ln(T_s)} \quad (3.4)$$

Si se conoce la humedad del medio ambiente es posible determinar la presión de vapor de agua, dado que:

$$R_h = \frac{e}{e_s} \quad (3.5)$$

donde R_h es la humedad relativa ambiente, cuyo valor oscila entre 0 y 1 (0 a 100%), siendo e la presión parcial de vapor de agua.

Por lo tanto a partir de las Ecuaciones (3.4) y (3.5) la presión parcial de vapor de agua puede estimarse como:

$$e = R_h f(T, P)e^{\frac{C_1}{T_s^2} + \frac{C_2}{T_s} + C_3 + C_4T_s + C_5T_s^2 + C_6T_s^3 + C_7T_s^4 + C_8\ln(T_s)} \quad (3.6)$$

Utilizando la ecuación (3.6), es posible determinar la presión parcial de vapor de agua conociendo la humedad relativa, la presión absoluta y la temperatura.

Existen ecuaciones semi-empíricas simplificadas de la Ecuación (3.4), que permiten determinar la temperatura de punto de rocío (o de escarcha) a partir de la temperatura ambiente. Para la mezcla vapor-agua o vapor-hielo [21] se tiene la siguiente ecuación :

$$T_s = T_n \frac{\ln\left(\frac{R_h}{100}\right) + \frac{mT}{T_n+T}}{m - \ln\left(\frac{R_h}{100}\right) - \frac{mT}{T_n+T}} \quad (3.7)$$

donde T es la temperatura en grados centígrados, T_n y m son constantes que valen 243.12 y 17.62 para temperaturas de 0°C a 50°C y 272.62 y 22.46 para temperaturas entre -40°C a 0°C respectivamente.

3.3. Integral de vapor de agua

La estimación de IPWV mediante mediciones de radiosondeo se realiza calculando la integral del perfil de densidad de vapor de agua:

$$IPWV[mm] = \frac{10^3}{\rho_l} \int_0^z \rho_v(z) dz \quad (3.8)$$

Donde $\rho_v(z)$ es la densidad del vapor de agua, ρ_l es la densidad del agua líquida con un valor de $1000 \frac{Kg}{m^3}$, y z es la altura. Los límites de esta integral se toman desde la altura de la estación, hasta la altura máxima en la que se recibieron datos válidos [22]. La altura z, es medida utilizando un sensor de presión.

Se considera que el desplazamiento de la radiosonda es únicamente "hacia arriba", es decir, se supone como si la atmósfera recorrida hubiera sido íntegramente vertical. Esto suele generar errores en el cálculo, que dependen de la magnitud del desplazamiento horizontal del instrumento.

Debe obtenerse una versión discreta de la integral dada por (3.8). Utilizando los perfiles de radiosondeo es posible aproximar la integral IPWV como:

$$IPWV[mm] = \frac{10^3}{\rho_l} \sum_{i=1}^{Z_{max}} \rho_v\left(\frac{z_i + z_{i+1}}{2}\right)(z_{i+1} - z_i) \quad (3.9)$$

donde los z_i son las alturas en donde se realizan las mediciones del radiosondador.

Cuanto mayor cantidad de datos se tengan del perfil en el ascenso, mejor será la aproximación del IPWV utilizando la Ecuación (3.9). Si bien esto parece trivial, no lo es al momento del diseño de un instrumento de este tipo, este tema será tratado en capítulos posteriores.

La densidad $\rho_v(z)$ se expresa a partir de los perfiles de temperatura, humedad relativa y presión medidos por el radiosondador utilizando la Ecuación (3.1) y la Ecuación (3.6). Por lo tanto midiendo las variables presión, temperatura, y humedad relativa es posible calcular la integral de vapor de agua a lo largo de todo el trayecto que realice la radiosonda. Este método es utilizado para determinar el IPWV mediante este instrumento.

3.4. Determinación de la incertidumbre en la estimación del IPWV

A partir de la Ecuación (3.1) y la Ecuación (3.6) la densidad ρ_v del gas de vapor de agua puede escribirse como:

$$\rho_v(z) = \frac{e(z)}{T(z)} \frac{1}{Rv} \quad (3.10)$$

Donde $e(z)$ es la presión parcial de vapor de agua, $T(z)$ es la temperatura ambos en función de la altura z, y Rv es la constante de los gases para el vapor de agua con un valor de 461.5181 J/KgK.

A partir de la fórmula de Wexler de la Ecuación (3.2) y la Ecuación (3.10), es posible escribir una sola expresión que permita calcular el vapor de agua integrado utilizando temperatura, humedad y presión, variables que son medidas por las radiosondas. La ecuación para el cálculo del IPWV en función de estos parámetros puede escribirse como:

$$IPWV[mm] = \frac{10^3}{\rho_l} \int_0^z \frac{e(z)}{T(z)} \frac{1}{Rv} dz \quad (3.11)$$

Aplicando la teoría de propagación de errores a la Ecuación (3.11) es posible determinar la precisión en la estimación del IPWV debido a la precisión de cada uno de los sensores que intervienen en la medición. Esta forma de determinar la incertidumbre resulta difícil debido a lo complejo de esta integral.

Otra forma de estimar la precisión en el cálculo del IPWV, es empleando perfiles reales de datos de radiosondeo. Utilizando una versión discreta de la integral de vapor de agua, y modelando a los sensores como variables aleatorias gaussianas con media cero, y desviación estándar determinada por su precisión, puede obtenerse un conjunto de puntos en donde se puede determinar la incertidumbre en el IPWV resultante. Se utiliza este último método para estimar la incertidumbre dado su mayor simplicidad, y además que permite trabajar sobre datos reales de radiosondeo.

Para efectuar la simulación de la incertidumbre en la estimación del IPWV, se seleccionan estaciones de radiosondeo en tierra, disponibles en la base de datos de la Universidad de Wyoming [23], en regiones que cubran un amplio rango de IPWV. Se emplean las estaciones con las coordenadas geográficas que se observan en la Tabla (3.1).

Tabla 3.1. Coordenadas de las Estaciones de Radiosondeo seleccionadas para estimar la incertidumbre en el IPWV

Num Ref	Estaciones de Radiosondeo Seleccionadas		
	Latitud	Longitud	Nombre
1	-53.00	-70.85	SCCI
2	-34.81	-58.53	SAEZ
3	-27.67	-48.55	SBFL
4	4.83	-52.36	SOCA

La estación SCCI presenta valores promedio de IPWV que rondan los 15mm, SAEZ presenta 20mm, SBFL 35 mm y SOCA valores superiores a 45mm. Este análisis se implementará considerando datos de radiosondeos del año 2008 para el mes de abril.

Se modela la incertidumbre de los sensores como una variable aleatoria gaussiana, que adiciona ruido a la medición de los perfiles reales. A partir de esto se varía el ruido de los sensores hasta obtener una cota de precisión sobre el IPWV de 2% a 3%. Este resultado será aplicado en el Capítulo 4 para el diseño de un equipo de radiosondeo.

Se utiliza para el cálculo la versión discreta de la integral de vapor de agua de la Ecuación (3.11). La ecuación con el ruido adicionado esta representada por la siguiente expresión

$$IPWV[mm] = \frac{10^3}{\rho_l} \sum_0^z f(rh + nh, T + nt, p + np) \Delta z \quad (3.12)$$

Donde nh , nt y np son las variables aleatorias gaussianas de media cero y varianza k , siendo k la precisión de los sensores. La función $f(rh, T, p)$ expresa la densidad en función de las variables de temperatura, humedad relativa y presión absoluta medidas por la radiosonda.

3. Medición de vapor de agua utilizando radiosondas

La sumatoria se calcula utilizando todo el perfil de radiosondeo, si bien solo contribuyen de manera significativa los primeros 2Km a 4 Km de altura. Los intervalos Δz en los que se evalúa la sumatoria son dependientes de los datos de radiosondeo. En la Figura (3.6) se observa un perfil descargado desde la base de datos de Wyoming.

81405 SOCA Rochambeau Observations at 12Z 28 Sep 2008

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1012.0	9	25.8	23.8	89	18.74	170	1	297.9	352.6	301.3
1000.0	108	25.6	22.9	85	17.94	160	3	298.8	351.2	301.9
925.0	792	23.2	14.2	57	11.12	110	13	303.0	336.3	305.1
924.0	801	23.2	14.0	56	10.96	110	13	303.1	335.9	305.1
920.0	839	23.0	13.0	53	10.33	105	12	303.3	334.3	305.2
900.0	1030	21.6	9.6	46	8.40	78	9	303.8	329.2	305.3
860.0	1423	18.8	12.8	68	10.91	24	3	304.8	337.7	306.8
850.0	1523	18.0	11.0	64	9.79	10	1	305.0	334.6	306.8
843.0	1593	17.5	9.8	60	9.07	0	0	305.2	332.7	306.9
804.0	1997	14.6	2.6	44	5.77	104	10	306.3	324.2	307.3
791.0	2134	14.1	0.2	39	4.94	140	13	307.2	322.7	308.1
777.0	2285	13.6	-2.4	33	4.15	175	10	308.2	321.4	309.0
753.0	2548	12.4	3.4	54	6.53	237	4	309.7	330.1	310.9
746.0	2626	12.1	1.1	47	5.60	255	2	310.2	327.8	311.2
708.0	3063	10.4	-11.6	20	2.23	206	11	312.9	320.4	313.4
700.0	3157	9.8	-10.2	23	2.53	195	13	313.3	321.7	313.8
655.0	3701	5.8	-8.4	35	3.12	125	25	314.8	325.2	315.4
610.0	4284	1.6	-6.4	55	3.90	125	19	316.4	329.3	317.2
578.0	4719	1.2	-15.8	27	1.94	125	14	320.9	327.6	321.2
525.0	5483	-3.8	-23.4	20	1.11	125	5	323.8	327.8	324.0
500.0	5870	-6.3	-27.3	17	0.82	135	7	325.3	328.3	325.5
469.0	6367	-9.7	-32.7	13	0.52	147	9	327.1	329.1	327.2
407.0	7448	-15.4	-49.1	4	0.11	175	15	333.2	333.7	333.2
400.0	7580	-16.1	-51.1	3	0.09	170	15	334.0	334.4	334.0
391.0	7751	-17.1	-55.1	2	0.06	164	16	334.9	335.1	334.9
351.0	8537	-23.1	-56.6	3	0.05	135	18	337.2	337.4	337.2
300.0	9680	-31.9	-58.9	5	0.05	145	18	340.3	340.5	340.3
261.0	10647	-39.7	-61.7	8	0.04	154	19	342.7	342.8	342.7
255.0	10805	-40.9				155	19	343.2		343.2
250.0	10940	-41.9				160	19	343.6		343.6
221.0	11752	-48.3				200	22	346.1		346.1
200.0	12410	-53.5				210	22	347.9		347.9
167.0	13545	-63.1				232	22	350.3		350.3
156.0	13961	-65.3				240	22	353.5		353.5
150.0	14200	-66.5				225	21	355.3		355.3
137.0	14731	-69.4				190	18	359.5		359.5
118.0	15606	-74.3				250	28	366.2		366.2
106.0	16234	-77.8				240	37	371.0		371.0
103.0	16403	-78.7				233	35	372.3		372.3
100.0	16570	-79.9				225	32	373.1		373.1
99.1	16621	-80.3				220	31	373.3		373.3

Figura 3.6. Perfil de radiosondeo de la estación SOCA

Para efectuar el cálculo de la incertidumbre, se adiciona el ruido simulado de los sensores a cada medición de IPWV sobre la estación de radiosondeo. Luego se encuentran un conjunto de puntos, en los que se calcula la desviación estándar STD respecto del valor real de IPWV (sin el ruido) según la siguiente expresión:

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (IPWV_i - IPWV_{simulado_i})^2}{N}} \quad (3.13)$$

Siendo los $IPWV_i$ los valores reales de vapor de agua integrado y los $IPWV_{simulado_i}$ los valores simulados. En las Figuras (3.8),(3.10),(3.12),(3.14) puede observarse que el cálculo de la incertidumbre para el IPWV, arroja 2% relativo al valor absoluto en cada estación, que representa en los sensores $\pm 0.6C$ de incertidumbre en la medición de temperatura, 3% en la humedad y 10hPa en la presión. Estos valores de precisión fueron establecidos en la simulación considerando los sensores que utilizan los equipos actuales, y las disponibilidades existentes en el mercado Argentino, teniendo en cuenta que estos resultados serán utilizados para la construcción de un equipo de radiosondeo en capítulos posteriores de esta tesis.

3.4. Determinación de la incertidumbre en la estimación del IPWV

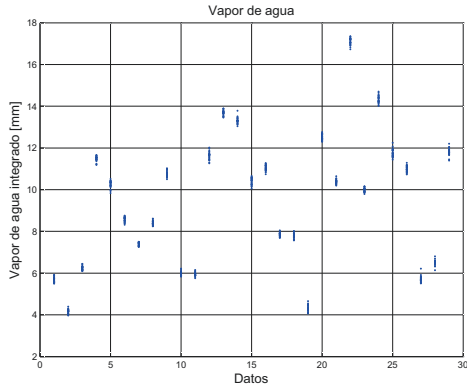


Figura 3.7. Valores de IPWV absolutos Estación SCCI, y dispersión de las mediciones

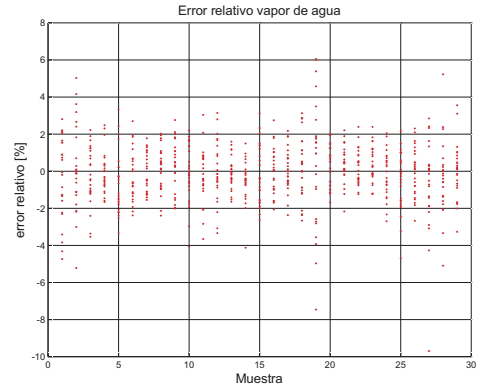


Figura 3.8. Error relativo estación SCCI

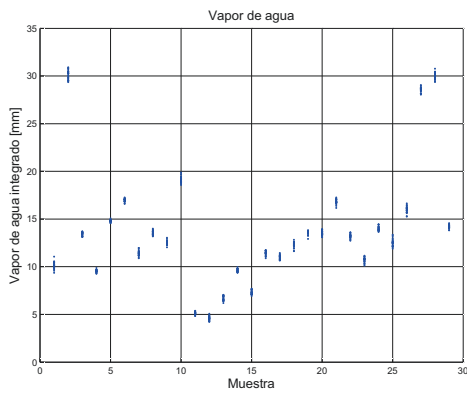


Figura 3.9. Valores de IPWV absolutos Estación SAEZ, y dispersión de las mediciones

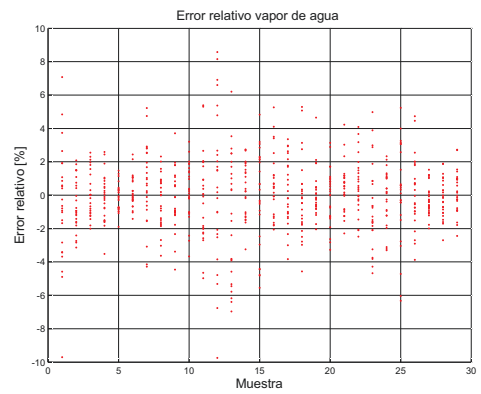


Figura 3.10. Error relativo estación SAEZ

3. Medición de vapor de agua utilizando radiosondas

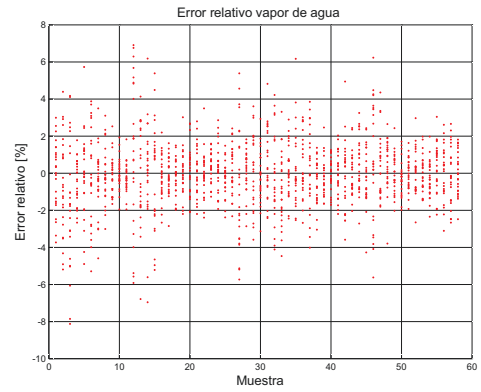
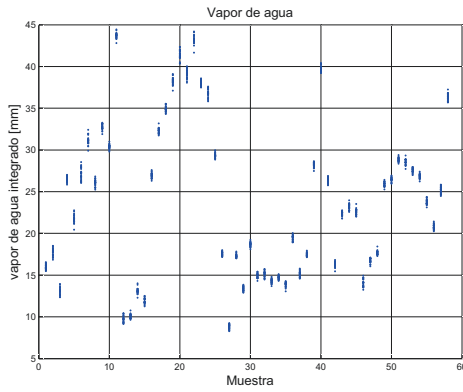


Figura 3.11. Valores de IPWV absolutos Estacion IMBT, y dispersión de las mediciones

Figura 3.12. Error relativo estación IMBT

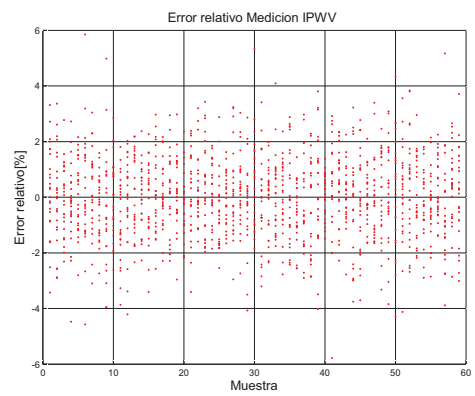
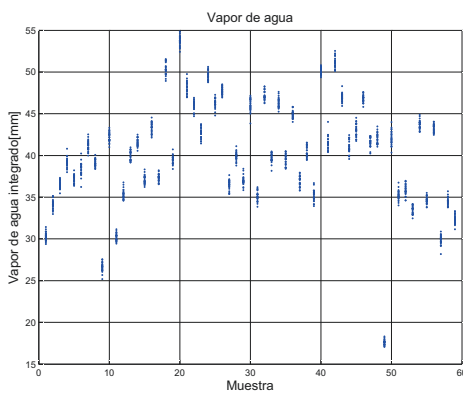


Figura 3.13. Valores de IPWV absolutos Estación SOCA, y dispersión de las mediciones

Figura 3.14. Error relativo estación SOCA

El análisis efectuado, permite estimar una cota máxima en cuanto a la precisión de los sensores, pero no tiene en cuenta la constante de respuesta de los sensores. Esto resulta importante en una radiosonda, debido a que la velocidad de ascenso puede ser demasiado elevada para que el sensor pueda seguir la variación de los parámetros físicos medidos, introduciendo errores sistemáticos. En la siguiente sección se analizarán estos errores, tratando de cuantificar las consecuencias sobre la medida final.

3.5. Determinación de la constante de respuesta de los sensores de radiosondas

En esta sección se estudiará el efecto que provoca una constante de respuesta elevada en los sensores de la radiosonda. Se evaluará el efecto sobre el sensor de temperatura y humedad cuantificando los errores sistemáticos en la determinación de estas dos variables. El sensor de presión, dada su alta velocidad de respuesta, no presenta esta dificultad.

3.5.1. Constante de respuesta del sensor de temperatura

La constante de respuesta se define como el tiempo que tarda un sensor en alcanzar el 63 % del valor final de una medida cuando la variable física se mantiene constante. Si la magnitud física cambia bruscamente en el tiempo, y la respuesta del sensor es lenta respecto de esta variación, el sensor no podrá identificar este cambio, produciéndose errores sistemáticos en la medición.

En el caso de las radiosondas la constante de tiempo de respuesta debe ser tal permita seguir las variables físicas en el ascenso del dispositivo. Se analizará el caso de la temperatura y se obtendrá un valor estimativo para la misma.

Partiendo del modelo de atmósfera estándar ISA descrito en el Capítulo 2, la variación de la temperatura en función de la altura en la atmósfera terrestre tiene un comportamiento que aproxima (en valor medio), la siguiente ecuación:

$$T = T_0 \left(1 - \frac{h}{44320}\right) \quad (3.14)$$

Siendo T_0 la temperatura superficial en grados Kelvin, y h la altura.

Considerando que la precisión del sensor es δT_s se puede decir que la temperatura es aproximadamente constante en un intervalo δh durante el ascenso si se verifica que:

$$\delta T_p < \frac{\delta T_s}{10} \quad (3.15)$$

Es decir, si la variación de temperatura medida δT_p es menor que la décima parte de la precisión del sensor, será como si la temperatura fuese constante para el mismo. Derivando la ecuación (3.14) y despejando para δh se obtiene:

$$\delta h = 44320 \frac{\delta T}{T_0} \quad (3.16)$$

Para calcular el tiempo que la radiosonda tarda en recorrer la distancia δh se debe conocer la velocidad de ascenso. En general la velocidad del aire sobre los sensores corresponde a la velocidad de ascenso si estos no se encuentran dentro de alguna cavidad. Bajo esta condición el tiempo t_s que demora el radiosonda en atravesar δh será:

$$t_s = \frac{\delta h}{V_s} \quad (3.17)$$

3. Medición de vapor de agua utilizando radiosondas

donde V_s es la velocidad de ascenso de la radiosonda. Reemplazando δh de la Ecuación (3.16) en la Ecuación (3.17) y haciendo $\delta T = \delta T_p$ se obtiene:

$$t_s = 44320 \frac{\delta T_p}{T_0 V_s} \quad (3.18)$$

Dado que la variación de temperatura es despreciable en δh puede decirse que $\tau = t_s$, siendo τ la constante de respuesta del sensor. Es decir, se asume que en el intervalo δh la temperatura, para el sensor, es constante y por lo tanto en ese intervalo el τ debe ser el calculado en la Ecuación (3.17).

Se tomará como referencia la velocidad de flujo de aire sobre los sensores de la radiosonda comercial Vaisala RS92, según su hoja de datos (Ver Apéndice E, hoja de datos de radiosondas Vaisala) $V_s = 6m/s$, valor promedio de ascenso utilizando el tamaño de globos recomendados por el fabricante.

Considerando los valores de error de temperatura obtenidos en el análisis de la sección anterior, se obtiene que $\delta T_p = 0.06K$, con $T_0 = 300K$ (valor promedio de temperatura superficial) y $V_s = 6m/s$. Si se reemplazan estos valores en la ecuación (3.18) se obtiene un valor de $t_s = 1.2s = \tau$.

El valor de $\tau = 1.2s$ garantiza que a una velocidad de ascenso de $6m/s$, el sensor podrá seguir correctamente la variación de temperatura de $-6.5C^\circ/Km$ en la tropósfera.

3.5.2. Variación de la constante de respuesta con la altura, efecto en el sensor de temperatura

El cálculo de la sección anterior no tiene en cuenta que τ varía en función de la presión exterior. Una expresión que permite estimar esta variación es [24]:

$$\tau = \tau_p(\rho V_p)^{-n} \quad (3.19)$$

Siendo τ_p la constante de tiempo del sensor a nivel del mar, ρ la densidad del aire y n una constante que oscila entre 0.4 a 0.8 dependiendo del tipo de flujo de aire laminar o turbulento. La velocidad V_p , es la velocidad del flujo de aire al que fue medido τ_p , los fabricantes de sensores dan estos datos en sus hojas.

Utilizando nuevamente el modelo de atmósfera estándar detallado en el Capítulo 2 la densidad del aire promedio en función de la altura puede escribirse como:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{h}{44320}\right)^{4.225} \quad (3.20)$$

Donde $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del aire a nivel del mar.

Empleando la Ecuación (3.18), considerando nuevamente que $t_s = \tau$, reemplazando en la Ecuación (3.19), utilizando la Ecuación (3.20) y $n=0.4$ como peor condición, se obtiene:

$$\tau_p = 40864.41 V_p^{-0.4} \frac{\delta T_p}{T_0} V_s^{-0.6} \rho_0^{0.4} \left(1 - \frac{h}{44320}\right)^{1.7} \quad (3.21)$$

La Ecuación (3.21) permite calcular el valor del τ_p a nivel del mar considerando la altura máxima a la que se desea medir con un error sistemático despreciable frente a la incertidumbre de medición determinada en la sección (3.4).

Puede aproximarse sin mucho error que $V_s = V_p$ dado que la velocidad de ascenso no es muy alta y en general la velocidad del flujo de aire con la que se mide la constante τ_p del sensor es de algunos metros por segundo. Reemplazando con valores, $T_0 = 300 \text{ K}$, $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $V_s = 6 \text{ m/s}$ y $h = 11 \text{ km}$ (Región troposférica) se obtiene: $\tau_p = 0.3 \text{ s}$.

Las hojas de datos de los radiosondas Vaisala (Ver Apéndice E) muestran que a 1000 hPa la constante de tiempo del sensor de temperatura es de 0.4 s, valor muy cercano al obtenido teóricamente con este análisis.

En la Figura (3.15) se observa el efecto del τ variable con la altura, para una constante de respuesta de 1 segundo y 10 segundos. La curva azul representa el retardo sin considerar el efecto de la variación de presión, y la curva roja si lo considera. Puede observarse que para valores de retardo grandes del orden de 10 segundos o más, el efecto es significativo en la medición de temperatura.

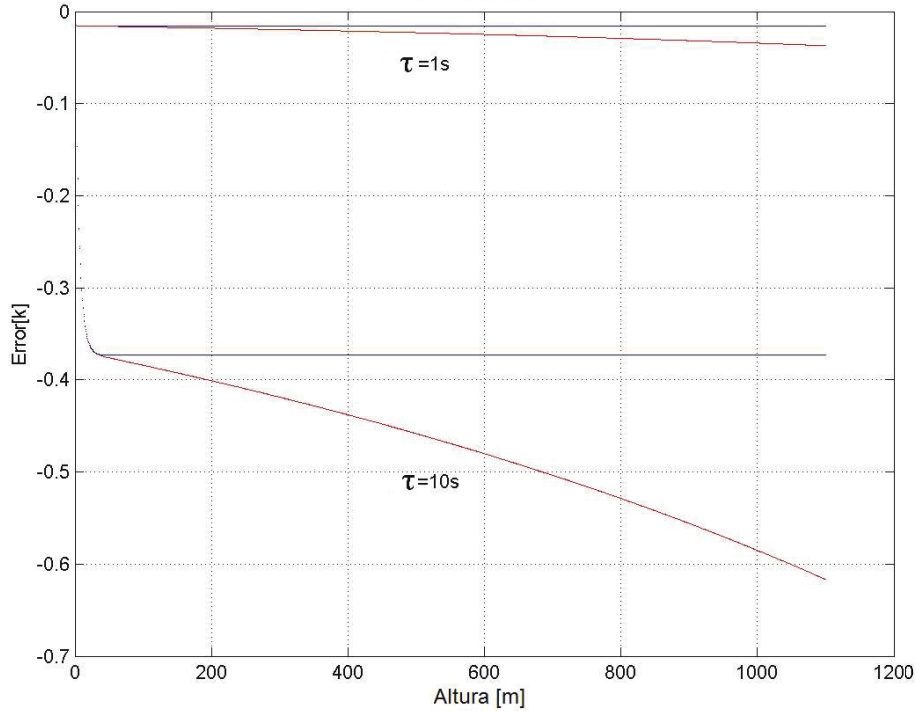


Figura 3.15. Efecto de la variación de presión sobre la constante de retardo del sensor de temperatura. Las curvas rojas consideran el efecto de la altura, mientras que las curvas azules no.

3.5.3. Constante de respuesta del sensor de humedad

En el caso de la humedad relativa, el modelo del perfil medio respecto de la altura responde a una función exponencial [25], esta función tiene la siguiente expresión:

$$R_h = R_0 e^{-0.0006396(h-h_r)} \quad (3.22)$$

Donde R_h es la humedad relativa a la altura h , y R_0 es la humedad relativa a la altura h_r . Según esta ecuación, es en los primeros metros de ascenso donde se tiene la mayor variación de humedad. Utilizando una aproximación lineal de la función exponencial de la Ecuación (3.22) y considerando la altura de referencia $h_r = 0$ se obtiene:

$$R_h = R_0(1 - 0.0006396h) \quad (3.23)$$

Derivando h para obtener el error en la humedad en función de la altura:

$$\delta R_h = -R_0 0.0006396 \delta h \quad (3.24)$$

Tomando valor absoluto en la Ecuación (3.24) y considerando nuevamente que:

$$t_s = \frac{\delta h}{V_s} \quad (3.25)$$

Se obtiene:

3.6. Determinación de la altura utilizando mediciones de presión absoluta, su efecto en la estimación del IPWV

$$t_s = \frac{\delta R_h}{R_0 0.0006396 V_s} \quad (3.26)$$

Tomando $\delta R_h < \frac{\delta R_s}{10}$ donde δR_s es la precisión obtenida en el cálculo de la Sección (3.4) $\delta R_s = 3\%$, y utilizando $V_s = 6m/s$, con $R_0 = 70\%$ (valor estándar promedio), se obtiene un valor de $t_s = 1.1s$.

La humedad relativa puede presentar variaciones importantes en un periodo relativamente corto de tiempo, por ejemplo al pasar dentro de una nube, o corrientes de aire cargadas de humedad, estas variaciones pueden llegar a ser importantes y son muy difíciles de cuantificar. Es por esto que el sensor debe tener una constante de respuesta rápida que permita seguir lo mas fielmente posible estos cambios.

Es posible realizar un análisis similar al caso de la temperatura, para determinar la variación de la constante de respuesta del sensor de humedad en función de la altura. Sin embargo dada la naturaleza de esta variable se hace muy difícil predecir su comportamiento.

En el Capítulo 4 se tendrá en cuenta el valor mínimo de 1.1 segundos calculado para poder seguir una variación exponencial de humedad dada por la Ecuación (3.22). Este valor será una referencia para el diseño de un equipo de radiosondeo, si bien se tratará de utilizar la constante de respuesta más baja dentro de la disponibilidad de sensores en el mercado argentino.

Los sensores capacitivos tienen constantes de tiempo del orden de 0.3 segundos para temperaturas mayores a 10°C . Cuando la temperatura disminuye empieza a incrementarse la constante de respuesta a valores cercanos a 20 segundos para temperaturas de -40°C . Esto si bien representa un problema, no sería tan significativo, considerando que a temperaturas tan bajas la cantidad de vapor de agua es despreciable.

3.6. Determinación de la altura utilizando mediciones de presión absoluta, su efecto en la estimación del IPWV

Se evaluará la precisión en la estimación de la altura a partir de mediciones de presión absoluta, y la indeterminación máxima en este parámetro necesaria para el cálculo de la integral de la Ecuación (3.8).

Para el cálculo de la integral de vapor de agua, es necesario determinar la altura del radiosondador con la mayor precisión posible. En la integral de vapor de agua de la Ecuación (3.10), una precisión de ± 3 metros en la altura presenta una incertidumbre que puede despreciarse en la estimación del IPWV. Los sistemas de GPS de simple frecuencia, no pueden lograr este desempeño, por lo que se deben utilizar sensores de presión para estimar la altura.

Se determinará la incertidumbre máxima en la medición de presión absoluta, que permita calcular la altura con errores menores a ± 3 metros, haciendo de esta forma despreciable la indeterminación en el IPWV.

Utilizando la ecuación de la presión para el modelo de atmósfera estándar [10] descrito en la Sección (2.1) del Capítulo 2, es posible derivar una relación que permita estimar la altura en función de esta variable:

$$P = P_0 \left(1 - \frac{h}{44329}\right)^{5.25} \quad (3.27)$$

donde P_0 es la presión a nivel del mar con un valor de 101325 N/m^2 y h es la altura. Derivando y tomando el módulo en la Ecuación (3.27) se obtiene:

$$\delta P = \left(12 \left(1 - \frac{h}{44329}\right)^{4.25}\right) \delta h \quad (3.28)$$

3. Medición de vapor de agua utilizando radiosondas

Se observa que a medida que se incrementa la altura el error en la presión aumenta. Dado que en los primeros 4000 metros esta la mayor concentración de vapor de agua, puede utilizarse este valor como peor condición, tomando $\delta h = 3$:

$$\delta P = 0.24hPa \quad (3.29)$$

Puede verse que para poder determinar altura con precisiones de $\pm 3m$, el sensor de presión debe poder medir con precisiones del orden de $0.24hPa$. La determinación de presión con errores menores a $0.24hPa$ es bastante exigente, y requiere de sensores de altas prestaciones.

Capítulo 4

Desarrollo de un equipo de radiosondeo

En este capítulo se describirá la metodología implementada para el diseño, construcción y prueba de un equipo de radiosondeo, optimizado para mediciones de IPWV. Se mostrarán los sensores de presión, temperatura y humedad seleccionados, las pruebas sobre el enlace de radiofrecuencia propuesto y las mediciones realizadas comparando con instrumentos de referencia como la radiosonda Vaisala RS92™.

4.1. Necesidad de un instrumento de radiosondeo de diseño nacional

En la República Argentina los sondeos atmosféricos son escasos o inexistentes. La periodicidad con la que se realizan resulta muy irregular, dificultando su utilización para análisis en series temporales largas. Científicamente resulta interesante una cobertura espacial y temporal mayor a la actual del dato de radiosondeo. Hoy en día este requerimiento no es cumplido salvo por algunas estaciones en todo el país.

En la Figura (4.1) se observa un mapa donde pueden verse los radiosondeos disponibles públicamente desde la página de la Universidad de Wyoming [23] para todo Sudamérica.

En la República Argentina pueden verse solamente unos pocos radiosondeos, de los cuales tienen continuidad temporal solamente la estación SAEZ de Ezeiza. Esta estación efectúa dos radiosondeos diarios a las 12:00 de tiempo universal coordinado (UTC) y a las 00:00 UTC. El resto de las radiosondas sobre la región argentina presenta períodos donde no se efectúan mediciones.

Los equipos utilizados para las mediciones son de la marca VAISALA™, radiosondas modelos RS-80™, RS-90™ y las nuevas RS-92™ con sus receptores modelo DIGICORA™ correspondientes.

El principal inconveniente de los radiosondadores es que el instrumental se pierde en cada medición. Los equipos utilizados en su totalidad son importados, es por esto que el desarrollo de un instrumento que permita reducir los costos resulta fundamental.

Este tipo de dispositivos son los primeros pasos para equipos de mayor complejidad, como por ejemplo módulos meteorológicos en satélites de órbitas bajas, permitiendo la validación de técnicas y componentes en condiciones extremas.

En este contexto también se debe destacar la formación de recursos humanos que resulta un valioso aporte en esta dirección. Fue dirigida por el autor de esta tesis, una tesina de grado de Ricardo Estevan Pávez, estudiante de Ingeniería Electrónica, la temática de la



Figura 4.1. Radiosondeos en Sudamérica

misma fue el desarrollo de una carga de aplicación para vectores experimentales. Parte del instrumental desarrollado fue utilizado como carga de aplicación en un vector lanzado por Fuerza Aérea Argentina, proyecto que se describirá en este Capítulo y permitió la validación de los componentes electrónicos de la radiosonda en condiciones extremas.

4.2. Selección de sensores para el equipo de radiosondeo

Refiriéndose al Capítulo 3 en la Sección (3.4), donde se estimaron las precisiones de medición para determinar IPWV con una incertidumbre del orden de 2 mm, se pretende seleccionar los sensores más adecuados disponibles en el mercado Argentino que cumplan este requerimiento.

En la Tabla (4.1) se observan los valores de precisión y constante de respuesta estimada (Ver Capítulo 3, Sección 3.5 de esta tesis) para cada uno de los dispositivos:

Tabla 4.1. Requerimientos de los sensores

Características de los sensores			
τ	Sensor	Precisión	Rango
0.3 s	Temperatura	$\pm 0.6C^{\circ}$	$-40C^{\circ}$ a $50C^{\circ}$
1.1 s	Humedad	$\pm 3\%$	10% a 100%
-	Presión	$\pm 0.3hPa$	500hPa a 1100hPa

Se necesita en el caso de la temperatura, que pueda medir con precisiones de $\pm 0.3C^{\circ}$ y una constante de tiempo de 0.3 segundos, para la humedad $\pm 3\%$ con una constante de tiempo del orden de 1.1 segundos.

En el caso de la presión se dispone de sensores que tienen constantes de respuesta del orden de mili-segundos, lo que es más que suficiente para esta aplicación.

Haciendo un análisis de los sensores disponibles en nuestro país, existen numerosos dispositivos que permiten medir temperatura y humedad simultáneamente, los mas económicos presentan constantes de respuesta muy elevadas y además no soportan temperaturas por debajo de -20°C , que en este caso representa una limitación.

4.2.1. Sensor de temperatura y humedad

En el mercado argentino se encuentra disponible el sensor SHT 75TM, que presenta la ventaja de poder medir temperatura y humedad simultáneamente. Son fabricados por la empresa Sensirion de origen Suizo, y tienen buena disponibilidad en el mercado.

En la Figura (4.2) se observa las características de este tipo de dispositivos y en la Figura (4.3) sus dimensiones físicas. Entregan directamente una salida digital de 14 bits para temperatura y 12 bits para humedad. Utilizan un protocolo similar al conocido Inter-Integrated Circuit (I^2C) [26]

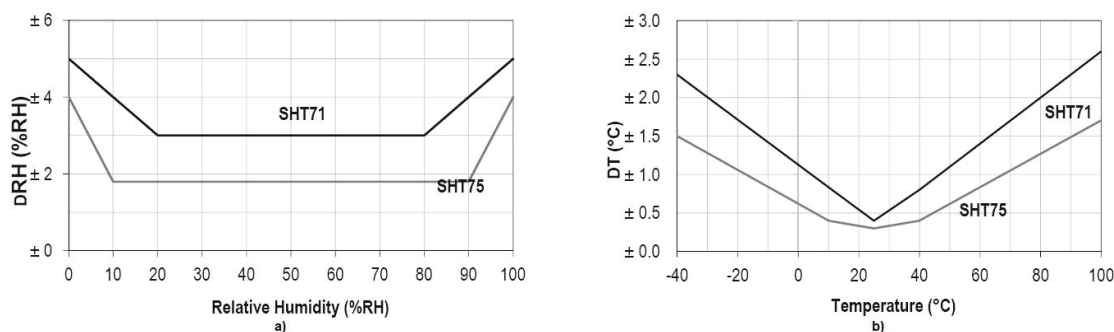


Figura 4.2. Incertidumbre y rango de medición de los sensores SHT 71TM y SHT75TM. Fuente: www.sensirion.com

En la Figura (4.2 a), puede observarse que a temperaturas por debajo de 10°C el sensor mide con una incertidumbre de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, hasta los -40°C , midiendo con $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$.

En el caso de la humedad, observando la Figura (4.2 b), puede verse que presenta una incertidumbre del $\pm 2\%$ para casi todo el rango de funcionamiento.

Se utilizará este sensor para la medición de temperatura y humedad en el equipo de radiosondeo, dado que de las opciones existentes en el mercado, es el que mejor se adapta a los requerimientos. En la etapa de prueba del instrumento, se evaluará el desempeño del mismo, comparando las mediciones contra una estación meteorológica de referencia.

Otro punto a favor de este dispositivo, es que integra toda la electrónica necesaria para la medición, facilitando el diseño, ya que solamente necesita un bus similar a I^2C para conectarse a un microcontrolador (μC). Además tolera la luz directa del sol, lo que permite montarlo en el exterior y lejos del cuerpo de la radiosonda, esto mejora la medida y elimina errores sistemáticos.

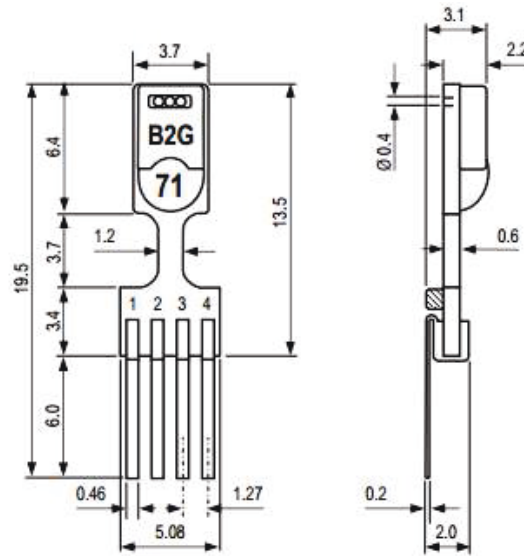


Figura 4.3. Dimensiones físicas de los sensores SHT71™ y SHT75™. Fuente: www.sensirion.com

4.2.2. Sensor de presión

El MPL115A2 es un sensor de presión absoluta de bajo costo, compensando por variación de temperatura en un rango que oscila desde -20°C a 85°C , y con medición de temperatura interna. Este dispositivo tiene una precisión de $\pm 10\text{hPa}$. El rango de medición es de 500hPa, hasta 1150hPa. En la Figura (4.4) se observa una imagen del mismo.



Figura 4.4. Sensor MPL115A2

La principal ventaja de este sensor, al igual que el de temperatura y humedad, es que entrega una salida digital. Todos los circuitos de calibración y el convertor analógico-digital (ADC) se encuentran integrados dentro del encapsulado, lo que facilita el diseño de los circuitos electrónicos adicionales, ya que puede conectarse directamente a un μC utilizando el protocolo I^2C .

Este dispositivo utiliza la tecnología MicroElectroMechanical Systems (MEMS), lo que permite ser integrado en un pequeño tamaño. En la Figura (4.5) se observa el diagrama de bloques interno del mismo.

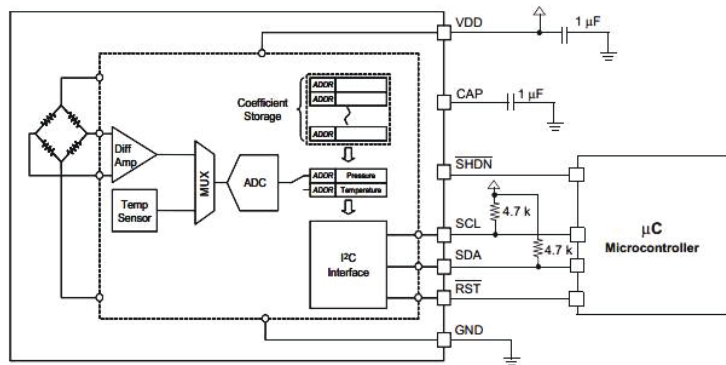


Figura 4.5. Diagrama de bloques interno del sensor de presión absoluta MPL115A2. Fuente: www.freescale.com

La conexión del sensor con un μC es muy simple, necesita únicamente de dos resistencias sobre los terminales SCL y SDA del puerto I^2C .

Tanto el sensor de temperatura y humedad como el de presión entregan salidas digitales, y pueden ser alimentados con tensiones que oscilan entre 3.1V hasta 5V. El sensor de presión se ubicará en el interior del equipo de radiosondeo, para prevenir que las bajas temperaturas afecten la medición.

4.3. Diseño electrónico del equipo de radiosondeo

Se pretende un diseño que resulte económico y a la vez eficiente. Todo el sistema de radiosonda debe ser alimentado por una batería, cuya capacidad permita una autonomía suficiente para efectuar las mediciones en el ascenso. El sistema también debe tener un módulo GPS, que permite conocer la ubicación (Latitud y Longitud) de la radiosonda, y un enlace de radiofrecuencia que transmita toda esta información a tierra, donde un receptor reciba y decodifique las mediciones.

El diagrama en bloques general puede observarse en la Figura (4.6). El μC coordina todas las tareas, selecciona cada sensor para la medición y toma la posición desde el módulo GPS.

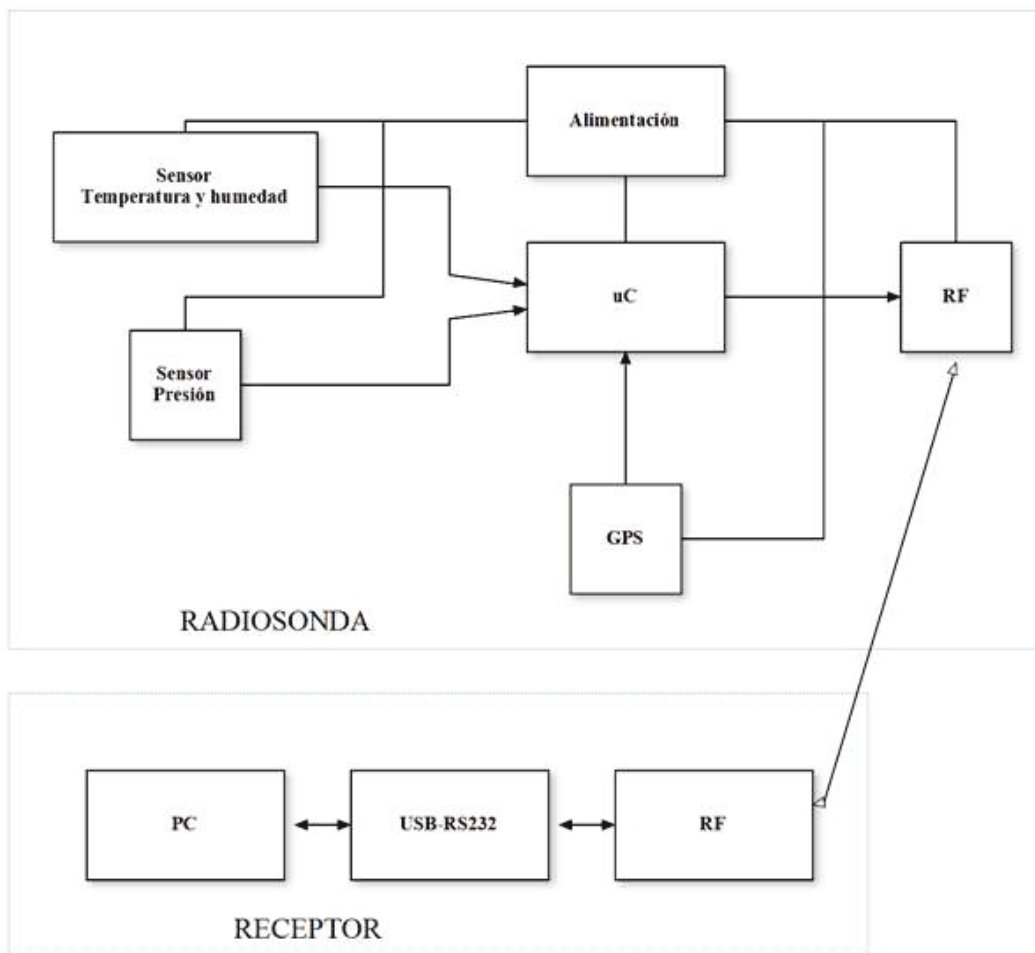


Figura 4.6. Diagrama en bloques del sistema de radiosondeo

El desarrollo puede dividirse en la etapa instrumental de baja frecuencia y la de radiofrecuencia (RF) de transmisión de datos.

El receptor consta del bloque de RF, que recibe la señal, luego se conecta con un convertor Recommended Standard 232 (RS232) a Universal Serial Bus (USB) para finalmente visualizar los datos en una PC, con un software desarrollado específicamente.

La etapa instrumental está formada por un μC PIC18LF452TM [27] conectado al sensor de presión MPL115A2TM mediante el bus I^2C , y al sensor de temperatura y humedad SHT75TM mediante dos terminales.

La etapa de radiofrecuencia de la radiosonda (Figura (4.6)) fue implementada utilizan-

do módulos Xbee PRO 868TM [28], de DIGITM trabajando en una frecuencia de 868 Mhz con potencias máximas del orden de 25dBm. Estos dispositivos permiten establecer enlaces bidireccionales, y pueden ser utilizados como transmisor y/o receptor indistintamente.

El equipo cuenta con un módulo GPS Trimble Lassen Sky IITM [29] (Figura 4.7), configurado en modo RS232, NMA 0183. La conexión con el μC se realiza mediante el módulo UART embebido del que dispone el mismo. El módulo GPS cuenta con una antena externa activa, que será ubicada por fuera de la radiosonda en su parte superior, para obtener una buena calidad de señal de los satélites.



Figura 4.7. Módulo GPS TRIMBLE

El módulo GPS se alimenta con una tensión de 5V, por lo que fue implementada una pequeña fuente elevadora mediante el integrado MC 34063 de la marca MotorolaTM, que permite elevar los 3,7volt de la batería hasta los 5V necesarios para el correcto funcionamiento de este dispositivo.

El equipo receptor (Figura (4.6)), consta también de un módulo Xbee-Pro 868TM, un convertor RS232-USB implementando con un integrado FTDI 232BL de la empresa Future Technology Devices InternationalTM, que se conecta por USB directamente a una PC.

En la Figura (4.8) se observa el circuito electrónico del bloque de baja frecuencia del equipo. El reloj del sistema esta compuesto por el cristal X1 con una frecuencia de 4Mhz, y los dos capacitores C1 y C2 de 22pF. Estos componentes generan una referencia de tiempo estable que permite tomar medidas a intervalos de tiempo de 2 segundos. La estabilidad de la referencia de tiempo es muy importante al momento de la comparación de las medidas. El circuito integrado U2 es una fuente elevadora.

El diodo D2 se utiliza para reducir los 3.7volt de la batería hasta 3 volt y de estar forma generar una diferencia de potencial de 2 volt, necesaria para que el circuito regulador del integrado MC34063 funcione correctamente.

Las resistencias, R1, R2, y R3 son necesarias para la comunicación de los sensores con el μC . La resistencia R6 mantiene al μC activo.

Como puede observarse en la Figura (4.8), el circuito es sumamente simple, y económico. Dos condiciones fundamentales dado que el instrumental no se recupera.

Se minimizaron al máximo los componentes adicionales utilizando sensores que integran toda la electrónica de medición.

Command	Code
Reserved	0000x
Measure Temperature	00011
Measure Relative Humidity	00101
Read Status Register	00111
Write Status Register	00110
Reserved	0101x-1110x
Soft reset, resets the interface, clears the status register to default values. Wait minimum 11 ms before next command	11110

Figura 4.10. Secuencias de comandos, sensor SHT75™. Fuente: www.sensirion.com

Por ejemplo, si se quiere medir temperatura la secuencia de bits a enviar por la línea DATA es la siguiente: 10100000011, al mismo tiempo se debe enviar la señal de reloj al pin CLOCK en sincronismo con los datos, de manera que puedan ser interpretados correctamente por el sensor.

Una vez que se le comunica al sensor que tipo de lectura se va a realizar, se requiere de un tiempo de espera, que depende de la resolución en bits utilizada y de la medición que se esté efectuando (temperatura o humedad). Estos tiempos oscilan entre 11/55/210ms según se utilice 8/12/14bit. Para el diseño de este equipo fue utilizada la máxima resolución de 14 bits para temperatura y 12 bits para humedad.

Luego de recibir los 8 bits con la medición a realizar, el sensor envía un pulso bajo confirmando que la secuencia de bits fue recibida (ACK), este pulso es enviado por la misma línea DATA, razón por la cual el μC previamente debe cambiar su entrada a alta impedancia (pin establecido como entrada). El estado alto de la línea se mantiene gracias a la resistencia de pull-up hasta tanto el sensor fuerce a cero indicando que la secuencia fue recibida.

Cuando el sensor ha puesto en bajo la línea DATA luego del tiempo que le toma realizar la medida, comienza a enviar los bits con los datos de la medición, primero se envía la parte más significativa (MSB) y después la menos significativa (LSB). Una vez recibidos todos los bits de MSB, el μC debe enviar al sensor una confirmación poniendo en bajo la línea DATA, para esto el pin correspondiente debe cambiar de modo de alta impedancia (entrada) a salida.

En la Figura (4.11) se observa un ciclo completo de lectura de temperatura y humedad.

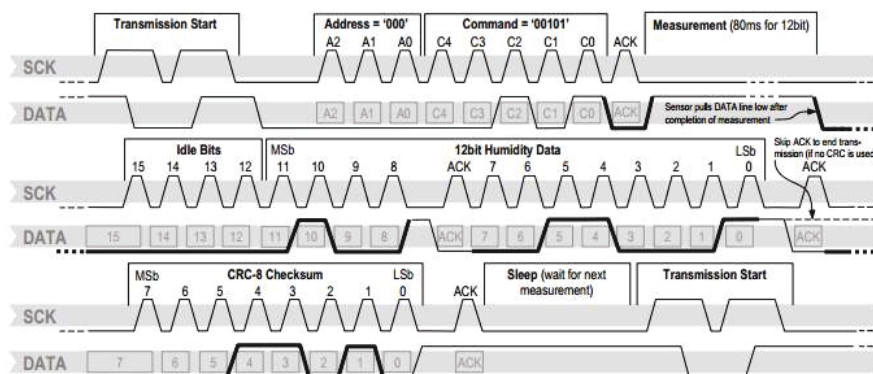


Figura 4.11. Secuencia de lectura completa, sensor SHT75™. Fuente: www.sensirion.com

Finalmente luego de haber transmitido todos los datos de las mediciones, se dispone de la opción de poder realizar un chequeo de errores utilizando redundancia ciclica (CRC). En este proyecto no se utiliza esta opción ya que consume mayor tiempo de transmisión lo que resulta innecesario para esta aplicación; es por esto que el último bit de confirmación ACK no es utilizado. Se envían entonces, 9 pulsos de reloj para finalizar la transmisión.

Una vez terminada la comunicación con el sensor se dispone de un número de 16bits que contiene el valor de temperatura o humedad leído. A este binario de 16 bits se le debe aplicar una ecuación para convertirlo en una medida de temperatura o humedad fácilmente interpretable, en la hoja de datos del fabricante se facilitan estas ecuaciones.

Las siguientes ecuaciones permiten transformar los números enteros de las cuentas del conversor analógico digital, en valores de temperatura y humedad:

$$RH_{linear} = c_1 + c_2SO_{rh} + c_3SO_{rh}^2 \quad (4.1)$$

$$RH_{true} = (T_c - 25)(a_1 + a_2SO_{rh}) + RH_{linear} \quad (4.2)$$

$$T_c = d_1 + d_2SO_T \quad (4.3)$$

Siendo $c_1 = -2.0468$, $c_2 = 0.0367$, $c_3 = -1.5996 \cdot 10^{-6}$, $a_1 = 0.01$, $a_2 = 8 \cdot 10^{-4}$, $d_1 = -40.1$ y $d_2 = 0.01$ constantes que brinda el fabricante. Las variables SO_{rh} y SO_T son los valores de las cuentas de los conversores ADC, de humedad y temperatura respectivamente. La humedad RH_{linear} se compensa por temperatura, quedando la medida linealizada y compensada que brinda el sensor, determinada por RH_{true} . Para compensar se utiliza la medición de temperatura T_c que brinda el propio sensor.

Las Ecuaciones (4.1),(4.2) y (4.3) son programadas dentro del μC , para efectuar la conversión de las cuentas de los ADC a los valores reales de temperatura y humedad. Es por esto que el μC debe ser capaz de efectuar operaciones en punto flotante.

4.3.2. Lectura del sensor de presión

El sensor de presión MPL115A2 es compatible con el protocolo I^2C del que la mayoría de los compiladores en alto nivel poseen librerías, por lo que la comunicación con el μC resulta trivial.

En la Figura (4.12) se observa el ciclo de lectura de este sensor brindado por el fabricante.

La secuencia consta de leer los coeficientes de calibración del sensor, enviar el comando de inicio de lectura de los conversores ADC y leer el valor medido. Los coeficientes de calibración dependen del sensor, y varían ligeramente de uno a otro dispositivo de la misma familia.

La ecuaciones para la conversión de las cuentas de los conversores son las siguientes:

$$P_{comp} = a_0 + (b_1 + c_{12}T_{adc})P_{adc} + b_2T_{adc} \quad (4.4)$$

$$P_{hpa} = 10P_{comp} \left(\frac{150 - 50}{1023} \right) + 500 \quad (4.5)$$

Tanto la Ecuación (4.4) como la (4.5) son provistas por el fabricante, siendo las constantes b_1 , c_{12} y b_2 obtenidas desde la lectura del sensor previo a la medición de presión. T_{adc} y P_{adc} son las cuentas de los conversores ADC, de temperatura interna y de presión. La presión final dada por la ecuación (4.5) tiene unidades de Hectopascales.

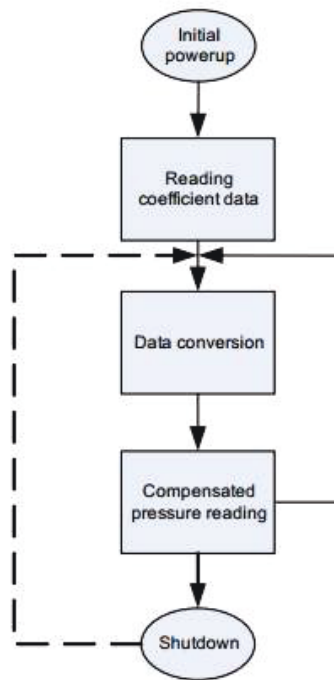


Figura 4.12. Diagrama de flujo de lectura, sensor MPL115A2

4.4. Ensayos de validación de la etapa instrumental

A partir de los sensores seleccionados, fueron construidos dos equipos, una estación meteorológica portátil y un dispositivo experimental que fue ubicado en la cabeza de un vector de lanzamiento en lo que se conoció como "Experiencia centenario", realizada por la Fuerza Aérea Argentina.

4.4.1. Estación meteorológica

El objetivo de la construcción de un prototipo de estación meteorológica, fue la validación de las mediciones de los sensores empleados en la radiosonda experimental. Se utilizó para la validación la estación meteorológica de referencia, ubicada en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, a cargo de la Dra. Nora Sabbione quien brindó los datos para poder efectuar la experiencia. La estación cuenta con un registro histórico de datos meteorológicos de alta calidad con equipamiento de la marca Vaisala™.

Otra aplicación de la estación meteorológica es la medición de IPWV a partir de la técnica GPS, brindando los datos sinópticos de presión y temperatura superficial necesarios para estimar el retardo troposférico húmedo. Este tema será tratado en detalle en el Capítulo 5 de esta tesis.

En las imágenes de la Figuras (4.13) y (4.14) se observa el prototipo de estación meteorológica construido. El equipo se basa en el circuito elemental de la Figura (4.8), al que se le adicionó una conexión USB mediante un adaptador RS232-USB fabricado con el chip FT-DI232, un display de cristal líquido (LCD) de 16x2 segmentos para visualizar en tiempo real las mediciones, una memoria de 2GB para almacenar mediciones, y una conexión a celular utilizando un módulo SIMCOM 900™ que permite monitorear el estado del equipo mediante mensajes SMS. La memoria de almacenamiento fue implementada a partir de una tarjeta

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo



Figura 4.13. Prototipo construido de una estación meteorológica portátil

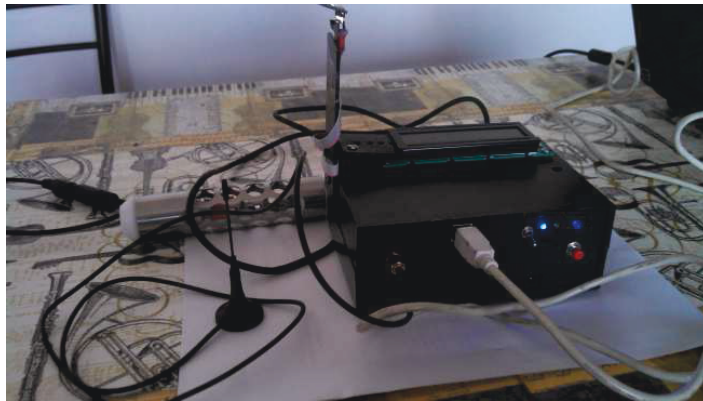


Figura 4.14. Prototipo en funcionamiento

Micro SD™. Todos los circuitos electrónicos fueron ubicados en una caja plástica para su protección.

En el caso del sensor de temperatura y humedad fue construida una cápsula metálica con orificios que permite protegerlo. En la imagen de la Figura (4.15) se observa más en detalle la pieza construida. El objetivo de esta cápsula protectora es poder manipular de manera segura el sensor, para ubicarlo cerca del equipo de referencia. Dentro de la cápsula puede observarse el sensor SHT75™, montado sobre una placa de circuito impreso.

El sensor de presión fue montado sobre una pieza de plástico separado de la caja donde se ubican los circuitos electrónicos, de manera que el calor generado por los mismos no afecte la medición.



Figura 4.15. Capsula protectora del sensor de temperatura y humedad

4.4.2. Resultados de la validación de los sensores

En la imagen de la Figura (4.16) se observa el prototipo construido, ubicado dentro del abrigo meteorológico de la estación Vaisala™, en el predio de la Facultad de Astronomía y Ciencias Geofísicas de la Ciudad de La Plata

La experiencia consistió en 12 días de validación ininterrumpidos. Los datos son obtenidos cada 5 minutos, que es el tiempo entre medidas de la estación Vaisala™. Los resultados pueden observarse en las Figuras (4.17) a (4.22), el eje de tiempo representa mediciones cada cinco minutos.

Los datos fueron almacenados en la memoria interna del prototipo construido. El estado de funcionamiento del prototipo se controló remotamente utilizando la red de telefonía GPRS. De esta, forma pudo monitorearse en todo momento que las mediciones se estuvieran realizando así como también detectar la presencia de algún corte en el suministro eléctrico, ya que no se disponía de una fuente de energía auxiliar.

Las Figuras (4.17), muestra la medición de temperatura de ambos equipos, y la Figura (4.18) su diferencia. Los gráficos siguientes repiten esta medida para el caso de la humedad en las Figuras (4.19) y (4.20) y la presión absoluta en las Figuras (4.21) y (4.22).

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo

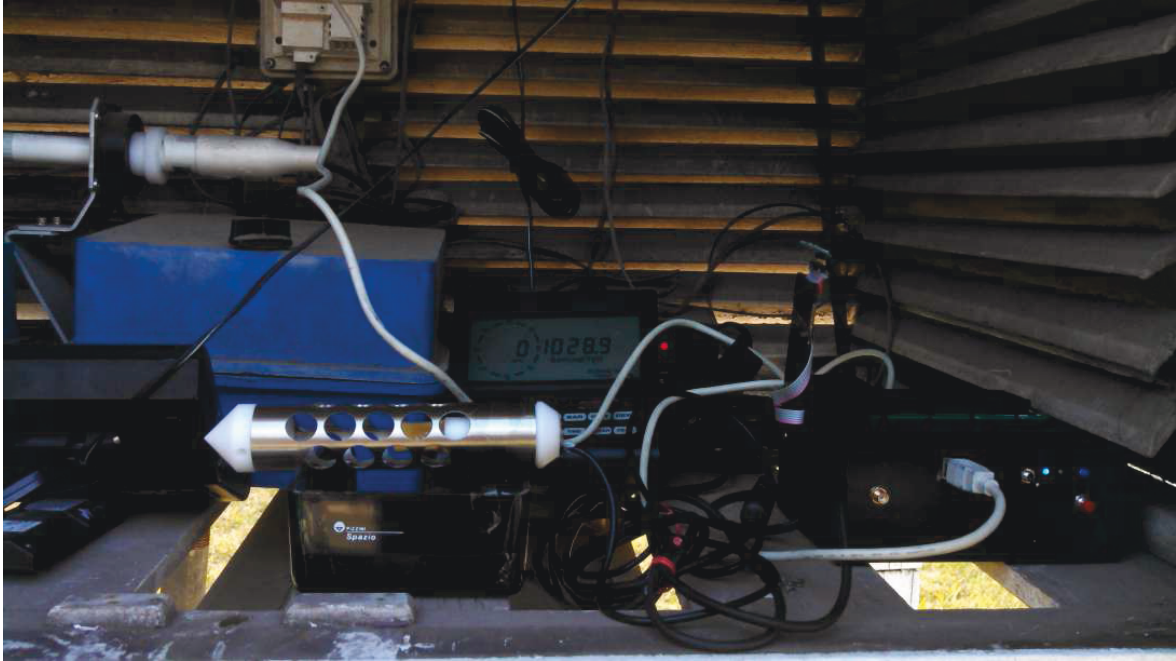


Figura 4.16. Prototipo instalado en el abrigo meteorológico donde se encuentra la estación Vaisala™

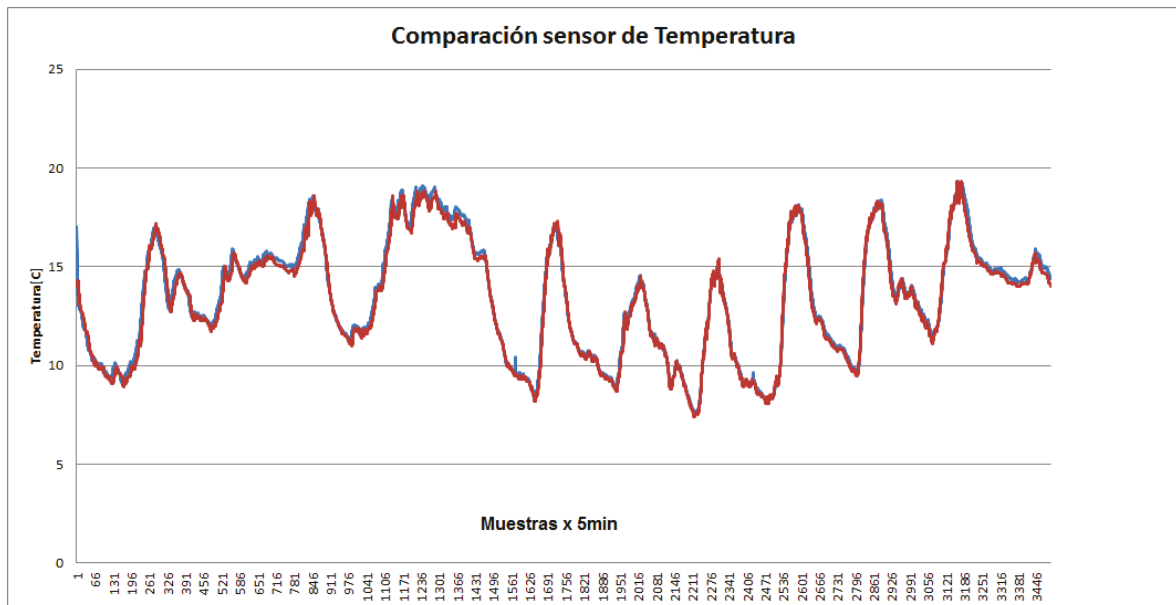


Figura 4.17. Curvas de temperatura medida: en azul temperatura medida por el prototipo y en rojo temperatura medida por la estación meteorológica Vaisala™

4.4. Ensayos de validación de la etapa instrumental

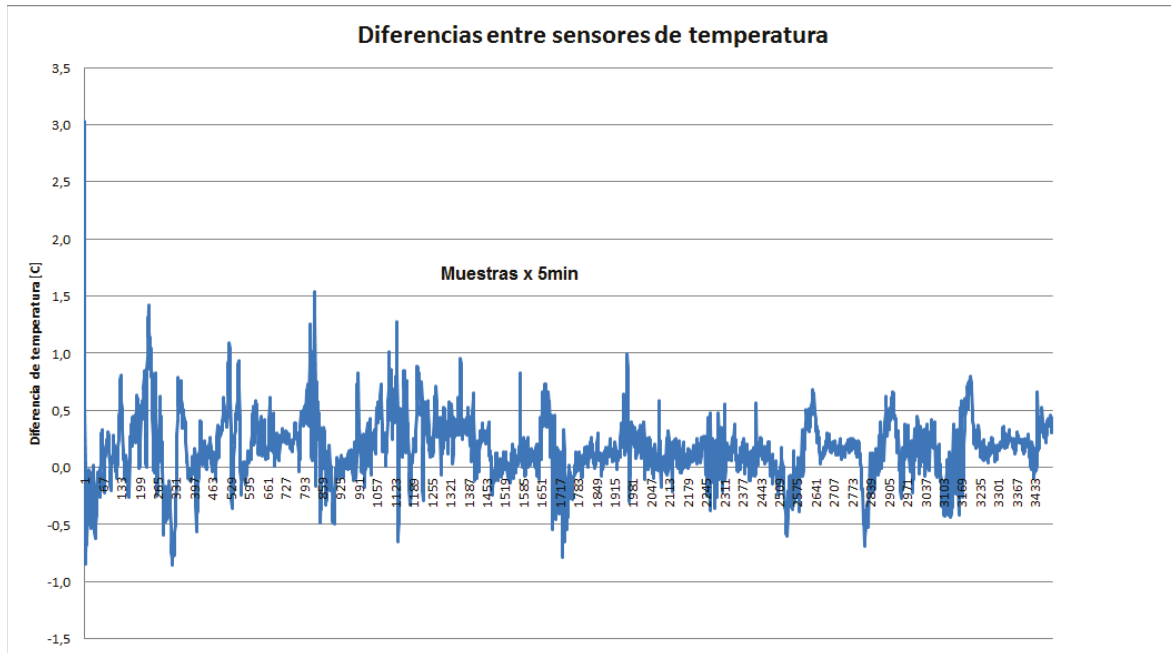


Figura 4.18. Diferencias de temperatura entre el Prototipo y la estación meteorológica Vaisala™

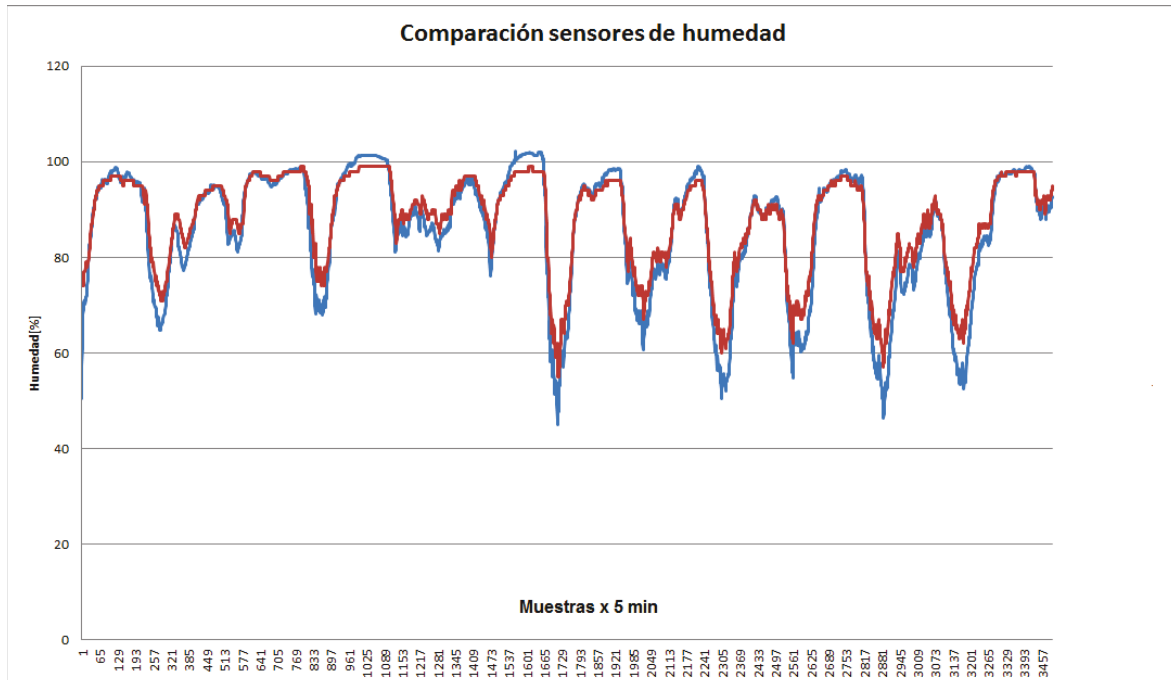


Figura 4.19. Curvas de humedad medida: en azul humedad medida por el prototipo y en rojo humedad medida por la estación meteorológica Vaisala™

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo

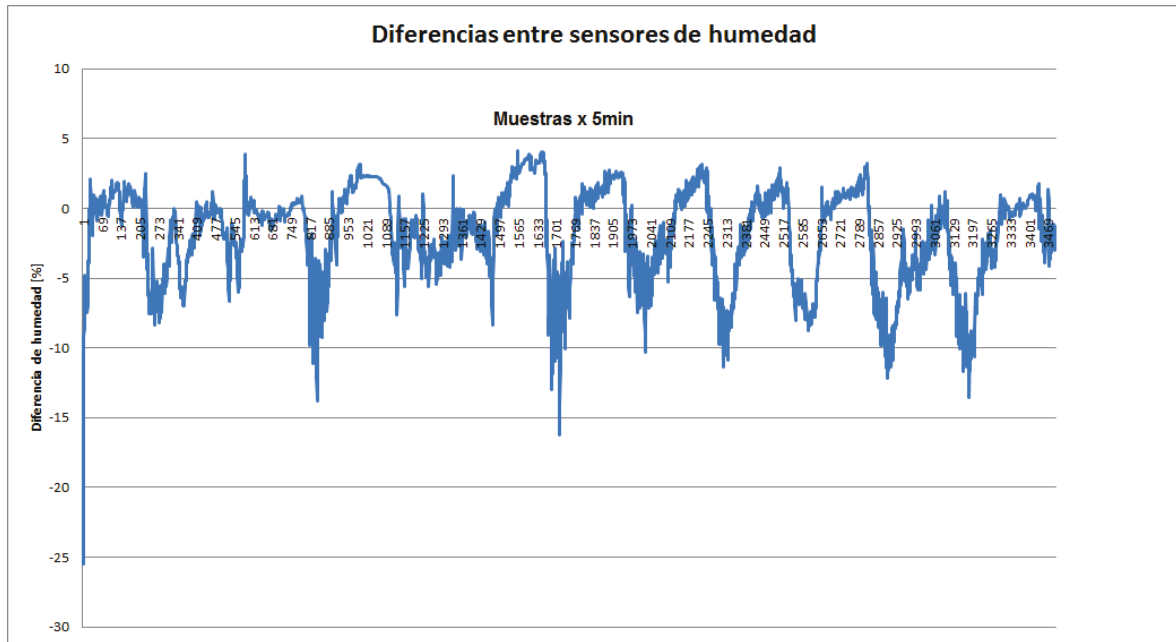


Figura 4.20. Diferencias de humedad entre el Prototipo y la estación meteorológica Vaisala™

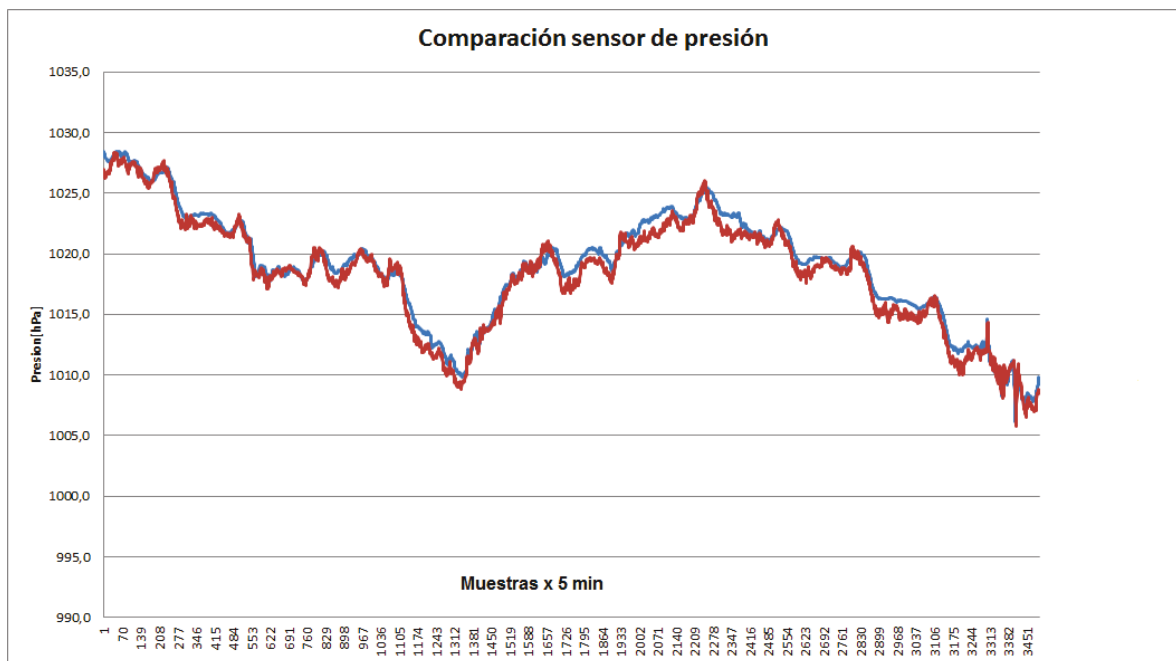


Figura 4.21. Curvas de presión medida: en azul presión medida por el prototipo y en rojo presión medida por la estación meteorológica Vaisala™

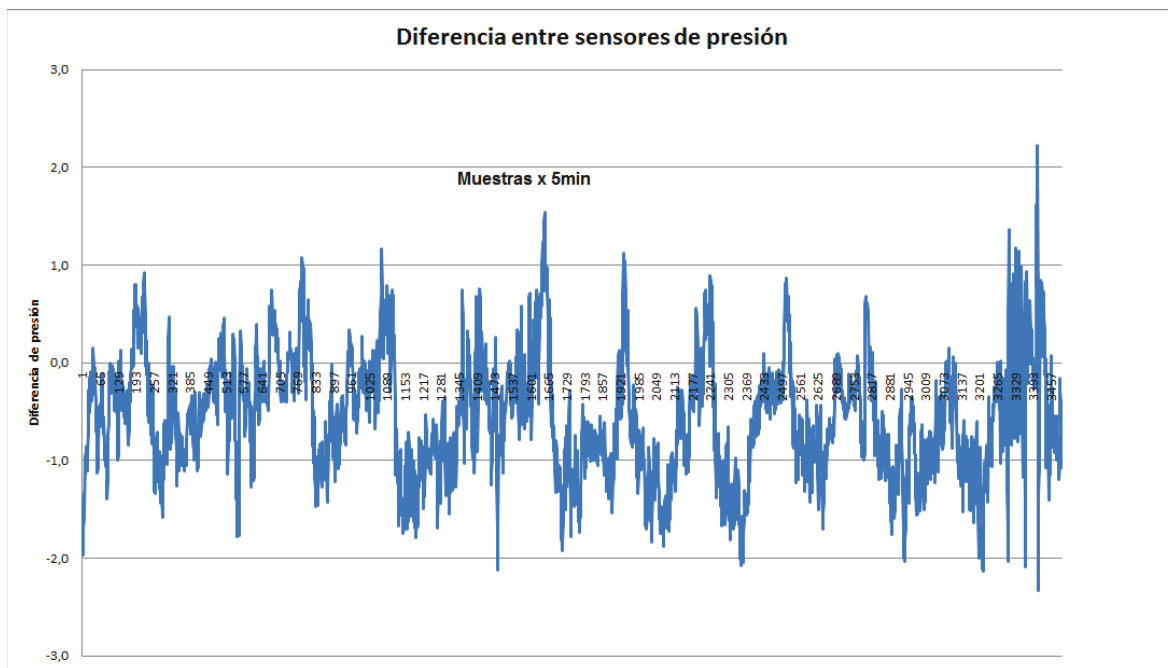


Figura 4.22. Diferencias de presión entre el Prototipo y la estación meteorológica Vaisala™

En la Tabla (4.2), se observan los resultados de la experiencia. Para los cálculos estadísticos se eliminaron los últimos 3 días de medición debido a que la precisión del reloj construido en el circuito prototipo, no permitió mantener el sincronismo mas allá de los 15 días de iniciada la experiencia. Si bien esto representa un problema en validaciones largas, en el caso de una radiosonda, cuyo tiempo de vuelo es mucho menor, no lo será.

La columna $\Delta Prom$ de la Tabla (4.2) representa el promedio de las diferencias de las mediciones del prototipo respecto de la estación Vaisala™.

$$\Delta Prom = \frac{\sum_{i=1}^N (Medicion_{Prototipo_i} - Medicion_{Vaisala_i})}{N} \tag{4.6}$$

La desviación estándar σ , se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Medicion_{Prototipo_i} - Medicion_{Vaisala_i})^2}{N} - \Delta Prom^2} \tag{4.7}$$

La columna *Med.Prom* de la Tabla (4.2), indica el valor promedio de los parámetros medidos en la ventana temporal de validación. Estos valores indican una presión promedio de 1020 hPa, una humedad relativa del 83% y una temperatura de 11.7°C.

Tabla 4.2. Validación entre las mediciones de la estación meteorológica Prototipo y la de referencia Vaisala™

Sensor	Resultados de la validación		
	$\Delta Prom$	σ	Med. Prom
Presión	-0.6hPa	0.6hPa	1020hPa
Humedad	-2 %	4 %	83 %
Temperatura	0.2°C	0.38°C	11.7°C

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo

La desviación σ de la presión es de apenas 0.6hPa, cercana al valor calculado teóricamente de 0.24 hPa (Ver Sección (3.4)). En cuanto a la temperatura se observa que su precisión es del orden de 0.4°C, mejor a los 0.6°C calculados (Ver Sección (3.4)). La humedad presenta desviaciones del orden de 4%, valor un poco mayor al 3% impuesto por los requerimientos con un corrimiento de -2% respecto del sensor Vaisala™. Los resultados de la comparación resultan satisfactorios, se estima que podrá utilizarse este diseño en la construcción del equipo de radiosondeo, para medir IPWV.

4.4.3. Ensayo del equipamiento instrumental, "Experiencia Centenario"

En el marco del proyecto "Experiencia Centenario", de Fuerza Aérea Argentina fue desarrollado un prototipo de carga de aplicación que integra todos los componentes instrumentales de la radiosonda, exceptuando el GPS. Esta carga de aplicación tiene como objetivo validar la electrónica que se utiliza en el prototipo de radiosonda descrito en secciones posteriores de este capítulo, en condiciones extremas. En la imagen de la Figura (4.23) se observa el equipo construido.



Figura 4.23. Carga de aplicación desarrollada para el ensayo de instrumental meteorológico en un vector de lanzamiento

El instrumento, de características similares a una radiosonda, fue implementado con los siguientes requerimientos:

- Baterías de 3.7volt 1100 mAh, con capacidad para 5 días de funcionamiento continuo.
- Medición de temperatura, presión y humedad relativa.
- Peso de 100 gramos, desarrollada con aluminio de alta resistencia.
- Almacenamiento interno de 2GB, implementado mediante tarjeta SD.

En la imagen de la Figura (4.24) se observa la placa desarrollada al momento de su programación, y en la Figura (4.25) el dispositivo montado con el conjunto de experimentos de distintas universidades. En el diseño y construcción de la caja metálica de aluminio participo la Universidad Tecnológica Nacional Regional de La Ciudad de La Plata (UTNRLP), utilizando una fresa de control numérico CNC.

En lo que se refiere al vector el motor estaba compuesto fundamentalmente por el tubo motor y el conjunto tobera, con un diámetro de 280 mm y una longitud aproximada de 2.400 mm. Sobre el conjunto tobera, en su parte exterior se ubica el módulo de estabilización compuesto por cuatro aletas de estabilización de forma trapezoidal, en disposición cruciforme

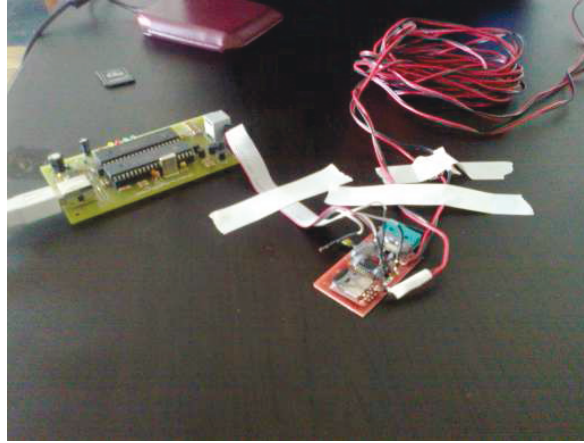


Figura 4.24. Placa de la carga de aplicación desarrollada

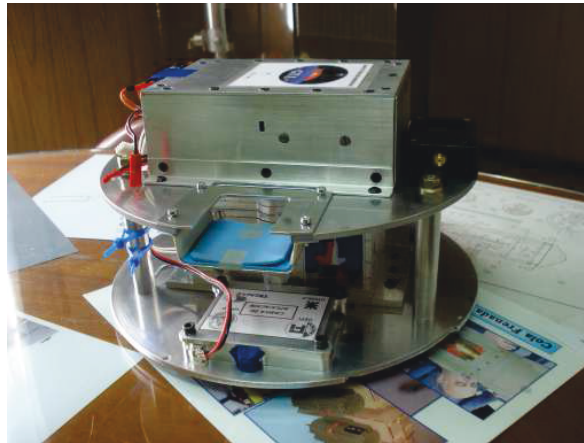


Figura 4.25. Instrumento montado sobre el módulo de experimentos

con perfil simple cuña modificada. Estas aletas se encuentran ligeramente anguladas con un calaje de 6 minutos que produce en el cohete una rotación axial (“roll”) con el propósito de disminuir la dispersión durante sus fases de vuelo. Los tres módulos que conforman la carga útil (recuperación, invitado y telemétrico) suman una longitud aproximada de 1.200 mm, finalizando con la proa cónica de aproximadamente 1.040 mm de longitud, obteniéndose una longitud final del cohete de aproximadamente 4.640 mm.

El módulo de experimentos, una vez alcanzada la altura de vuelo, debía caer asistido por un paracaídas para poder recuperarse en tierra, según se observa en el esquema de la Figura (4.26). El objetivo del prototipo de la carga de aplicación, era determinar los parámetros de temperatura, humedad relativa y presión absoluta, en la etapa de caída del módulo.

El dispositivo fue lanzado el día 18 de diciembre de 2013 a las 7:25 de la mañana en la Base de Lanzamiento de Chamical, ubicada en la provincia de La Rioja, en la imagen de la Figura (4.27) se observa el instante del despegue.

Debido a una falla en las etapas del cohete, nunca abrió el paracaídas y la carga de aplicación se estrelló violentamente contra tierra.

Los dispositivos electrónicos sobrevivieron a la caída, verificando la solidez del diseño. Los únicos datos que pudieron medirse fueron la temperatura y humedad relativa dentro del cohete. Esta información si bien no tiene ningún valor científico, si tiene valor práctico, habiéndose

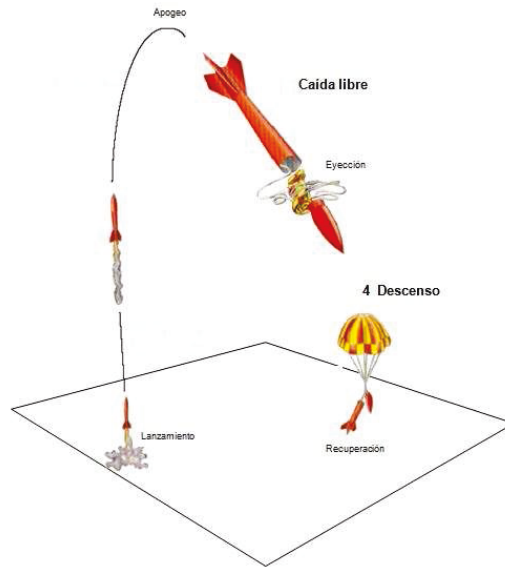


Figura 4.26. Lanzamiento y separación de la ojiva del Vector



Figura 4.27. Cohete centenario al momento del despegue

logrado toda la logística necesaria para llevar adelante un experimento de esta envergadura y permitiendo probar dispositivos electrónicos en condiciones únicas. En la Figura (4.28) se observan los datos que pudieron recuperarse.

Se está trabajando actualmente en una carga de aplicación con características mejoradas, preparada para futuros lanzamientos de vectores.

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo

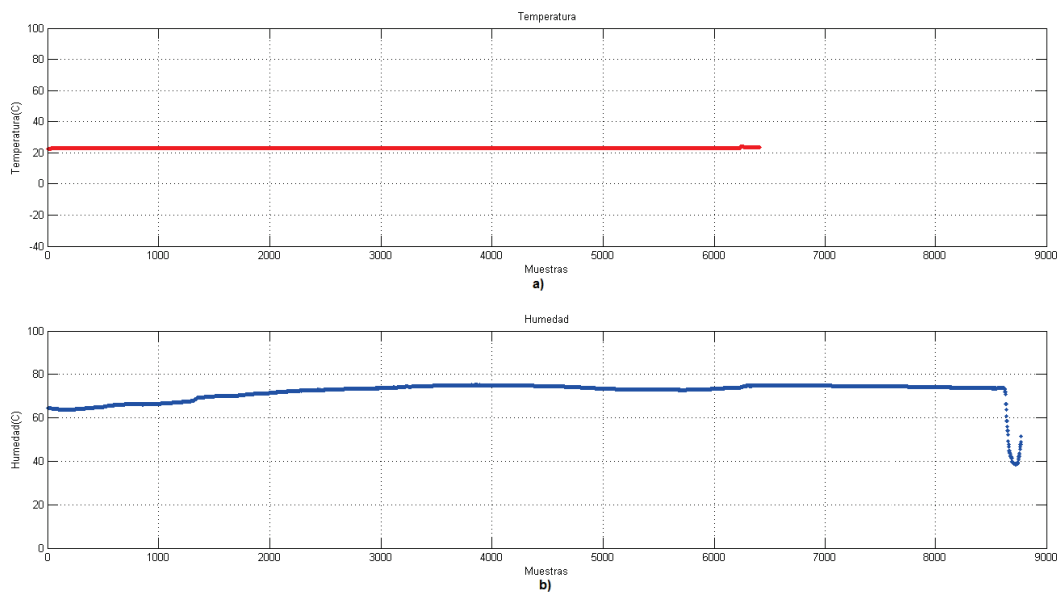


Figura 4.28. Datos recuperados de la experiencia, a)-medición de temperatura, b)-medición de humedad.

4.5. Diseño del enlace de Radiofrecuencia del equipo de radiosondeo

Uno de los puntos críticos en el diseño del prototipo de radiosondador es la etapa de radiofrecuencia, debe tener la capacidad de poder transmitir a tierra la información de las mediciones y tener un consumo reducido para no agotar las baterías. Si esta etapa falla se perderá por completo los datos del equipo.

La experiencia en el lanzamiento de radiosondadores indica que pueden existir desplazamientos horizontales debidos a vientos de hasta 300Km, dependiento de la zona geográfica y el clima de la región. En los primeros 4Km de altura respecto de la estación de lanzamiento, el desplazamiento horizontal suele ser menor a 100Km.

En lo referente a la altura puede decirse que para determinar IPWV la mayor contribución se encuentra en capas bajas de la atmósfera, y que en mayor medida este gas se encuentra en los primeros 2 km a 4 Km [31]. Aún así resulta interesante poder realizar mediciones del perfil atmosférico hasta alturas superiores, principalmente en la tropósfera hasta unos 11Km de altura.

Debido a que el objetivo principal de este equipo es la determinación de IPWV, se tomará como cota máxima de desplazamiento horizontal 100Km, y una altura máxima de 11 Km, superior a los 4km de la capa de vapor de agua, para darle un margen razonable al instrumento. Teniendo en cuenta estas consideraciones resulta la situación de la Figura (4.29):

La distancia máxima que deberá poder transmitir la radiosonda con este esquema es de 101Km.

Otro factor a tener en cuenta es la frecuencia que se puede utilizar para transmitir. Los sistemas de radiosondeo suelen utilizar la frecuencia de 403Mhz o 1608Mhz. Al momento de contrastar las mediciones del prototipo, se lanzará en simultáneo un equipo comercial Vaisala™, por lo que sería deseable que transmitan a distintas frecuencias para evitar interferencias.

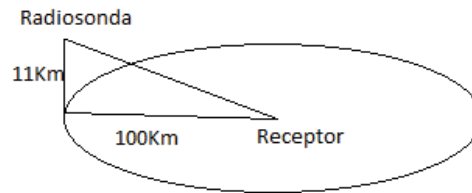


Figura 4.29. Distancia máxima del enlace de RF

4.5.1. Sistemas embebidos de radiofrecuencia

Para la construcción de la etapa de radiofrecuencia se utilizan módulos electrónicos embebidos, que concentran en un solo componente todos los elementos necesarios para establecer un enlace de radiofrecuencia. Estos dispositivos suelen disponer de un protocolo de comunicaciones que mejora notablemente la estabilidad y rendimiento del enlace.

La utilización de sistemas embebidos representa una alternativa de diseño modular, permitiendo utilizar diferentes tipos de componentes (con mayor y menor potencia de transmisión) dependiendo el tipo de aplicación que se le desee dar al equipo, siendo fáciles de reemplazar alterando muy poco el diseño del resto de la etapas electrónicas

Existen en el mercado varios módulos de radiofrecuencia que pueden adaptarse a esta aplicación. Uno de ellos son los Xbee™ de Digi™. Entre los de mayor potencia se encuentra el Xbee-pro 868™ [32]. Disponen de una potencia máxima de salida de 25 dBm y velocidades configurables desde los 1200 baudios. Poseen una sensibilidad de -112dBm a 9600 baudios. Estos módulos se alimentan con 3.3v, y trabajan a una frecuencia de 868Mhz. En la Figura (4.30) puede observarse uno de estos dispositivos.



Figura 4.30. Módulo Xbee Pro 868™

Se realizará un ensayo que permitirá determinar si este módulo resulta apto para poder transmitir distancias del orden de 100km. Previo a este ensayo se efectuará el cálculo del enlace de radiofrecuencia considerando que en todo momento existe línea de vista libre de obstáculos entre transmisor y receptor (Escenario que se presenta en el caso del equipo de radiosondeo y su receptor en tierra).

4.5.2. Cálculo del enlace de Radiofrecuencia

Se aplicarán las ecuaciones de cálculo de enlaces [33], considerando línea de vista entre transmisor y receptor, y atenuación del espacio libre, para una atmósfera ideal sin otro efecto sobre la señal electromagnética. La ecuación para la potencia recibida puede escribirse como:

$$P_r = P_g1 + P_g2 + P_t - P_{tel} \quad (4.8)$$

Siendo P_r la potencia recibida (en el receptor), P_g1 y P_g2 las ganancias de las antenas transmisoras y receptoras respectivamente, P_t la potencia transmitida y P_{tel} las pérdidas del espacio libre. La expresión de P_{tel} es:

$$P_{tel} = 20 \log\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right) \quad (4.9)$$

siendo λ la longitud de onda y D la distancia entre antenas.

Para un primer análisis se consideran antenas con ganancia de 0 dB, pérdidas en los conectores de la antena receptora y transmisora de 0.5 dB, una sensibilidad de -112 dBm, y que tanto el módulo receptor como el transmisor se encuentran cerca de la antena (sin pérdidas en los cables). Para una potencia de 25 dBm (potencia máxima que pueden transmitir estos dispositivos) y aplicando la ecuación del cálculo de enlaces se obtiene:

$$D = \frac{\lambda}{4\pi} 10^{(P_r + P_g1 + P_g2)/20} = 173 \text{ Km} \quad (4.10)$$

Se observa que teóricamente y con antenas sin ganancia este módulo debería poder transmitir sin problemas distancias superiores a 100Km. Cabe destacar que en el máximo de la sensibilidad, la tasa de errores puede ser muy elevada, por lo tanto debe hacerse un ensayo antes de decidir si el módulo cumple los requerimientos.

4.6. Ensayo del módulo de radiofrecuencia

El objetivo de esta experiencia es determinar si es posible realizar un enlace estable de radiofrecuencia con los módulos XBee Pro 868TM aplicable al prototipo de radiosonda. Se desea evaluar para una tasa de errores del 2% en la información del enlace, que sensibilidad real presentan.

Para realizar la experiencia se utiliza un convertor RS232-USB, conectado a los pines *Dout* – *Din* (pines 2 y 3) del módulo Xbee [32]. El convertor se conecta a una notebook utilizando un cable USB que proporciona comunicación y alimentación al dispositivo. En el otro extremo del enlace se utiliza otro módulo con los terminales *Dout* – *Din* cortocircuitados de manera que todo lo que reciba este dispositivo será retransmitido nuevamente. Este módulo es alimentado utilizando una batería de litio de 3.7 volt. En la Figura (4.31) se observa el esquema de conexión:

La experiencia fue realizada en la ciudad de Tandil, en las coordenadas 37,1956° S, 58,5336° N, ubicando un punto elevado sobre una sierra en la que se dispuso el transmisor junto con una Notebook.

El receptor se ubicó en un vehículo que al desplazarse sobre la ruta retransmitía la señal. Se utilizó el software X-CTUTM [34] de DigiTM en el modo de detección de rango para evaluar la calidad del enlace.

Se utilizaron antenas del tipo doble hélice cuadrifilar con una ganancia máxima del orden de 2 dB, que fueron construidas específicamente para el ensayo. En la imagen de la Figura (4.32) se observa la antena desarrollada para la experiencia, fue construida con polarización circular derecha.

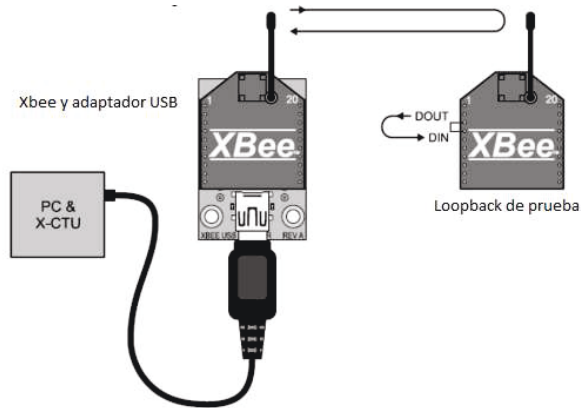


Figura 4.31. Conexión de los módulos

Este tipo de antenas permite obtener ganancia direccional, sin utilizar un plano de tierra, lo que es ideal para el caso de los radiosondadores, ya que permite concentrar la energía de la antena hacia el receptor en tierra.

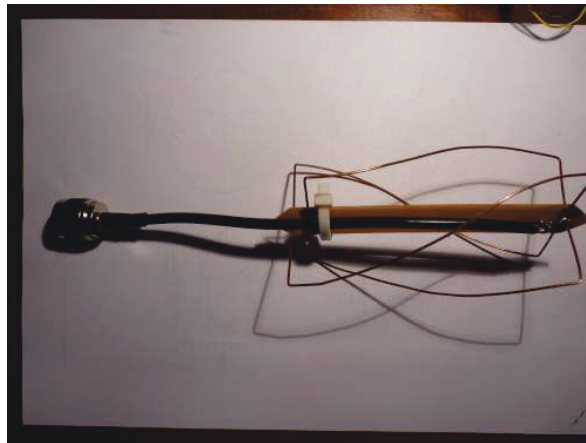


Figura 4.32. Antena doble helice cuadrifilar desdoblada

En la Figura (4.34) se observa el perfil del terreno y en la Figura (4.33) una foto al momento de realizar la experiencia:



Figura 4.33. Transmisor



Figura 4.34. Perfil del terreno

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo

Se efectuaron 5 mediciones en diferentes condiciones de distancia y potencia emitida por el transmisor. En la Tabla (4.3) se observan los resultados. Se logró una distancia máxima de 12Km, dado no había línea de vista.

Puede observarse que a partir de los -102 dBm comienza a perderse calidad en el enlace. A partir de -105 dBm la tasa de errores es de 50 %. Este ensayo permitió comprobar que la sensibilidad útil del módulo de radiofrecuencia es de aproximadamente -102 dBm, ya que para valores menores se pierden gran cantidad de datos. Los ensayos fueron hechos a 9600 baudios.

Pot. Transmitida[dBm]	Pot. Recibida[dBm]	Tasa de Error[%]	Distancia[Km]
0	-90	0	1
0	-102	2	5
20	-83	0	5
0	-111	95	12
25	-87	0	12

Tabla 4.3. Mediciones del enlace de RF

Puede aplicarse nuevamente la ecuación de cálculo de enlace para obtener, con las mediciones reales, la distancia de transmisión que se puede lograr con los módulos XBee Pro 868™

$$D = 87Km \quad (4.11)$$

El resultado indica que para una sensibilidad de -102dBm, se recibirá información con una tasa de error del orden de 2 %, que aplicado al cálculo del enlace, permite estimar una distancia máxima de 87Km.

Debe tenerse en cuenta que pueden existir otros efectos que atenúen la señal electromagnética. Sería deseable obtener una potencia mayor en el receptor, para garantizar que la información se reciba correctamente, cuando la radiosonda se aleje hasta que la señal se encuentre en el umbral de sensibilidad.

Para incrementar la potencia de la señal, fue construida una antena Direccional Yagui de 5 elementos con una ganancia de 11 dB. Esta antena mejora la ganancia de potencia en el receptor y permite captar señales mas débiles a costa de una mayor direccionalidad. Se deberá "apuntar" hacia la radiosonda la antena para obtener el máximo de ganancia. Cuando el equipo se encuentre muy lejos para observarlo se dispone del dato GPS para ubicarlo y direccionar la antena receptora.

4.7. Construcción de una antena tipo YAGUI-UDA

Con el objetivo de incrementar la distancia de transmisión de los módulos Xbee-pro 868TM, se construyó una antena direccional del tipo YAGUI-UDA. Esta antena posee 11 dB de ganancia máxima en su lóbulo frontal.

En la Figura (4.35) se observa el esquema de la antena. Fue construida utilizando un tubo de PVC que sirve de soporte para los elementos de la antena, el módulo de radiofrecuencia se conecta al elemento activo utilizando un pequeño segmento de cable coaxial, y esta sujeto a la antena detrás del elemento reflector.

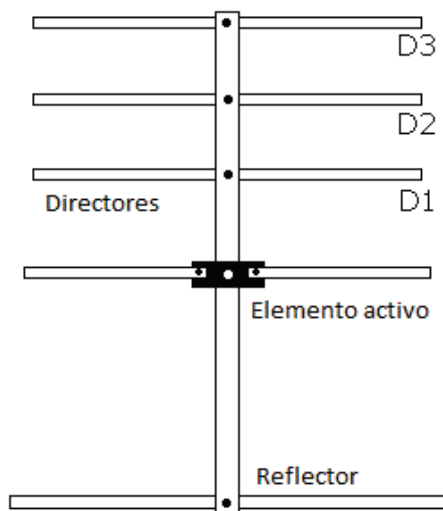


Figura 4.35. Esquema de construcción de una antena YAGUI-UDA

En la Tabla (4.4) se observan sus dimensiones.

Elemento	Dimensiones[cm]	Distancia desde el reflector[cm]
Reflector	17.28	0
Dipolo	16.40	6.22
Director 1	15.55	9.33
Director 2	15.32	15.55
Director 3	14.97	21.77

Tabla 4.4. Dimensiones de la antena YAGUI-UDA para la frecuencia de 868Mhz

El diseño se realizó utilizando el software FEKOTM, que permite simular todas las características de la antena. En la Figura (4.36) se observa el patrón de irradiación, que tiene en su punto máximo una ganancia de 11 dB (Parte frontal de la antena).

En la Figura (4.37) se observa el prototipo de la antena construida. El módulo de radiofrecuencia se ubicó dentro de una caja plástica y sujeto a la antena detrás del reflector para que no modifique significativamente el diagrama de irradiación. En la caja plástica se dispuso un conector con un cable de 4 conductores, 2 para la alimentación del módulo y los restantes para la comunicación RS232. Se logró un receptor compacto, donde esta todo montado al cuerpo de la antena.

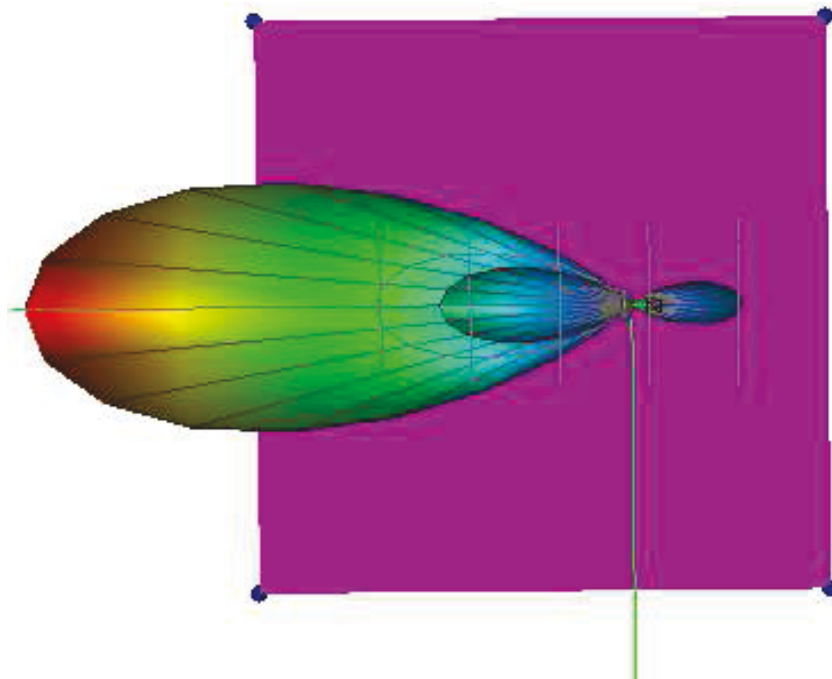


Figura 4.36. Simulación del diagrama de irradiación con FEKO™



Figura 4.37. Prototipo de la antena YAGUI-UDA para la frecuencia de 868Mhz

El módulo se conecta a una PC o Notebook utilizando un adaptador USB-RS232. La antena se monta sobre un tripode a fin de tener un equipo portátil y a la vez funcional que permita trasladarse e instalarse fácilmente.

4.8. Prototipo de Radiosonda Construido

El prototipo construido integra la etapa instrumental con los sensores de presión, temperatura y humedad, el módulo GPS y la etapa de radiofrecuencia. Todo se alimenta con una batería de litio de 3.7 Volt logrando una autonomía de 3 horas a máxima potencia de transmisión. El equipo implementado se muestra en la Figura (4.38) y en la Figura (4.39)

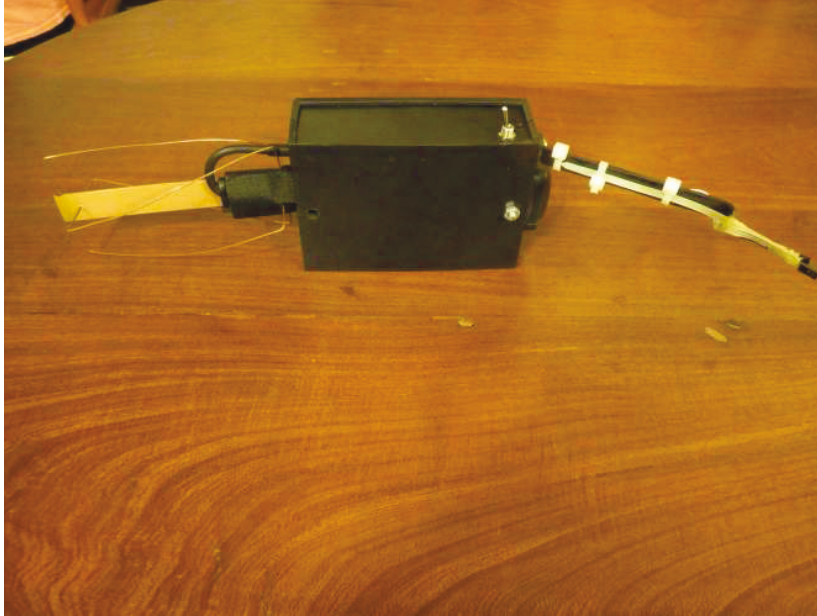


Figura 4.38. Prototipo de radiosondador

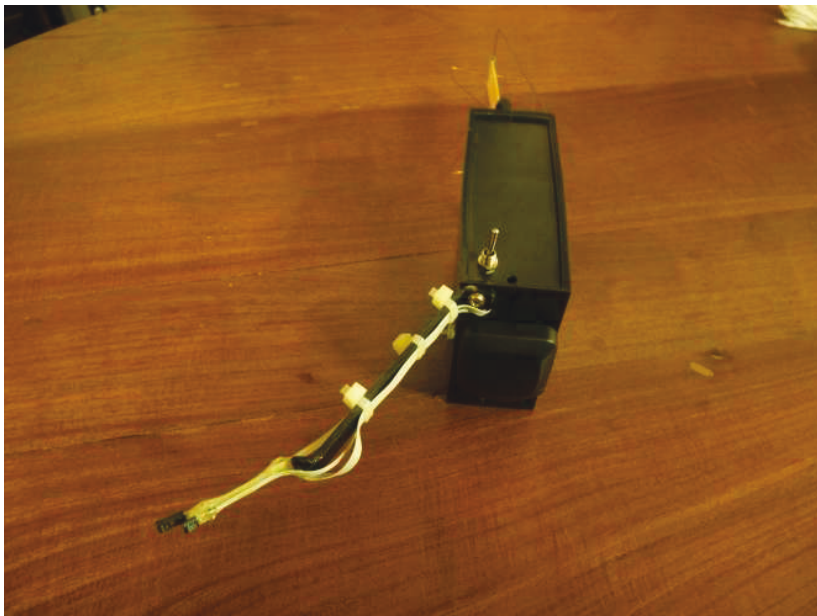


Figura 4.39. Prototipo de radiosondador

Puede observarse la antena del módulo GPS sobre la parte superior de la radiosonda, que permite una buena recepción de los satélites.

Los sensores de temperatura y humedad fueron dispuestos en un brazo plástico alejados

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo

del cuerpo de la radiosonda, con el objetivo que la medida no sea alterada por el propio equipo.

El sensor de presión se dispuso dentro de la caja plastica, aislado térmicamente, al igual que el resto de los circuitos electronicos para protegerlos de las bajas temperaturas.

En el Apéndice A de esta tesis, se describe un modelo térmico [35] utilizado para estimar la cantidad de aislante que se requiere para proteger los componentes del instrumento. En la imagen de la Figura (4.40), se observa el equipo por dentro.

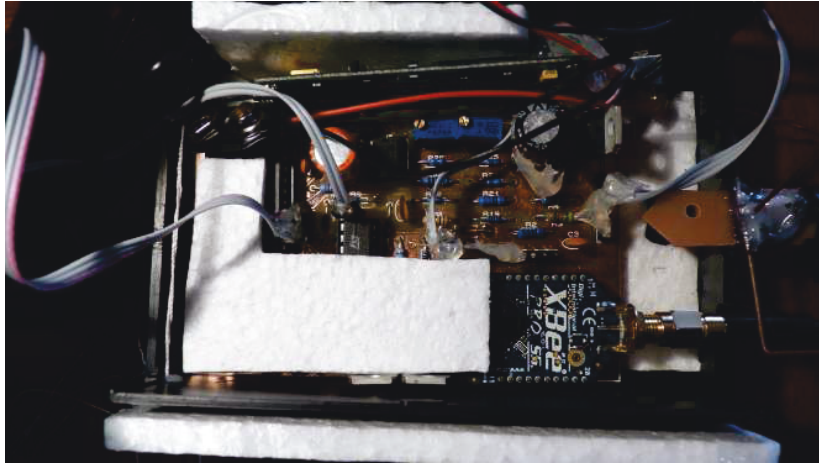


Figura 4.40. Prototipo de radiosondador por dentro

El módulo GPS fue soldado sobre la placa principal. La batería de litio es apoyada sobre el circuito para proveer calefacción durante el vuelo.

El módulo de Radiofrecuencia se conecta a la antena utilizando un conector del tipo SMA invertido y un cable coaxial.

Para la visualización de los datos del sondeo fue implementado un software que puede ser ejecutado en maquinas con Windows 7™ . Este software permite la visualización de las mediciones en tiempo real, determinar la potencia recibida y la tasa de errores del enlace de radiofrecuencia. En la Figura (4.41) se observa la placa de circuito impreso construida.

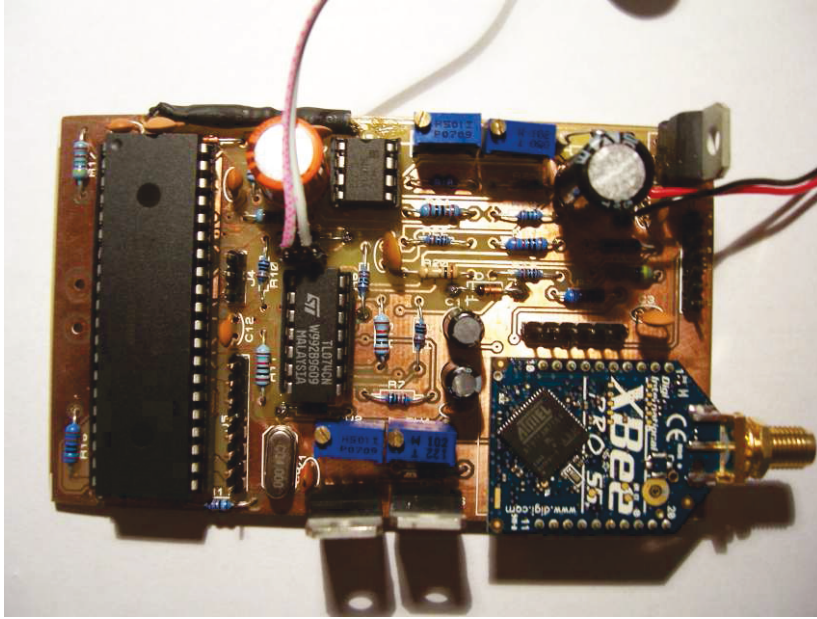


Figura 4.41. Placa de circuito impreso construida

4.9. Validación de los prototipos de radiosondeo

Se efectuaron los lanzamientos en el servicio meteorológico de Aeroparque, ubicado en Avenida Dorrego 4019. El predio dispone de un equipo de radiosondeo Vaisala RS92™, que se utiliza para validar las mediciones en simultáneo con el prototipo de radiosonda.

Mediante la participación del personal del servicio, coordinado por el Vicecomodoro Marcos García, fueron cedidas las radiosondas Vaisala.

La experiencia consistió en ubicar ambos equipos en los extremos de una varilla de madera de unos 2 metros de longitud. Las radiosondas se sujetaron a la varilla utilizando una hilo de nylon, y todo el conjunto fue amarrado al globo mediante un devanador. En la imagen de la Figura (4.42) se observa el equipo de trabajo momentos previos a la experiencia.

Los resultados de la experiencia se observan en las Figuras (4.43) a (4.48) y en la Tabla (4.5) la media de las diferencias $\Delta Prom$, la desviación estándar σ , y los rangos de temperatura, humedad y presión del sondeo.

Tabla 4.5. Validación entre Prototipo de radiosonda y radiosonda Vaisala™

Sensor	Resultados Validación		
	$\Delta Prom$	σ	Rango
Presión	0.98 hPa	1hPa	1010 a 500hPa
Humedad	2.35 %	3.3 %	50 a 10 %
Temperatura	0.33C°	1.18 C°	20C° a -22C°

Puede observarse en las Figuras (4.43) y (4.46) que la temperatura del prototipo, en el inicio del lanzamiento es mayor que la radiosonda Vaisala. Esto se debió a que estuvo expuesta al sol un en los preparativos previos al lanzamiento de los equipos. Se observa que instantes después ambas temperatura coinciden en valores por debajo de los 0.35 C° durante todo el sondeo.

4. Desarrollo de un equipo de radiosondeo



Figura 4.42. Grupo de Trabajo momentos antes de lanzamiento

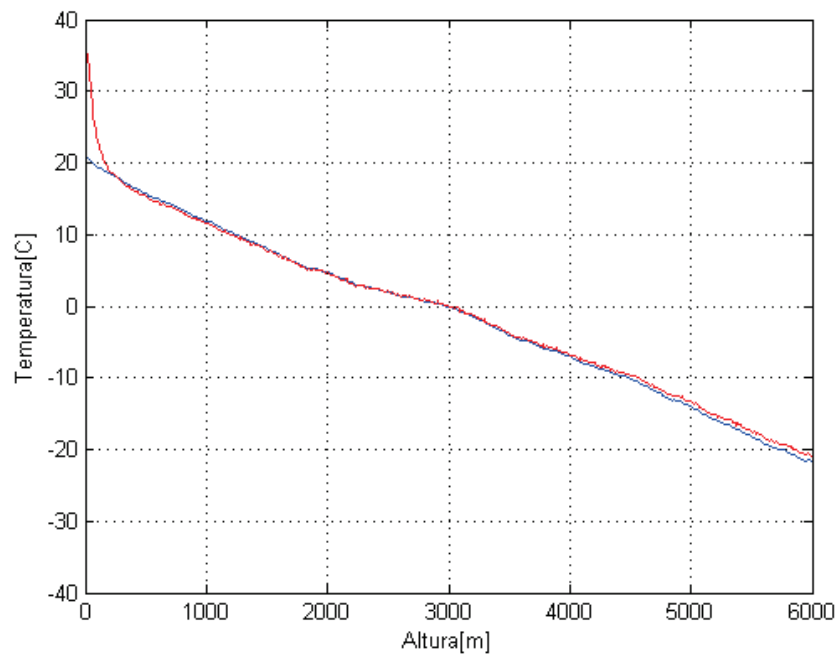


Figura 4.43. Curva de temperatura medida: en azul radiosonda Vaisala™ y en rojo prototipo de radiosonda

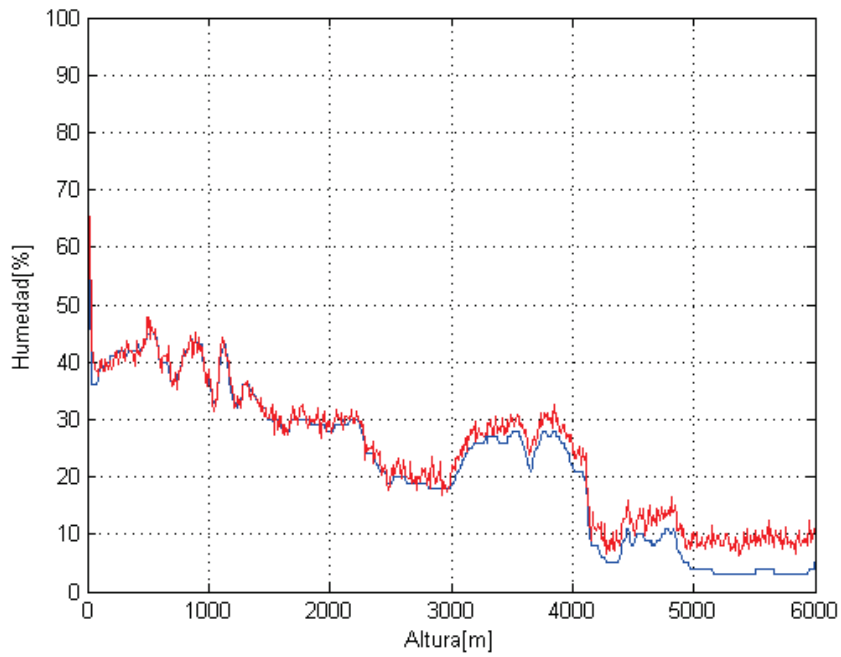


Figura 4.44. Curva de humedad medida: en azul radiossonda Vaisala™ y en rojo prototipo de radiossonda

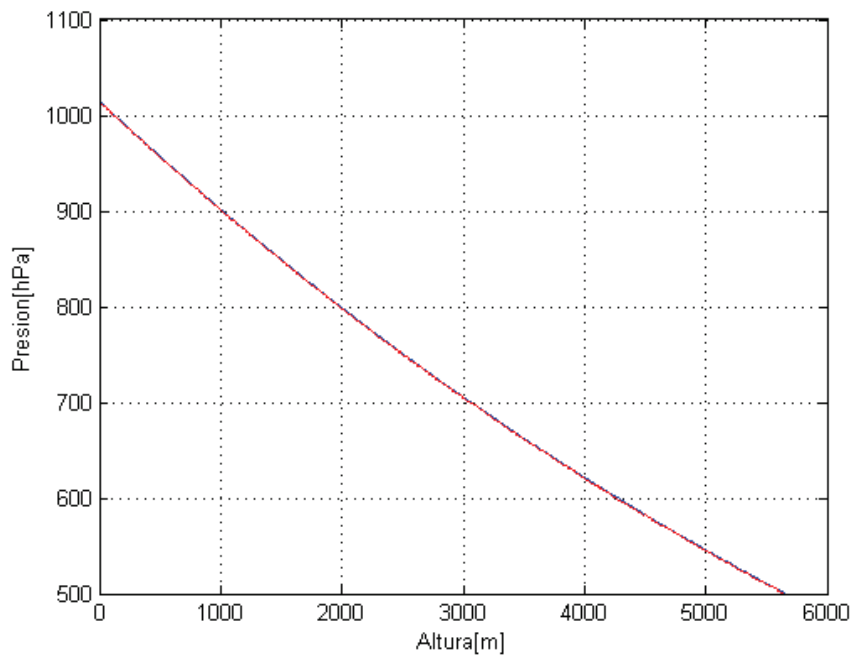


Figura 4.45. Curva de presión medida: en azul radiossonda Vaisala™ y en rojo prototipo de radiossonda

En las Figuras (4.44) y (4.47) se observan las curvas de humedad y sus diferencias res-

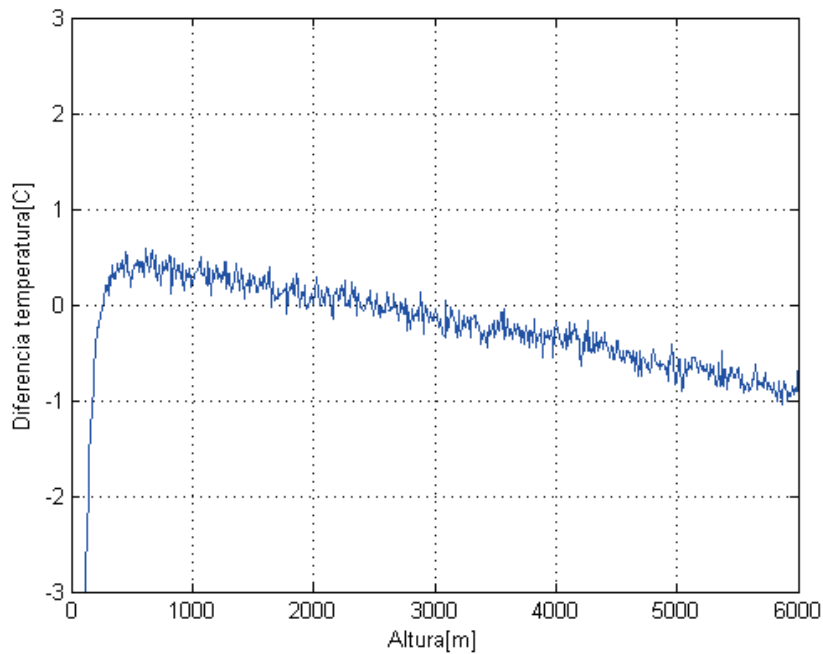


Figura 4.46. Diferencia de temperatura entre radiosonda Prototipo y Vaisala™)

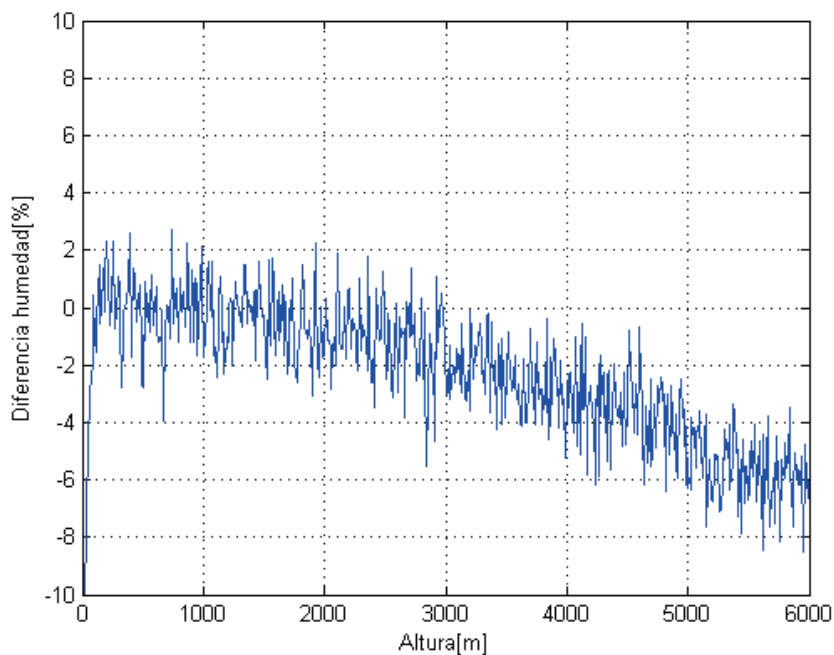


Figura 4.47. Diferencia de humedad entre radiosonda Prototipo y Vaisala™)

pectivamente. Puede observarse que la humedad coincide en valores de hasta un 4% para alturas de 4km, incrementándose hasta 6% para alturas superiores.

En las Figuras (4.45) y (4.48) se muestran las curvas de presión, mostrando un excelente

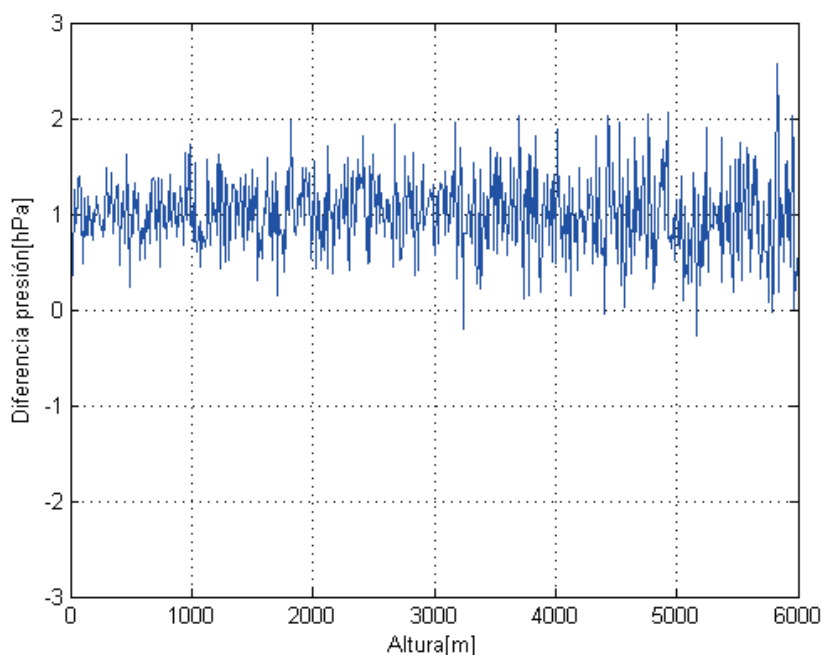


Figura 4.48. Diferencias de presión entre radio-sonda Prototipo y Vaisala™

acuerdo entre ambas, con diferencias de 2hPa máximas para alturas de 6 Km.

El radiosondador funcionó como lo previsto, transmitiendo en todo momento una señal clara que en ningún momento sufrió pérdida de información. El modulo GPS estableció en todo momento la ubicación del instrumento, funcionando el sistema electrónico como lo previsto.

Para evaluar si la medida del IPWV cumplió las expectativas, se calcula la integral de vapor de agua dada por la Ecuación (3.10), obteniéndose el IPWV del prototipo y el del radiosondador Vaisala™, este último ofrece este dato ya calculado por lo que se tendrán tres valores diferentes de este dato.

Para el calculo de la integral de vapor de agua se utiliza la versión discreta dada por la Ecuacion (3.9), aplicándola sobre los perfiles obtenidos. Se observa una discrepancia entre el IPWV calculado mediante la Ecuación (3.9) y el que brinda el fabricante Vaisala™ como producto del sondeo. Esta discrepancia se debe principalmente a que se esta calculando en base a un perfil acotado, donde los datos entregados están espaciados en niveles de presión y no en el tiempo. Los resultados se observan en la Tabla (4.6).

IPWV	IPWV calculado	IPWV Calculado Prototipo
11.5[mm]	10.88[mm]	13.3[mm]

Tabla 4.6. Estimación del vapor de agua, con los datos del radiosondeo Vaisala™, con la integral del perfil, y con los datos del prototipo

El valor de IPWV 11.5 [mm] corresponde al entregado por el sondeo del equipo Vaisala™, el de 10.88 [mm] es la integral del perfil del Vaisala™ y el de 13.3 [mm] es la integral del perfil del prototipo. Se observa una diferencia de 1.8 [mm] entre ambos cálculos. Esta diferencia se

encuentra dentro de la estimada en el diseño del equipo.

Las mediciones de temperatura, humedad relativa y presión se obtuvieron hasta los 6 Km de altura. Mas allá de los 6 Km, la información de humedad relativa comenzó a presentar errores, para luego dejar de funcionar. Esto se debe a las características del sensor, que no es capaz de soportar temperaturas por debajo de -40 C° .

Para una medición de IPWV, esto no representa un problema, debido a que el vapor de agua se concentra, en promedio entre los 2 Km a 4 Km de altura. Si se desea obtener una altura mayor, todo el sistema electrónico de la radiosonda puede reutilizarse, pero con sensores que soporten las condiciones necesarias por debajo de -40 C° . Al momento de redactar esta tesis, obtener sensores que puedan medir en estas condiciones resulta difícil en el mercado Argentino

El enlace de radiofrecuencia del equipo continuó transmitiendo hasta casi los 20 Km de altura, por lo que reemplazando los sensores actuales por otro tipo de dispositivos es posible obtener mediciones a alturas mayores.

En lo que respecta a los resultados obtenidos, presentados en la Tabla (4.6) puede observarse que el IPWV entregado por el radiosondador VaisalaTM es de 11.5[mm], valor menor a los 13.3 [mm] obtenidos con el prototipo. Es decir, el radiosondador Vaisala mide menos IPWV comparando con respecto al prototipo, considerando además que este último recorrió menos altura que el equipo VaisalaTM.

Esta diferencia puede deberse a varios factores como por ejemplo desviaciones de calibración en los componentes electrónicos, degradación del elemento dieléctrico de los sensores, congelamiento, etc.

No obstante en el trabajo de Sun et. al., [36] donde se analizan diferentes tipos de radiosondadores, se observa que estos presentan una medición de IPWV menor respecto de perfiles de la red Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC). En este trabajo se analizan 12 tipos distintos de radiosondadores, detectándose que las VaisalaTM presenta una medición "mas seca" que los datos de la red COSMIC.

En la Figura (4.44) se observa que la medición de humedad del radiosondador VaisalaTM, es menor que la obtenida por el prototipo. Lo mencionado en el trabajo de Sun et al., podría estar vinculado con esta diferencia en las mediciones, aunque para obtener conclusiones definitivas se debe validar el prototipo de radiosondador con otra técnica, como por ejemplo GPS y estudiar el acuerdo en las mediciones de IPWV para detectar algún efecto de este tipo.

Se continua trabajando para lograr una altura superior de medición, buscando sensores adecuados para soportar las condiciones de baja temperatura, así como también en diferentes escenarios de validación.

Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, efectuando una medición de IPWV con diferencias de 1.8 [mm] respecto de un radiosondador VaisalaTM.

Capítulo 5

Medición de vapor de agua utilizando la Señal de posicionamiento global GPS

La técnica de estimación de IPWV a partir del sistema de posicionamiento Global GPS, relaciona el retraso y la curvatura que sufre esta señal, con la integral de la densidad de vapor de agua, en el trayecto que recorre la misma desde el satélite hasta la superficie terrestre.

La señal de GPS sufre en su camino por la atmósfera dos perturbaciones, una debido a la atmósfera ionizada y otra en capas inferiores, debido a la atmósfera neutra. El efecto provocado por la ionosfera es dependiente de la longitud de onda y puede ser removido utilizando dos frecuencias de medición. Una vez eliminado el efecto de la ionosfera queda la perturbación debida al aire "seco" en capas superiores, y al vapor de agua que conforma aire "húmedo" en las capas inferiores de la troposfera.

La diferencia de camino debido al retardo y curvatura de la señal GPS respecto del vacío esta documentada por varios autores [37] y puede evaluarse según la ecuación:

$$\delta L = \int_0^L n(s) ds - G = 10^{-6} \int_0^L N(s) ds + (S - G) \quad (5.1)$$

donde $n(s)$ es el índice de refractividad en función de la posición s a lo largo del trayecto L . G es la distancia geométrica en línea recta desde el satélite hasta el receptor y S es el camino real de la señal curvada a lo largo de L . El primer termino de la Ecuación (5.1) esta relacionado con el retardo, mientras que el segundo con la curvatura.

5.1. Retardo troposférico de la señal GPS

El retardo que sufre la señal de GPS al recorrer la troposfera puede dividirse en una parte "seca" (retardo hidrostático) y en una parte "húmeda" (debida al vapor de agua)[37]. Ambos retardos están referidos al retraso que sufre la señal observando en la dirección del satélite, con respecto al tiempo que tardaría si fuera vacío. Es por esto que ambos retardos se verticalizan refiriéndolos al zenith respecto de la estación. Se denomina entonces ZPD , ZHD y ZWD a los retardos total, "seco" o hidrostático y húmedo, respectivamente, todos medidos desde el ángulo zenital [37].

Por lo tanto el retardo total se lo puede escribir como: $ZPD = ZWD + ZHD$. El ZHD es fuertemente dependiente de la presión superficial, mientras que el ZWD depende del IPWV presente en la atmósfera. La transformación de los retardos con respecto al zenith se realiza a partir de las funciones de mapeo, tema que no será tratado en esta tesis.

5. Medición de vapor de agua utilizando la Señal de posicionamiento global GPS

El retardo hidrostático ZHD puede aproximarse utilizando un modelo que depende de la presión superficial, altura de la estación y de su latitud [37].

$$ZHD = 2.779 \frac{P_s}{f(\lambda, H)} \quad (5.2)$$

donde $f(\lambda, H) = 1 - 0.00266 \cos(2\lambda) - 0.00028H$, H representa la altura de la estación con latitud λ . P_s es la presión superficial.

5.2. El factor de conversión Π

Para determinar el ZWD se resta al ZPD el ZHD estimado mediante la Ecuación (5.2). El ZWD esta directamente relacionado con la cantidad de vapor de agua presente en la troposfera, y se obtiene mediante un factor de conversión que vincula ambas variables:

$$IPWV = \Pi ZWD \quad (5.3)$$

siendo Π :

$$\Pi = \frac{1}{10^6 \rho R_v [\frac{K_3}{T_m} + K_2]} \quad (5.4)$$

donde $K'_2 = K_2 - mK_1$, siendo T_m

$$T_m = \frac{\int_0^L \frac{P_v}{T} dL}{\int_0^L \frac{P_v}{T^2} dL} \quad (5.5)$$

donde K_1 , K_2 y K_3 son constantes [38], m es el cociente entre las masas molares del vapor de agua y el aire seco, T es la temperatura en grados Kelvin, P_v es la presión parcial de vapor de agua en $[N/m^2]$, L es la altura en $[m]$, ρ es la densidad del agua líquida en $[Kg/m^3]$ y R_v es la constante específica de los gases para el vapor de agua.

La Variable T_m se denomina temperatura media de la atmósfera y tiene una fuerte dependencia con la temperatura superficial. Más adelante se estudiará en detalle esta variable.

5.3. Incertidumbre en la determinación de IPWV desde la técnica GPS

La técnica GPS permite estimar IPWV con indeterminaciones del orden de unos pocos milímetros. Comparando esta técnica frente a radiosondeos se observan desviaciones del orden de 2mm a 3mm para valores de IPWV del orden de 30 [mm].

A partir de las Ecuaciones (5.2), (5.3) y (5.5) pueden escribirse los errores relativos en el cálculo del IPWV según:

$$\frac{\delta PW(ZPD)}{PW} = \frac{\delta ZPD}{ZWD} \quad (5.6)$$

$$\frac{\delta PW(T_m)}{PW} = \frac{\delta T_m}{T_m} \quad (5.7)$$

$$\frac{\delta PW(P_s)}{PW} = \frac{\delta P_s}{P_s} \frac{ZHD}{ZWD} \quad (5.8)$$

Pueden observarse tres ecuaciones que generan incertidumbre en la determinación del IPWV, la que indica la Ecuación (5.6), debido a la estimación del retardo total ZPD , la estimación de la temperatura media T_m dada por la Ecuación (5.7) y finalmente la medición de la presión superficial P_s dada por la Ecuación (5.8).

El valor de la Constante Π en la Ecuación (5.3) es de aproximadamente 6.5, por lo que para lograr estimaciones del orden del milímetro en el IPWV, el ZPD debe ser del orden de centímetros o menos. El parámetro T_m es poco sensible en la determinación de IPWV.

La presión superficial es una variable que afecta directamente la estimación del IPWV. Observando la ecuación (5.8), puede verse que el error relativo en la medición de P_s esta multiplicado por el cociente $\frac{ZHD}{ZWD}$. Esta relación es de aproximadamente 2000, por lo que una determinación del 2% en el IPWV, requiere una medida de presión con una precisión de 1hPa.

Las ecuaciones (5.6), (5.7) y (5.8) se suman para obtener la indeterminación total en la estimación del IPWV. La presión superficial es un parámetro clave que debe determinarse con buena resolución, midiendo con sensores en un abrigo meteorológico y en condiciones de temperatura controlada para evitar corrimientos en las características del sensor.

5.3.1. La temperatura media de la atmósfera

La temperatura media de la atmósfera T_m es el único parámetro desconocido en la constante de conversión de la Ecuación (5.3). Utilizando la Ecuación (5.5), es posible calcular esta variable integrando los perfiles de radiosondeo. Para esto se debe reemplazar la integral por una versión discreta de la misma:

$$T_m = \frac{\sum_0^L \frac{P_v}{T} \delta L_i}{\sum_0^L \frac{P_v}{T^2} \delta L_i} \quad (5.9)$$

Donde los intervalos δL_i corresponden a las mediciones del perfil hasta la capa máxima de altura L .

Si bien es posible utilizar la Ecuación (5.9) para estimar T_m , no resulta práctico, ni en muchos casos posible, determinar el perfil del comportamiento de la atmósfera si no se dispone de algún instrumento adicional para hacerlo.

En los trabajos de Bevis [37] y [38], utilizando una base a datos de 13 estaciones de radiosondeo a lo largo de dos años, en latitudes que comprenden desde Alaska, hasta Florida se obtuvo un modelo medio, que responde a una relación lineal entre la temperatura superficial y el T_m dado por la ecuación:

$$T_m = 0.72T_0 + 70.2 \quad (5.10)$$

Donde T_0 es la temperatura superficial en grados Kelvin.

El ajuste del modelo dado por la Ecuación (5.10) muestra una dispersión de 4.7K respecto de los datos a lo largo de los dos años en las 13 estaciones. Posteriormente se pudo corroborar que este modelo empírico de T_m era válido globalmente.

Es posible verificar este modelo en latitudes sobre la República Argentina. Se tomará como ejemplo la estación de radiosondeo del Aeropuerto de Ezeiza (SAEZ).

Se utilizaron datos del año 2007 para verificar la correspondencia con el modelo de Bevis de la Ecuación (5.10), los resultados se observan en la Figura (5.1).

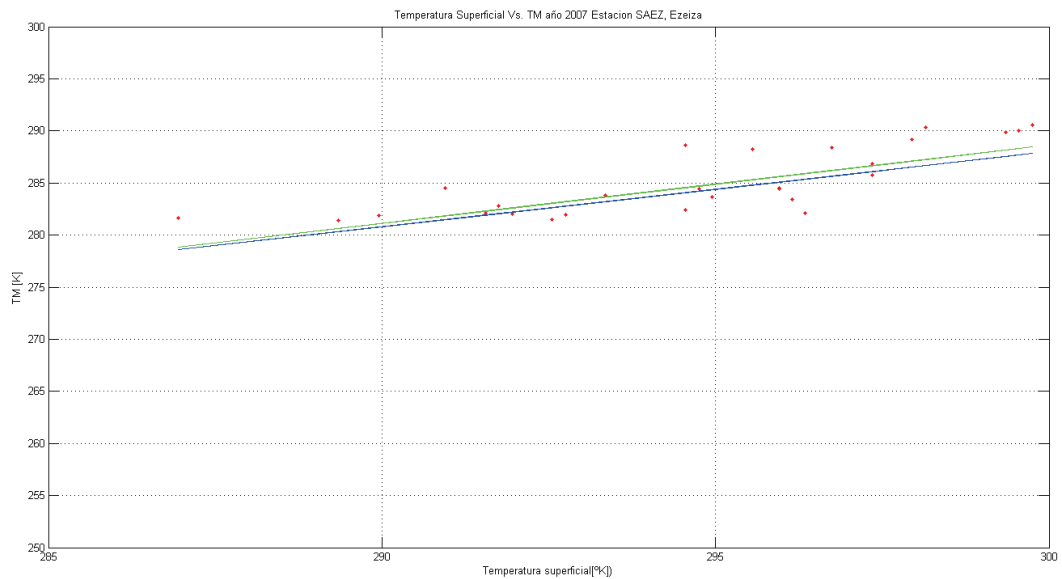


Figura 5.1. Ajuste de T_m en la estación SAEZ, EZEIZA. Año 2007

La curva azul de la Figura (5.1) corresponde al ajuste real de los datos de la estación SAEZ, mientras que la curva verde al ajuste proporcionado por Bevis según la Ecuación (5.10). Puede verse la excelente correspondencia entre ambas. El resultado del ajuste lineal para SAEZ en 2007 resulta:

$$T_m = 0.75T_0 + 63.4 \quad (5.11)$$

La diferencia entre la Ecuación (5.10) y la Ecuación (5.11), provoca errores de algunos grados Kelvin, que observando la ecuación (5.8) de propagación del error relativo de IPWV en función del TM, genera diferencias del solo 0.3 % en la estimación del IPWV.

Posteriormente Mendez [39] presenta un trabajo con coeficiente ligeramente diferentes a los de Bevis:

$$T_m = 0.789T_0 + 50.4 \quad (5.12)$$

Este último modelo está basado en 50 estaciones de radiosondeo, a lo largo de un año. Solbrig [40] obtuvo otro modelo de ajuste en la región de Alemania obteniendo la siguiente aproximación:

$$T_m = 0.77T_0 + 54.7 \quad (5.13)$$

Todos estos modelos se basan en la medición de la temperatura superficial, mediante algún tipo de instrumento. De no disponerse esta información existen modelos regionales que vinculan las coordenadas geográficas y el día del año con el valor de la constante de conversión Π .

En el trabajo de Emardson [41], se desarrolla un modelo que vincula la latitud α y el día del año, con la constante Π según la siguiente ecuación:

$$\Pi = b_0 + b_1\alpha + b_2\text{sen}\left(\frac{2\pi DOY}{365}\right) + b_3\text{cos}\left(\frac{2\pi DOY}{365}\right) \quad (5.14)$$

Donde DOY es el día del año. Los valores de los coeficientes de este modelo son: $b_0 = 5.882$, $b_1 = 0.01113$, $b_2 = 0.064$, $b_3 = 0.127$, y son válidos para la mayor parte de las regiones de Europa.

En el caso de conocer la temperatura superficial Emaradson propone el siguiente modelo:

$$\Pi = a_0 + a_1\Delta T + a_2\Delta T^2 \quad (5.15)$$

donde ΔT es la diferencia $T - T_{prom}$, siendo T la temperatura superficial y T_{prom} junto con los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 valores tabulados sobre diferentes regiones de Europa.

La variable T_m es la única incógnita que no está bien determinada en la Ecuación (5.4), los modelos empíricos que se describieron permiten estimarla en función de la temperatura superficial y/o las coordenadas geográficas y el día del año en una región determinada.

A partir de la Ecuación (5.8) se observa que T_m no es una variable sensible en la determinación del IPWV, para valores que oscilen en algunos grados Kelvin. Es por esto que puede utilizarse el modelo global de Bevis dado por la Ecuación (5.10) sin cometer errores significativos en la estimación del IPWV.

La técnica GPS descrita, permite estimar IPWV a partir del retardo troposférico total ZPD , sobre una región determinada.

5.4. Comparación de la estimación de IPWV con GPS frente a radiosondeos

En esta sección se describirá la metodología utilizada para la comparación del IPWV obtenido desde la técnica GPS frente al determinado mediante radiosondeos en 30 pares de estaciones a lo largo de los años 2008 a 2013, en la región de Sudamérica.

La metodología se basa en la selección de estaciones GPS y de radiosondeo que se encuentren a una distancia mínima que permita comparar las dos técnicas de medición de IPWV.

El procesamiento de la red geodésica fue llevado a cabo por la Lic. Clara Bianchi, estudiante de doctorado de la Facultad de Astronomía y Ciencias Geofísicas de la Universidad Nacional de la Plata, quien fue la encargada de obtener los retardos troposféricos totales *ZPD* de la red.

5.4.1. Selección de estaciones de radiosondeo y GPS

El criterio para la selección de pares de estaciones GPS-Radiosondeo contempla la distancia menor a 100 Km entre ellas, y la existencia de dato meteorológico cercano. También se controla que la diferencia de altura máxima sea del orden de 200 metros o menos entre ambas.

La diferencia de altura entre estaciones provoca que la atmósfera que es "vista" por GPS cambie respecto de la estación de radiosondeo. En el caso que la altura de la estación GPS sea mayor, se observa que el IPWV obtenido desde esta técnica, presenta un error sistemático en defecto respecto del observado con radiosondeo. Cuando la altura es menor sucede el caso contrario.

Se utilizaron las estaciones de radiosondeo de la red de la Universidad de Wyoming, que además dispone de observaciones superficiales in-situ con el radiosondeo, brindando datos de temperatura superficial, humedad relativa y presión absoluta. Los datos incluyen además condiciones de lluvia y nubosidad sobre la superficie.

El dato meteorológico se utiliza para eliminar la componente "seca" hidrostática ZHD dada por la Ecuación (5.2) descrita en la Sección (5.1), y también para el cálculo de la constante de conversión de la Ecuación (5.4).

En la Figura (5.2) se observan las estaciones de radiosondeo en color verde disponibles desde el sitio de la Universidad de Wyoming, y las estaciones GPS en color rojo disponibles por la red SIRGAS [42]

En la Figura (5.3) se observan los pares de estaciones seleccionados, referenciando cada uno de ellos a la Tabla (5.1).

La Tabla (5.1) muestra los nombres de las estaciones, la latitud y longitud de cada una de ellas identificando con "RAD" si es radiosondeo y con "GPS" si es una estación del sistema de posicionamiento global, su diferencia de altura y la distancia a la que se encuentran una respecto de otra.

Las estaciones seleccionadas presentan un amplio rango de IPWV, con valores promedios menores a 15[mm] para estaciones ubicadas en latitudes altas, hasta valores de 50[mm] o más para latitudes cercanas al ecuador. Esto permite verificar el comportamiento de las estimaciones de IPWV desde la técnica GPS en diferentes escenarios de medición, comprobando la incertidumbre y errores sistemáticos que presente la medida.

Otro factor que se tuvo en cuenta para la selección de estaciones, fue la continuidad temporal de los datos de GPS y de radiosondeo.

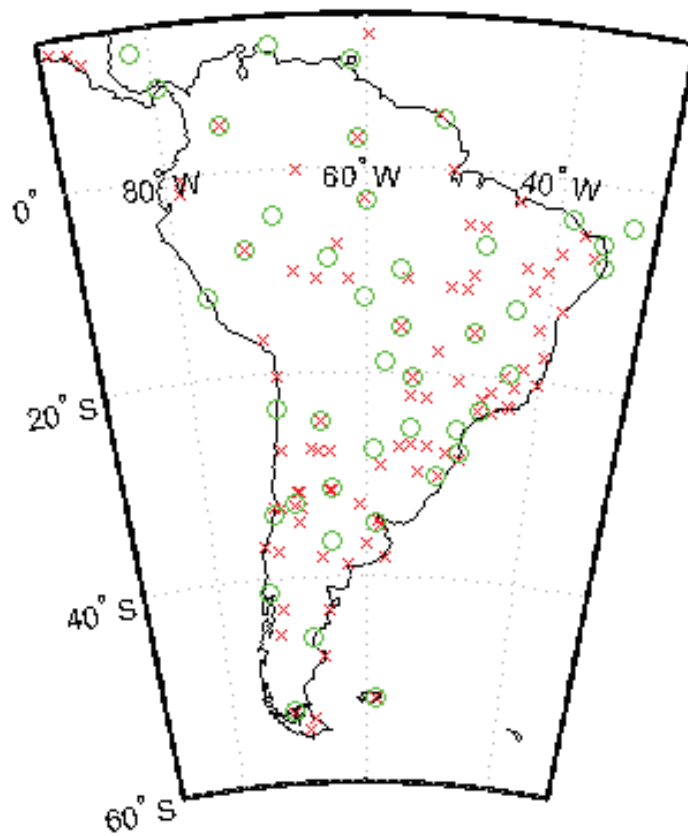


Figura 5.2. Estaciones de radiosondeo (verde) y GPS(rojo) disponibles en la región de Sudamérica

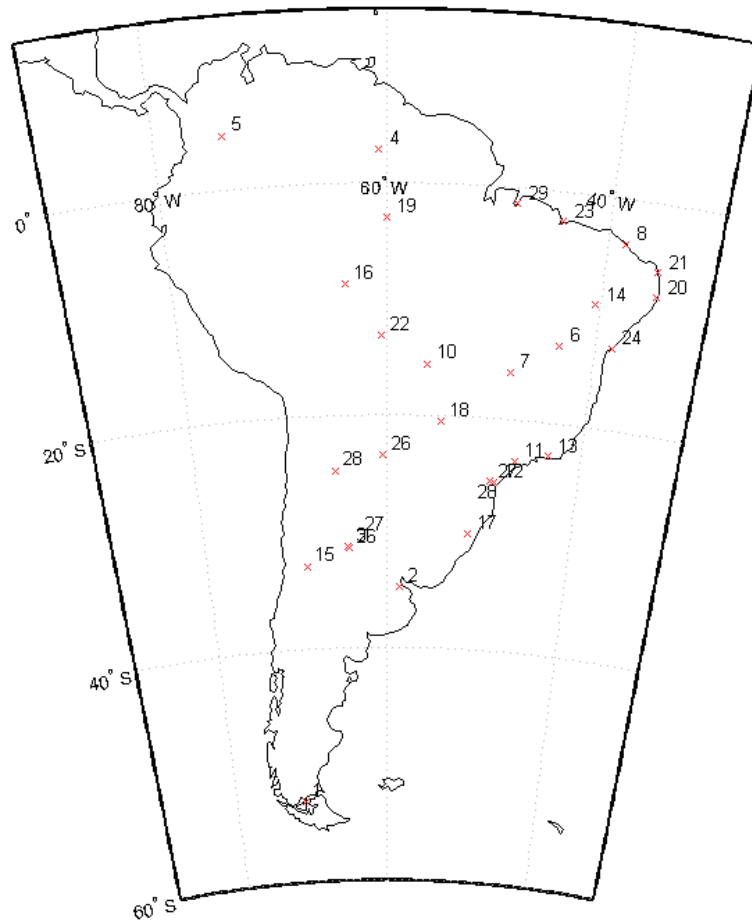


Figura 5.3. Pares de estaciones GPS-Radiosondeo Seleccionadas

5.4. Comparación de la estimación de IPWV con GPS frente a radiosondeos

Tabla 5.1. Estaciones GPS-Radiosondeo Seleccionadas

Pares de estaciones GPS-Radiosondeo seleccionadas								
Num	Estación GPS	Estación Radiosondeo	Latitud GPS	Longitud GPS	Latitud RAD	Longitud RAD	Diferencia altura RAD-GPS	Distancia
1	PARC	SCCI	-53.13	-70.88	-53.00	-70.85	25[m]	14 [Km]
2	IGM1	SAEZ	-34.81	-58.53	-34.6	-58.4	15[m]	26[Km]
3	UCOR	SACO	-31.43	-64.19	-34.6	-58.4	37[m]	12[Km]
4	BOAV	SBBV	2.84	-60.70	2.83	-60.7	55[m]	1[Km]
5	BOGT	SKBO	4.64	-74.08	4.7	-74.15	-6[m]	8[Km]
6	BOMJ	SBLP	-13.25	-43.42	-13.26	-43.41	24[m]	1[Km]
7	BRAZ	SBBR	-15.94	-47.87	-15.86	-47.93	-58[m]	10[Km]
8	CEEU	SBFZ	-3.87	-38.42	-3.76	-38.70	5[m]	21[Km]
9	CAYN	SOCA	4.90	52.31	4.83	-52.36	-71[m]	13[Km]
10	CUIB	SBCY	-15.55	-56.06	-15.65	-56.10	-53[m]	10[Km]
11	POLI	SBMT	-23.55	-46.73	-23.52	-46.63	68[m]	10[Km]
12	IMBT	SBFL	-28.23	-48.65	-27.67	-48.65	-25[m]	58[Km]
13	RIOD	SBGL	-22.81	-43.30	-22.81	-43.25	-8[m]	6[Km]
14	PEPE	SBPL	-9.38	-40.50	-9.38	-40.48	-7[m]	6[Km]
15	MZAC	SAME	-32.89	-68.87	-32.83	-68.78	-133[m]	11[Km]
16	POVE	SBPV	-8.70	-63.89	-8.76	-63.91	-20[m]	6[Km]
17	POAL	SBPA	-30.07	-51.11	-30	-51.18	-69[m]	10[Km]
18	MSCG	SBCG	-20.44	-54.54	-20.46	-53.66	-119[m]	13[Km]
19	NAUS	SBMN	-3.02	-60.05	-3.15	-59.98	-22[m]	15[Km]
20	RECF	SERF	-8.05	-34.95	-8.05	-34.91	-7[m]	7[Km]
21	RNNA	SBNT	-5.83	-35.20	-5.91	-35.25	1[m]	9[Km]
22	ROCD	SBVH	-13.12	-60.54	-12.70	-60.10	217[m]	57[Km]
23	SALU	SBSL	-12.93	-38.43	-2.36	-44.14	9[m]	2[Km]
24	SAVO	SBSV	-12.93	-38.43	-13.01	-38.51	-36[m]	11[Km]
25	UCNF	SCFA	-20.78	-60.41	-23.43	-60.45	76[m]	25[Km]
26	MGBH	SBPR	-31.43	-64.19	-31.32	-64.22	-154[m]	47[Km]
27	UFPR	SBCT	-25.44	-49.23	-25.51	-49.16	-14[m]	9[Km]
28	UNSA	SASA	-24.72	-65.40	-24.85	-65.48	-8[m]	14[Km]
29	BELE	SBBE	-1.40	-48.4	-1.48	-48.48	-18[m]	12[Km]

5.4.2. Procesamiento y descarga de los datos

Dado el volumen de información, fue necesario implementar un algoritmo que se encargue de realizar las tareas de descarga y comparación de los datos. El software fue desarrollado en Octave y se dividió en dos bloques, la descarga del dato meteorológico, y la descarga y comparación del IPWV desde radiosondas contra GPS.

En la Figura (5.4), se observa el diagrama de flujo utilizado para la descarga y almacenamiento del dato meteorológico. Se implementó un algoritmo basado en el protocolo HTTP para evitar el uso de la interfaz de descarga de la página de la Universidad de Wyoming, que haría el proceso demasiado tedioso.

Una vez obtenidos los datos sinópticos, se procede a la descarga y comparación con los

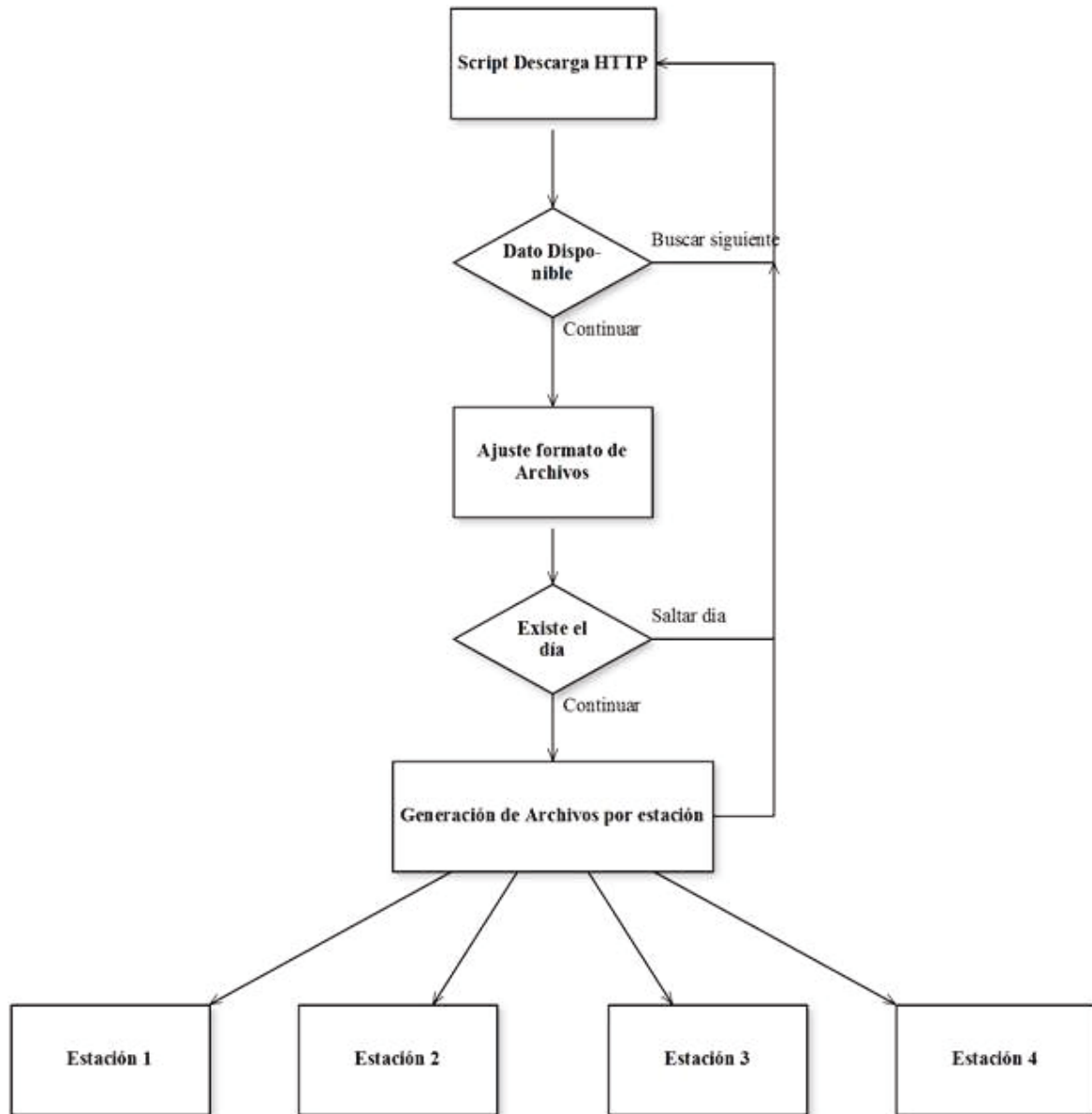


Figura 5.4. Diagrama de flujo del procesamiento Datos Meteorológicos

datos GPS, según el diagrama de flujo de la Figura (5.5)

El código fuente para el procesamiento de los datos esta disponible en el Apéndice E de esta tesis.

Se implementan en el mismo código rutinas de control, que permiten determinar perfiles de radiosondeo incompletos, o sin dato de vapor de agua que son eliminados de forma automática.

El algoritmo entrega archivos con los datos de IPWV desde la técnica de radiosondeo y GPS, por año y por estación. Cada archivo se almacena en formato de texto para su análisis.

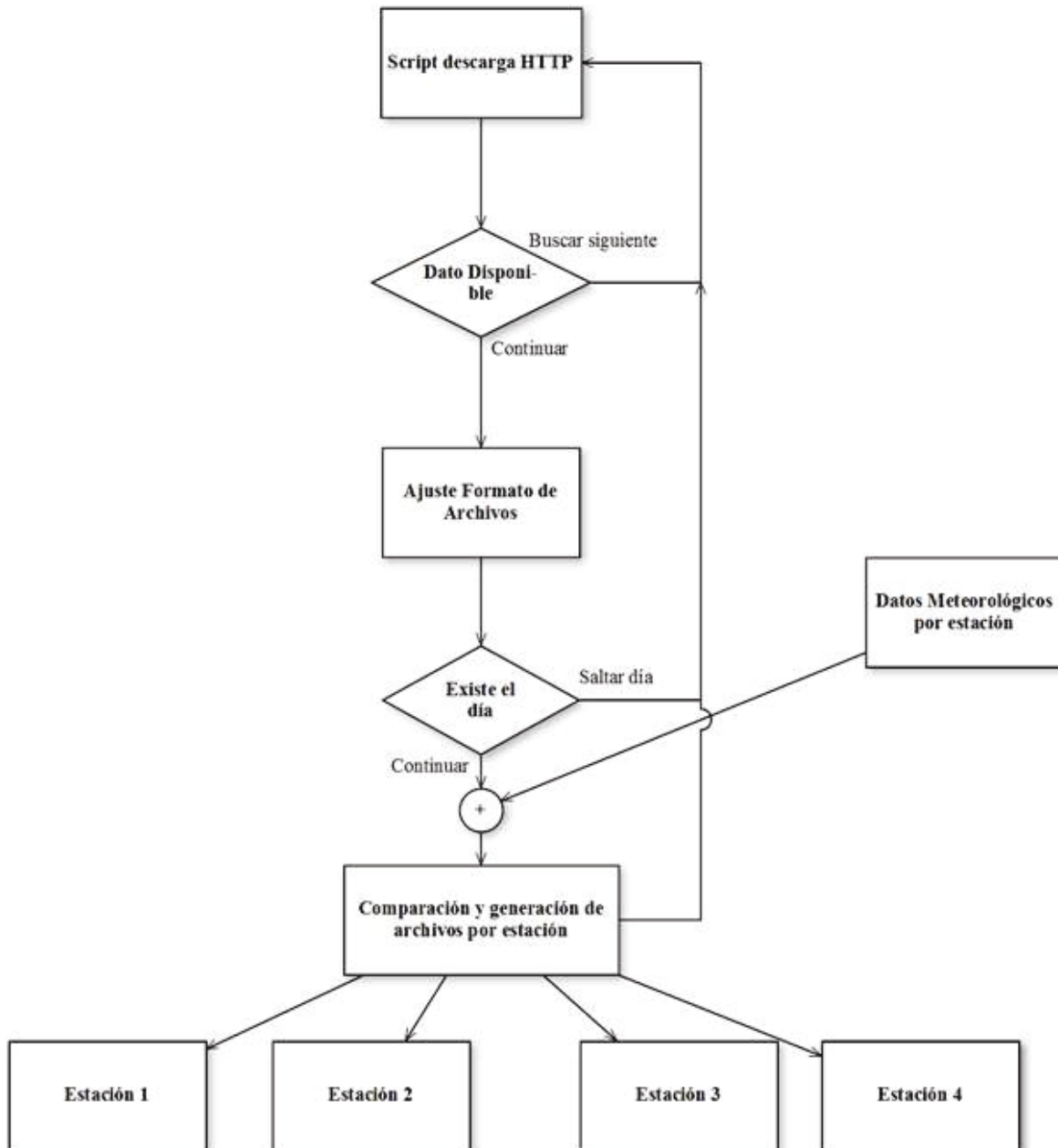


Figura 5.5. Diagrama de flujo de Descarga y comparación del IPWV con radiosondeo frente a GPS

5.5. Resultados de la comparación entre técnicas

Para presentar los resultados se dividirán los mismos en dos partes. Primero se mostrarán gráficas representativas de los pares de estaciones GPS-Radiosondeo para el año 2008. Luego se efectuará un análisis global que permitirá evaluar ambas técnicas. Estos resultados fueron presentados en el trabajo GPS IPWV Intercomparison Over South American Region, enviado a la revista internacional Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. El mismo está siendo evaluado para su publicación al momento de escritura de esta tesis.

5.5.1. Resultados por año

En las Figuras (5.6-a) hasta la (5.15-a) se observan los histogramas de las diferencias entre la técnica GPS y de radiosondeo para la estimación de IPWV. En las Figuras (5.6-b) a (5.15-b) se observan los gráficos de comparación entre técnicas, la recta de 45 grados punteada representa el caso ideal de acuerdo entre técnicas, respecto de la recta de ajuste en trazo continuo. El eje RS-IPWV de las Figuras (5.6-b) a (5.15-b) representa el vapor de agua integrado medido con radiosondeo, mientras que el eje GPS-IPWV el vapor de agua integrado obtenido mediante la técnica GPS. Los histogramas muestran el porcentaje de ocurrencia de las diferencias en milímetros de IPWV entre ambas técnicas.

Se registran desviaciones estándar de 1 [mm] a 4 [mm] dependiendo de la estación, con corrimientos de 1 [mm] a 2 [mm] en exceso para GPS. La correlación entre técnicas es superior al 0.9 en todos los casos.

Se observa un comportamiento similar para los años desde 2009 a 2013, registrándose correlaciones elevadas con similares desviaciones y corrimientos en exceso para el IPWV determinado mediante la técnica GPS. No se muestran los resultados debido a la gran cantidad de gráficos.

Figura 5.6. Resultados estación MSCG

Figura 5.7. Resultados estación POVE

Figura 5.8. Resultados estación POLI

Figura 5.9. Resultados estación PEPE

Figura 5.10. Resultados estación IGM1

Figura 5.11. Resultados estación BOGT

Figura 5.12. Resultados estación BELE

Figura 5.13. Resultados estación FALK

Figura 5.14. Resultados estación IMBT

Figura 5.15. Resultados estación BOMJ

Figura 5.16. Resultados estación BDOS

Figura 5.17. Resultados estación POAL

5.5.2. Resultados de la comparación agrupando años

En la Figura (5.18), se observa el valor de IPWV promedio por estación obtenido con la técnica GPS, junto con las barras de desviación asociadas, evaluadas sobre los 5 años de datos respecto de las mediciones de radiosondeo.

El análisis de la Figura (5.18) permite visualizar gráficamente el aumento de la dispersión entre técnicas a medida que el IPWV aumenta. Puede observarse en estaciones como CAYN, CEEU y CUIB, barras de error grandes asociadas a dispersiones mayores en el IPWV, frente a estaciones como FALK, PARC y UCNF con valores medios menores de IPWV y menor dispersión.

Se observa entonces que para valores cercanos a 50 [mm] de IPWV en la estación CAYN, existen diferencias entre técnicas que pueden llegar a ser de hasta 6 [mm] como máximo, siendo menores a medida que el vapor de agua disminuye. En promedio, si se analiza las estaciones con mayor vapor de agua, las dispersiones se presentan con desviaciones estándar menores a 4 [mm].

Otra forma de visualizar los resultados, y enfocando solamente en la técnica GPS como un instrumento para obtener IPWV, sería agrupar todas las estaciones y todos los años disponibles, para visualizar únicamente la cantidad de vapor de agua comparando este resultado frente al obtenido con radiosondeo.

Esta forma de interpretar los resultados, resulta "mas instrumental", estableciendo el rango de medición de IPWV y las dispersiones que se presentan entre técnicas.

En la Figura (5.19) se observa las diferencia entre técnicas (Radiosondeo-GPS), y en la Figura (5.20) el error relativo en función del IPWV medido. La técnica GPS sobre-estima a radiosondeo en valores promedio desde 1 [mm] para IPWV desde 10mm, hasta valores de 2 [mm] para IPWV de 60 [mm].

En el caso del error relativo entre técnicas, se encuentra por debajo del 10% del IPWV para valores mayores a 10 [mm], hasta valores de 5% para valores de IPWV mayores a 60 [mm]. Resultados similares se encuentran en otros trabajos publicados para regiones diferentes [43].

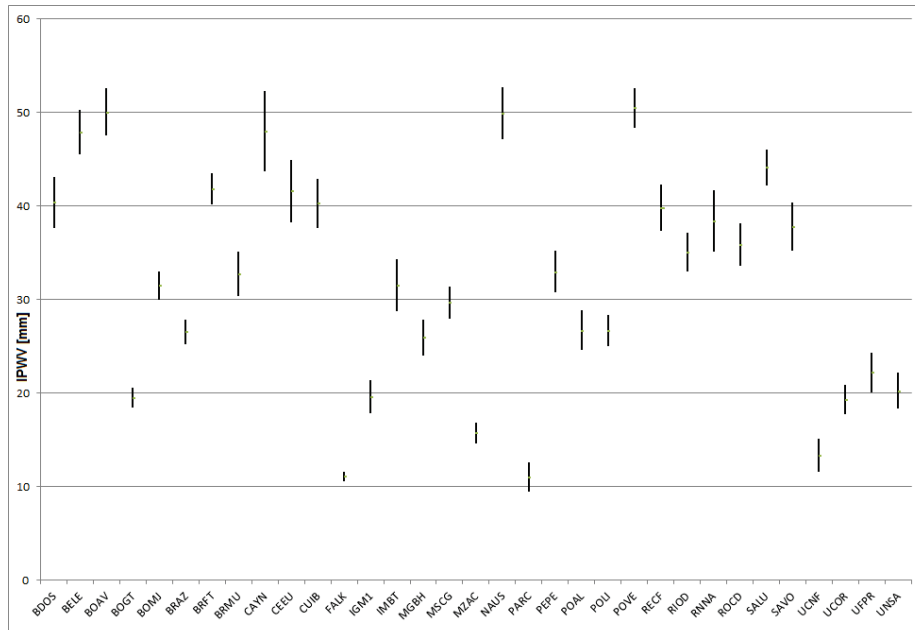


Figura 5.18. Valores Promedio y desviación estándar para las estaciones en los 5 años de comparación

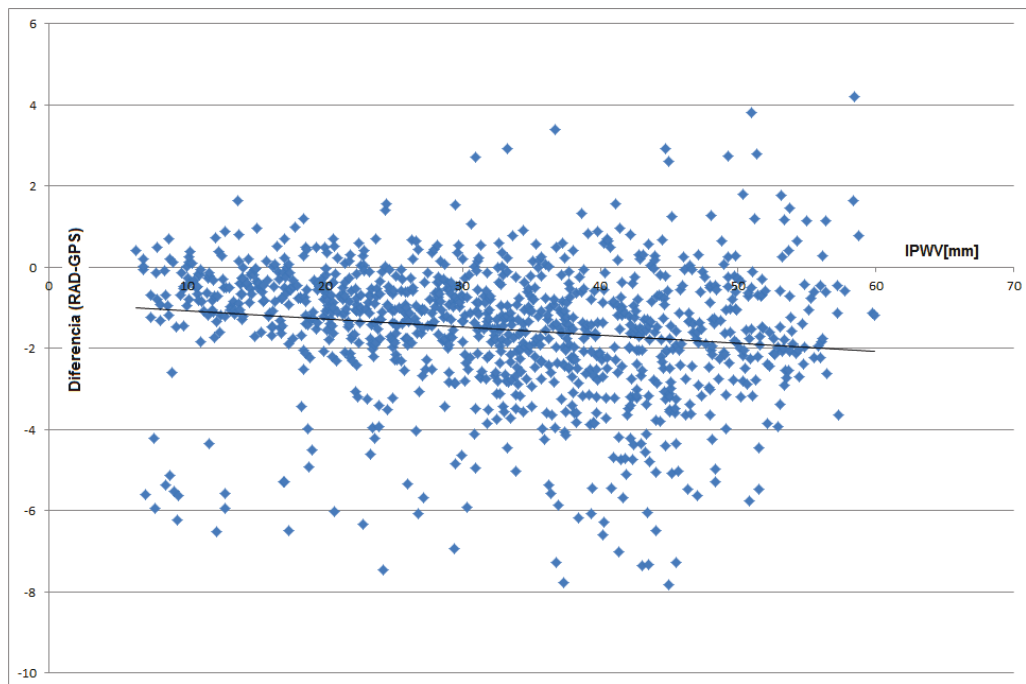


Figura 5.19. Diferencia entre técnicas (RAD-GPS) en función del IPWV medido. La curva negra representa el ajuste de la nube de puntos azules.

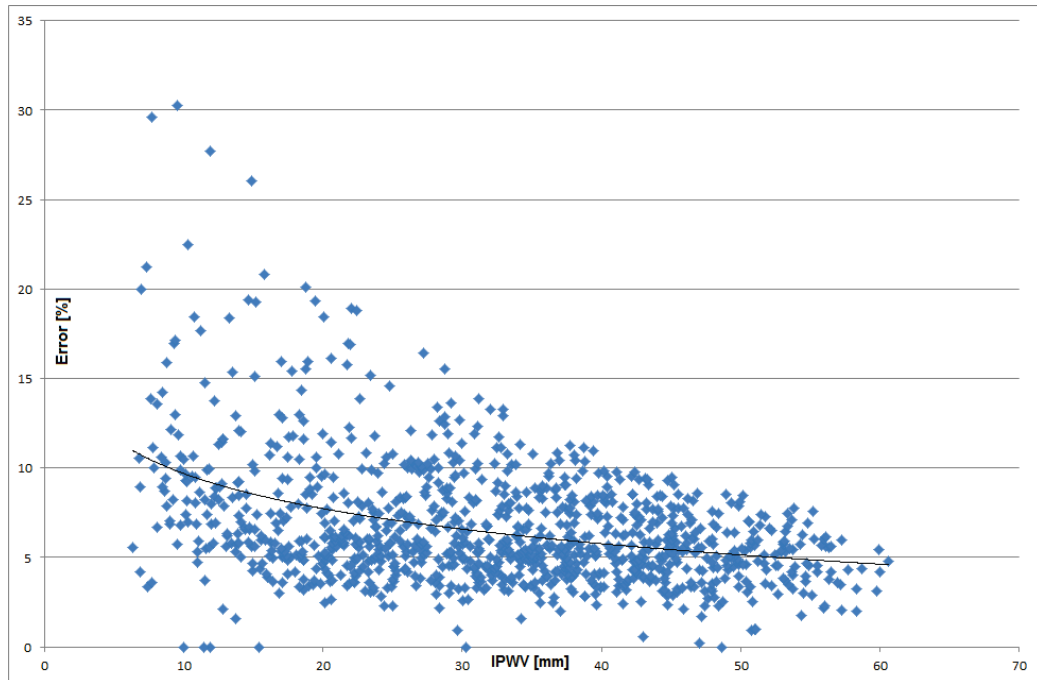


Figura 5.20. Error relativo entre técnicas (RAD-GPS) en función del IPWV medido. La curva negra representa el ajuste de la nube de puntos azules.

Estos resultados muestran el acuerdo entre la técnica GPS y de radiosondeo y serán utilizados en el Capítulo 7 para calibrar los datos del Radiómetro de Microondas a bordo del Satélite Argentino SACD/AQUARIUS.

Las estimaciones de IPWV utilizando GPS, permiten una cobertura temporal que puede alcanzar intervalos de 5 minutos, a diferencia de las que solamente son lanzadas, en el mejor de los casos, dos veces al día.

Capítulo 6

Medición de variables físicas en la atmósfera mediante técnicas de radiometría

La medición de la radiación electromagnética ha resultado una importante fuente de información para el estudio de los diferentes gases que integran la atmósfera. El avance de la radiometría ha permitido efectuar observaciones desde la superficie terrestre, y también desde satélites en órbita. Con estas mediciones se han confeccionados mapas de diversas variables, como vapor de agua, hielo, salinidad, vientos entre muchas otras. En esta sección se describirá el principio de funcionamiento de un radiómetro, desde el punto de vista teórico, abarcando algunos conceptos de electrónica básica, para luego aplicarlos a la medición de vapor de agua integrado.

6.1. La Radiometría

Un radiómetro, es un sistema electrónico, que mide la radiación de energía electromagnética no coherente en varias longitudes de onda dentro de un espectro de frecuencias denominado bandas. Dentro de estas bandas se utilizan detectores específicos que convierten la medición de energía radiada en una señal eléctrica equivalente.

Dependiendo la región del espectro donde se este trabajando, los radiómetros pueden utilizar técnicas ópticas para detectar la señal, técnicas de radiofrecuencia y también técnicas mixtas de la Quasi-óptica en ondas milimétricas y sub-milimétricas.

El principio físico de funcionamiento de todo radiómetro se basa en la aproximación de Rayleigh-Jeans, que para frecuencias comprendidas entre 1Ghz a 300Ghz, cumple que:

$$Bf^0(T) = \frac{2K_bT}{\lambda^2} \quad (6.1)$$

donde Bf^0 es el brillo espectral de un cuerpo negro perfecto a una temperatura T , siendo λ la longitud de onda en el espectro de emisión, y K_b la constante de Boltzman. Esta relación es fundamental en la radiometría, y vincula la temperatura de un cuerpo negro perfecto con la densidad de potencia radiada uniformemente por el mismo. Para una superficie real el brillo espectral o poder emisivo es menor que para un cuerpo negro ideal a la misma temperatura. La relación entre ambas se denomina emisividad ϵ [44] y se la puede definir como:

$$\epsilon = \frac{B(\alpha, \theta, T)}{Bf^0(T)} \quad (6.2)$$

Donde $B(\alpha, \theta, T)$ es el brillo espectral del objeto real, según la posición de observación dada por los ángulos α, θ , a una temperatura T .

La emisividad depende del material de la superficie emisora, de la longitud de onda, de la temperatura y de las dirección en la que se este considerando la observación si el material no es isotrópico.

6.1.1. La temperatura equivalente de brillo

Un cuerpo negro es un elemento ideal que en equilibrio termodinámico a una temperatura T , irradia por lo menos tanta energía como cualquier otro cuerpo a igual temperatura. Los materiales reales generalmente se refieren como cuerpos grises, ya que emiten menos que un cuerpo negro y no necesariamente absorben toda la energía que le incide.

De esta forma se define la temperatura de brillo T_b de un cuerpo real (para una dada frecuencia o ancho de banda), como la temperatura necesaria para que un cuerpo negro emita la misma cantidad de energía en esa región del espectro. Entonces, si T es la temperatura física del objeto:

$$Bf^0(T_b) = B(\alpha, \theta, T) \quad (6.3)$$

o en un determinado ancho de banda Δf

$$\int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} Bf^0(T_b)df = \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} B(\alpha, \theta, T)df \quad (6.4)$$

La temperatura de brillo es un parámetro muy importante, ya que es la variable que la generalidad de los radiómetros entregan como producto de sus mediciones.

Aplicando la aproximación de Rayleigh-Jeans de la Ecuación(6.1), y la Ecuación (6.2) en la Ecuación (6.4) se obtiene que la temperatura física y de brillo de un objeto están vinculadas por la emisividad según la ecuación:

$$T_b = \epsilon T \quad (6.5)$$

En la Figura (6.1) se observa una superficie a una temperatura física T que genera una temperatura equivalente de brillo T_b menor que T , dado que para un material real la emisividad es menor que 1. De aquí en adelante se omitirán algunas dependencias de las ecuaciones por simplicidad en la escritura.

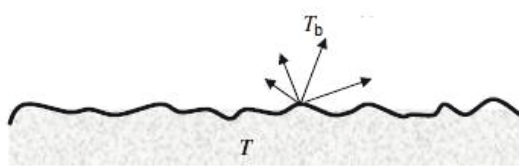


Figura 6.1. Superficie a una temperatura real T , con una temperatura de brillo equivalente T_b

6.1.2. Temperatura de antena

Consideremos una situación donde un cuerpo emite una onda electromagnética de densidad de potencia constante $S_t(\alpha, \theta)$ con un área A_t , y es captada por una antena con un área de captura A_r . En este caso la potencia recibida P_r por la antena receptora será:

$$P_r = S_t(\alpha, \theta)A_r \quad (6.6)$$

Esta potencia P_r puede escribirse en función del brillo espectral de la fuente emisora como:

$$P_r = A_r \iint_{4\pi} B_t(\alpha, \theta)F_n(\alpha, \theta)d\Omega \quad (6.7)$$

Donde $B_t(\alpha, \theta)$ es el brillo espectral de la fuente emisora, y $F_n(\alpha, \theta)$ es el diagrama de irradiación normalizado de la antena receptora [45].

Si la distribución espectral de brillo $B_t(\alpha, \theta)$ es polarizada al azar, como el caso de las emisiones térmicas, y la antena detecta una señal polarizada, entonces la potencia en bornes de la antena receptora va a ser un medio de la potencia incidente [45].

$$P_r = \frac{1}{2}A_r \iint_{4\pi} B_t(\alpha, \theta)F_n(\alpha, \theta)d\Omega \quad (6.8)$$

Utilizando la Ecuación (6.8) para deducir la potencia de señal electromagnética recibida por una antena puesta dentro de una cámara (cuerpo negro) como la mostrada en la Figura (6.2) y utilizando la aproximación de Rayleigh-Jeans dada por la Ecuación (6.1) y la Ecuación (6.8) puede derivarse la siguiente expresión:

$$P_r = A_r \iint_{4\pi} \frac{K_b T}{\lambda^2} F_n(\alpha, \theta)d\Omega \quad (6.9)$$

$$P_r = A_r \left(\frac{K_b T}{\lambda^2} \right) \iint_{4\pi} F_n(\alpha, \theta)d\Omega \quad (6.10)$$

La integral de la Ecuación (6.10) se define como el ángulo sólido del diagrama de irradiación Ω_p [46].

$$\Omega_p = \iint_{4\pi} F_n(\alpha, \theta)d\Omega \quad (6.11)$$

El ángulo sólido esta relacionado con A_r según la ecuación:

$$\Omega_p = \frac{\lambda^2}{A_r} \quad (6.12)$$

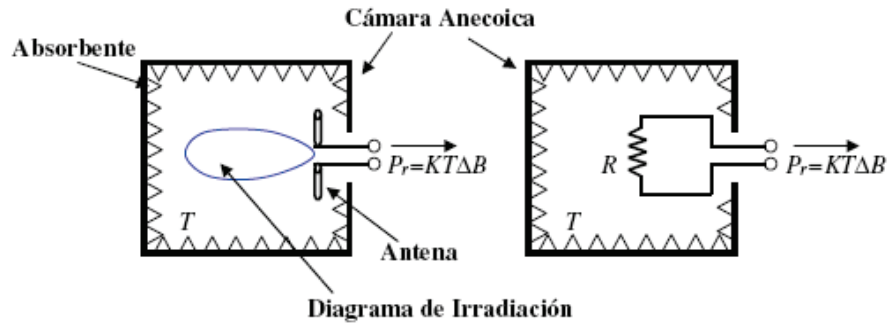


Figura 6.2. Antena colocada en una cámara que simula un cuerpo a una temperatura T y su circuito equivalente. Fuente: Antenas Para Radiómetros En Ondas Milimétrica Con Haces Múltiples. Bava J.A.

Utilizando la Ecuación (6.11) y Ecuación (6.12), y reemplazando en la Ecuación (6.10) se obtiene que:

$$P_r = KT \quad (6.13)$$

Donde P_r es la potencia por unidad de ancho de banda y resulta análoga a la expresión de Nyquist para un resistor a una temperatura de T grados Kelvin [45].

Finalmente la potencia recibida P_r en un ancho de banda ΔB , con una temperatura $T = T_a$ queda expresada como:

$$P_r = K_b T_a \Delta B \quad (6.14)$$

La temperatura T_a es la temperatura equivalente que observa la antena generada por el cuerpo negro a temperatura T . Si el cuerpo es un objeto real, su temperatura de brillo equivalente será menor ya que estará afectada por el factor de emisividad, por lo que la temperatura equivalente de la antena será también menor respecto del caso ideal (Cuerpo negro).

La Ecuación (6.14) es de gran importancia en radiometría, ya que vincula linealmente a la temperatura de antena con la potencia que recibe la misma, y el ancho de banda para la que fue construida.

En el caso de un radiómetro ubicado en un satélite en órbita la temperatura de brillo de un área sobre la superficie está afectada por perturbaciones como reflexiones, radiación de la atmósfera, radiación por rayos incidiendo sobre la zona en la que se está midiendo, etc. En este caso la temperatura de brillo es la contribución de todos estos efectos, por lo que la temperatura de brillo del objeto o área en estudio no coincide con la real, sino que es el aporte de varias fuentes emisoras.

La temperatura aparente de antena respecto de la temperatura de brillo observada desde un radiómetro en órbita T_{ap} , considerando el caso ideal, que no existan perturbaciones puede calcularse a partir de la Ecuación(6.14) y teniendo en cuenta que:

$$P_r = \frac{1}{2} A_r \Delta B \iint_{4\pi} \frac{K_b T_{ap}(\alpha, \theta)}{\lambda^2} F_n(\alpha, \theta) d\Omega \quad (6.15)$$

Igualando la Ecuación (6.14) con la Ecuación (6.15) se obtiene:

$$T_a = \frac{\iint_{4\pi} T_{ap}(\alpha, \theta) F_n(\alpha, \theta) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\alpha, \theta) d\Omega} \quad (6.16)$$

La temperatura T_a dada por la Ecuación (6.16) se denomina temperatura radiométrica de antena [46]. Representa la temperatura que observará una antena, considerando una temperatura aparente T_{ap} , que en el caso de un instrumento en órbita es la suma de las contribuciones de las fuentes emisoras que se encuentren presentes en la atmósfera y la superficie en observación. Este tema será tratado en el Capítulo 7, donde se utilizará un modelo de regresión que permitirá estimar IPWV en tierra utilizando datos de temperatura de brillo obtenidos con el Radiómetro de Microondas (MWR) del satélite SACD/Aquarius.

6.1.3. La polarización

La información polarimétrica en un radiómetro de detección remota es en muchos casos de importancia en la detección de parámetros geofísicos de la corteza [47].

En una onda plana, los vectores de campo eléctrico E y campo magnético H en el campo lejano son perpendiculares entre si y se producen en un plano normal al vector de propagación de la onda electromagnética. La relación entre los vectores de campo eléctrico y/o magnético determinan la polarización de una onda. Una señal que posee campo eléctrico en una sola dirección se denomina onda plana o linealmente polarizada, mientras que otra en la que el vector de campo eléctrico rota en el tiempo manteniendo constante su intensidad se la denomina de polarización circular o circularmente polarizada.

Los fenómenos geofísicos que generalmente se quieren detectar con un radiómetro, están parcialmente polarizados y en algunos casos con pequeños grados del mismo. La detección de la polarización se realiza mediante los conocidos parámetros de Stokes, que permiten identificar el grado de polarización de una determinada señal electromagnética[45].

En esta tesis no se determinará la polarización de la señal, pero serán utilizados los datos de temperatura de brillo en la frecuencia de 36.5 Ghz del instrumento MWR del SACD/Aquarius para determinar IPWV, aplicando los canales de polarización vertical y horizontal a un modelo de regresión. No serán utilizados por lo tanto los parámetros de Stokes, por lo que no se describirán en detalle.

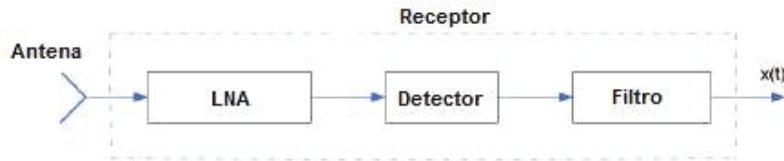


Figura 6.3. Esquema en bloques elemental de un radiómetro

6.2. Esquema elemental de un radiómetro

Un radiómetro trabajando en la región de las microondas es, en esencia, una antena receptora sintonizada en la banda de frecuencias de interés, seguido de un amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplifier-LNA) y un detector-rectificador, que entrega una tensión continua proporcional a la densidad de potencia electromagnética recibida por la antena. Puede observarse un esquema elemental de este tipo de instrumentos en la Figura (6.3)

La antena es el primer elemento con el que se encuentra la señal electromagnética. Se la puede interpretar como un transformador, que adapta la impedancia intrínseca del medio, al circuito electrónico que procesará la señal. En la Figura (6.4) se observa una bocina corrugada para la frecuencia de 36.5 Ghz, utilizada como antena receptora en el Radiómetro de Microondas MWR del Satelite SACD/Aquarius.

Si se observa el diagrama en bloques elemental de un radiómetro en la Figura (6.3), después de la antena el siguiente elemento es un amplificador filtrado. Este componente es denominado amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplifier) LNA por sus siglas en ingles, y permite elevar la débil señal proveniente desde la antena, a valores que pueden ser manejados más fácilmente por el resto de los circuitos electrónicos. No es el objetivo de esta tesis describir el funcionamiento de un amplificador de microondas, pero si indagar respecto de los posibles problemas que pueden surgir de las características no ideales de este componente.

Los amplificadores LNA estan diseñados para amplificar la señal y minimizar el ruido agregado, elevando solamente lo necesario la amplitud de la magnitud de entrada como para que su manejo sea mas simple electrónicamente, sin perjudicar la calidad de la señal. Otra característica importante que deben cumplir es su linealidad en la ganancia de amplificación, ya que de este factor dependerá el rango que pueda ser utilizado el radiómetro.

El radiómetro MWR del SACD/Aquarius presenta una alinealidad en sus medidas a partir de temperaturas de brillo superiores a 300K. Esta alinealidad esta relacionada con los diodos internos de ruido de referencia provocando que la ganancia no se mantenga constante. Este tema será tratado con mayor profundidad en el Capítulo 7.

El elemento detector transforma la potencia de la señal recibida en una tensión continua que es proporcional a la densidad de potencia electromagnética que llega a la antena del radiómetro. Como elemento detecto suelen utilizarse diodos de radiofrecuencia. El filtro luego del detector sirve para eliminar el ruido de la señal, entregándola a los conversores analógicos digitales para ser digitalizada.



Figura 6.4. Bocina corrugada de microondas en la frecuencia de 36.5Ghz

6.3. La atmósfera en teledetección de microondas

La atmósfera de la Tierra esta compuesta aproximadamente por un 78 % de nitrógeno, 21 % de oxígeno, 0.9 % de argón, trazas de otros gases nobles, ozono (O₃), dióxido de carbono (CO₂) y una cantidad variable de vapor de agua [48]. Estos constituyentes interactúan de maneras diferentes con la radiación dependiendo de factores como la temperatura, densidad, presión, especie molecular y frecuencia [49].

Cuando una onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera interactúa pudiendo ser absorbida y/o dispersada. Al mismo tiempo, la atmósfera emite energía hacia la tierra y hacia el exterior del planeta. Para caracterizar la manera en que un material interactúa con un flujo de radiación incidente se definen los siguientes parámetros:

Absorción (α): Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.

Reflectividad(ρ): Relación entre el flujo incidente y reflejado por una superficie.

Transmitancia(τ): Relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Las magnitudes de estos tres parámetros no solo dependen del tipo de material, sino también, de la terminación de la superficie, de la región del espectro en la radiación incidente, y del ángulo con que incide la radiación [50].

Las regiones del espectro en donde la radiación electromagnética es levemente afectada por el medio (alta transmisividad) se conocen como ventanas atmosféricas y permiten observar la superficie con la menor distorsión posible. Por el contrario existen bandas de absorción donde la atenuación es pronunciada y pueden ser usadas para determinar características de los componentes que las producen.

La absorción es la capacidad que tiene una molécula de material para absorber radiación, generando calor o algún otro tipo de energía en este proceso. En el caso de la atmósfera terrestre, los gases que la componen generan filtros de absorción en rangos del espectro electromagnético específicos.

En la Figura (6.5) puede observarse el comportamiento de la atmósfera en la absorción de microondas para frecuencias de hasta 1000 Ghz para una atmósfera húmeda, con presencia

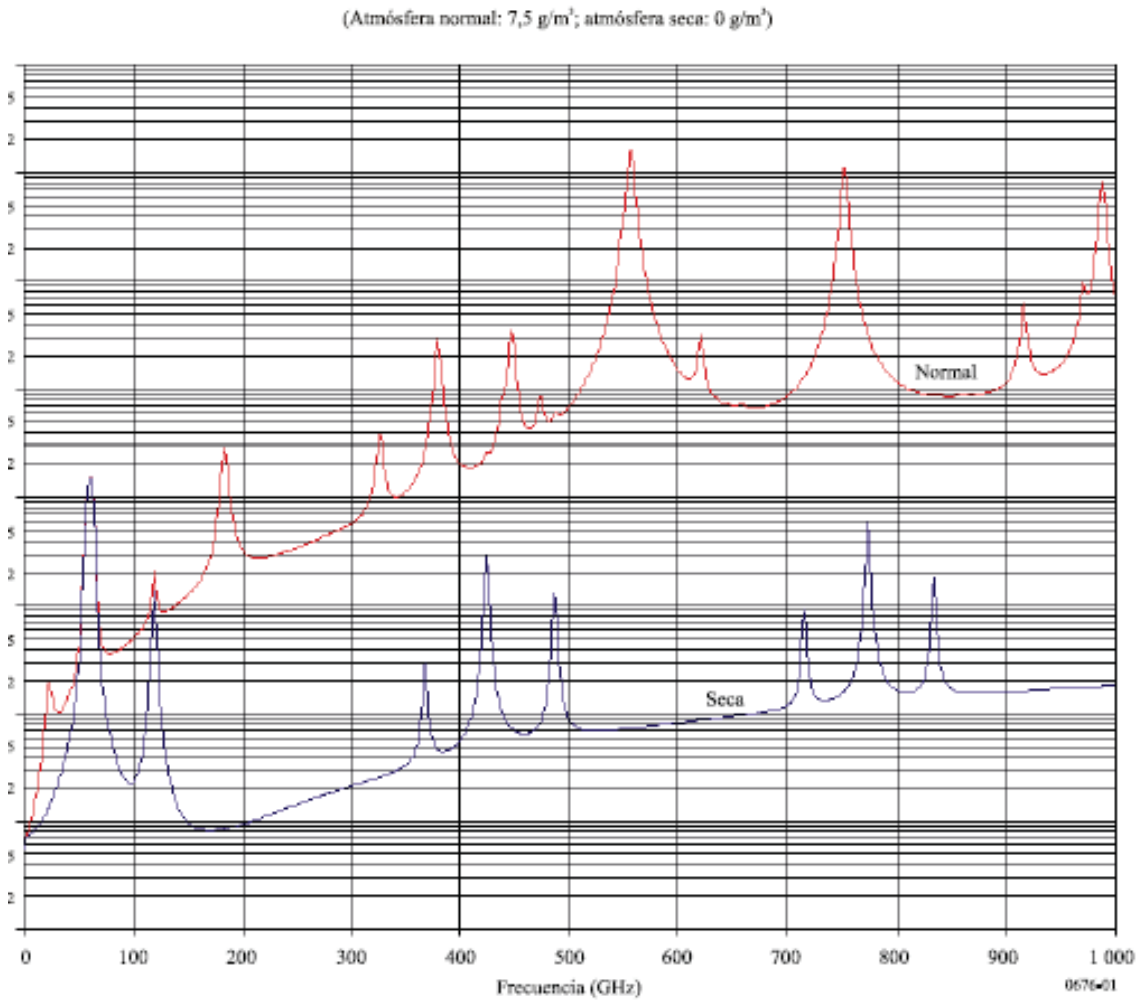


Figura 6.5. Atenuación debida a los gases en la atmósfera. En rojo el aire húmedo, en azul aire seco.
Fuente: Recomendación UIT P.676-7

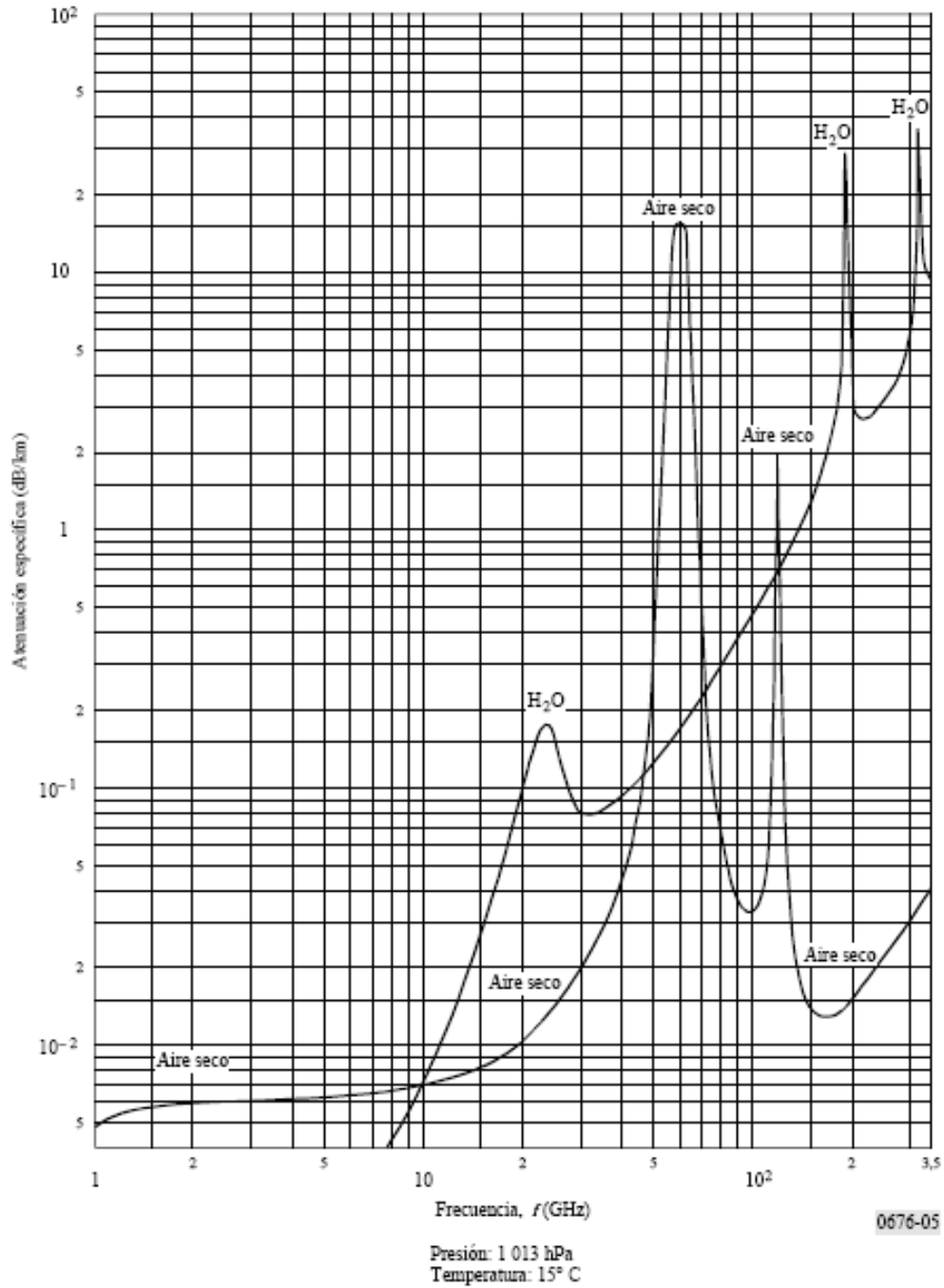


Figura 6.6. Primeros picos de absorción del H₂O. Fuente: Recomendación UIT P.676-7

de vapor de agua (curva roja), y para atmosfera seca con poca humedad (curva azul). La Figura (6.6) muestra en detalle los primeros picos de absorción.

Puede observarse en la Figura (6.6), que cerca de los 24 Ghz aparece el primer pico de absorción debido a la molécula de vapor de agua. A medida que se incrementa la frecuencia se suceden los siguientes picos de absorción de la molécula de agua.

Las curvas características de absorción permiten determinar la frecuencia de observación para el estudio de cada gas en particular.

Para determinar la magnitud de la atenuación provocada, en una rango de frecuencias por un determinado gas, es necesario medir las llamadas frecuencias ventana, donde el gas es transparente a la señal electromagnética, lo que provoca una atenuación baja. De esta forma a partir de las dos mediciones, una en el pico de absorción, y otra en la frecuencia ventana es posible despejar el valor de la incógnita del pico de atenuación.

En la práctica es necesario efectuar mediciones de una mayor cantidad de variables, que vinculen la la cantidad física que se desee estimar, con mediciones de temperatura de brillo en frecuencias específicas (Ventanas y de absorción). Es por esto que los radiómetros se construyen en múltiples frecuencias características, y polarizaciones. Esto se debe principalmente a que existen interferencias de otras señales, superpuestas a la medición, como por ejemplo presencia de nubes, efecto de la emisión de fondo, lluvia, radiación solar, entre otras. En teledetección espacial la radiación que llega al sensor proviene de múltiples fuentes y, en general, solo algunas de esas componentes son deseables por lo que es imprescindible conocer de que manera interactúa la radiación electromagnética con las superficies y con el medio transmisor.

6.4. Temperatura aparente de brillo observada por un radiómetro en órbita

La temperatura de brillo aparente T_{ap} observada por un instrumento ubicado en el espacio esta afectada por diversos factores. En la Figura (6.7) puede observarse un modelo simplificado. La contribución de la señal esta dada por la emisión atmosférica de los gases, su reflejo sobre la superficie terrestre y la emisión de señal electromagnética que produce el material de superficie.

En [51] y [52] se aproxima la temperatura aparente observada por una antena ubicada desde un satélite observando hacia la atmósfera terrestre por la Ecuación (6.17).

$$T_{ap} = T_{BU} + \tau_{atmos}(T_b + T_{scat}) \quad (6.17)$$

Donde T_{ap} es la temperatura de brillo medida por la antena, T_{BU} es la temperatura de brillo ascendente, T_b es la temperatura de brillo superficial, τ_{atmos} es la transmisividad de la atmósfera, T_{scat} se define como la temperatura de dispersión de la atmósfera que representa la temperatura de brillo del cielo reflejada sobre la superficie terrestre y responde a la ecuación:

$$T_{scat} = (1 - \epsilon)(T_{BD} + \tau_{atmos}T_{BC}) \quad (6.18)$$

Donde ϵ es la emisividad de la superficie, T_{BC} es la temperatura del fondo de brillo cósmico con un valor de 2.73K y T_{BD} es la temperatura de brillo descendente de la atmósfera cuya expresión es:

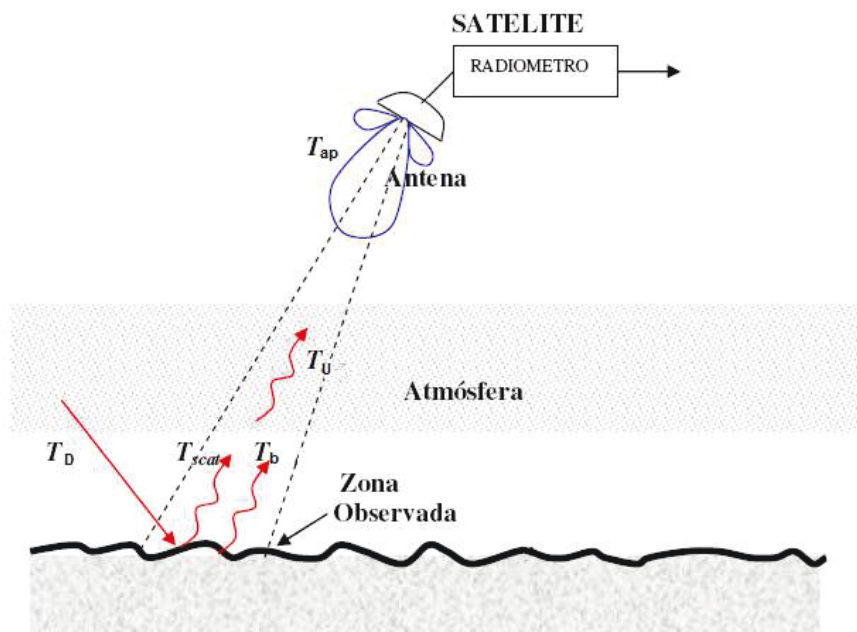


Figura 6.7. Aportes de la señal vistos por un instrumento en órbita, considerando atmósfera de una sola capa libre de nubes. Adaptado de: Antenas Para Radiómetros En Ondas Milimetrica Con Haces Múltiples. Bava J.A.

$$T_{BD} = (1 - \tau_{atmos})T_D \quad (6.19)$$

Siendo T_D la temperatura efectiva de brillo descendente de la atmósfera.

La expresión de la temperatura de brillo ascendente T_{BU} es similar a la de brillo descendente T_{BD} y está dada por:

$$T_{BU} = (1 - \tau_{atmos})T_U \quad (6.20)$$

Donde T_U es la temperatura efectiva de brillo ascendente de la atmósfera.

A la emisión atmosférica contribuyen gases como el oxígeno, el vapor de agua y el agua líquida. Parte de esta señal se refleja en la superficie y atraviesa nuevamente el medio atmosférico, por lo que el coeficiente de reflexión del material indicará la cantidad de señal reflejada (En el caso del océano se refleja casi su totalidad). La emisión de la superficie terrestre depende principalmente de la temperatura física a la que se encuentre el material y del coeficiente de emisividad del mismo.

Las ecuaciones de absorción de la atmósfera en las frecuencias de 23.8 Ghz y 36.5 Ghz vienen dadas por la contribución del oxígeno, el vapor de agua y el agua líquida según la ecuación:

$$\alpha_{atmos} = \alpha_O + \alpha_V + \alpha_L \quad (6.21)$$

Donde α_{atmos} es la absorción atmosférica, α_O es la absorción del oxígeno, α_V es la absorción del vapor de agua y finalmente α_L es la absorción del agua líquida.

La absorción y la transmitancia se relacionan según la siguiente expresión:

$$\tau_{atmos} = e^{-sec(\theta)(\alpha_O + \alpha_V + \alpha_L)} \quad (6.22)$$

Donde θ es el ángulo de incidencia. Aquí puede observarse la importancia del ángulo de incidencia y el porque debe ser tenido en cuenta al realizar las mediciones, ya que la atmósfera que atraviesa el haz varía en función de este ángulo y por lo tanto el valor de la temperatura de brillo observada.

Reemplazando la Ecuación (6.18) hasta la Ecuación (6.22), en la Ecuación (6.17) y considerando que la temperatura de brillo superficial puede escribirse en función de la temperatura superficial SST :

$$T_b = \epsilon SST \quad (6.23)$$

Se obtiene entonces la ecuación de las temperatura de brillo aparente en función de la temperatura superficial SST , la temperatura de brillo ascendente T_{BU} , la temperatura de brillo descendente T_{BD} , y la temperatura de fondo de brillo de microondas T_{BC} .

$$T_{ap} = T_{BU} + \tau_{atmos}(\epsilon SST + (1 - \epsilon)(T_{BD} + \tau_{atmos}T_{BC})) \quad (6.24)$$

Los valores de las temperaturas T_{BU} y T_{BD} de la Ecuación (6.24) pueden ser reemplazados por las temperaturas efectivas de ascenso y descenso T_U y T_D . Sustituyendo estas variables, la temperatura aparente de brillo es dependiente de tres parámetros desconocidos: la cantidad de vapor de agua presente atmósfera, los vientos y la absorbancia del agua líquida [53]. Este modelo es aplicado para calibrar el instrumento MWR del satélite SACD/Aquarius sobre mar [54].

6.4.1. Modelo de ajuste propuesto para obtener IPWV sobre tierra a partir de mediciones de temperatura de brillo

En el caso de la superficie terrestre, la dispersión de los parámetros electromagnéticos que caracterizan al material de superficie, hace que resulte difícil aplicar modelos a regiones extensas, o en caso de utilizarlos presentan errores sistemáticos muy grandes. Es por esto que para tierra se deben acotar las regiones a fin de que la superficie sea lo mas homogénea posible evitando además, zonas costeras.

Puede plantearse un modelo de regresión estadístico, que relacione las mediciones en las dos frecuencias y las tres polarizaciones para obtener una aproximación de la función inversa de la Ecuación (6.24) en función de las temperaturas de brillo medidas con las variables que se quieren estimar. En la referencia [54], se plantean modelos con polinomios de primer y segundo orden para obtener IPWV, sobre mar.

Se propone sobre tierra, y en regiones acotadas donde los parámetros electromagnéticos que caracterizan a la superficie se mantengan aproximadamente constantes, un modelo de ajuste lineal que relacione las mediciones en las dos bandas del radiómetro con el IPWV. La ecuación del modelo propuesto es:

$$IPWV_{modelo} = A\Delta T_{b_{24H}} + B\Delta T_{b_{37H}} + C\Delta T_{b_{37V}} + Dt_{st} + E \quad (6.25)$$

Donde ΔTb_{24H} , ΔTb_{37H} , ΔTb_{37V} representan las diferencias entre la temperatura de brillo en las polarizaciones horizontales y verticales respecto de sus medias en la ventana espacial de medición, t_{st} es la temperatura superficial. Las constantes del modelo A, B, C, D y E son los coeficientes de calibración que se desean obtener para cada estación en tierra.

En la Ecuación (6.25) se observa que se utilizan las diferencias de temperatura de brillo respecto de su valor medio en la ventana espacial. Esto se realiza para desafectar los valores significativamente altos de temperatura de brillo que se presentan sobre la superficie terrestre. Por lo tanto, para aplicar el modelo dado por la Ecuación (6.25) para la estimación de IPWV, se debe obtener un promedio de las mediciones del MWR en la ventana espacial, para luego restarlo a las mediciones puntuales y de esta forma obtener las diferencias como parámetro de entrada al modelo.

En el Capítulo 7 se aplicarán los conceptos descritos, para la estimación de IPWV con el radiómetro MWR del SACD/Aquarius.

Capítulo 7

Estimación de IPWV utilizando el instrumento MWR del Satélite Argentino SACD/Aquarius

En este capítulo se desarrollará un modelo de regresión lineal en múltiples variables que permitirá estimar sobre tierra y en una zona bien determinada, vapor de agua integrado utilizando los datos de las temperaturas de brillo del instrumento MWR del satélite SACD/Aquarius.

Para la calibración se utilizarán datos de radiosondeo sobre tierra. Para esto se deberá seleccionar cuidadosamente la zona geográfica, teniendo en cuenta que la estación no sea costera para evitar la interferencia del mar.

También serán utilizados datos de IPWV obtenidos con la técnica GPS, provenientes de la red Suominet [55], que permitirán extender la cantidad de estaciones disponibles en tierra donde exista una intersección con los datos del satélite.

7.1. El instrumento MWR

El satélite argentino SACD/Aquarius es una misión satelital dedicada a la observación de la atmósfera y la superficie terrestre. Posee siete instrumentos incluyendo el equipamiento Aquarius, dedicado a la medición de salinidad en mares.

El instrumento MWR, esta constituido por dos radiómetros operando en las frecuencias de 23.8 Ghz y 36.5 Ghz. Se encuentra calibrado actualmente sobre el océano, los datos de temperatura de brillo sobre tierra están disponibles, pero no son procesados debido a que no se encuentra implementado ningún algoritmo que los procese.

Cada receptor del MWR es un radiómetro de dos referencias internas. La primera esta formada por un diodo de ruido, que inyecta una señal mediante un acoplador direccional y un atenuador después de la antena. La otra referencia, consiste en una guía de onda acoplada a una carga interna genera una temperatura de brillo equivalente bien conocida, este sistema es conocido como receptor Dicke. Interruptores electrónicos internos conmutan estas referencias, y permiten a partir de ellas despejar la temperatura de entrada del receptor. En la Figura (7.1) se observa un diagrama en bloques del instrumento.

No es el espíritu de esta tesis describir el funcionamiento interno del MWR, sino dar una idea de su estructura funcional, para poder explicar las posibles limitaciones que se puedan presentar en la calibración del instrumento, para las temperaturas de brillo que se presentarán sobre tierra.

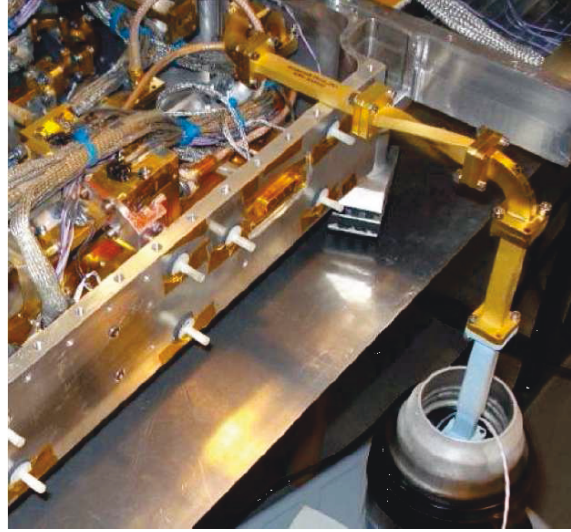


Figura 7.2. Referencia de calibración fría. Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009

Considerando la ganancia G , constante en todas las mediciones, y a partir del sistema de Ecuaciones (7.1) puede encontrarse una expresión para la temperatura de entrada al receptor, que viene dada por la expresión:

$$T_{in} = \frac{C_{in} - C_0}{C_{(in+n)} + C_{in}} T_n + T_0 \quad (7.2)$$

La Ecuación (7.2) permite determinar la temperatura de brillo de entrada a partir de la temperatura de brillo de la referencia interna T_0 , la generada por el diodo T_n y del número de cuentas a la salida de los conversores analógicos-digitales.

Fueron utilizadas dos referencias externas, la primera con nitrógeno líquido a una temperatura de 84.8°K y la segunda referencia a una temperatura de 329.5°K. Un tercer punto adicional es el generado por la referencia interna T_0 a una temperatura de brillo equivalente de 293,5°K. Con estas tres temperaturas de referencia, es posible determinar una aproximación a la transferencia del receptor del radiómetro. Los resultados se reproducen en el gráfico de la Figura (7.3).

Del sistema de Ecuaciones (7.1) puede despejarse el valor del ruido que inyecta el diodo de referencia para cada medición. Este debería ser independiente del valor de la temperatura de brillo (ya que el diodo siempre inyecta la misma cantidad de ruido). El sistema de ecuaciones presenta dos soluciones posibles para la temperatura de ruido del diodo

$$\begin{aligned} C_{(c+n)} &= GT_n \\ C_{(h+n)} &= GT_n \end{aligned} \quad (7.3)$$

Donde $C_{(c+n)}$ es la cantidad de cuentas del conversor analógico-digital para la medición "fría", y $C_{(c+h)}$ es la cantidad de cuentas para la medición "caliente". La Figura (7.4) reproduce los resultados de aplicar la Ecuación (7.3) a la medición de calibración realizada.

Lo que puede observarse es que existe una diferencia en el número de cuentas para ambas mediciones. Esto se traduce en una no-linealidad en la transferencia del instrumento.

7. Estimación de IPWV utilizando el instrumento MWR del Satélite Argentino SACD/Aquarius

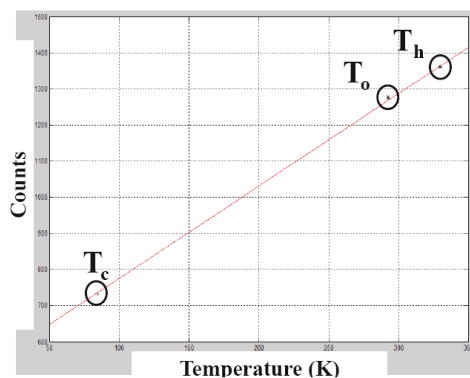


Figura 7.3. Función de transferencia del radiómetro MWR. Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009

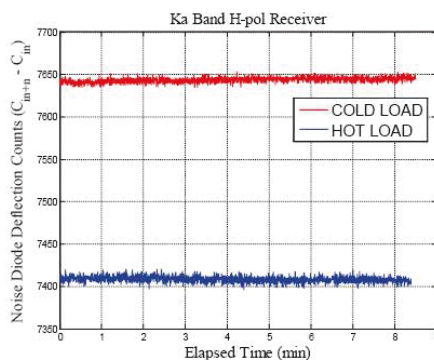


Figura 7.4. Valor de las cuentas del diodo de ruido para cada medición. Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009

El análisis de calibración realizado antes del lanzamiento indica que el radiómetro presenta una no-linealidad, que para temperaturas superiores a 300°K puede ser problemática. No obstante no fueron realizados ensayos que permitan determinar cuantitativamente el valor de la misma.

Sobre tierra las temperaturas de brillo pueden ser superiores a 300°K, por lo que se tendrá especial cuidado en no superar este límite, ubicando zonas donde temperatura este preferentemente por debajo de este valor.

Se deberá realizar previamente un análisis de los datos de IPWV que pueden obtenerse en tierra teniendo en cuenta las restricciones de temperatura de brillo máxima cercana a los 300°K.

7.2. Distribución Geométrica de los sensores del MWR

El instrumento MWR dispone de dos frecuencias de medición en 23.8Ghz y 36.5Ghz, cada frecuencia dispone de 8 haces, la mitad de ellos con ángulos de incidencia de 52 grados respecto del zenith y la otra con 58 grados. Los haces iluminan una antena offset toroidal con un ángulo de 3dB por haz de 1.64 grados, lo que resulta en un campo instantáneo de visión (IFOV) de 50 [Km].

Esta geometría produce una cobertura con un radio promedio de 380 [Km], separada 272 [Km] de la traza del satélite coincidiendo con la del Instrumento Aquarius. En la Figura (7.5) puede observarse la distribución geométrica mencionada.

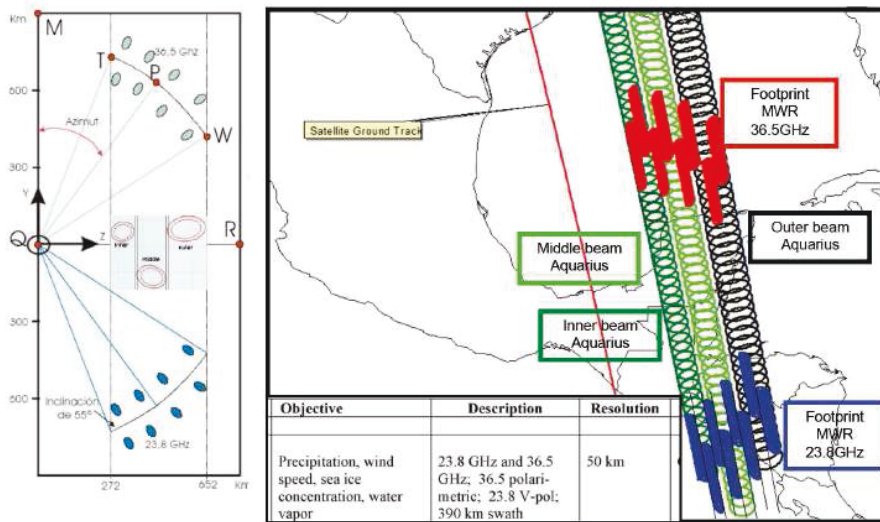


Figura 7.5. Distribución Geométrica de los sensores. Fuente: Fuente: Brightness Temperature Calibration of SACD/AQUARIUS Microwave Radiometer (MWR). Sayak Krishna Biswas. M.S. University of Central Florida, 2009

Como puede observarse en la Figura (7.5), existe una diferencia espacial en las mediciones de las bandas de 23.8 Ghz (banda K) y 36.5 Ghz (banda Ka).

La medición entre bocinas se realiza sincrónicamente cada 240 milisegundos, por lo que se obtiene un ciclo completo de las 8 bocinas cada 1.92 segundos. En la Figura (7.6) se observa esto último.

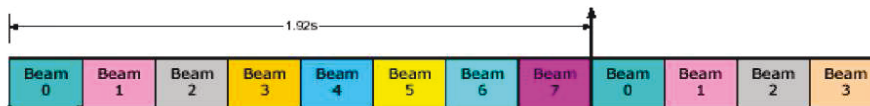


Figura 7.6. Diagrama de tiempo de medición de las bocinas. Fuente CONAE

En la Figura (7.7) se observa la configuración de instrumentos del SACD-Aquarius, pueden observarse las dos antenas del MWR y las 8 bocinas de iluminación en cada una de ellas.

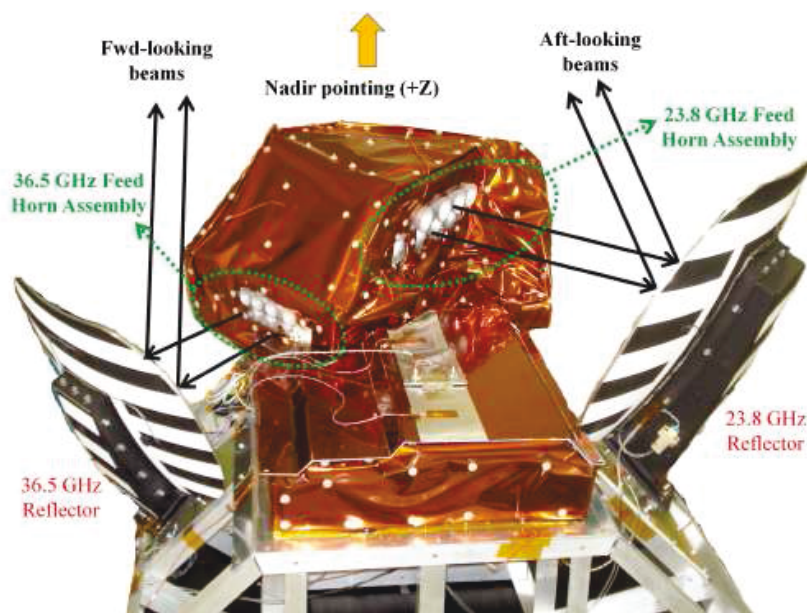


Figura 7.7. Distribución de los instrumentos de SACD-Aquarius. Fuente CONAE

7.3. Datos del instrumento MWR

Los datos del radiómetro están separados en niveles. El nivel L1A dispone de información de temperatura de brillo de las distintas bocinas en número de cuentas desde los conversores analógicos-digitales e información relacionada con el funcionamiento del radiómetro tales como tensiones de los amplificadores, temperatura interna de los distintos equipamientos, etc.

El nivel L1B contiene la información de las mediciones de temperatura de brillo calibradas de los ocho haces y los datos de GPS que ubican a los mismos. Las mediciones son en unidades de grados Kelvin.

El nivel L2B contiene estimaciones de vapor de agua, hielo y vientos utilizando un modelo calibrado. Estos datos están disponibles únicamente para el océano, hasta 50 [Km] lejos de zonas costeras.

En la Figura (7.8) se observa las imágenes generadas desde el nivel L1B de temperatura de brillo sobre todo el planeta tierra. Un mapa de todo el globo necesita de datos de una semana, tiempo en el que las órbitas comienzan nuevamente a repetirse.

En la Figura (7.9), se observan las estimaciones de IPWV en mar. Estos datos se encuentran calibrados a partir de las mediciones del satélite Windsat, con una órbita muy similar al SACD.

Todos los productos de mediciones del satélite SACD/Aquarius fueron aportados por CONAE a través la directora de ciencia de la misión, la Dra. Sandra Torrusio.

Todos los datos están comprimidos utilizando el formato de metadatos HDF5. La información esta estructurada en directorios con un breve comentario del contenido de los mismos.

El nivel L1B posee un directorio con la medición de las temperaturas de brillo y otro directorio con la localización GPS de las mediciones. En el nombre del archivo de metadatos

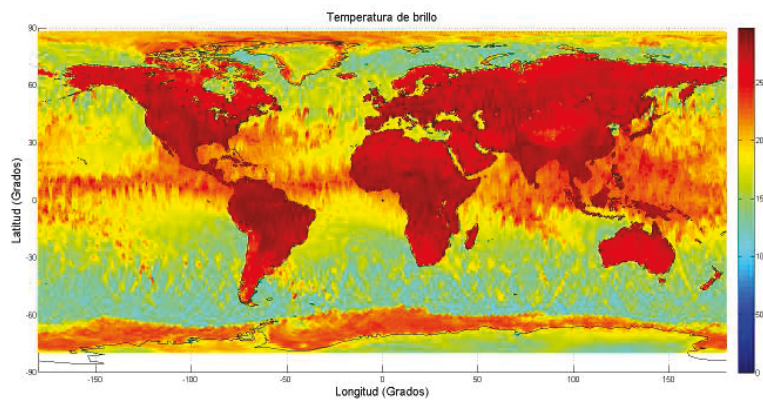


Figura 7.8. Temperaturas de brillo en la frecuencia de 23.8 Ghz sobre el planeta Tierra

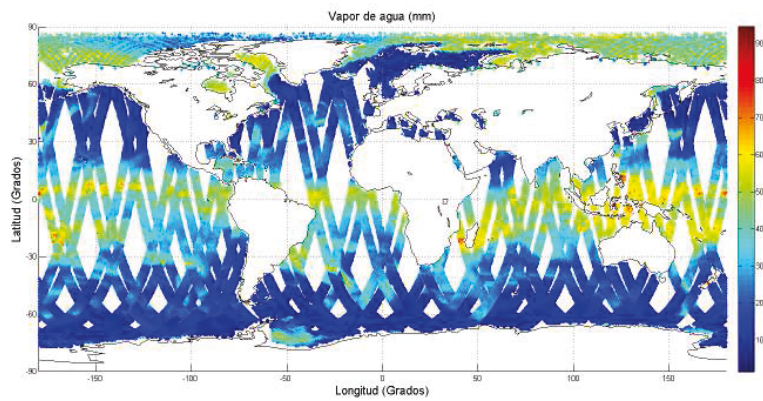


Figura 7.9. Concentración de vapor de agua sobre el Planeta Tierra

se brinda información de la fecha y el número de órbita.

El Satélite posee una órbita polar sincrónica al sol (heliosincrónica) ubicada a 657 km de altura, que tarda 1 hora aproximadamente en recorrer todo el globo. En las Figuras (7.10) a (7.13), se observan cuatro órbitas contiguas.

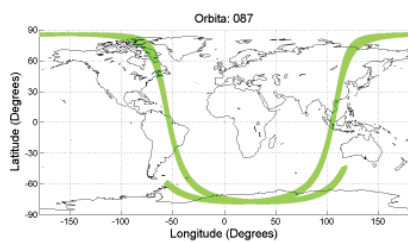


Figura 7.10. Orbita 87

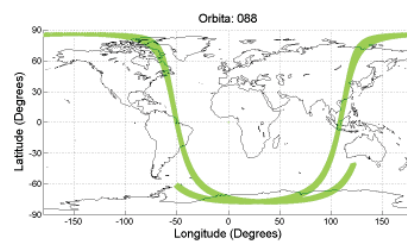


Figura 7.11. Orbita 88

7. Estimación de IPWV utilizando el instrumento MWR del Satélite Argentino SACD/Aquarius

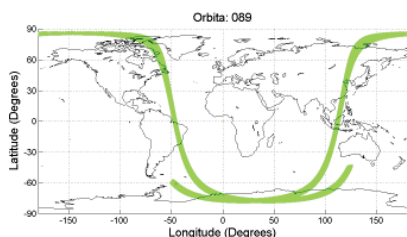


Figura 7.12. Órbita 89

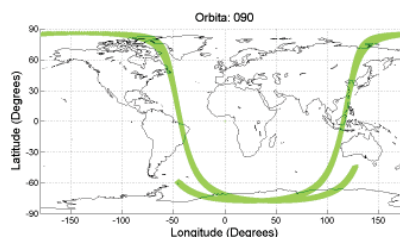


Figura 7.13. Órbita 90

Un aspecto a tener en cuenta son las calibraciones que se realizan regularmente al radiómetro. Estas calibraciones giran las antenas (rotando toda la estructura del satélite) apuntando hacia el fondo de brillo cósmico para obtener una fuente de referencia. Estas calibraciones pueden observarse en las trazas de las bocinas, ya que aparentan separarse, este efecto se muestra en la Figura (7.14)

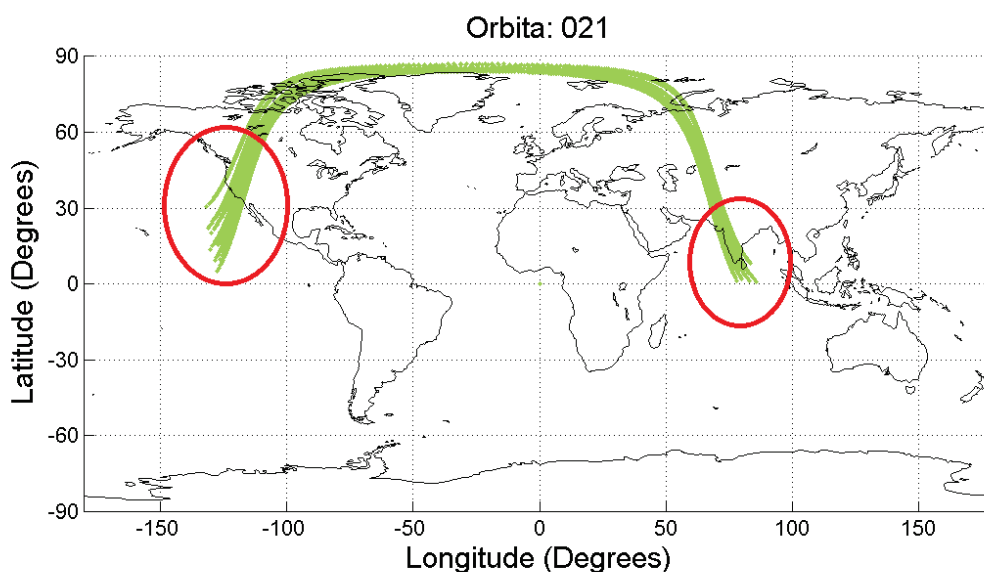


Figura 7.14. Efecto de la calibración de fondo de brillo en la traza del satélite

Para detectar las calibraciones y eliminarlas del conjunto de datos se detecta que la separación entre trazas se mantenga constante. En caso de que esto no suceda se elimina el dato del conjunto de mediciones.

En la sección siguiente se describirá la metodología empleada para la selección de los datos

de calibración de radiosondeo en tierra. Se realizará un análisis de las zonas geográficas más convenientes desde el punto de vista de la medición de IPWV teniendo en cuenta los criterios de temperatura de brillo máxima, y disponibilidad de los datos superficiales.

7.4. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de radiosondadores

Se detallarán y luego explicarán las condiciones que deben cumplir las mediciones de temperatura de brillo del MWR, para que puedan ser utilizadas en el modelo de calibración de la Ecuación (6.25), de la Sección (6.4.1). Los criterios descritos serán aplicados tanto a la frecuencia de 23.8Ghz como a la de 36.5Ghz

- Restricción espacial en un radio de 50Km medido desde la estación en tierra.
- Restricción temporal de ± 30 minutos desde el lanzamiento del radiosondador.
- Temperatura de brillo inferior a 300K.
- Condiciones atmosféricas libre de nubes.

La calibración requiere datos superficiales de vapor de agua y temperatura, para introducir al modelo de regresión de la Ecuación (6.25), y de esta forma calibrar las constantes.

La principal dificultad consiste en conseguir estaciones donde la traza del satélite cubra la región al momento del lanzamiento de radiosondas, con una diferencia temporal no mayor a 30 minutos. Este criterio se utiliza debido a que el tiempo promedio en que la radiosonda asciende hasta la tropósfera ronda los 30 minutos, por lo que se dispone en ese intervalo, de una medida de IPWV con todo el perfil atmosférico.

Actualmente las radiosondas son lanzadas a las 12 tiempo universal coordinado (UTC) o 0 UTC, salvo raras excepciones.

Resulta evidente que para un mismo valor de IPWV provisto por la radiosonda, se dispondrán de varias mediciones de temperatura de brillo por haz separadas temporalmente. Se promediarán dichas mediciones y finalmente se realizará con esos datos otro promedio final entre haces para obtener el valor del ajuste.

En la Figura (7.15), se observa en negro las trazas a la hora 12 UTC, y en blanco las correspondientes a las 00 UTC, en un rango de ± 30 minutos.

De la Figura (7.15) puede verse que no son muchas las zonas sobre tierra que cubre el satélite en los horarios de lanzamientos de radiosondas. Sobre Argentina, la órbita recorre el horario de las 00 UTC, pero lamentablemente no existen radiosondadores disponibles a esa hora en esta región.

En Europa se tiene cobertura sobre Rusia, pero sobre esta región el contenido de vapor de agua es muy bajo, al igual que en los polos. Deben buscarse zonas que tengan mayor contenido de vapor de agua sin que se saturen los instrumentos del MWR.

En este trabajo se obtuvieron ajustes en el rango de 15mm a 60mm de IPWV, donde pudo observarse que los valores de temperatura de brillo promedio en ambas bandas eran del orden de 300°K o menos y los valores de IPWV permitían obtener una precisión razonable en la estimación.

Otro factor a tener en cuenta es que deben seleccionarse días claros para las mediciones, ya que la presencia de lluvia altera de manera significativa las mediciones de temperatura de brillo en ambas bandas. Estos datos por lo tanto deben ser eliminados del modelo.

Los datos de mediciones superficiales incluyen información sobre la nubosidad, lo que permite saber si el día en que se efectuó la medida hubo presencia de nubes, y en este caso descartarla.

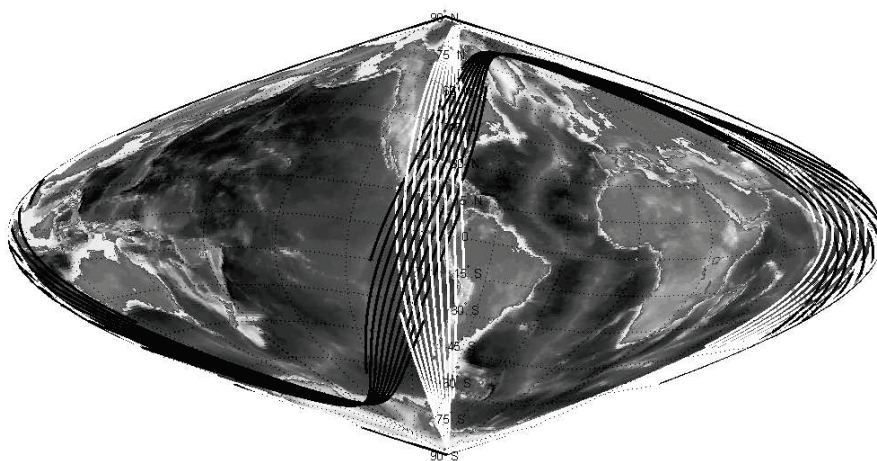


Figura 7.15. Recorrido de los haces para las horas 12 UTC en negro y 0UTC en blanco, en un rango de ± 30 minutos



Figura 7.16. Estaciones de radiosondeo seleccionadas sobre Norteamérica

Las estaciones seleccionadas que cumplen las condiciones impuestas se encuentran sobre Norteamérica y pueden verse en la Figura (7.16)

Se seleccionan seis estaciones de Norteamérica, para el período desde enero hasta agosto del año 2014.

7.4. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de radiosondadores

En la Tabla (7.1) se observan las coordenadas de las estaciones seleccionadas. Se dispone de datos de radiosondeo a las 00UTC y 12 UTC, y datos meteorológicos cada 30 minutos in-situ con los radiosondadores. Todos los datos de radiosondeo fueron extraídos desde el sitio de la Universidad de Wyoming [23], que dispone de una base de datos mundial. Este sitio también dispone de observaciones de superficie, brindando una base de datos meteorológica con información cada 30 minutos.

Tabla 7.1. Coordenadas de las Estaciones de Radiosondeo

Num Ref	Estaciones Seleccionadas		
	Latitud	Longitud	Estación
1	33.36	-84.56	72215
2	32.31	-90.08	72235
3	34.84	-92.26	72340
4	32.83	-97.3	72249
5	32.46	-93.78	72248
6	36.08	-79.95	72317

El procesamiento consiste en leer los archivos de órbitas en formato HDF5, y extraer las mediciones de temperatura de brillo en la frecuencia de 23.8 Ghz polarización horizontal, 36.5 Ghz polarización horizontal y vertical, y los datos de latitud y longitud para los ocho haces.

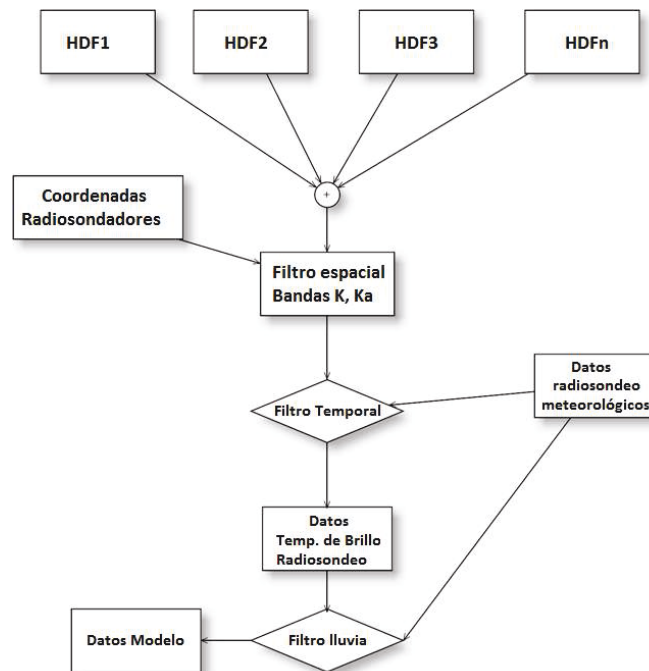


Figura 7.17. Diagrama esquemático del procesamiento

En la Figura (7.17) se observa un esquema general del procesamiento de la información, se ingresan los datos de las coordenadas de las estaciones en tierra y se buscan coincidencias con los haces para extraer mediciones de temperatura de brillo en el área cercana a la estación. Luego se filtra temporalmente el dato, para obtener la coincidencia en la hora del lanzamiento de las radiosondas.

7.4.1. Resultados de la calibración del MWR utilizando radiosondas

Los resultados de los ajustes pueden observarse en las Figuras (7.18) a (7.23). El eje denominado $IPWV$ en los gráficos representa el vapor de agua integrado medido mediante radiosondas, **mientras que el eje $IPWV_{modelo}$ el correspondiente al modelo de ajuste propuesto en la Ecuación (6.25) del Capítulo 6**. Las rectas a 45 grados representa el caso ideal de ajuste entre el modelo propuesto y las mediciones de radiosondas. Las desviaciones estándar STD se calculan mediante la expresión:

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (IPWV_i - IPWV_{modelo_i})^2}{N}} \quad (7.4)$$

Las constantes del modelo de la Ecuación (6.25), fueron encontrados previamente mediante un ajuste de mínimos cuadrados, tomando como dato de entrada los valores de IPWV de radiosondas, y las mediciones de temperatura de brillo del MWR en sus dos bandas. Una vez obtenidos los coeficientes, se calcularon los valores estimados de IPWV del modelo, para compararlos con los obtenidos por radiosondas sobre cada estación.

En la Tabla (7.2) se observan los coeficientes de calibración correspondientes a cada estación.

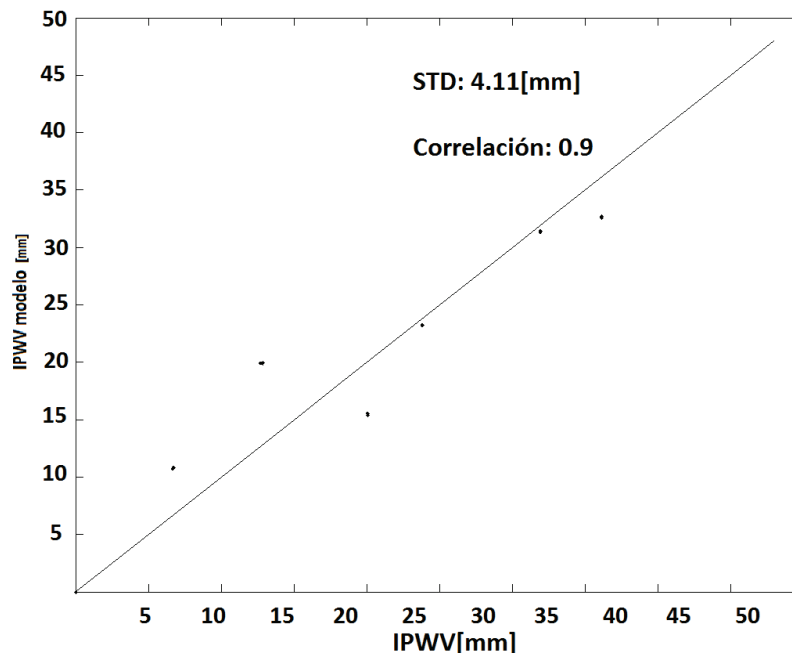


Figura 7.18. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72215

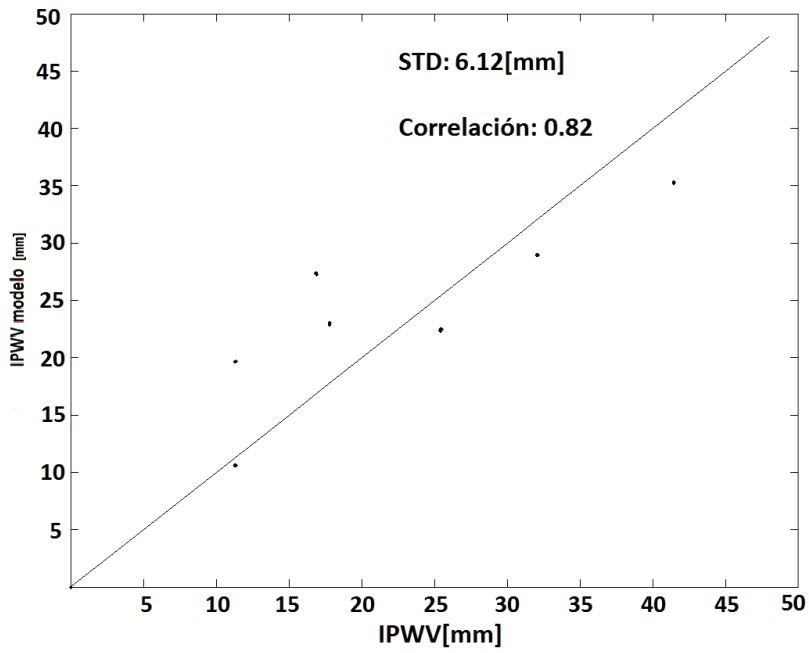


Figura 7.19. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72235

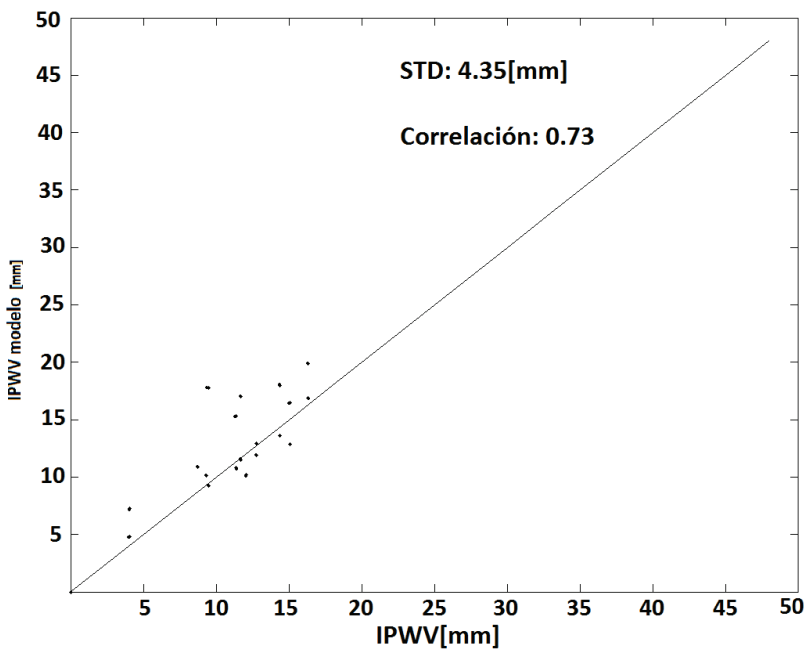


Figura 7.20. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72340

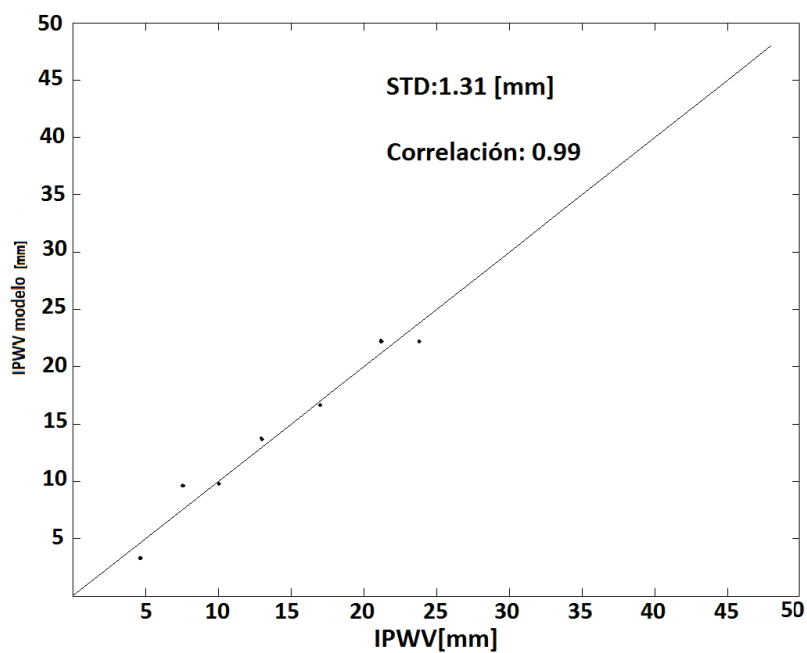


Figura 7.21. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72249

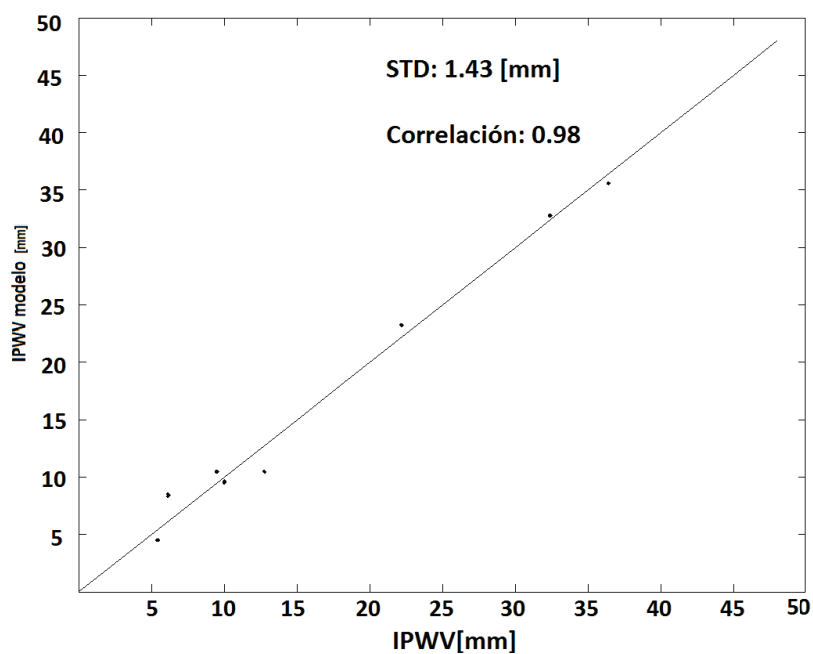


Figura 7.22. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72248

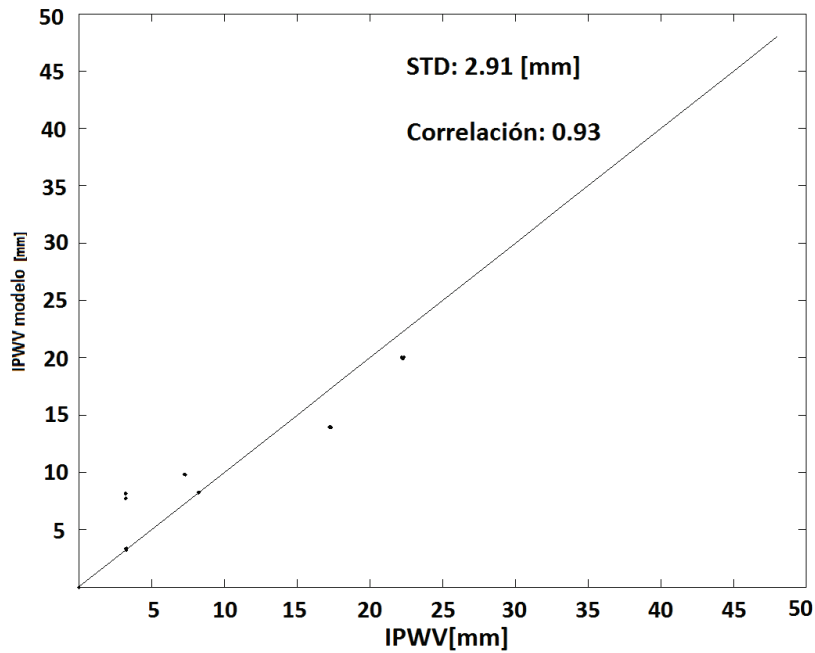


Figura 7.23. Comparación del modelo de ajuste con los datos de radiosondas sobre la estación 72317

Tabla 7.2. Constantes de calibración para cada estación a partir de datos de la técnica de radiosondeo

Num Ref	Constantes de calibración					Número de Estación
	A	B	C	D	E	
1	0.956	-0.356	-0.005	0.321	15.012	72215
2	0.589	0.079	2.547	-0.157	-26.859	72235
3	0.69	1.598	-0.632	-0.8	2.583	72340
4	0.415	-0.091	0.063	0.40	11.025	72249
5	1.365	0.856	-0.115	-0.5	-26.341	72248
6	0.752	1.087	-0.321	0.356	-3.467	72317

Pueden verse en todas las estaciones correlaciones altas, mayores a 0.7 en correspondencia con el modelo de regresión, y valores de desviación estándar que oscilan entre 1.3 [mm] para la estación de radiosondeo 72249 , hasta 6.1 [mm] para la estación 72235. La mejor correlación se obtuvo en la estación 72249, mientras que la peor en la estación 72340 con un valor de 0.72.

Los datos de radiosondeo son escasos, y se dispone de unos pocos puntos de ajuste para varios meses de datos. Es por esto que implementará el modelo de regresión descrito, pero utilizando datos de IPWV provenientes de la técnica GPS, de la red Suominet. Se dispone de una mayor densidad de datos, a diferencia de la técnica de radiosondeo, que obtiene un valor único de IPWV en cada medición del MWR.

7.5. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de la red Suominet-GPS

En esta sección se utilizarán los datos de IPWV provistos por la red Suominet GPS, que brinda estimaciones cada 5 minutos del vapor de agua, incluyendo datos meteorológicos superficiales.

El procedimiento para el ajuste del modelo es el mismo que para el caso de radiosondas, y consiste en ubicar estaciones sobre tierra que tengan coincidencia espacial y temporal con las mediciones de temperatura de brillo del MWR. **Se continuará utilizando el modelo de ajuste provisto por la Ecuación (6.25) del Capítulo 6.**

La ventaja de utilizar datos GPS de IPWV, es una cobertura temporal mayor, lo que permite obtener más puntos para el ajuste.

El ajuste se realizará sobre la misma región que para el caso de los datos de radiosondeo, debido a que se desean comparar ambos resultados. En la Figura (7.24) se observan las estaciones seleccionadas, cuyas coordenadas se encuentran en la Tabla (7.3)

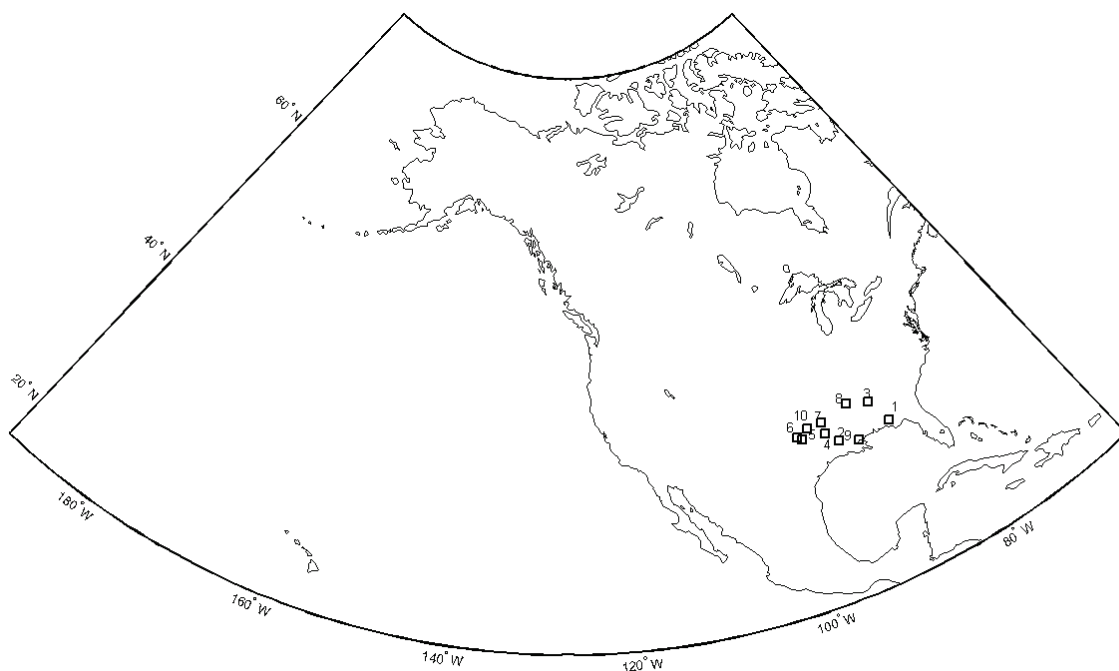


Figura 7.24. Estaciones seleccionadas de la red Suominet para la calibración de los datos del MWR

7.5. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de la red Suominet-GPS

Tabla 7.3. Coordenadas de las Estaciones GPS

Num Ref	Estaciones de GPS Seleccionadas		
	Latitud	Longitud	Nombre de Estación
1	30.84	-85.60	BNFY
2	31.17	-92.41	LSUA
3	33.53,	-86.85	AL30
4	32.42	-93.70	SHRV
5	32.79	-96.67	TXDA
6	33.20	-97.16	TXDE
7	33.69	-93.60	ARHP
8	34.36	-89.53	MSOX
9	30.47	-90.09	COVG
10	33.67	-95.55	TXPA

7.5.1. Resultados de la calibración del MWR utilizando la red Suominet-GPS

Los resultados obtenidos utilizando los datos superficiales de IPWV brindados por la red Suominet, se observan en las Figuras (7.25) a (7.34). En la Tabla (7.4) se observan los valores de las constantes del modelo de la Ecuación (6.25) asociadas.

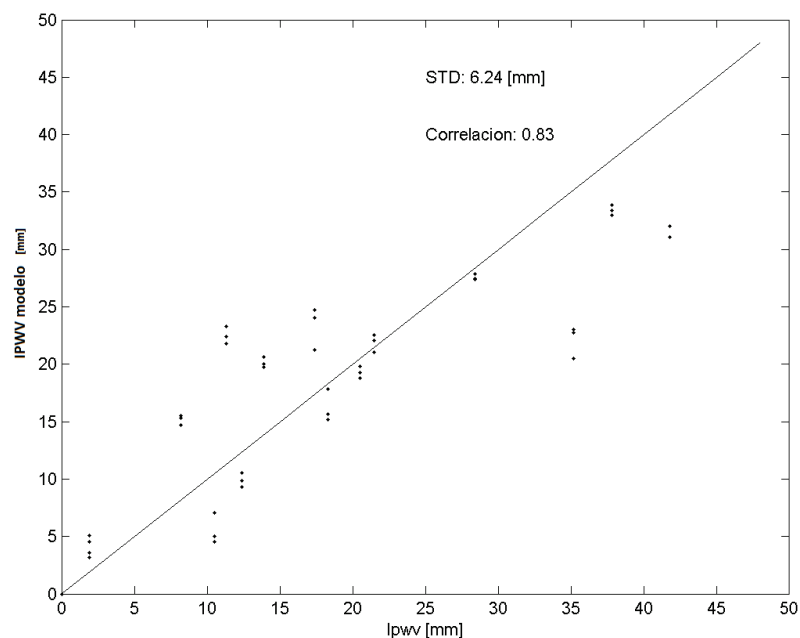


Figura 7.25. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación BNFY

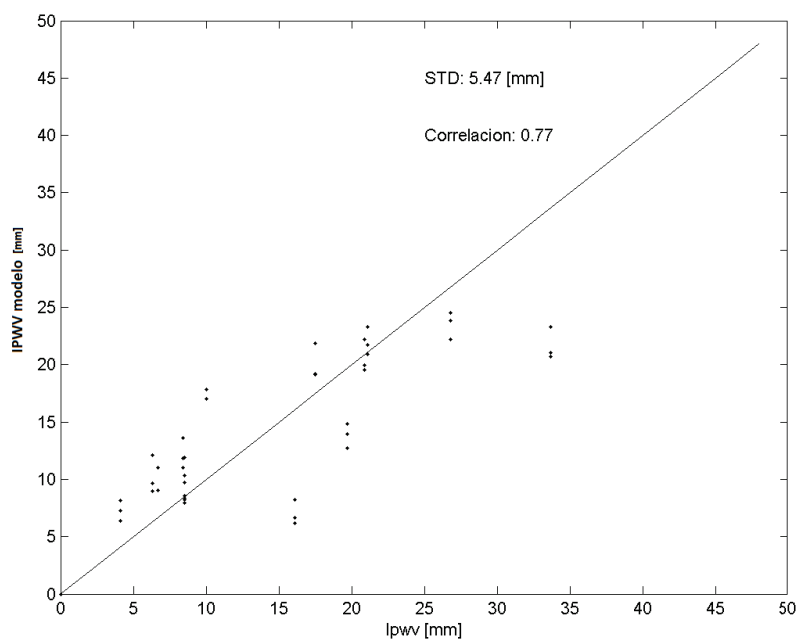


Figura 7.26. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación LSUA

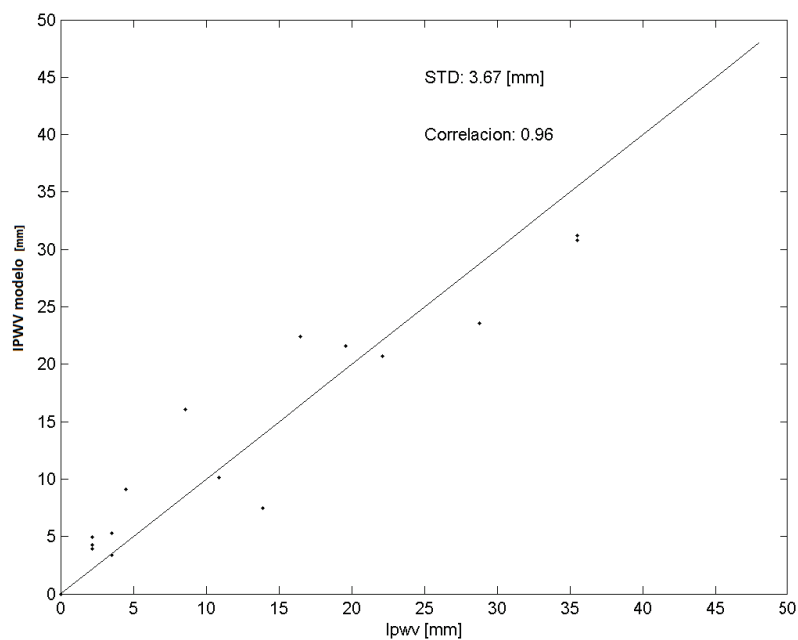


Figura 7.27. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación AL30

7.5. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de la red Suominet-GPS

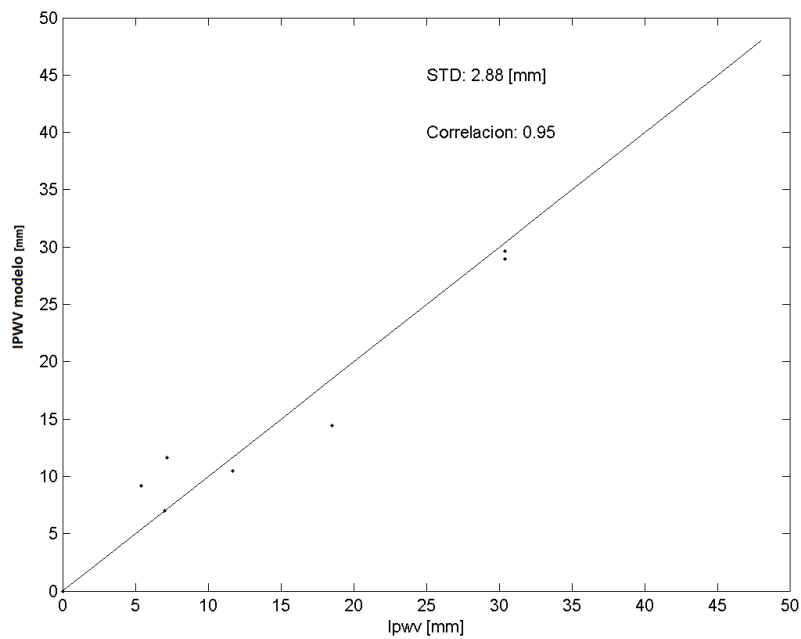


Figura 7.28. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación SHRV

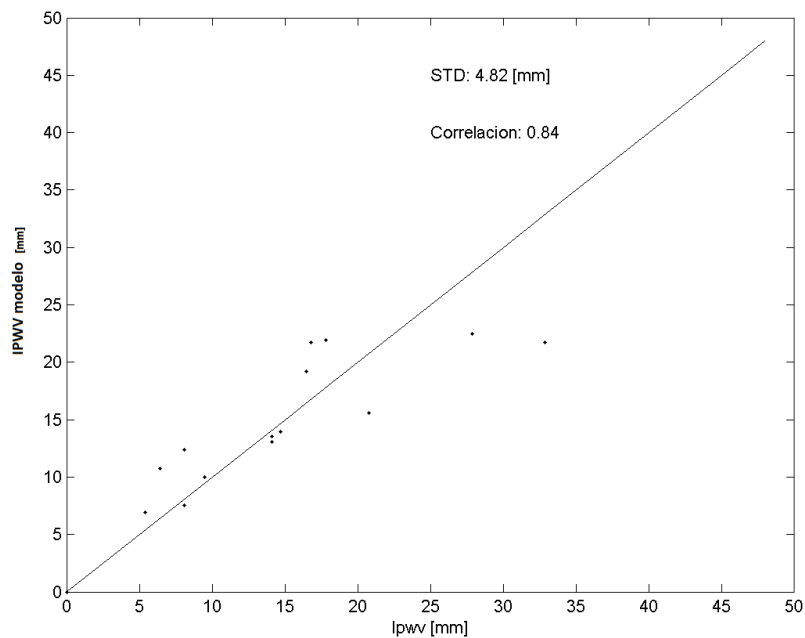


Figura 7.29. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación TXDA

7. Estimación de IPWV utilizando el instrumento MWR del Satélite Argentino SACD/Aquarius

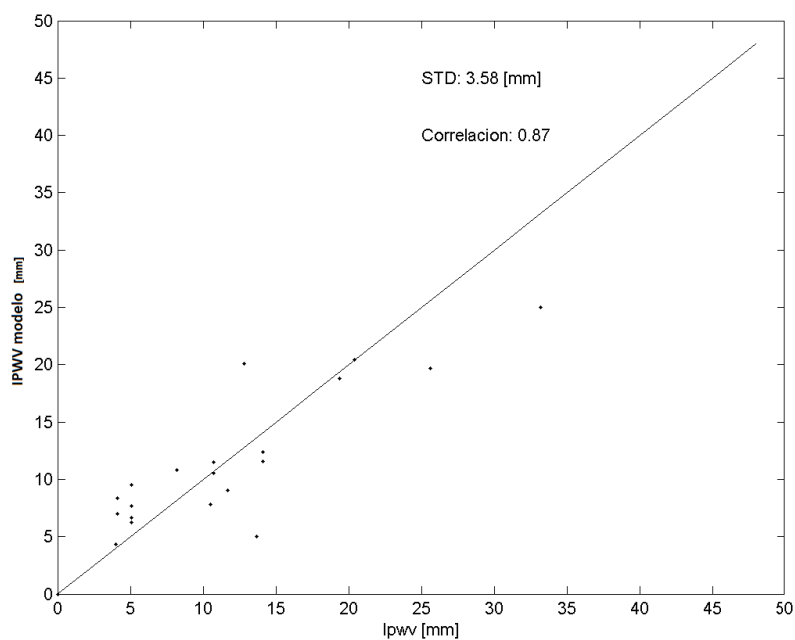


Figura 7.30. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación TXDE

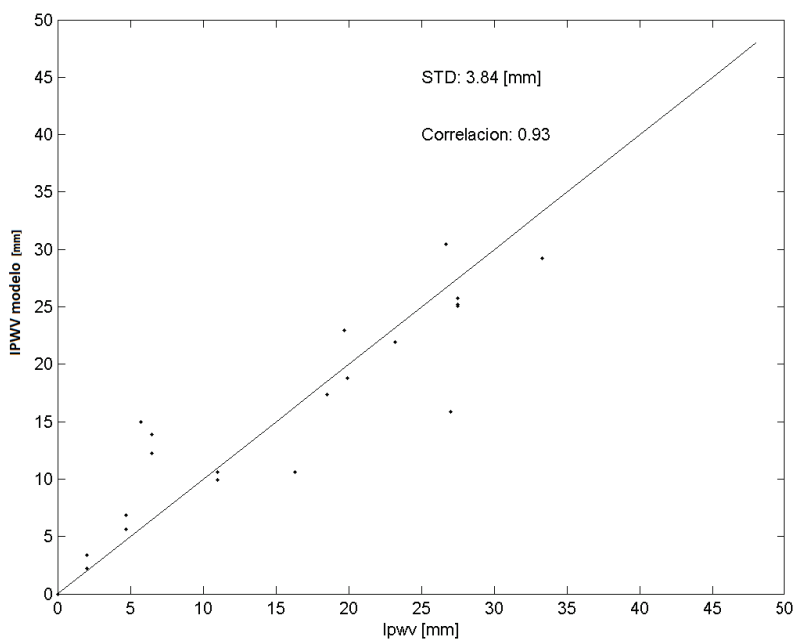


Figura 7.31. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación ARHP

7.5. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de la red Suominet-GPS

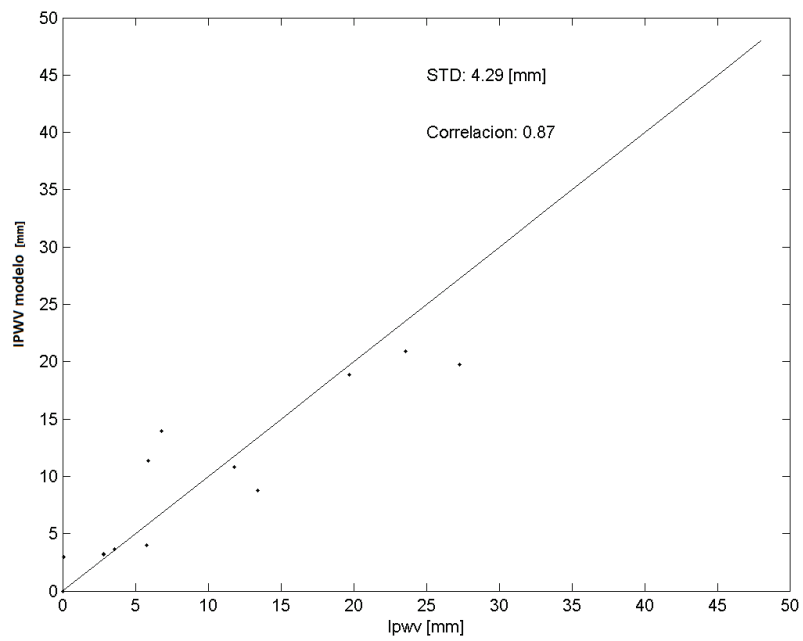


Figura 7.32. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación MBOX

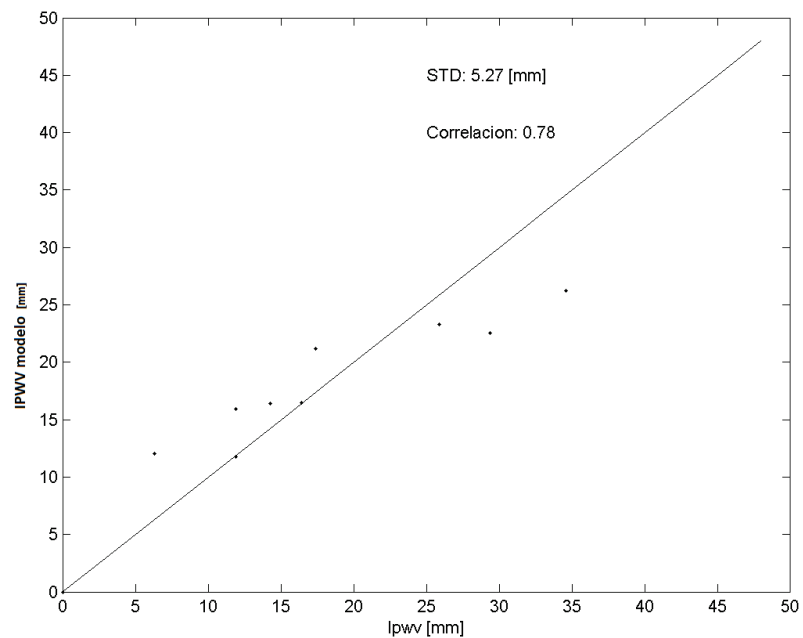


Figura 7.33. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación COVG

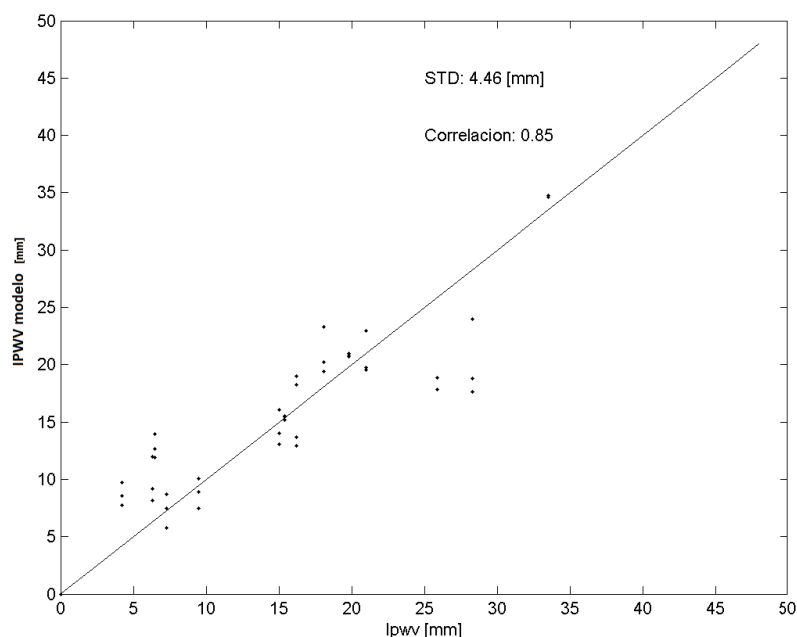


Figura 7.34. Comparación del modelo de ajuste con los datos de GPS sobre la estación TXPA

De la misma forma que para la calibración utilizando datos de radiosondeo puede observarse correlaciones elevadas por encima de 0.7, con valores de desviación estándar menores a 7 [mm].

Las estaciones de SHRV y TXDE se encuentran en una ubicación cercana a las estaciones de radiosondeo 72248 y 72249. Puede observarse de las Tablas (7.2) y (7.4) que el valor de las constantes son similares. Este resultado es muy importante, e indica que desde dos fuentes de distintas de dato de vapor de agua como es, la técnica de radiosondeo y GPS, se obtiene un ajuste con constante comparables.

A partir de los resultados obtenidos se observa que es posible realizar estimaciones de IPWV sobre tierra, pero acotando las zonas geográficas, debido a que el terreno genera un fondo de temperatura de brillo que no es constante como en el caso del océano. Este hecho puede observarse en las constantes, que varían notablemente de una locación a otra del terreno.

Para lograr un ajuste que pueda ser aplicado a una región más extensa, debe poder modelarse de alguna forma la radiación de fondo de brillo del terreno. Para esto existen dos soluciones viables. Una sería la utilización de un modelo de transferencia radiativa sobre tierra, que permitiera conocer los valores de emisividad. A partir de los datos de emisividad, se podría construir un grillado donde se identifique en cada punto los valores de temperatura de fondo de brillo del terreno.

La segunda opción, en la que se trabaja actualmente, consiste en la creación de un grillado promediando las temperaturas de fondo de brillo de las órbitas del satélite. Esta metodología, permite obtener una estimación del fondo de brillo, ya que si la cantidad de datos de temperatura de brillo promediados sobre una locación determinada es grande, se desafectaría el efecto de las variabilidades debidas a la atmósfera, quedando el efecto debido al terreno únicamente.

Esta propuesta resulta innovadora, no encontrándose trabajos hoy en día que traten de resolver el problema del fondo de brillo de esta forma. Se continua trabajando para lograr

7.5. Calibración del MWR en tierra utilizando datos de IPWV de la red Suominet-GPS

ampliar la cobertura del modelo para estimar IPWV sobre tierra.

Tabla 7.4. Constantes de calibración para cada estación a partir de datos de la técnica GPS

Num Ref	Constantes de calibración					Número de Estación
	A	B	C	D	E	
1	1.544	-0.335	0.217	0.032	25.183	BNFY
2	0.765	-0.304	-0.259	0.301	4.072	LSUA
3	1.344	-0.432	-0.045	0.174	13.005	AL30
4	1.458	0.794	-0.112	-0.268	-25.015	SHRV
5	0.366	0.303	-0.085	0.999	9.884	TXDA
6	0.398	-0.110	0.047	0.460	11.027	TXDE
7	0.999	0.179	0.108	0.364	-3.859	ARPH
8	0.413	0.853	-0.050	-0.029	1.668	MSOX
9	0.758	0.180	2.171	-0.013	-28.852	COVG
10	0.662	0.337	-0.090	0.808	-27.327	TXPA

Capítulo 8

Conclusiones y trabajos a futuro

En este Capítulo se resumirán las conclusiones principales de esta tesis, haciendo una división de las áreas temáticas desarrolladas. Esta forma de presentar las conclusiones brinda un orden claro de los objetivos logrados, y de los trabajos a futuro.

Esta tesis, se divide en los Capítulos 3 y 4 donde se desarrolla instrumentación de aplicación en la meteorología y en los Capítulos 5, 6 y 7 donde se estima vapor de agua integrado desde diferentes tipos de técnicas.

8.1. Instrumentos desarrollados

Con el objetivo de obtener instrumentos que permitan estimar el vapor de agua integrado, se desarrollaron tres equipos, aplicables en diferentes escenarios de la meteorología. Se describirán brevemente cada uno de los prototipos implementados, haciendo hincapié en los resultados obtenidos.

8.1.1. Estación meteorológica

La estación meteorológica resulta un importante instrumento en la determinación de vapor de agua. Permite obtener dato sinóptico de presión y temperatura superficial, fundamental para la estimación de IPWV desde la técnica GPS. Se logró implementar un instrumento de dimensiones reducidas que resulta fácil de transportar e instalar. Los resultados de la validación frente a una estación meteorológica de referencia Vaisala™ se observan en la Tabla (4.2) del Capítulo 4.

La determinación obtenida en los parámetros de temperatura, humedad y presión frente a la estación de referencia Vaisala™ representan un excelente desempeño para un equipo que no supera los 150 dólares. Además, el equipo cuenta con funcionalidad adicional, permitiendo almacenar años de mediciones en una memoria interna del tipo SD, y contando con comunicación mediante la red de telefonía celular.

Las funcionalidades adicionales representan un valor agregado, ya que permiten ubicar el dispositivo en zonas alejadas de difícil acceso. Se está trabajando hoy en día para hacer que este equipo sea autónomo alimentado por paneles solares y administrado remotamente desde internet.

La validación de la estación meteorológica implementada permitió verificar los sensores de temperatura, humedad relativa y presión que posteriormente fueron utilizados en el prototipo del equipo de radiosondeo.

8.1.2. Carga de Aplicación

El desarrollo de una carga de aplicación para un vector experimental, permitió verificar el funcionamiento y las técnicas de construcción de equipos electrónicos en condiciones extremas. La carga de aplicación implementada permite medir temperatura, humedad relativa y presión absoluta, almacenando la información en una memoria interna. Todo el equipo se alimenta con una batería de litio.

El vector "Centenario" de Fuerza Aérea Argentina, donde fue ubicada la carga, no completó la fase de apertura de la cofia. Aún así, los circuitos de la carga de aplicación continuaron en funcionamiento, pudiéndose recuperar información de la medición. Los resultados se observan en la Figura(4.28) del Capítulo 4.

Se continúa trabajando en una carga de aplicación con mejor desempeño. Se planea incorporar una cámara que grabe el ascenso y descenso del equipo, junto con un GPS que permita determinar el trayecto de descenso. La experiencia adquirida en este ensayo, junto con la logística que se tuvo que manejar resultan en un valioso aporte para futuros proyectos en esta dirección.

8.1.3. Prototipo de radiosonda

Las radiosondas permiten la determinación de los parámetros in-situ para la estimación de vapor de agua, resultando un instrumento muy importante para la meteorología. El desarrollo de un equipo nacional de radiosondeo, supone un aporte innovador, frente a la opción de equipos importados de costo elevado.

Los prototipos se validaron frente a radiosondas comerciales Vaisala™, cedidas por el servicio meteorológico. Se efectuaron 3 ensayos en el predio ubicado en la Avenida Dorrego 4019 de la Ciudad de Buenos Aires.

Los resultados de la validación del último lanzamiento se presentan en la Tabla (4.5), del Capítulo 4. La estimación de IPWV con el prototipo presenta diferencias del orden de 1.8 [mm] respecto de la radiosonda de referencia.

El lanzamiento de validación permitió medir el perfil de temperatura, humedad relativa y presión absoluta hasta una altura de 6 Km. El prototipo continuó transmitiendo hasta los 20 Km, pero los datos del sensor de humedad comenzaron a presentar errores para luego interrumpirse. La estimación de vapor de agua, para esta altura lograda, resulta suficiente, dado que la media global de este gas se ubica en los primeros 2 Km a 4 Km [31].

Se continúa trabajando para incrementar la altura de medición de los sensores, para obtener perfiles completos. Se está estudiando el reemplazo del sensor de humedad por algún otro dispositivo que permite medir en temperaturas menores a -40 C°.

El problema de la medición de humedad, para temperaturas por debajo de -40 C° , es la baja constante de respuesta del sensor. Esto genera que la determinación de este parámetro sea una tarea difícil.

Existen trabajos publicados [36] que documentan problemas en la determinación de humedad, detectándose mediciones "mas secas" que los perfiles obtenidos de la red COSMIC para diferentes marcas de radiosondas. Estas discrepancias en los perfiles de humedad están siendo estudiadas hoy en día.

Actualmente se está trabajando para realizar más lanzamientos de validación, con el propósito de ensayar el equipo en diferentes condiciones. Los lanzamientos están previstos para el año 2015.

Como conclusión puede decirse que el instrumento de radiosondeo cumplió las expectativas, logrando una medición de IPWV con un buen acuerdo frente a instrumentos comerciales.

8.2. Estimación de IPWV desde diferentes técnicas

En los Capítulos 5, 6 y 7 de esta tesis se utilizaron diferentes técnicas que permitieron determinar vapor de agua integrado. Las estimaciones realizadas suponen un aporte, calculando el IPWV en regiones donde no se dispone de este dato hoy en día. En el Capítulo 5 se utilizó la técnica GPS, mientras que en los Capítulos 6 y 7 se implementó un algoritmo que permitió utilizar un radiómetro en órbita para el cálculo de IPWV sobre la superficie terrestre.

8.2.1. Estimación de IPWV utilizando datos de posicionamiento global GPS

La estimación de IPWV en la región de Sudamérica permitió determinar el acuerdo de esta técnica frente a el vapor de agua integrado obtenido mediante radiosondeos. El trabajo fue realizado en conjunto con la Lic. Clara Bianchi, quien procesó los retardos troposféricos de la señal de GPS que permitieron el cálculo del IPWV. Estos resultados fueron presentados en el trabajo GPS IPWV Intercomparison Over South American Region, enviado a la revista internacional *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.

Los resultados obtenidos pueden resumirse en las Figuras (5.19) y (5.20) del Capítulo 5. La técnica GPS sobre-estima a radiosondeo en valores promedio desde 1 [mm] para IPWV desde 10mm, hasta valores de 2 [mm] para IPWV de 60 [mm]. En términos relativos estos valores se encuentran por debajo del 10% del IPWV para valores mayores a 10 [mm], hasta valores de 5% para valores de IPWV mayores a 60 [mm].

Con el trabajo realizado, se ha encontrado el acuerdo de los valores de IPWV con GPS y radiosondeo que se presenta en estaciones de América del Sur. La cobertura regional del dato y por consiguiente los climas específicos en esas latitudes hacen de este análisis un trabajo único. El acuerdo entre técnicas es similar al encontrado por otros autores en regiones diferentes [43].

Otro aporte que se realizó en el Capítulo 5 fue el cálculo de la temperatura media T_m en Argentina. No se han encontrado trabajos similares que comparen el modelo de Bevis [37] en esta región. Los resultados calculados para la estación SAEZ ubicada en Ezeiza muestran diferencias de unos pocos grados Kelvin. Este resultado permite afirmar que el modelo de Bevis de T_m resulta apto para el cálculo de vapor de agua en estas latitudes.

8.2.2. Estimación de IPWV en tierra con datos del instrumento MWR del SACD/Aquarius

En los Capítulos 6 y 7 se combinan las técnicas de estimación de vapor de agua estudiadas a lo largo de la tesis, para la calibración en tierra de las mediciones de temperatura de brillo del instrumento MWR del Satélite Argentino SACD/Aquarius. La calibración permitió estimar IPWV sobre tierra, con errores menores a 7 [mm] en regiones acotadas un radio de 50 Km sobre estaciones GPS y de radiosondeo en el Sur de Norteamérica. Estos resultados fueron presentados en la Octava Reunión de Ciencia de la misión SACD/Aquarius realizada en la Sindicatura General de la Nación, en la provincia de Buenos Aires, y también en un trabajo [57] publicado en la Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), que fue presentado en el congreso ARGENCON 2014 realizado en la Ciudad de Bariloche.

Los resultados en la determinación del IPWV utilizando esta técnica, son similares a otros instrumentos, como el Advance Microwave Scanning Radiometer de NASA (AMSR-E) [58]. Si bien este radiómetro es más avanzado que el MWR, ya que dispone de 6 frecuencias de

medición en polarización horizontal y vertical, los resultados obtenidos son comparables en áreas acotadas a los del MWR.

La calibración permitió obtener una nueva utilidad de este instrumento. Ya que actualmente no se encontraban implementados algoritmos de estimación de IPWV sobre tierra. Los resultados permiten afirmar que es posible utilizar el MWR en regiones acotadas sobre la superficie terrestre para medir vapor de agua integrado.

Esta previsto como trabajo a futuro, ampliar la región de cobertura del modelo de ajuste. Se esta trabajando en conjunto con Sebastián Heredia, perteneciente al grupo de procesamiento de datos del MWR del Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gullich", en la formulación de un modelo de temperatura de fondo de brillo, que permite determinar un grillado para obtener una referencia de la emisividad del terreno.

La forma en que se esta implementando el algoritmo, se basa en realizar un promedio de las temperaturas de brillo de las órbitas en el tiempo. De esta manera, se determinará un valor promedio de temperatura de fondo de brillo que permitiría ajustar las estimaciones de vapor de agua integrado a regiones mayores.

Apéndices A

Modelo Térmico del equipo de radiosondeo

Thermal Model of Radiosonde System

Javier E. Epeloa^{1,2}, Guillermo Rodriguez^{1,2} and Jose A. Bava²

1- Facultad de Astronomía y Ciencias Geofísicas Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
2- Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Introduction:

A radiosonde is a device that allows the study of various physical parameters in the lower atmosphere, and transmits the results to earth through an RF link.

Figure 1 shows a radiosonde system, which is placed in a box filled with a material to provide heat isolation of the electronics circuits

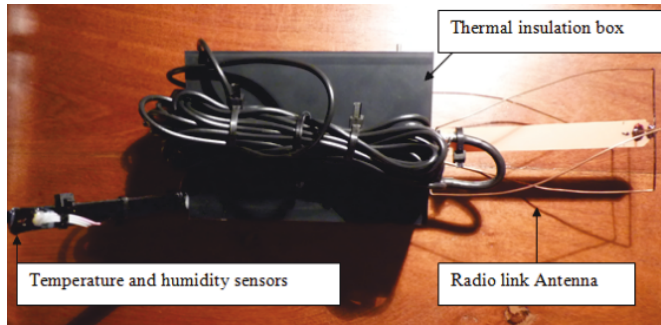


Figure 1. Radiosonde system

COMSOL, is used to create a 2D mathematical numeric model of the radiosonde and 3D model of electronic circuits of the system, taking in account the physical variables at the atmosphere [1] and their variation, which depend on the altitude.

The objective of the simulation is to obtain the variation of the average temperature of a printed circuit board inside the radiosonde. To obtain this the following equations [2] were solved:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T u) = 0$$

Figure 2 shows the 2D model of the radiosonde and atmospheric environment, and Figure 3 the 3D model of the printed circuit board (PCB). In the simulation of the PCB, we obtain the heat generated by the electronic circuits. This result is replaced in the 2D model to obtain the mean temperature of the PCB in function of time.

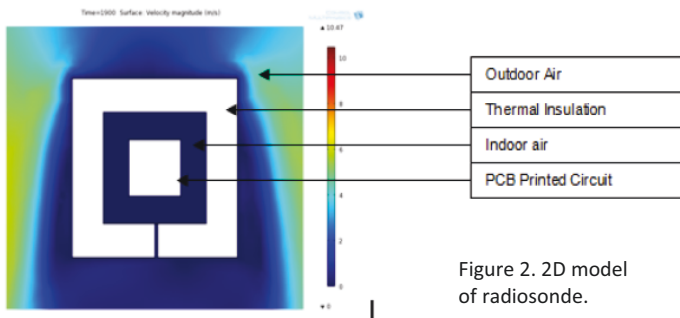


Figure 2. 2D model of radiosonde.

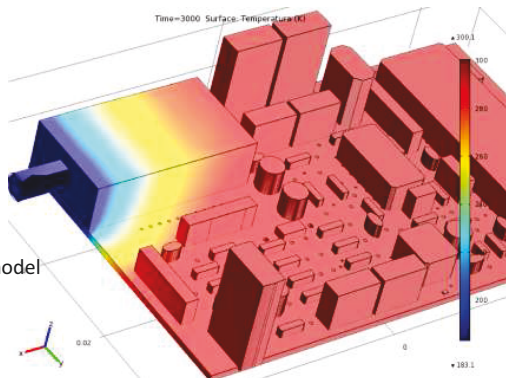


Figure 3. 3D model of PCB.

Results:

The polyurethane was selected as the insulation material for simulation with the characteristics shown in Table I.

Table I. Properties of thermal insulation box.

Variable	Value	Units
Density	50	Kg/m ³
Heat capacity	1768	Kcal/m ³ °C
Conductivity	0.04	k/mW

Figure 4 shows the results for 3 cases of internal heat generation of PCB.

Mean temperature of the PCB [K]

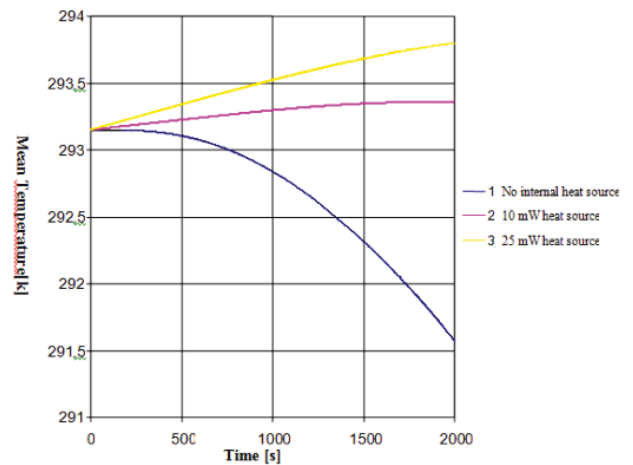


Figure 4. Mean Temperature of PCB.

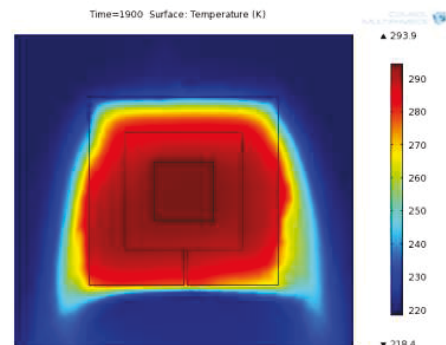


Figure 5. Temperature of the system

Figure 5 shows the temperature of the system, after 1900 seconds of simulation.

Conclusion:

For a simulation time of 2000 seconds, an internal heat generation of 10 mW is enough to compensate the heat loss due to air in the environment as observed in Figure 4 (line 2) This material and its geometry allow a thermal equilibrium condition.

References:

- [1] U.S. Standard atmosphere, 1976.
- [2] Fundamentos matemáticos de la mecánica de fluidos. Juan Luis Vázquez. Universidad Autónoma de Madrid. Año 2003.

Inquiries: jepeloa@fcaglp.unlp.edu.ar

Apéndices B

Trabajo Publicado IEEExplore

Estimación de Vapor de Agua Integrado Sobre Tierra Utilizando los Datos del Radiómetro MWR de la Misión SACD-Aquarius

Epeloa Javier^{†1}, Meza M. Amalia^{*2} y Bava J. Alberto^{†3}

[†]*Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería UNLP,
Calle 1 y 47, La Plata, Buenos Aires, Argentina*

¹jepeloa@gmail.com

³albertobava@yahoo.com.ar

^{*}*Departamento de Astrometría, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Paseo del Bosque, La Plata, Buenos Aires, Argentina*

²amalia.meza@gmail.com

Abstract—This paper describes the methodology implemented for the estimation of integrated water vapor (IPWV) over the land, by the use of brightness temperature measurements of the microwave radiometer (MWR) provided from the Argentinian Satellite SACD-Aquarius.

Using a linear regression model, estimations of IPWV were obtained with an error less than 7 mm over the North American region. Superficial meteorological data were used, as well as ground radiosonde stations, which allow to obtain the IPWV and temperature data necessary for the adjustment of the proposed model. This results can be compared with others satellital instruments such as the Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) of the NASA, through which IPWV data can be obtained with errors that vary from 6 to 12 mm.

This work represents an important contribution, allowing the use of the radiometer data of the SACD/Aquarius, to provide measurements of the IPWV over land, data that is not actually available for this instrument.

Resumen— En este trabajo se describe la metodología implementada para la estimación de vapor de agua integrado (IPWV) sobre la superficie terrestre, utilizando las mediciones de temperatura de brillo del Radiómetro de Microondas (MWR) del Satélite Argentino SACD/Aquarius.

Empleando un modelo de regresión lineal, se obtuvieron estimaciones de IPWV con un error menor a 7 mm sobre la región de Norteamérica. Se utilizaron datos superficiales meteorológicos, y estaciones de radiosondeo en tierra, que permitieron obtener los datos de IPWV y temperatura, necesarios para el ajuste del modelo propuesto. Estos resultados son comparables a instrumentos satelitales como el Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) de NASA, que permite obtener IPWV sobre tierra con errores que varían entre 6 a 12mm.

Este trabajo representa un aporte importante, permitiendo utilizar los datos del radiómetro del SACD/Aquarius, para proporcionar mediciones de IPWV sobre tierra, dato que actualmente no se encuentra disponible en este instrumento.

I. INTRODUCCIÓN

El satélite SACD/Aquarius es una misión dedicada a la medición de salinidad en mares. Posee 7 instrumentos de observación, entre los que se encuentra el radiómetro de microondas (MWR). Este instrumento opera en dos frecuencias, 23.8 Ghz y 36.5 Ghz. Los datos que entrega el MWR permiten al instrumento Aquarius obtener mediciones de

salinidad en mares. La frecuencia de 23.8 Ghz (polarización horizontal) permite detectar vapor de agua, mientras que la de 36.5 Ghz (polarización horizontal y vertical) permite detectar agua en estado líquido.

Las mediciones que efectúa el MWR se encuentran calibradas en océano, obteniendo datos de presión de vapor de agua integrado (IPWV), un gas muy importante relacionado con el cambio climático y el efecto invernadero.

El objetivo de este trabajo es obtener una estimación del IPWV sobre la superficie terrestre, utilizando los datos de temperatura de brillo del MWR.

Se identificaron en los datos de órbita del SACD, las mediciones de temperatura de brillo que coincidan en hora local con el lanzamiento de radiosondadores, obteniéndose en ese instante la temperatura superficial de las estaciones meteorológicas in-situ seleccionadas.

Las órbitas son filtradas espacialmente, promediando las mediciones de temperatura de brillo en un radio de un grado alrededor de cada estación en tierra. Se eliminan días que presenten condiciones de lluvia o nubosidad, utilizando los datos observacionales de condiciones atmosféricas de las estaciones meteorológicas in-situ, en los que se informa el tipo de nubosidad presente cada 30 minutos.

En [1] se establece que el MWR posee una ganancia de receptor constante hasta temperaturas del orden de 300K. Para registros mayores de temperatura de brillo, se produce una alinealidad del tipo compresiva, provocando mediciones con valores menores a los esperados. Se seleccionan locaciones en tierra, cuyas temperaturas de brillo sean inferiores a este valor máximo.

Hoy en día existen algoritmos que permiten estimar vapor de agua sobre tierra a partir de mediciones de temperatura de brillo. En [2] se describe la metodología empleada para determinar IPWV utilizando el Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) de NASA. Con este instrumento y a partir de algoritmos de regresión, se obtienen errores en la determinación de IPWV del orden de 2mm en mar y entre 6 a 12mm en tierra, para la región de América del Norte.

El instrumento MWR se encuentra actualmente entregando productos de IPWV únicamente sobre la superficie del océano. Por lo tanto, una calibración que permita determinar

este dato sobre tierra resulta en un valioso aporte, y una nueva aplicación del instrumento.

II. METODOLOGÍA

En esta sección se describirá un modelo radiativo utilizado para la calibración de radiómetros en satélites sobre mar. Estos modelos permiten obtener estimaciones de distintas variables físicas del medio atmosférico.

Este modelo fue utilizado con el instrumento MWR del SACD/Aquarius para obtener mediciones de IPWV, concentración de hielo y vientos sobre la superficie del mar. Utilizando este mismo concepto, se emplea un algoritmo similar que permite estimar IPWV en tierra, a partir de las mediciones de temperatura de brillo en las dos polarizaciones del MWR y la temperatura superficial.

Se describirá la metodología implementada para la selección de estaciones de calibración en tierra, y el procesamiento de la información de las temperaturas de brillo del MWR.

A. Modelo Radiativo

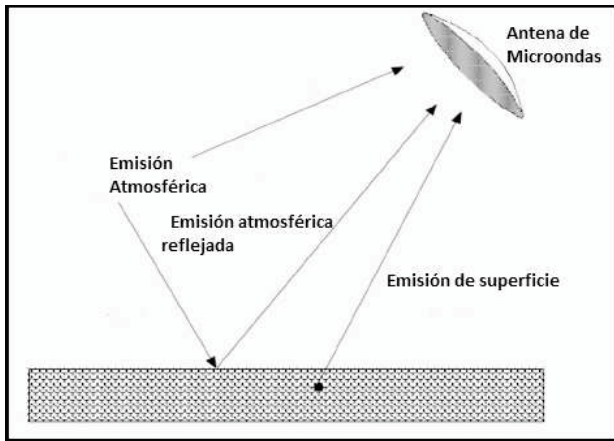


Fig. 1. Modelo radiativo considerando una atmósfera de una sola capa

En la Figura 1 se observa un esquema de modelo radiativo para observaciones desde satélites, considerando atmósfera de una sola capa y libre de nubes. Pueden verse tres aportes principales a la temperatura de brillo, la producida por la emisión atmosférica que genera una temperatura de brillo ascendente T_{BU} , la temperatura de brillo descendente T_{BD} que se refleja en la superficie, y la temperatura de brillo generada por la superficie del material. A la temperatura T_{BU} contribuyen gases como el oxígeno, el vapor de agua y el agua líquida, con sus diferentes coeficientes de emisión y absorción.

La temperatura de brillo T_{BD} se refleja en la superficie y atraviesa nuevamente el medio atmosférico hacia la antena. Si se considera a ϵ la emisividad del material, su coeficiente de reflexión $(1 - \epsilon)$ indicará la cantidad de señal reflejada. En el caso del océano se refleja casi su totalidad.

La emisión de la superficie terrestre depende principalmente de la temperatura física a la que se encuentre el material, y del coeficiente de emisividad del mismo.

En [3], [4], [5] se establece que la temperatura de brillo observada desde un radiómetro desde el cielo responde a la ecuación (1)

$$T_b = T_{BU} + \tau_{atmos}(\epsilon SST + (1 - \epsilon)(T_{BD} + \tau_{atmos} T_{BC})) \quad (1)$$

$$\tau_{atmos} = e^{-sec(\theta)(\alpha_O + \alpha_V + \alpha_L)} \quad (2)$$

Donde T_{BC} corresponde a la temperatura de brillo del fondo de microondas con un valor de 2.75K, y SST es la temperatura superficial. El coeficiente de transmitancia de la atmósfera τ_{atmos} depende, según la ecuación (2), del ángulo θ de incidencia del haz, y de los coeficientes de absorción del oxígeno α_O , del vapor de agua α_V , y del agua líquida α_L .

Según [4], [5] las temperaturas de brillo ascendentes y descendentes pueden ser parametrizadas en función del contenido de vapor de agua integrado, la temperatura superficial y la frecuencia radiométrica en la que se esté midiendo. Este modelo fue utilizado sobre mar para calibrar las mediciones de temperatura de brillo del instrumento AMSR-E y el Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), ambas misiones pertenecientes a NASA.

En la tesis [6], a partir de las ecuaciones (1), (2) y la dependencia de las temperaturas de brillo T_{BD} y T_{BU} con los parámetros atmosféricos, se desarrolla un modelo de regresión de múltiples variables, en el que se estima el IPWV a partir de las mediciones de temperatura de brillo sobre el océano del instrumento MWR.

Las estimaciones utilizadas para la calibración del IPWV, provienen del satélite WINDSAT que posee una órbita similar al SACD.

Sobre tierra las características de la superficie presentan una variabilidad mucho mayor que en el océano, por lo que una calibración en zonas geográficas extensas requiere de datos que caractericen el terreno y permitan aplicar la ecuación (1).

Se emplean estaciones de radiosondeo en tierra, utilizando las mediciones de temperatura de brillo del MWR en zonas acotadas a un radio no mayor a 100Km desde cada estación.

En la ecuación (3) se observa el modelo de regresión utilizado para aproximar los datos de vapor de agua.

$$IPWV = ATb_{24H} + BTb_{37H} + CTb_{37V} + Dt_{st} + E \quad (3)$$

Donde Tb_{24H} , Tb_{37H} , Tb_{37V} representan las mediciones de temperatura de brillo en las polarizaciones horizontales y verticales, t_{st} es la temperatura superficial, e IPWV es el contenido de vapor de agua integrado medido por el radiosondador. Las constantes del modelo A,B,C,D y E son los coeficientes de calibración que se desean obtener para cada estación en tierra.

La medición de IPWV de los radiosondadores se realiza mayormente a las 0 o 12 de tiempo universal coordinado (UTC), se deberán ubicar las locaciones en tierra donde la órbita del SACD cumpla con esta restricción temporal, para obtener mediciones de temperatura de brillo y poder calibrar el modelo.

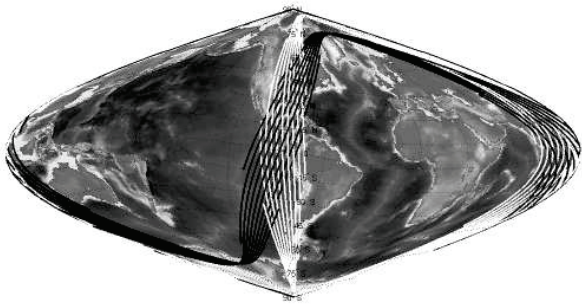


Fig. 2. Órbitas del SADC a la hora 12 UTC+1 (negro) y 0 UTC+1 (blanco)

B. Estaciones de radiosondeo en tierra

Cada medición del instrumento MWR dispone de 8 haces por canal. De las 8 bocinas 4 están dispuestas con un ángulo de incidencia de 52 grados y las restantes con 58 grados.

Utilizando una antena offset toroidal, se concentra sobre las bocinas receptoras la radiación de microondas observada sobre la superficie terrestre. La antena está dispuesta con un ángulo de 3db por haz de 1.64 grados, lo que resulta en un campo instantáneo de visión (IFOV) de 50Km.

En la Figura 2 se observan las mediciones del SADC/Aquarius que coinciden en hora universal con las 12 UTC (negro) y 0 UTC (blanco) en un margen de 1 hora.

Puede observarse que sobre Argentina existen datos cercanos a 0UTC, pero lamentablemente no se dispone de datos de radiosondeo a esa hora en la zona geográfica observada.

Sobre América central, y el sur de Norteamérica, se dispone de datos en las dos horas universales, y sobre ésta última región los radiosondadores son lanzados con regularidad en ambas horas.

La región de América central presenta el inconveniente de ser bastante lluviosa, por lo que muchos datos deben descartarse. Sobre Europa se dispone de datos en Rusia, pero se presenta el inconveniente de condiciones climáticas con muy poco vapor de agua. Por lo tanto seleccionarán las estaciones que se muestran en la Figura 3, y en la Tabla I sus coordenadas en grados.

Cada estación dispone de datos meteorológicos in-situ, que permiten obtener la temperatura superficial (dato que será utilizado para la calibración) y la nubosidad del cielo al momento del lanzamiento del radiosondador.

TABLA I
COORDENADAS DE LAS ESTACIONES DE RADIOSONDEO

Num Ref	Estaciones de Radiosondeo Seleccionadas		
	Latitud	Longitud	Numero de Estación
1	33.36	-84.56	72215
2	32.31	-90.08	72235
3	34.84	-92.26	72340
4	32.83	-97.3	72249
5	32.46	-93.78	72248
6	36.08	-79.95	72248

Todos los datos de radiosondeo fueron extraídos desde el sitio de la Universidad de Wyoming [7], que dispone de una base de datos mundial. Este sitio también dispone de observaciones de superficie, brindando una base de datos meteorológica con información cada 30 minutos.

C. Procesamiento de los datos del MWR

Se utilizan los datos del año 2014, hasta el día 19 de marzo, correspondiente a la última versión de los algoritmos de los productos L1.B de temperatura de brillo.

En la Figura 4 se observa el esquema de procesamiento utilizado, consiste en agrupar todas las órbitas, empleando las coordenadas espaciales para realizar un filtrado por región del dato.

A partir de los datos filtrados en locación se eliminan los que no corresponden a un lanzamiento de radiosondador, utilizando un filtro temporal.

Finalmente se eliminan los días lluviosos o con presencia de nubes, lo que permite obtener el ajuste del modelo de regresión lineal múltiple, y los coeficientes de calibración sobre cada estación.

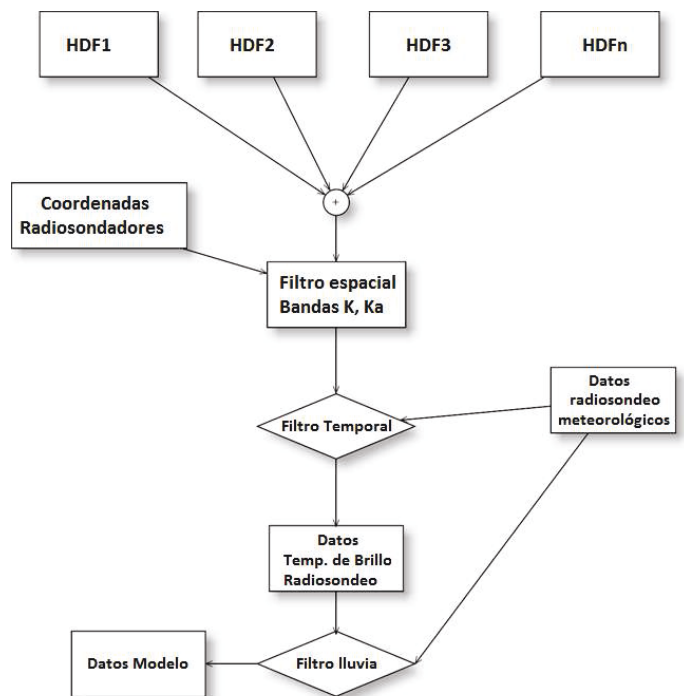


Fig. 4. Diagrama del procesamiento de los datos del MWR

El filtrado espacial se realiza tanto en la banda K (23.8 Ghz) como en la Ka (36.5Ghz) para asegurar la locación correcta de las mediciones. Esto se debe a que los haces apuntan a diferentes zonas geográficas, por lo que existe una diferencia de segundos entre medidas de distinta frecuencia.

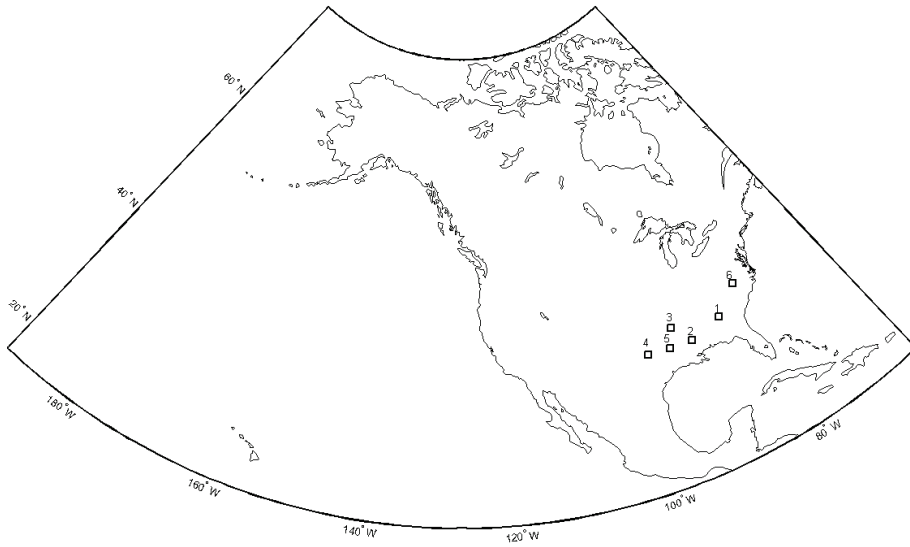


Fig. 3. Estaciones de radiosondeo seleccionadas

III. RESULTADOS

Los resultados de los ajustes pueden observarse en las Figuras 5 a 10.

En la Tabla 2 se observan los coeficientes de calibración correspondientes a cada estación

Los ajustes fueron realizados utilizando los datos de radiosondadores a la hora 12 UTC, correspondientes a las órbitas ascendentes del SACD.

Fig. 5. Estación 72215

Fig. 7. Estación 72340

Fig. 6. Estación 72235

Fig. 8. Estación 72249

TABLA II
CONSTANTES DE CALIBRACIÓN PARA CADA ESTACIÓN

Num Ref	Constantes de calibración					Número de Estación
	A	B	C	D	E	
1	0.008	0.0000057	-0.00026	0.0099	-2.43	72215
2	-0.00022	-0.002	0.0017	0.025	-5.93	72235
3	0.0012	0.0033	0.0009	0.0031	-1.68	72340
4	0.0222	-0.0941	0.0063	0.053	9.975	72249
5	-0.0071	0.0158	-0.0029	0.0075	-5.595	72248
6	-0.011	0.00054	0.000068	0.0182	-4.757	72317

Fig. 9. Estación 72248

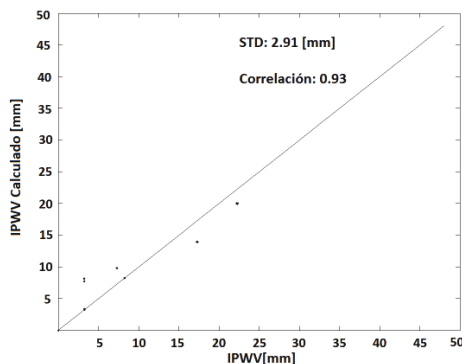


Fig. 10. Estación 72317

IV. CONCLUSIÓN

En este trabajo se obtuvieron estaciones de radiosondeo sobre la superficie terrestre, con el objetivo de calibrar los datos de temperatura de brillo provistos por el instrumento MWR del SACD/Aquarius. La calibración permite estimar IPWV con errores menores a 7mm, sobre regiones acotadas a un radio de hasta 100Km desde cada estación seleccionada. Esto presenta una contribución a los datos actuales que brinda el SACD/Aquarius, permitiendo obtener vapor de agua integrado sobre regiones en tierra.

Otros radiómetros satelitales, como el AMSR-E de NASA, presenta errores en la estimación de IPWV que oscilan desde 6 mm hasta 12mm, para regiones de América del Norte. Estos resultados son comparables a los obtenidos con el SACD, con la salvedad que el instrumento de NASA cubre superficies geográficas más extensas.

Del manejo de los datos del MWR, surge que es capaz de medir temperaturas de brillo con valores inferiores a

300K. Valores mayores de temperatura, son afectados por la alinealidad que presenta la ganancia del receptor de microondas, lo que se traduce en un aumento significativo en el error del IPWV. Esta limitación surge del análisis de las características técnicas del radiómetro y debe tenerse en cuenta para futuros trabajos con este instrumento.

En base a estos resultados actualmente se está trabajando con técnicas de medición de vapor de agua a partir de la señal de posicionamiento global GPS. Esto permitirá ampliar la intersección de las mediciones del radiómetro MWR con datos superficiales de IPWV, obteniéndose puntos de calibración en regiones mayores.

En síntesis este trabajo permite establecer la utilidad del radiómetro MWR para efectuar mediciones de IPWV en tierra. Una aplicación para la cual no fue diseñado, ya que la misión estaba orientada en obtener datos sobre la superficie del mar.

AGRADECIMIENTOS

-Un especial agradecimiento a Sebastián Heredia por la ayuda en la comprensión de los datos del instrumento MWR.

-A la Universidad de Wyoming por brindar los datos meteorológicos y de radiosondeo que hicieron posible este trabajo.

-A la Agencia de Promociones Científicas y Tecnológicas -PICT 00405 - Código de Proyecto 00405

REFERENCIAS

- [1] S. K. Biswas, "Brightness temperature calibration of sac-d/aquarius microwave radiometer (mwr)," PhD thesis, M.S. University of Central Florida, Orlando, FL, 2012.
- [2] M. N. Deeter, "A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean," *Geophysical Research Letters*, vol. 34, 2007.
- [3] F. J. Wentz, "A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave / imager," *Journal of Geophysical Research*, vol. 10, no. C4, pp. 8703–8718, 1997.
- [4] W. R. Spencer and F. J. Wentz, "Ssmi rain retrievals within a unified all- weather ocean algorithm," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 55, no. 9, pp. 1613–1627, 1998.
- [5] F. J. Wentz and T. Meissner, "Ssmi rain retrievals within a unified all- weather ocean algorithm," *Proposal 121599A-1. Remote Sensing Systems*, vol. CA, no. 66, p. 66, 2000.
- [6] R. A. Menzerotolo, "Rain rate retrieval algorithm for aquarius/sac-d microwave radiometer;" PhD thesis, M.S. University of Central Florida, Orlando, FL, 2010.
- [7] University of wyoming, upper air observations. [Online]. Available: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Apéndices C

Software de descarga de Datos de Radiosondeo y comparación con GPS

```
function [ output_args ] = descargar(n,estacion)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
delete('estacion.txt');

%n=input('ingresar estacion para la que se desea descargar el año de radiosondeo:');
%estacion=input('ingresar el nombre de la estacion GPS a comparar:', 's');
%delete([estacion '.txt']);
id=fopen('estacion.txt','at');
fprintf(id,'%s',estacion);
fclose(id);

%entrada=input('ingresar el nombre completo de la estacion GPS para realizar la
comparacion: ', 's');
%istring=sprintf('%d',n);
istring=n;
mkdir(istring)
meses=strcat(istring, '\enero');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\febrero');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\marzo');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\abril');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\mayo');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\junio');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\julio');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\agosto');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\septiembre');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\octubre');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\noviembre');
mkdir(meses);
meses=strcat(istring, '\diciembre');
mkdir(meses);

for i=1:12
    try
        istring1=sprintf('%d',i);
        pause(1);
        pagina='http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=samer&TYPE=TEXT%
3ALIST&YEAR=2012&MONTH=';
        mes=strcat(pagina,istring1);

        resto='&FROM=0112&TO=';
        final='&STNM=';
        pagina=strcat(mes,resto);
```

```
if i==1
    pagina=strcat(pagina,'3112');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==3
    pagina=strcat(pagina,'3112');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==5
    pagina=strcat(pagina,'3112');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==7
    pagina=strcat(pagina,'3112');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==8
    pagina=strcat(pagina,'3112');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==10
    pagina=strcat(pagina,'3112');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==12
    pagina=strcat(pagina,'3112');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==4
    pagina=strcat(pagina,'3012');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==6
    pagina=strcat(pagina,'3012');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==9
    pagina=strcat(pagina,'3012');
    pagina=strcat(pagina,final);
end
```

```
if i==11
    pagina=strcat(pagina,'3012');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

if i==2
    pagina=strcat(pagina,'2812');
    pagina=strcat(pagina,final);
end

archivo=strcat(pagina,istring)
%while(bajado==1);

    pause(5);
str = urlread2(archivo)
%catch
    % bajado=0;
    % disp('error de conexion reintentando');
%end

%if numel(str)>700
%bajado=1;
%else
    % bajado=0;
    % disp('error de conexion reintentando');
%end
    %end

if i==1
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring,'\enero');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
%copyfile('TM.m',meses)
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','0');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(id1,'%c');
fclose(id);
cd ..;
```

```
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(texto1);
    fprintf(idl,'%c',texto1);

fclose(id);

end
clear texto;
clear texto1;
if i==2
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring,'\febrero');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
%copyfile('TM.m',meses)
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','31');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
texto1=fscanf(idl,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);
```

```
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(id1,'%c',textol);

fclose(id);

end
clear texto;
clear textol;

if i==3
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring,'\marzo');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
copyfile('estacion.txt',meses);
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','60');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(id1,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(id1,'%c',textol);

fclose(id);
```

```
end
clear texto;
clear textol;

if i==4
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring,'\abril');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
copyfile('estacion.txt',meses);
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','91');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(id1,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(id1,'%c',textol);

fclose(id);

end
clear texto;
clear textol;

if i==5
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
```

```
fclose(fid);
meses=strcat(istring, '\mayo');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','121');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(id1,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(id1,'%c',textol);

fclose(id);

end
clear texto;
clear textol;

if i==6
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring, '\junio');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','152');
fclose(id);
```



```
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(idl,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(idl,'%c',textol);

fclose(id);

end
clear texto;
clear textol;

if i==7
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring,'\julio');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','182');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(idl,'%c');
fclose(id);
cd ..;
```

```
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(texto1);
    fprintf(id1,'%c',texto1);

fclose(id);

end
clear texto;
clear texto1;

if i==8
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring,'\agosto');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','213');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
texto1=fscanf(id1,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
```

```
disp(texto1);
    fprintf(id1, '%c', texto1);

fclose(id);

end
clear texto;
clear texto1;

if i==9
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring, '\septiembre');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id, '%c', '244');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id, '%c');
fclose(id);
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
texto1=fscanf(id1, '%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id, '%c', texto);

fprintf(id, '%c', 10);
fprintf(id, '%c', 10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(texto1);
    fprintf(id1, '%c', texto1);

fclose(id);

end
clear texto;
clear texto1;
```

```
if i==10
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring, '\octubre');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id, '%c', '274');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id, '%c');
fclose(id);
id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(id1, '%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id, '%c', texto);

fprintf(id, '%c', 10);
fprintf(id, '%c', 10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(id1, '%c', textol);

fclose(id);

end
clear texto;
clear textol;

if i==11
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring, '\noviembre');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
```

```
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','305');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
textol=fscanf(idl,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(idl,'%c',textol);

fclose(id);

end
clear texto;
clear textol;

if i==12
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
meses=strcat(istring,'\diciembre');
movefile('rad_dato.txt',meses)

copyfile('Salida_GPS',[meses '\Salida_GPS']);
copyfile('estacion.txt',meses);
copyfile('Generar_Archivos.m',meses)
id=fopen('mes.txt','at');
fprintf(id,'%c','335');
fclose(id);
movefile('mes.txt',meses);
cd(meses);
Generar_Archivos();
id=fopen([estacion '.txt'],'rt');
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
idl=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'rt');
```

```
textol=fscanf(id1,'%c');
fclose(id);
cd ..;
cd ..;
id=fopen([estacion '.txt'],'at');
disp(texto);
    fprintf(id,'%c',texto);

fprintf(id,'%c',10);
fprintf(id,'%c',10);
fclose(id);

id1=fopen([estacion 'pwm' '.txt'],'at');
disp(textol);
    fprintf(id1,'%c',textol);

fclose(id);

end
    catch exception
        disp(exception)
        %rethrow(exception)
        cd 'G:\Corrida';
    end
end

Filtrar(estacion)
meses=strcat(istring,'\Resultados_Anuales');

mkdir(meses);
movefile('GPSfiltrado1.txt',meses)
movefile([estacion '.txt'],meses);
movefile([estacion 'pwm' '.txt'],meses);
movefile('estacion.txt',meses)
clear all;

end
```

```
function [ output_args ] = Generar_Archivos(entrada)
try
[mes] = textread('mes.txt','%d');
id=fopen('estacion.txt','rt');
estacion=fscanf(id,'%s');
fclose(id);
delete('pwmvaisala.txt');
delete('GPSfiltrado1.txt');

%entrada=input('Cual es el nombre del archivo(sin ext.): ','s');
entrada=estacion;
file='rad_dato'
extension= '.txt';
delete([estacion extension]);
aconotar='at 12Z';
id=fopen([file extension],'rt');
if id==-1
disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);

a=1;
h=0;
for i=1: length(texto)
if (texto(i)==aconotar(1))

    a=1;
for j=1: (length(aconotar)-1)
    if texto(i+j)==aconotar(j+1)
a=a+1;
b=i;
else break;
end
end
if a==length(aconotar)

    disp('cadena encontrada');
disp(b);
h=h+1;
vector_posicion2(h)=b;
end
end

end
```

```
%% obtener el contenido de vapor de agua de cada radiosondeo (PWM integrado)
extension= '.txt';
aconotar='Precipitable water [mm] for entire sounding:';
id=fopen([file extension], 'rt');
if id==-1
disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id, '%c');
fclose(id);

a=1;
h=0;
for p=1: (length(vector_posicion2)-1)
    y=0;
for i=vector_posicion2(p): vector_posicion2(p+1)
if (texto(i)==aconotar(1))

    a=1;
for j=1: (length(aconotar)-1)
    if texto(i+j)==aconotar(j+1)
a=a+1;
b=i;
else break;
end
end
if a==length(aconotar)

disp('cadena encontrada');
disp(b);
y=y+1;
if (y==1)
    h=h+1;
vector_posicion3(h)=b;
end
    archivo='pwmvaisala.txt';
id=fopen(archivo, 'at');

for w=(vector_posicion2(p)+6): (vector_posicion2(p)+8)
    if texto(w+1)==10
        texto(w+1)='0';
    end
    if (y==1)
cadena=[texto(w+1)];
fprintf(id, '%c', cadena);
end
end
```



```
for k=(vector_posicion3(h)+44): (vector_posicion3(h)+48)
    if texto(k+1)==10
        texto(k+1)='0';
    end
    if (y==1)
        cadena1=[texto(k+1)];
        fprintf(id, '%c', cadena1);
    end
end
if (y==1)
    fprintf(id, '%c', 9);
end

    if (y==1)
        fprintf(id, '%c\n', '');
        fclose(id);
    end

end

end

end

file='Salida_GPS\saldida';
extension= '.txt';
aconotar='43200.000';
id=fopen([file entrada extension], 'rt');
if id==-1
    disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id, '%c');
fclose(id);

a=1;
h=0;
for i=1: length(texto)
    if (texto(i)==aconotar(1))

        a=1;
        for j=1: (length(aconotar)-1)
```

```
    if texto(i+j)==acontar(j+1)
        a=a+1;
        b=i;
        else break;
    end
end
if a==length(acontar)

    disp('cadena encontrada');
    disp(b);
    h=h+1;
vector_posicion(h)=b;
end
end

end

for j=1: h
    archivo='GPSfiltrado1.txt';
id=fopen(archivo,'at');

for i=(vector_posicion(j)-28): (vector_posicion(j)+100)
    if texto(i+1)==10
        texto(i+1)='0';
    end
cadena=[texto(i+1)];
fprintf(id,'%c',cadena);
end
fprintf(id,'%c\n','');
fclose(id);
end

disp('Operacion realizada con exito');

[diapwm, PWM] = textread('pwmvaisala.txt','%d %f');

for o=1: numel(diapwm)           %para cambiar el mes hay que ver si anda

    diapwm(o)=diapwm(o)+mes;
end

[diGPS, num2, num3, num4, num5, num6, num7, num8, PWM1, PWM2] = textread('GPSfiltrado1.
txt','%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f','commentstyle','c');

f=0;
q=0;
g=0;
l=0;
m=0;
n=0;
tam=numel(diaGPS);
```

```
tam1=numel(diapwm);

sumadeltas1=0;
sumadeltas2=0;
for i=1:tam

    for j=1:tam1
        if (diaGPS(i)==diapwm(j))

            q=q+(PWM(j)-PWM1(i))^2;
            f=f+(PWM(j)-PWM2(i))^2;

            g=g+PWM(j);
            l=l+PWM1(i);
            m=m+PWM2(i);
            n=n+1
            delta1(i)=-(PWM(j)-PWM1(i));
            delta2(i)=-(PWM(j)-PWM2(i));

            archivo='diferencias.txt';
            id=fopen(archivo,'at');
            fprintf(id,'%d',diaGPS(i));
            fprintf(id,'%c',9);
            fprintf(id,'%c',PWM1(i));
            fprintf(id,'%c',9);
            fprintf(id,'%c',PWM(j));
            fprintf(id,'%c',9);
            fprintf(id,'%c',delta1(i));
            fprintf(id,'%c',10);
            fclose(id);
            sumadeltas1=sumadeltas1+delta1(i);
            sumadeltas2=sumadeltas1+delta2(i);
            break;
        end

    end

sdeltas1=sumadeltas1/n;
sdeltas2=sumadeltas2/n;

rms1=sqrt(q/n);
rms2=sqrt(f/n);
media1=g/n;
media2=l/n;
media3=m/n;
```

```
end
```

```
    archivo=[estacion extension];  
    id=fopen(archivo, 'at');
```

```
    fprintf(id, '%s', 'Salida_GPS');
```

```
    fprintf(id, '%c', 9);
```

```
    fprintf(id, '%c', 10);  
    fprintf(id, '%s', 'RMS');  
    fprintf(id, '%c', 0);  
    fprintf(id, '%f', rms1);  
    fprintf(id, '%c', 0);  
    fprintf(id, '%f', rms2);
```

```
    fprintf(id, '%c', 10);  
    fprintf(id, '%s', 'MED');  
    fprintf(id, '%c', 0);  
    fprintf(id, '%f', media2);  
    fprintf(id, '%c', 0);  
    fprintf(id, '%f', media3);
```

```
    fprintf(id, '%c', 10);  
    fprintf(id, '%s', 'DMED');  
    fprintf(id, '%c', 0);  
    fprintf(id, '%f', sdeltas1);  
    fprintf(id, '%c', 0);  
    fprintf(id, '%f', sdeltas2);
```

```
    fprintf(id, '%c', 10);
```

```
    fclose(id);
```

```
%%
```

```
clc  
clear  
dia=0;
```

```
delete salida.txt;
[mes] = textread('mes.txt','%d');
id=fopen('estacion.txt','rt');
estacion=fscanf(id,'%s');
fclose(id);
%% Valores iniciales (inicio)
extension= '.txt';
aconotar='PRES';
%% Carga del texto
file='rad_dato';
id=fopen([file extension],'rt');
if id==-1
disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);
k=0;
w=0;
y=0;
%% Funcion para buscar cadena de texto (inicial)
a=1;
h=0;
for i=1: length(texto)
if (texto(i)==aconotar(1))

    a=1;
    for j=1: (length(aconotar)-1)
        if texto(i+j)==aconotar(j+1)
            a=a+1;
            b=i;
            else break;
        end
    end
    if a==length(aconotar)

        disp('cadena encontrada');
        disp(b);
        h=h+1;

vector_posicion(h)=b;

    end
end

end

extension= '.txt';
aconotar='Station information';
id=fopen([file extension],'rt');
if id==-1
disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id,'%c');
```

```
fclose(id);
%% Funcion para buscar cadena de texto (final)
a=1;
h=0;
for i=1: length(texto)
if (texto(i)==acontar(1))

    a=1;
for j=1: (length(acontar)-1)
    if texto(i+j)==acontar(j+1)
        a=a+1;
        b=i;
        else break;
    end
end
if a==length(acontar)

    disp('cadena encontrada');
    disp(b);
    h=h+1;
vector_posicion1(h)=b-10;
end

end

end

extension= '.txt';
acontar='at 12Z';
id=fopen([file extension], 'rt');
if id==-1
disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id, '%c');
fclose(id);

a=1;
h=0;
for i=1: length(texto)
if (texto(i)==acontar(1))

    a=1;
for j=1: (length(acontar)-1)
    if texto(i+j)==acontar(j+1)
        a=a+1;
        b=i;
        else break;
    end
```

```
end
if a==length(acontar)

    disp('cadena encontrada');
    disp(b);
    h=h+1;
vector_posicion2(h)=b;
end
end

end

%%

[dia, pwm] = textread('pwmvaisala.txt','%d %f');
dia=dia+mes;

for b=1:numel(dia)

    id=fopen([estacion 'pwm' extension], 'at');
    fprintf(id, '%d', dia(b));
    fprintf(id, '%c', 0);
    if dia(b)<10
        fprintf(id, '%c', 0);
end
if dia(b)<100
    fprintf(id, '%c', 0);
end

fprintf(id, '%.2f', pwm(b));

fprintf(id, '%c', 10);
```

```
fclose(id)
```

```
end
```

```
catch
```

```
end
```

```
end
```

```
%%obtengo los dias PWM de los radiosondeos
```



```
        break;
    end

end

end

end

axis([0, 60, 0, 60]);

c=polyfit(a,b,1)
w=c(1)*t+c(2);
plot(t,w,'k','LineWidth',1.5);

w=t;

plot(t,w,'k--','LineWidth',1.5);
legend('Lineal Regression','One-to-one','Location','SouthEast');

plot(a,b,'k.');
```

```
media=media/n;
RMS=sqrt(RMS/n);
STD=sqrt((RMS)^2-(media)^2)
STD=ceil((100*STD))/100;
media=ceil(100*media)/100;
STD=num2str(STD);
media=num2str(media);
p=corrcoef(a,b)
p(2)=ceil((100*p(2)))/100;
p=num2str(p(2));
text(4,55,['STD: ' STD ' MEANDIFF: ' media]);

text(4,48,['CORR: ' p]);

saveas(h,['estacion '.png]);
end
```

```
function [ output_args ] = Filtrar(entrada)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
try

file='Salida_GPS\salida';
extension= '.txt';
aconotar='43200.000';
id=fopen([file entrada extension],'rt');
if id==-1
disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);

a=1;
h=0;
for i=1: length(texto)
if (texto(i)==aconotar(1))

    a=1;
    for j=1: (length(aconotar)-1)
        if texto(i+j)==aconotar(j+1)
            a=a+1;
            b=i;
            else break;
        end
    end
    if a==length(aconotar)

        disp('cadena encontrada');
        disp(b);
        h=h+1;
vector_posicion(h)=b;
    end
end

end

for j=1: h
    archivo='GPSfiltradol.txt';
id=fopen(archivo,'at');

for i=(vector_posicion(j)-28: (vector_posicion(j)+100))
    if texto(i+1)==10
        texto(i+1)='0';
    end
cadena=[texto(i+1)];
fprintf(id,'%c',cadena);
end
fprintf(id,'%c\n','');
fclose(id);
```

```
end
```

```
disp('Operacion realizada con exito');
```

```
catch
```

```
end
```

```
end
```

Apéndices D

Software de descarga y procesamiento de Datos del SACD/aquarius

```
function [ output_args ] = Procesamiento_datos(estacion,latfiltrado,longfiltrado,orbita)

%%
%Inputs: #input_fol: direccion de la carpeta que contiene los archivos
%extraidos.
%      #local_fol: direccion de la carpeta que contiene los scripts para
%      abrir los hdf5.
%      #graficator_fol: direccion de la carpeta que contiene los archivos
%      graficadores.

%%

local_fol=pwd();
input_fol=[local_fol];
%graficator_fol='G:\SAC-D\Graficador_de_mapas';
%figures=['on';'on';'on';'on'];%valores:on u of

L2_dir=dir([input_fol,'\*' orbita '_002.h5']);
n_L2=length(L2_dir);
k_hlat_vec=[];k_hlon_vec=[];ka_hlon_vec=[];ka_hlat_vec=[];ka_vlon_vec=[];ka_vlat_vec=[];
k_htemp_vec=[];
ka_vtemp_vec=[];t_muestra_vec=[];ka_htemp_vec=[];
%Geolocation Data/k_h_latitude
for i=1:n_L2

    L2_filename=L2_dir(i).name;
    L2_filenameaux= L2_filename(42:44);
    L2_filename_info=hdf5info([input_fol,'\',L2_filename]);

    [k_hlat,k_hlon,ka_hlat,ka_hlon,ka_vlat,ka_vlon,k_htemp, ...
    ka_htemp,ka_vtemp,t_muestra]=op_L1_hdf5_1file_public(local_fol,input_fol,
L2_filename);

    k_hlat_vec=[k_hlat_vec;k_hlat];k_hlon_vec=[k_hlon_vec;k_hlon];
    ka_hlat_vec=[ka_hlat_vec;ka_hlat];ka_hlon_vec=[ka_hlon_vec;ka_hlon];
    ka_vlat_vec=[ka_vlat_vec;ka_hlat];ka_vlon_vec=[ka_vlon_vec;ka_vlon];
    k_htemp_vec=[k_htemp_vec;k_htemp]; ka_htemp_vec=[ka_htemp_vec;ka_htemp];
    ka_vtemp_vec=[ka_vtemp_vec;ka_vtemp];
    t_muestra_vec=[t_muestra_vec;t_muestra];

end

%cd(graficator_fol);

figure;
```

```
for j=1:8
    numel(t_muestra_vec)
    %t_muestra_vec(:,j)

    k_htemp_vec(abs(k_hlon_vec(:,j)-longfiltrado)>0.5,j)=0;
    k_htemp_vec(abs(k_hlat_vec(:,j)-latfiltrado)>0.5,j)=0;
    ka_htemp_vec(abs(ka_hlon_vec(:,j)-longfiltrado)>0.5,j)=0;
    ka_htemp_vec(abs(ka_hlat_vec(:,j)-latfiltrado)>0.5,j)=0;
    ka_vtemp_vec(abs(ka_vlon_vec(:,j)-longfiltrado)>0.5,j)=0;
    ka_vtemp_vec(abs(ka_vlat_vec(:,j)-latfiltrado)>0.5,j)=0;

end

% fclose(resultados);
%% tb_24Ghz
resultados=fopen([estacion '_Tb_24ghz.txt'],'at');
for i=1:8
    try
    tb=k_htemp_vec(find(k_htemp_vec(:,i)>0),i)

    Tiempo=t_muestra_vec(find(k_htemp_vec(:,i)>0))
    catch
    end

k=1;
tbsum=0;
for j=1:numel(Tiempo)
    [anio,mes,dia,hora]=ConvertirT(Tiempo(j))
    if j>1

        if strcmp(dia,diaanterior) && strcmp(hora,horaant)
            k=k+1;
            tbsum=tbsum+tb(j);
            Ipww(j)=Ipww(j-1);
            temp(j)=temp(j-1);
            tbpromedio=tbsum/k;
            if j==numel(Tiempo)
                fprintf(resultados,'%d',i);
            fprintf(resultados,'%c',9);
            fprintf(resultados,'%f',tbpromedio);
            fprintf(resultados,'%c',9);
            fprintf(resultados,'%f',Tiempo(j));

            fprintf(resultados,'%c',9);

            fprintf(resultados,'%f',Ipww(j));
            fprintf(resultados,'%c',9);
```

```
fprintf(resultados, '%f', temp(j));
    fprintf(resultados, '%c', 10);
        diaanterior=dia;
        horaant=hora;
        end
    else

        fprintf(resultados, '%d', i);
fprintf(resultados, '%c', 9);
        fprintf(resultados, '%f', tbpromedio);
    fprintf(resultados, '%c', 9);
        fprintf(resultados, '%f', Tiempo(j-1));

fprintf(resultados, '%c', 9);

fprintf(resultados, '%f', Ipwv(j-1));
fprintf(resultados, '%c', 9);
fprintf(resultados, '%f', temp(j-1));
    fprintf(resultados, '%c', 10);
        tbpromedio=tb(j);
        tbsum=tb(j);
        k=1;
        [Ipwv(j), temp(j)]=Bajar_rad(estacion, anio, mes, dia, hora);
        diaanterior=dia;
        horaant=hora;

    end

else
    diaanterior=dia;
    horaant=hora;

        [Ipwv(j), temp(j)]=Bajar_rad(estacion, anio, mes, dia, hora);
        tbsum=tb(j);
        if numel(Tiempo)==1
            tbpromedio=tb(j);
            fprintf(resultados, '%d', i);
fprintf(resultados, '%c', 9);
            fprintf(resultados, '%f', tbpromedio);
            fprintf(resultados, '%c', 9);
            fprintf(resultados, '%f', Tiempo(j));
fprintf(resultados, '%c', 9);

fprintf(resultados, '%f', Ipwv(j));
fprintf(resultados, '%c', 9);
fprintf(resultados, '%f', temp(j));
    fprintf(resultados, '%c', 10);
        end

end

end
```



```
end

clear Tiempo;
clear Ipwv;
clear tb;
end

fclose(resultados);
%% F37Ghz_h

resultados=fopen([estacion '_Tb_37ghz_h.txt'],'at');
for i=1:8
    try
        tb=ka_htemp_vec(find(ka_htemp_vec(:,i)>0),i)

        Tiempo=t_muestra_vec(find(ka_htemp_vec(:,i)>0))

        catch
            end

k=1;
tbsum=0;
for j=1:numel(Tiempo)
    [anio,mes,dia,hora]=ConvertirT(Tiempo(j))
    if j>1

        if strcmp(dia,diaanterior) && strcmp(hora,horaant)
            k=k+1;
            tbsum=tbsum+tb(j);
            Ipwv(j)=Ipwv(j-1);
            temp(j)=temp(j-1);
            tbpromedio=tbsum/k;
            if j==numel(Tiempo)
                fprintf(resultados,'%d',i);
fprintf(resultados,'%c',9);
                fprintf(resultados,'%f',tbpromedio);
                fprintf(resultados,'%c',9);
                fprintf(resultados,'%f',Tiempo(j));

fprintf(resultados,'%c',9);

fprintf(resultados,'%f',Ipwv(j));
fprintf(resultados,'%c',9);
fprintf(resultados,'%f',temp(j));
                fprintf(resultados,'%c',10);
                diaanterior=dia;
                horaant=hora;

            end

end
```

```
else

    fprintf(resultados, '%d', i);
fprintf(resultados, '%c', 9);
    fprintf(resultados, '%f', tbpromedio);
    fprintf(resultados, '%c', 9);
    fprintf(resultados, '%f', Tiempo(j-1));
fprintf(resultados, '%c', 9);

fprintf(resultados, '%f', Ipwv(j-1));
fprintf(resultados, '%c', 9);
fprintf(resultados, '%f', temp(j-1));
    fprintf(resultados, '%c', 10);
    [Ipwv(j), temp(j)] = Bajar_rad(estacion, anio, mes, dia, hora);
    tbpromedio = tb(j);
    tbsum = tb(j);
    k = 1;
    diaanterior = dia;
    horaant = hora;

end

else
    diaanterior = dia;
    horaant = hora;

    [Ipwv(j), temp(j)] = Bajar_rad(estacion, anio, mes, dia, hora);
    tbsum = tb(j);
    if numel(Tiempo) == 1
        tbpromedio = tb(j);
        fprintf(resultados, '%d', i);
fprintf(resultados, '%c', 9);
        fprintf(resultados, '%f', tbpromedio);
        fprintf(resultados, '%c', 9);
        fprintf(resultados, '%f', Tiempo(j));
fprintf(resultados, '%c', 9);

fprintf(resultados, '%f', Ipwv(j));
fprintf(resultados, '%c', 9);
fprintf(resultados, '%f', temp(j));
    fprintf(resultados, '%c', 10);
        end

end

end

clear Tiempo;
```

```
clear Ipwv;
clear tb;
end

fclose(resultados);

%%F37Ghz_v
resultados=fopen([estacion '_Tb_37ghz_v.txt'],'at');
for i=1:8
    try
        tb=ka_vtemp_vec(find(ka_vtemp_vec(:,i)>0),i)

Tiempo=t_muestra_vec(find(ka_vtemp_vec(:,i)>0))
        catch
            end

k=1;
tbsum=0;
for j=1:numel(Tiempo)
    [anio,mes,dia,hora]=ConvertirT(Tiempo(j))
    if j>1

        if strcmp(dia,diaanterior) && strcmp(hora,horaant)
            k=k+1;
            tbsum=tbsum+tb(j);
            Ipwv(j)=Ipwv(j-1);
            temp(j)=temp(j-1);
            tbpromedio=tbsum/k;
            if j==numel(Tiempo)
                fprintf(resultados,'%d',i);
fprintf(resultados,'%c',9);
                fprintf(resultados,'%f',tbpromedio);
                fprintf(resultados,'%c',9);
                fprintf(resultados,'%f',Tiempo(j));

fprintf(resultados,'%c',9);

                fprintf(resultados,'%f',Ipwv(j));
                fprintf(resultados,'%c',9);
                fprintf(resultados,'%f',temp(j));
                fprintf(resultados,'%c',10);
                diaanterior=dia;
                horaant=hora;

                end
            else

                fprintf(resultados,'%d',i);
fprintf(resultados,'%c',9);
                fprintf(resultados,'%f',tbpromedio);
```

```
        fprintf(resultados, '%c', 9);
        fprintf(resultados, '%f', Tiempo(j-1));
    fprintf(resultados, '%c', 9);

    fprintf(resultados, '%f', Ipwv(j-1));
    fprintf(resultados, '%c', 9);
    fprintf(resultados, '%f', temp(j-1));
    fprintf(resultados, '%c', 10);
    tbpromedio=tb(j);
    tbsum=tb(j);
    k=1;
    [Ipwv(j), temp(j)]=Bajar_rad(estacion, anio, mes, dia, hora);

    diaanterior=dia;
    horaant=hora;
end

else
    diaanterior=dia;
    horaant=hora;

    [Ipwv(j), temp(j)]=Bajar_rad(estacion, anio, mes, dia, hora);
    tbsum=tb(j);
    if numel(Tiempo)==1
        tbpromedio=tb(j);
        fprintf(resultados, '%d', i);
    fprintf(resultados, '%c', 9);
        fprintf(resultados, '%f', tbpromedio);
        fprintf(resultados, '%c', 9);
        fprintf(resultados, '%f', Tiempo(j));
    fprintf(resultados, '%c', 9);

    fprintf(resultados, '%f', Ipwv(j));
    fprintf(resultados, '%c', 9);
    fprintf(resultados, '%f', temp(j));
    fprintf(resultados, '%c', 10);
    end

end

end

clear Tiempo;
clear Ipwv;
clear tb;
end

fclose(resultados);

Apilado(estacion);
```

```
% for j=1:8
%graficador_gral(k_hlat_vec(:,j),k_hlon_vec(:,j),k_htemp_vec(:,j),L2_filenameaux);hold↵
on;
% end
```

```
function [ IPWM, T ] = Bajar_rad( numeroest, anio, mes, dia, hora )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

try
archivo=['http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=naconf&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR='
anio '&MONTH=' mes '&FROM=' dia hora '&TO=' dia hora '&STNM=' numeroest]

pause(0.2)
str = urlread2(archivo);
disp(str);
pause(0.2)
fid = fopen('rad_dato.txt','wt');
fprintf(fid, '%s', str);
fclose(fid);
pause(0.2)

file='rad_dato'
extension= '.txt';
acontar='Precipitable water [mm] for entire sounding:';
id=fopen([file extension],'rt');
if id==-1
disp('Error en la carga de archivo, compruebe que el archivo existe...')
end
texto=fscanf(id,'%c');
fclose(id);

a=1;
h=0;
for i=1: length(texto)
if (texto(i)==acontar(1))

    a=1;
for j=1: (length(acontar)-1)
    if texto(i+j)==acontar(j+1)
a=a+1;
b=i;
else break;
end
end
if a==length(acontar)

    disp('cadena encontrada');
    disp(b);
    h=h+1;
vector_posicion2(h)=b;
end
end

end
```

```
archivo='pwmvaisala.txt';
id=fopen(archivo,'wt');

for w=vector_posicion2(1)+44:(vector_posicion2(1)+48)
    if texto(w+1)==10
        texto(w+1)='0';
    end
    cadena=[texto(w+1)];
    fprintf(id,'%c',cadena);

end
fclose(id);

[Vapor] = textread('pwmvaisala.txt','%f');
IPWM=Vapor;
T=Temperatura_rad();
delete('rad_dato.txt');
delete('pwmvaisala.txt');
catch

    IPWM=-1;
    T=-1;
    delete('rad_dato.txt');
    delete('pwmvaisala.txt');

end
```



```
fprintf(idy, '%c', 10);
fprintf(idy, '%.3f', promediot37h);
fprintf(idy, '%c', 10);
fprintf(idw, '%.3f', promediot37v);
fprintf(idw, '%c', 10);
fprintf(idz, '%.3f', PromedioIPWV);
fprintf(idz, '%c', 10);
fprintf(idt, '%.3f', PromedioT);
fprintf(idt, '%c', 10);
q=0;
promediot24=0;
promediot37v=0;
promediot37h=0;
PromedioT=0;
PromedioIPWV=0;

    end
    %end
end

fclose(idw);
fclose(idy);
fclose(idz);
fclose(idt);

load t_24_h.txt
load t_37_h.txt
load t_37_v.txt
load Temp.txt
load ipwv.txt

%Ajuste*****
%
% X = [ones(size(t_24_h)) t_24_h t_37_h t_37_v Temp];
% %X = [t_24_h t_37_h t_37_v t_24_h.^2 t_37_h.^2 t_37_v.^2 Temp];
% [b,bint,r,rint,stats] = regress(ipwv,X);
% for i=1:numel(r)
%     cuadrado(i)=r(i)^2;
%
% end

%disp(bint);
b=[-28.852 -0.013 2.171 0.180 0.758];
disp(b);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% [t242014,t37h2014,t37v2014,tgps2014,ipwv2014,temperatura2014]=textread([ESTACION
'FINAL2014.txt'] , '%f %f %f %f %f %f');
% format long;
% z=0;
```

```
% p=0;
% w=0;
%
% archivo='t_37_v2014.txt';
% idw=fopen(archivo,'wt');
% archivo='t_24_h2014.txt';
% idx=fopen(archivo,'wt');
%   archivo='t_37_h2014.txt';
% idy=fopen(archivo,'wt');
% archivo='ipwv2014.txt';
% idz=fopen(archivo,'wt');
%
%
% archivo='Temp2014.txt';
% idt=fopen(archivo,'wt');
%
% for i=1:numel(t242014)
%   fprintf(idx,'%3f',t242014(i));
%   fprintf(idx,'%c',10);
%   fprintf(idy,'%3f',t37h2014(i));
%   fprintf(idy,'%c',10);
%   fprintf(idw,'%3f',t37v2014(i));
%   fprintf(idw,'%c',10);
%   fprintf(idz,'%3f',ipwv2014(i));
%   fprintf(idz,'%c',10);
%   fprintf(idt,'%3f',temperatura2014(i));
%   fprintf(idt,'%c',10);
%
% end
%
%
% fclose(idw);
%   fclose(idx);
%   fclose(idy);
%   fclose(idz);
%   fclose(idt);
%
%   load t_24_h2014.txt
%   load t_37_h2014.txt
%   load t_37_v2014.txt
%   load Temp2014.txt
%   load ipwv2014.txt
%
%
```

```
h=figure(1);
%a=numel(cuadrado)-1;
%cuadrado=(sum(cuadrado));
%dividir=cuadrado./a;
```

```
%STD=sqrt(dividir);
t=[0:3:50];
q=t;
ipwv_calculado=b(1)+b(2)*t_24_h+b(3)*t_37_h+b(4)*t_37_v+b(5)*Temp;
prom=1;
qprom=0;
k=1;
for i=1:numel(ipwv_calculado)-1

    if ipwv(i)==ipwv(i+1)
        if i==1
            qprom= ipwv_calculado(i);
            ipwv_grafico(i)=ipwv_calculado(i);
            ipwv_grafico_rad(i)=ipwv(i);
        end

        k=k+1;
        qprom=qprom+ipwv_calculado(i+1);
        qpromedio=qprom/k;

    else

        if i==1
            qprom= ipwv_calculado(i);
            ipwv_grafico(i)=ipwv_calculado(i);
            ipwv_grafico_rad(i)=ipwv(i);
        end

        if k>1

            ipwv_grafico(i)=qpromedio;
            ipwv_grafico_rad(i)=ipwv(i-1);

            qprom=ipwv_calculado(i);
            qpromedio=ipwv_calculado(i);

        end

        k=1;

    end
end

diff=(ipwv-ipwv_calculado);
media=mean(diff);
media=ceil(100*media)/100;
media=num2str(media);
figure(1)
plot(ipwv_grafico_rad,ipwv_grafico,'k. ');
%title(['Modelo de regresion estadistica, estacion ' ESTACION]);
```

```
hold on;
plot(t,q,'k');
axis([0 50 0 50]);
xlabel('Ipwv [mm]');
ylabel('Ipwv calculado [mm]');
% STD=ceil(100*STD)/100;
%STD=num2str(STD);
%text(25,45,['STD: ' STD ' [mm]']);

p=corrcoef(ipwv,ipwv_calculado);
p(2)=ceil((100*p(2)))/100;
p=num2str(p(2));
text(25,40,['Correlacion: ' p]);
%figure(2)
% hist(diff,100,1);
% axis([-10 10 0 300]);
% % Curva_estadistica(ESTACION);
% % Curva_plano();
% figure(3)
% plot(t_24_h,ipwv,'r.');
```

```
*****
% idajuste=fopen('Coeficientes.txt','at');
% fprintf(idajuste,'%s',ESTACION);
% fprintf(idajuste,'%c',9);
% fprintf(idajuste,'%3f',b(1));
% fprintf(idajuste,'%c',9);
% fprintf(idajuste,'%3f',b(2));
% fprintf(idajuste,'%c',9);
% fprintf(idajuste,'%3f',b(3));
% fprintf(idajuste,'%c',9);
% fprintf(idajuste,'%3f',b(4));
% fprintf(idajuste,'%c',9);
% fprintf(idajuste,'%3f',b(5));
% fprintf(idajuste,'%c',10);
% fclose(idajuste);
*****
for p=1:numel(ipwv)
idajuste=fopen('Validacion.txt','at');
fprintf(idajuste,'%s',ESTACION);
fprintf(idajuste,'%c',9);
fprintf(idajuste,'%3f',ipwv(p));
fprintf(idajuste,'%c',9);
fprintf(idajuste,'%3f',ipwv_calculado(i));
fprintf(idajuste,'%c',10);

end
fclose(idajuste);

saveas(h,[ESTACION '_SACD' '.png']);
```

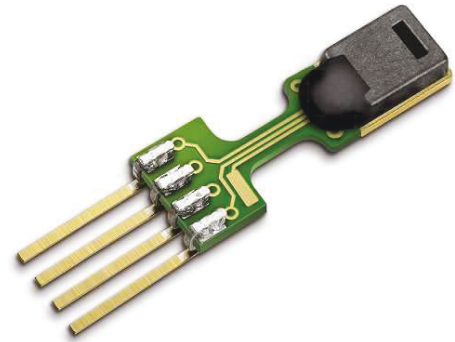
Apéndices E

Hojas de datos de sensores utilizados y radiosonda Vaisala

Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75)

Humidity and Temperature Sensor IC

- Fully calibrated
- Digital output
- Low power consumption
- Excellent long term stability
- Pin type package – easy integration



Product Summary

SHT7x (including SHT71 and SHT75) is Sensirion's family of relative humidity and temperature sensors with pins. The sensors integrate sensor elements plus signal processing in compact format and provide a fully calibrated digital output. A unique capacitive sensor element is used for measuring relative humidity while temperature is measured by a band-gap sensor. The applied CMOSens® technology guarantees excellent reliability and long term stability. Both sensors are seamlessly coupled to a 14bit analog to digital converter and a serial interface circuit. This results in superior signal quality, a fast response time and insensitivity to external disturbances (EMC).

Each SHT7x is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into an OTP memory on the chip. These coefficients are used to internally calibrate the signals from the sensors. The 2-wire serial interface and internal voltage regulation allows for easy and fast system integration. The small size and low power consumption makes SHT7x the ultimate choice for even the most demanding applications.

SHT7x is supplied on FR4 with pins which allows for easy integration or replacement. The same sensor is also available as surface mountable packaging (SHT1x) or on flex print (SHTA1).

Dimensions

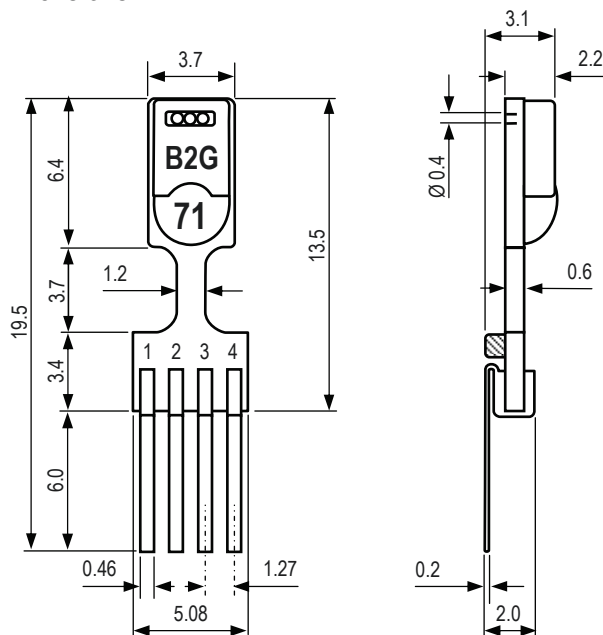


Figure 1: Drawing of SHT7x (applies to SHT71 and SHT75) sensor packaging, dimensions in mm (1mm = 0.039inch). Contact assignment: 1: SCK, 2: VDD, 3: GND, 4: DATA. Hatched item on backside of PCB is a 100nF capacitor – see Section 2.1 for more information.

Sensor Chip

SHT7x V4 – for which this datasheet applies – features a version 4 Silicon sensor chip. Besides a humidity and a temperature sensor the chip contains an amplifier, A/D converter, OTP memory and a digital interface. V4 sensors can be identified by the alpha-numeric traceability code on the sensor cap – see example “B2G” code on Figure 1.

Material Contents

While the sensor is made of a CMOS chip the sensor housing consists of an LCP cap with epoxy glob top on an FR4 substrate. Pins are made of a Cu/Be alloy coated with Ni and Au. The device is fully RoHS and WEEE compliant, thus it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

Evaluation Kits

For sensor trial measurements, for qualification of the sensor or even experimental application (data logging) of the sensor there is an evaluation kit *EK-H4* available including SHT71 (same sensor chip as SHT1x) and 4 sensor channels, hard and software to interface with a computer. For other evaluation kits please check www.sensirion.com/humidity.

Sensor Performance

Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±3.0		%RH
	max	see Figure 2			
Accuracy ² SHT75	typ		±1.8		%RH
	max	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time ³	tau 63%		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

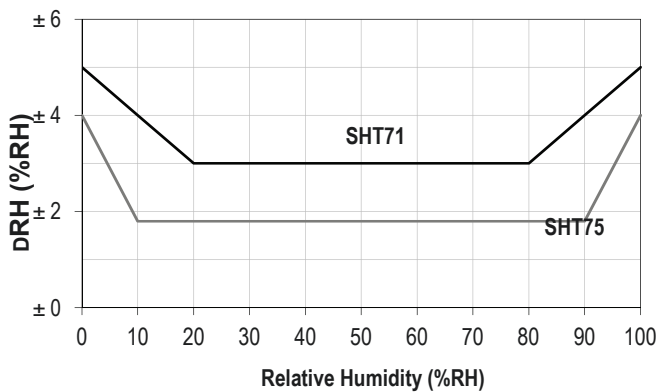


Figure 2: Maximal RH-tolerance at 25°C per sensor type.

Electrical and General Items

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Source Voltage		2.4	3.3	5.5	V
Power Consumption ⁵	sleep		2	5	µW
	measuring		3		mW
	average		90		µW
Communication	digital 2-wire interface, see Communication				
Storage	10 – 50°C (0 – 80°C peak), 20 – 60%RH				

¹ The default measurement resolution of is 14bit for temperature and 12bit for humidity. It can be reduced to 12/8bit by command to status register.

² Accuracies are tested at Outgoing Quality Control at 25°C (77°F) and 3.3V. Values exclude hysteresis and are only applicable to non-condensing environments.

³ Time for reaching 63% of a step function, valid at 25°C and 1 m/s airflow.

Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±0.4		°C
	max	see Figure 3			
Accuracy ² SHT75	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁶	tau 63%	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

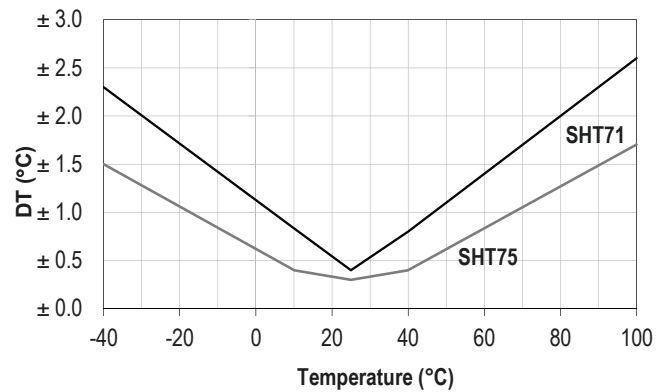


Figure 3: Maximal T-tolerance per sensor type.

Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT71	Tape Stripes	50	1-100092-04
SHT75	Tape Stripes	50	1-100071-04

This datasheet is subject to change and may be amended without prior notice.

⁴ Value may be higher in environments with high contents of volatile organic compounds. See Section 1.3 of Users Guide.

⁵ Values for VDD=3.3V at 25°C, average value at one 12bit measurement per second.

⁶ Response time depends on heat capacity of and thermal resistance to sensor substrate.

Users Guide SHT7x

1 Application Information

1.1 Operating Conditions

Sensor works stable within recommended normal range – see Figure 4. Long term exposures to conditions outside normal range, especially at humidity >80%RH, may temporarily offset the RH signal (+3 %RH after 60h). After return to normal range it will slowly return towards calibration state by itself. See Section 1.4 “Reconditioning Procedure” to accelerate eliminating the offset. Prolonged exposure to extreme conditions may accelerate ageing.

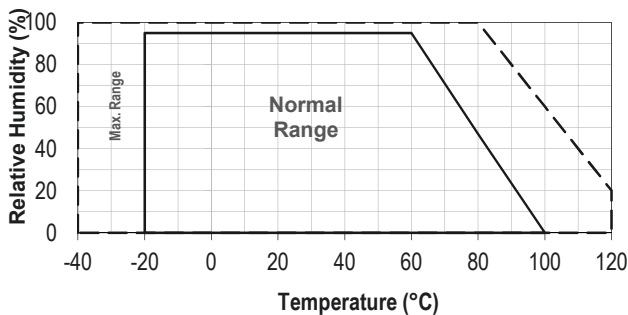


Figure 4: Operating Conditions

1.2 Sockets and Soldering

For maintain high accuracy specifications the sensor shall not be soldered. Sockets may be used such as “Preci-dip / Mill-Max R851-83-004-20-001” or similar.

Standard wave soldering ovens may be used at maximum 235°C for 20 seconds. For manual soldering contact time must be limited to 5 seconds at up to 350°C⁷.

After wave soldering the devices should be stored at >75%RH for at least 12h to allow the polymer to re-hydrate. Alternatively the re-hydration process may be performed at ambient conditions (>40%RH) during more than 5 days.

In no case, neither after manual nor wave soldering, a board wash shall be applied. In case of application with exposure of the sensor to corrosive gases the soldering pads of pins and PCB shall be sealed to prevent loose contacts or short cuts.

1.3 Storage Conditions and Handling Instructions

It is of great importance to understand that a humidity sensor is not a normal electronic component and needs to be handled with care. Chemical vapors at high concentration in combination with long exposure times may offset the sensor reading.

For these reasons it is recommended to store the sensors in original packaging including the sealed ESD bag at following conditions: Temperature shall be in the range of 10°C – 50°C (0 – 80°C for limited time) and humidity at 20 – 60%RH (sensors that are not stored in ESD bags). For sensors that have been removed from the original packaging we recommend to store them in ESD bags made of metal-in PE-HD⁸.

In manufacturing and transport the sensors shall be prevented of high concentration of chemical solvents and long exposure times. Out-gassing of glues, adhesive tapes and stickers or out-gassing packaging material such as bubble foils, foams, etc. shall be avoided. Manufacturing area shall be well ventilated.

For more detailed information please consult the document “Handling Instructions” or contact Sensirion.

1.4 Reconditioning Procedure

As stated above extreme conditions or exposure to solvent vapors may offset the sensor. The following reconditioning procedure may bring the sensor back to calibration state:

Baking: 100 – 105°C at < 5%RH for 10h
 Re-Hydration: 20 – 30°C at ~ 75%RH for 12h⁹.

1.5 Temperature Effects

Relative humidity reading strongly depends on temperature. Therefore, it is essential to keep humidity sensors at the same temperature as the air of which the relative humidity is to be measured. In case of testing or qualification the reference sensor and test sensor must show equal temperature to allow for comparing humidity readings.

The packaging of SHT7x is designed for minimal heat transfer from the pins to the sensor. Still, if the SHT7x shares a PCB with electronic components that produce heat it should be mounted in a way that prevents heat transfer or keeps it as low as possible.

Furthermore, there are self-heating effects in case the measurement frequency is too high. Please refer to Section 3.3 for detailed information.

⁷ 235°C corresponds to 455°F, 350°C corresponds to 662°F

⁸ For example, 3M antistatic bag, product “1910” with zipper .

⁹ 75%RH can conveniently be generated with saturated NaCl solution. 100 – 105°C correspond to 212 – 221°F, 20 – 30°C correspond to 68 – 86°F

1.6 Light

The SHT7x is not light sensitive. Prolonged direct exposure to sunshine or strong UV radiation may age the housing.

1.7 Materials Used for Sealing / Mounting

Many materials absorb humidity and will act as a buffer increasing response times and hysteresis. Materials in the vicinity of the sensor must therefore be carefully chosen. Recommended materials are: Any metals, LCP, POM (Delrin), PTFE (Teflon), PE, PEEK, PP, PB, PPS, PSU, PVDF, PVF.

For sealing and gluing (use sparingly): Use high filled epoxy for electronic packaging (e.g. glob top, underfill), and Silicone. Out-gassing of these materials may also contaminate the SHT7x (see Section 1.3). Therefore try to add the sensor as a last manufacturing step to the assembly, store the assembly well ventilated after manufacturing or bake at 50°C for 24h to outgas contaminants before packing.

1.8 Wiring Considerations and Signal Integrity

SHT7x are often applied using wires. Carrying the SCK and DATA signal parallel and in close proximity more than 10cm may result in cross talk and loss of communication. This may be resolved by routing VDD and/or GND between the two data signals and/or using shielded cables. Furthermore, slowing down SCK frequency will possibly improve signal integrity.

Please see the Application Note “ESD, Latch-up and EMC” for more information.

1.9 ESD (Electrostatic Discharge)

ESD immunity is qualified according to MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at ±2 kV).

Latch-up immunity is provided at a force current of ±100mA with $T_{amb} = 80^{\circ}C$ according to JEDEC78A. See Application Note “ESD, Latch-up and EMC” for more information.

2 Interface Specifications

Pin	Name	Comment
1	SCK	Serial Clock, input only
2	VDD	Source Voltage
3	GND	Ground
4	DATA	Serial Data, bidirectional

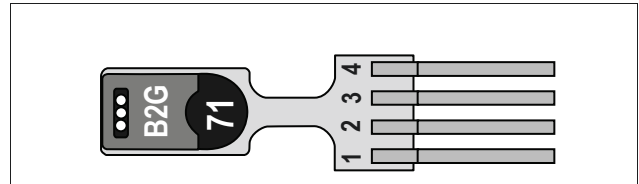


Table 1: SHT7x pin assignment.

2.1 Power Pins (VDD, GND)

The supply voltage of SHT7x must be in the range of 2.4 and 5.5V, recommended supply voltage is 3.3V. Decoupling of VDD and GND by a 100nF capacitor is integrated on the backside of the sensor packaging.

The serial interface of the SHT7x is optimized for sensor readout and effective power consumption. The sensor cannot be addressed by I²C protocol, however, the sensor can be connected to an I²C bus without interference with other devices connected to the bus. Microcontroller must switch between protocols.

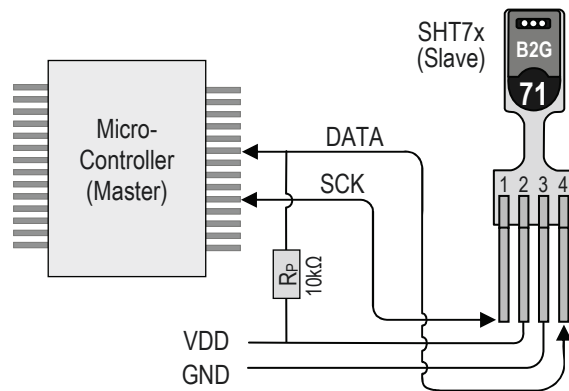


Figure 5: Typical application circuit, including pull up resistor R_p .

2.2 Serial clock input (SCK)

SCK is used to synchronize the communication between microcontroller and SHT7x. Since the interface consists of fully static logic there is no minimum SCK frequency.

2.3 Serial data (DATA)

The DATA tri-state pin is used to transfer data in and out of the sensor. For sending a command to the sensor, DATA is valid on the rising edge of the serial clock (SCK) and must remain stable while SCK is high. After the falling edge of SCK the DATA value may be changed. For safe communication DATA valid shall be extended T_{SU} and T_{HO} before the rising and after the falling edge of SCK, respectively – see Figure 6. For reading data from the sensor, DATA is valid T_V after SCK has gone low and remains valid until the next falling edge of SCK.

To avoid signal contention the microcontroller must only drive DATA low. An external pull-up resistor (e.g. 10 kΩ) is required to pull the signal high – it should be noted that pull-up resistors may be included in I/O circuits of

microcontrollers. See Table 2 for detailed I/O characteristic of the sensor.

2.4 Electrical Characteristics

The electrical characteristics such as power consumption, low and high level, input and output voltages depend on the supply voltage. Table 2 gives electrical characteristics of SHT7x with the assumption of 5V supply voltage if not stated otherwise. For proper communication with the sensor it is essential to make sure that signal design is strictly within the limits given in Table 3 and Figure 6. Absolute maximum ratings for VDD versus GND are +7V and -0.3V. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect the sensor reliability (e.g. hot carrier degradation, oxide breakdown).

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Power supply DC ¹⁰		2.4	3.3	5.5	V
Supply current	measuring		0.55	1	mA
	average ¹¹	2	28		µA
	sleep		0.3	1.5	µA
Low level output voltage	I _{OL} < 4 mA	0		250	mV
High level output voltage	R _P < 25 kΩ	90%		100%	VDD
Low level input voltage	Negative going	0%		20%	VDD
High level input voltage	Positive going	80%		100%	VDD
Input current on pads				1	µA
Output current	on			4	mA
	Tri-stated (off)		10	20	µA

Table 2: SHT7x DC characteristics. R_P stands for pull up resistor, while I_{OL} is low level output current.

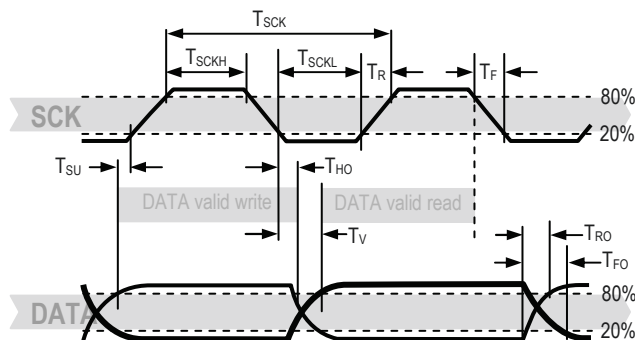


Figure 6: Timing Diagram, abbreviations are explained in Table 3. Bold DATA line is controlled by the sensor, plain DATA line is controlled by the micro-controller. Note that DATA valid read time is triggered by falling edge of anterior toggle.

¹⁰ Recommended voltage supply for highest accuracy is 3.3V, due to sensor calibration.

¹¹ Minimum value with one measurement of 8 bit resolution without OTP reload per second, typical value with one measurement of 12bit resolution per second.

	Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
F _{SCK}	SCK Frequency	VDD > 4.5V	0	0.1	5	MHz
		VDD < 4.5V	0	0.1	1	MHz
T _{SCKx}	SCK hi/low time		100			ns
T _R /T _F	SCK rise/fall time		1	200	*	ns
T _{FO}	DATA fall time	OL = 5pF	3.5	10	20	ns
		OL = 100pF	30	40	200	ns
T _{RO}	DATA rise time		**	**	**	ns
T _V	DATA valid time		200	250	***	ns
T _{SU}	DATA setup time		100	150	***	ns
T _{HO}	DATA hold time		10	15	****	ns

* $T_{R_max} + T_{F_max} = (F_{SCK})^{-1} - T_{SCKH} - T_{SCKL}$

** T_{RO} is determined by the R_P*C_{bus} time-constant at DATA line

*** T_{V_max} and T_{SU_max} depend on external pull-up resistor (R_P) and total bus line capacitance (C_{bus}) at DATA line

**** T_{HO_max} < T_V - max (T_{RO}, T_{FO})

Table 3: SHT7x I/O signal characteristics, OL stands for Output Load, entities are displayed in Figure 6.

3 Communication with Sensor

3.1 Start up Sensor

As a first step the sensor is powered up to chosen supply voltage VDD. The slew rate during power up shall not fall below 1V/ms. After power-up the sensor needs 11ms to get to Sleep State. No commands must be sent before that time.

3.2 Sending a Command

To initiate a transmission, a Transmission Start sequence has to be issued. It consists of a lowering of the DATA line while SCK is high, followed by a low pulse on SCK and raising DATA again while SCK is still high – see Figure 7.

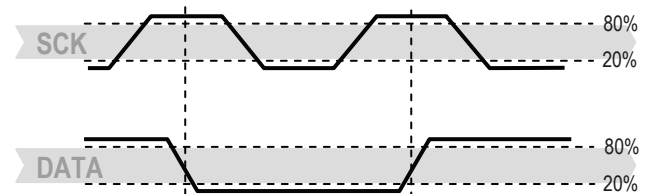


Figure 7: "Transmission Start" sequence

The subsequent command consists of three address bits (only '000' is supported) and five command bits. The SHT7x indicates the proper reception of a command by pulling the DATA pin low (ACK bit) after the falling edge of the 8th SCK clock. The DATA line is released (and goes high) after the falling edge of the 9th SCK clock.

Command	Code
Reserved	0000x
Measure Temperature	00011
Measure Relative Humidity	00101
Read Status Register	00111
Write Status Register	00110
Reserved	0101x-1110x
Soft reset , resets the interface, clears the status register to default values. Wait minimum 11 ms before next command	11110

Table 4: SHT7x list of commands

3.3 Measurement of RH and T

After issuing a measurement command ('00000101' for relative humidity, '00000011' for temperature) the controller has to wait for the measurement to complete. This takes a maximum of 20/80/320 ms for a 8/12/14bit measurement. The time varies with the speed of the internal oscillator and can be lower by up to 30%. To signal the completion of a measurement, the SHT7x pulls data line low and enters Idle Mode. The controller must wait for this Data Ready signal before restarting SCK to readout the data. Measurement data is stored until readout, therefore the controller can continue with other tasks and readout at its convenience.

Two bytes of measurement data and one byte of CRC checksum (optional) will then be transmitted. The micro controller must acknowledge each byte by pulling the DATA line low. All values are MSB first, right justified (e.g. the 5th SCK is MSB for a 12bit value, for a 8bit result the first byte is not used).

Communication terminates after the acknowledge bit of the CRC data. If CRC-8 checksum is not used the controller may terminate the communication after the measurement data LSB by keeping ACK high. The device automatically returns to Sleep Mode after measurement and communication are completed.

Important: To keep self heating below 0.1°C, SHT7x should not be active for more than 10% of the time – e.g. maximum one measurement per second at 12bit accuracy shall be made.

3.4 Connection reset sequence

If communication with the device is lost the following signal sequence will reset the serial interface: While leaving DATA high, toggle SCK nine or more times – see Figure 8. This must be followed by a Transmission Start sequence preceding the next command. This sequence resets the interface only. The status register preserves its content.

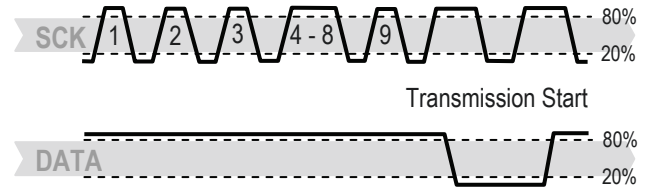


Figure 8: Connection Reset Sequence

3.5 CRC-8 Checksum calculation

The whole digital transmission is secured by an 8bit checksum. It ensures that any wrong data can be detected and eliminated. As described above this is an additional feature of which may be used or abandoned. Please consult Application Note "CRC Checksum" for information on how to calculate the CRC.

3.6 Status Register

Some of the advanced functions of the SHT7x such as selecting measurement resolution, end-of-battery notice, use of OTP reload or using the heater may be activated by sending a command to the status register. The following section gives a brief overview of these features.

After the command Status Register Read or Status Register Write – see Table 4 – the content of 8 bits of the status register may be read out or written. For the communication compare Figure 9 and Figure 10 – the assignation of the bits is displayed in Table 5.

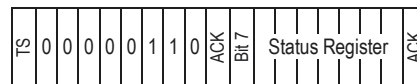


Figure 9: Status Register Write



Figure 10: Status Register Read

Examples of full communication cycle are displayed in Figure 11 and Figure 12.

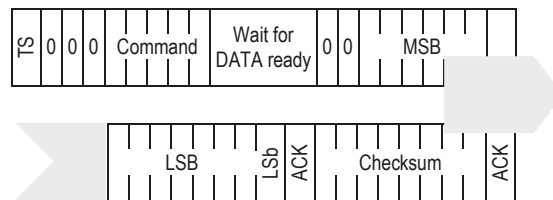


Figure 11: Overview of Measurement Sequence. TS = Transmission Start, MSB = Most Significant Byte, LSB = Last Significant Byte, LSb = Last Significant Bit.

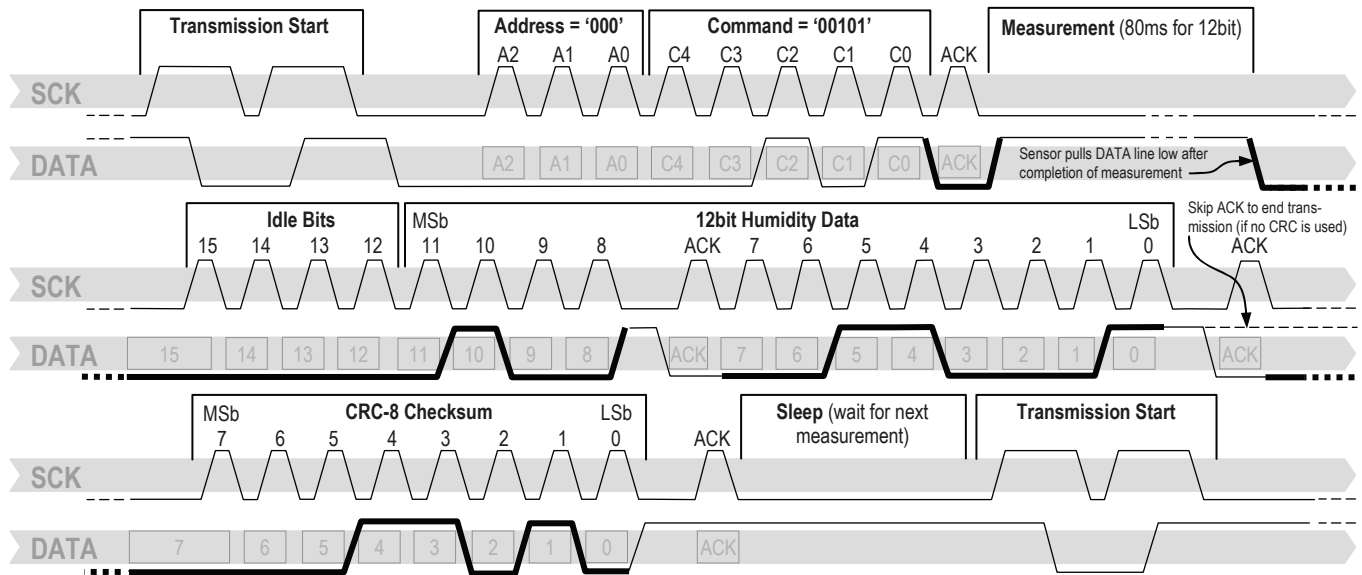


Figure 12: Example RH measurement sequence for value “0000’0100’0011’0001” = 1073 = 35.50%RH (without temperature compensation). DATA valid times are given and referenced in boxes on DATA line. Bold DATA lines are controlled by sensor while plain lines are controlled by the micro-controller.

Bit	Type	Description	Default
7		reserved	0
6	R	End of Battery (low voltage detection) '0' for VDD > 2.47 '1' for VDD < 2.47	X No default value, bit is only updated after a measurement
5		reserved	0
4		reserved	0
3		For Testing only, do not use	0
2	R/W	Heater	0 off
1	R/W	no reload from OTP	0 reload
0	R/W	'1' = 8bit RH / 12bit Temp. resolution '0' = 12bit RH / 14bit Temp. resolution	0 12bit RH 14bit Temp.

Table 5: Status Register Bits

Measurement resolution: The default measurement resolution of 14bit (temperature) and 12bit (humidity) can be reduced to 12 and 8bit. This is especially useful in high speed or extreme low power applications.

End of Battery function detects and notifies VDD voltages below 2.47 V. Accuracy is ±0.05 V.

Heater: An on chip heating element can be addressed by writing a command into status register. The heater may increase the temperature of the sensor by 5 – 10°C¹² beyond ambient temperature. The heater draws roughly 8mA @ 5V supply voltage.

For example the heater can be helpful for functionality analysis: Humidity and temperature readings before and after applying the heater are compared. Temperature shall increase while relative humidity decreases at the same time. Dew point shall remain the same.

Please note: The temperature reading will display the temperature of the heated sensor element and not ambient temperature. Furthermore, the sensor is not qualified for continuous application of the heater.

OTP reload: With this operation the calibration data is uploaded to the register before each measurement. This may be deactivated for reducing measurement time by about 10ms.

4 Conversion of Signal Output

4.1 Relative Humidity

For compensating non-linearity of the humidity sensor – see Figure 13 – and for obtaining the full accuracy of the sensor it is recommended to convert the humidity readout (SO_{RH}) with the following formula with coefficients given in Table 6:

$$RH_{linear} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \text{ (%RH)}$$

SO _{RH}	c ₁	c ₂	c ₃
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

Table 6: Humidity conversion coefficients

¹² Corresponds to 9 – 18°F

Values higher than 99%RH indicate fully saturated air and must be processed and displayed as 100%RH¹³. Please note that the humidity sensor has no significant voltage dependency.

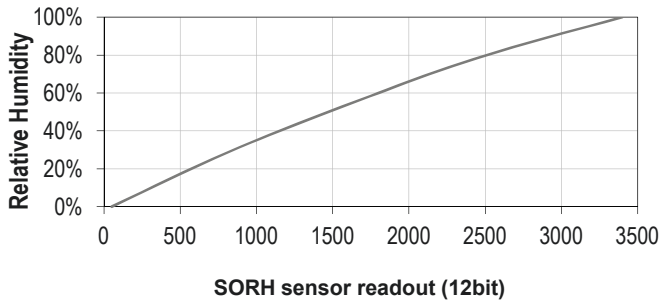


Figure 13: Conversion from SO_{RH} to relative humidity

4.2 Temperature compensation of Humidity Signal

For temperatures significantly different from 25°C (~77°F) the humidity signal requires temperature compensation. The temperature correction corresponds roughly to 0.12%RH/°C @ 50%RH. Coefficients for the temperature compensation are given in Table 8.

$$RH_{true} = (T_c - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{linear}$$

SO _{RH}	t ₁	t ₂
12 bit	0.01	0.00008
8 bit	0.01	0.00128

Table 7: Temperature compensation coefficients

4.3 Temperature

The band-gap PTAT (Proportional To Absolute Temperature) temperature sensor is very linear by design. Use the following formula to convert digital readout (SO_T) to temperature value, with coefficients given in Table 9:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T$$

VDD	d ₁ (°C)	d ₁ (°F)	SO _T	d ₂ (°C)	d ₂ (°F)
5V	-40.1	-40.2	14bit	0.01	0.018
4V	-39.8	-39.6	12bit	0.04	0.072
3.5V	-39.7	-39.5			
3V	-39.6	-39.3			
2.5V	-39.4	-38.9			

Table 8: Temperature conversion coefficients.

4.4 Dew Point

SHT7x is not measuring dew point directly, however dew point can be derived from humidity and temperature readings. Since humidity and temperature are both measured on the same monolithic chip, the SHT7x allows superb dew point measurements.

For dew point (T_d) calculations there are various formulas to be applied, most of them quite complicated. For the temperature range of -40 – 50°C the following approximation provides good accuracy with parameters given in Table 10:

$$T_d(RH, T) = T_n \cdot \frac{\ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) + \frac{m \cdot T}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{RH}{100\%}\right) - \frac{m \cdot T}{T_n + T}}$$

Temperature Range	T _n (°C)	m
Above water, 0 – 50°C	243.12	17.62
Above ice, -40 – 0°C	272.62	22.46

Table 9: Parameters for dew point (T_d) calculation.

Please note that “ln(...)” denotes the natural logarithm. For RH and T the linearized and compensated values for relative humidity and temperature shall be applied.

For more information on dew point calculation see Application Note “Introduction to Humidity”.

5 Environmental Stability

If sensors are qualified for assemblies or devices, please make sure that they experience same conditions as the reference sensor. It should be taken into account that response times in assemblies may be longer, hence enough dwell time for the measurement shall be granted. For detailed information please consult Application Note “Testing Guide”.

SHT7x have been tested according to the test conditions given in Table 11. Sensor performance under other test conditions cannot be guaranteed and is not part of the sensor specifications. Especially, no guarantee can be given for sensor performance in the field or for customer’s specific application.

Please contact Sensirion for detailed information.

¹³ If wetted excessively (strong condensation of water on sensor surface), sensor output signal can drop below 100%RH (even below 0%RH in some cases), but the sensor will recover completely when water droplets evaporate. The sensor is not damaged by water immersion or condensation.

Environment	Standard	Results ¹⁴
HTOL	125°C, 1000 h	Within specifications
TC	-40°C - 125°C, 500 cycles Acc. JESD22-A104-C	Within specifications
THU	85°C / 85%RH, 1000h	Within specifications
ESD immunity	MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at ±2kV)	Qualified
Latch-up	force current of ±100mA with T _{amb} = 80°C, acc. JEDEC 17	Qualified

Table 10: Qualification tests: HTSL = High Temperature Storage Lifetime, TC = Temperature Cycles, UHST = Unbiased Highly accelerated temperature and humidity Test, THU = Temperature humidity unbiased

6 Packaging

6.1 Packaging type

The device is supplied in a single-in-line pin type package. The sensor housing consists of a Liquid Crystal Polymer (LCP) cap with epoxy glob top on a standard 0.6 mm FR4 substrate. The sensor head is connected to the pins, by a small bridge to minimize heat conduction and response times. The pins are made of Cu/Be alloy coated with 1.3µm Ni and 0.5µm Au, which are soldered to the FR4 substrate by lead-free solder paste. The gold plated back side of the sensor head is connected to the GND pin. A 100nF capacitor is mounted on the back side between VDD and GND. The device is fully RoHS and WEEE compliant – thus it is free of of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

Size including pins is 19.5 x 5.08 x 3.1mm. Total weight: 168 mg, weight of sensor head: 73 mg.

All pins are Au plated to avoid corrosion. They can be soldered or mate with most 1.27 mm (0.05”) sockets, for example: Preci-dip / Mill-Max R851-83-004-20-001 or similar.

6.2 Traceability Information

All SHT7x are marked with an alphanumeric, three digit code on the chip cap – see “B2G” on Figure 1. The lot numbers allow full traceability through production, calibration and testing. No information can be derived from the code directly, respective data is stored at Sensirion.

Labels on the reels are displayed in Figure 14 and Figure 15, they both give traceability information.



Figure 14: First label on reel: XX = Sensor Type (71 for SHT71), NN = Chip Version (04 for V4), Y = last digit of year, RRR = number of sensors on reel divided by 10 (200 for 2000 units), TTTTT = Traceability Code.

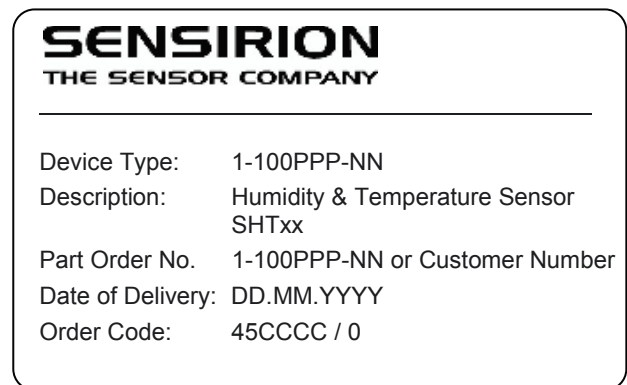


Figure 15: Second label on reel: For Device Type and Part Order Number please refer to Table 12, Delivery Date (also Date Code) is date of packaging of sensors (DD = day, MM = month, YYYY = year), CCCC = number of order.

6.3 Shipping Package

SHT7x are shipped in 32mm tape at 50pcs each – for details see Figure 16 and Table 12. Reels are individually labeled with barcode and human readable labels, see section 6.2.

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT71	Tape Stripes	50	1-100092-04
SHT75	Tape Stripes	50	1-100071-04

Table 11: Packaging types per sensor type.

Dimensions of packaging tape are given in Figure 16. All tapes have a 7 pockets empty leader tape (first pockets of the tape) and a 7 pockets empty trailer tape (last pockets of the tape).

¹⁴ According to accuracy and long term drift specification given on Page 2.

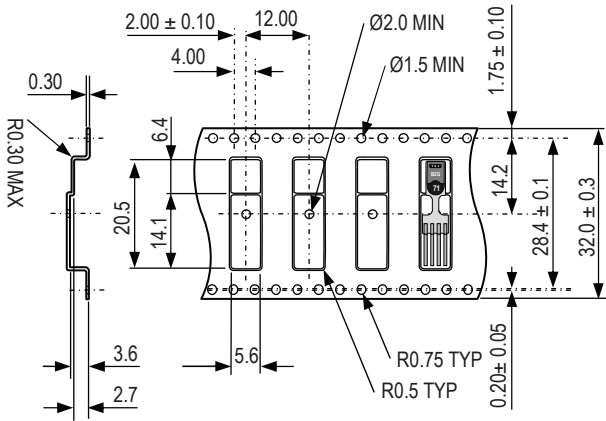


Figure 16: Tape configuration and unit orientation within tape, dimensions in mm (1mm = 0.039inch). Leader tape is to the right of the figure, trailer tape to the left.

Revision History

Date	Version	Page(s)	Changes
March 2007	3.0	1 – 10	Data sheet valid for SHTxx-V4 and SHTxx-V3
July 2008	4.0	1 – 10	New release, rework of datasheet
April 2009	4.2	2, 7	Amended foot note 2, communication diagram changed (Figure 12)
May 2010	4.3	1 – 11	Errors eliminated, information added – for details please ask for change protocol.
December 2011	5	1, 7-9	References to V3 sensors eliminated.

Important Notices

Warning, Personal Injury

Do not use this product as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury. Do not use this product for applications other than its intended and authorized use. Before installing, handling, using or servicing this product, please consult the data sheet and application notes. Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

If the Buyer shall purchase or use SENSIRION products for any unintended or unauthorized application, Buyer shall defend, indemnify and hold harmless SENSIRION and its officers, employees, subsidiaries, affiliates and distributors against all claims, costs, damages and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if SENSIRION shall be allegedly negligent with respect to the design or the manufacture of the product.

ESD Precautions

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation, take customary and statutory ESD precautions when handling this product.

See application note "ESD, Latchup and EMC" for more information.

Warranty

SENSIRION warrants solely to the original purchaser of this product for a period of 12 months (one year) from the date of delivery that this product shall be of the quality, material and workmanship defined in SENSIRION's published specifications of the product. Within such period, if proven to be defective, SENSIRION shall repair and/or replace this product, in SENSIRION's discretion, free of charge to the Buyer, provided that:

- notice in writing describing the defects shall be given to SENSIRION within fourteen (14) days after their appearance;

- such defects shall be found, to SENSIRION's reasonable satisfaction, to have arisen from SENSIRION's faulty design, material, or workmanship;
- the defective product shall be returned to SENSIRION's factory at the Buyer's expense; and
- the warranty period for any repaired or replaced product shall be limited to the unexpired portion of the original period.

This warranty does not apply to any equipment which has not been installed and used within the specifications recommended by SENSIRION for the intended and proper use of the equipment. EXCEPT FOR THE WARRANTIES EXPRESSLY SET FORTH HEREIN, SENSIRION MAKES NO WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCT. ANY AND ALL WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE EXPRESSLY EXCLUDED AND DECLINED.

SENSIRION is only liable for defects of this product arising under the conditions of operation provided for in the data sheet and proper use of the goods. SENSIRION explicitly disclaims all warranties, express or implied, for any period during which the goods are operated or stored not in accordance with the technical specifications.

SENSIRION does not assume any liability arising out of any application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All operating parameters, including without limitation recommended parameters, must be validated for each customer's applications by customer's technical experts. Recommended parameters can and do vary in different applications.

SENSIRION reserves the right, without further notice, (i) to change the product specifications and/or the information in this document and (ii) to improve reliability, functions and design of this product.

Copyright© 2011, SENSIRION.
CMOSens® is a trademark of Sensirion
All rights reserved

Headquarters and Subsidiaries

SENSIRION AG
Laubisruetistr. 50
CH-8712 Staefa ZH
Switzerland

phone: +41 44 306 40 00
fax: +41 44 306 40 30
info@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion AG (Germany)
phone: +41 44 927 11 66
info@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion Inc., USA
phone: +1 805 409 4900
info_us@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion Japan Co. Ltd.
phone: +81 3 3444 4940
info@sensirion.co.jp
www.sensirion.co.jp

Sensirion Korea Co. Ltd.
phone: +82 31 345 0031 3
info@sensirion.co.kr
www.sensirion.co.kr

Sensirion China Co. Ltd.
phone: +86 755 8252 1501
info@sensirion.com.cn
www.sensirion.com.cn

To find your local representative, please visit www.sensirion.com/contact



Miniature I²C Digital Barometer

The MPL115A2 is an absolute pressure sensor with a digital I²C output targeting low cost applications. A miniature 5 x 3 x 1.2 mm LGA package is ideally suited for the space constrained requirements of portable electronic devices. Low current consumptions of 5 μ A during Active mode and 1 μ A during Shutdown (Sleep) mode are essential when focusing on low-power applications. The wide operating temperature range spans from -40°C to +105°C to fit demanding environmental conditions.

The MPL115A2 employs a MEMS pressure sensor with a conditioning IC to provide accurate pressure measurements from 50 to 115 kPa. An integrated ADC converts pressure and temperature sensor readings to digitized outputs via a I²C port. Factory calibration data is stored internally in an on-board ROM. Utilizing the raw sensor output and calibration data, the host microcontroller executes a compensation algorithm to render *Compensated Absolute Pressure* with ± 1 kPa accuracy.

The MPL115A2 pressure sensor's small form factor, low power capability, precision, and digital output optimize it for barometric measurement applications.

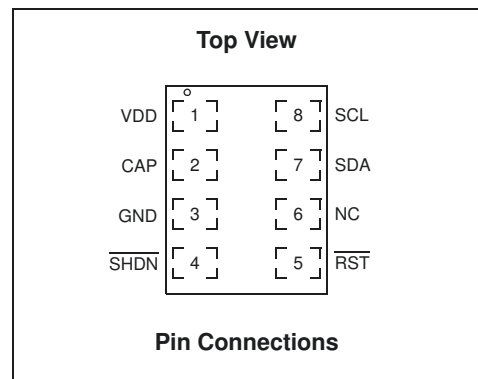
Features

- Digitized pressure and temperature information together with programmed calibration coefficients for host micro use.
- Factory calibrated
- 50 kPa to 115 kPa absolute pressure
- ± 1 kPa accuracy
- 2.375V to 5.5V supply
- Integrated ADC
- I²C Interface (operates up to 400 kHz)
- 7-bit I²C address = 0x60
- Monotonic pressure and temperature data outputs
- Surface mount RoHS compliant package

Application Examples

- Barometry (portable and desktop)
- Altimeters
- Weather stations
- Hard-disk drives (HDD)
- Industrial equipment
- Health monitoring
- Air control systems

MPL115A2
50 to 115 kPa



ORDERING INFORMATION									
Device Name	Package Options	Case No.	# of Ports			Pressure Type			Digital Interface
			None	Single	Dual	Gauge	Differential	Absolute	
MPL115A2	Tray	2015	•					•	I ² C
MPL115A2T1	Tape & Reel (1000)	2015	•					•	I ² C

1 Block Diagram and Pin Descriptions

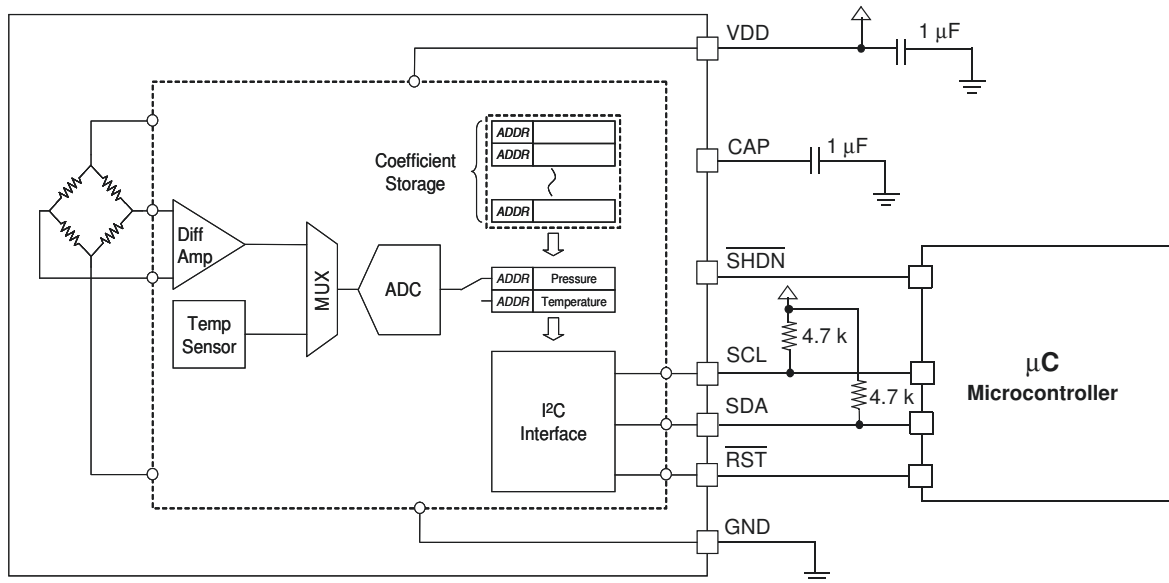


Figure 1. Block Diagram and Pin Connections

Table 1. Pin Description

Pin	Name	Function
1	VDD	VDD Power Supply Connection: VDD range is 2.375V to 5.5V.
2	CAP	1 μ F connected to ground.
3	GND	Ground
4	$\overline{\text{SHDN}}$	Shutdown: Connect to GND to disable the device. When in shutdown, the part draws no more than 1 μ A supply current and all communications pins ($\overline{\text{RST}}$, SCL, SDA) are high impedance. Connect to VDD for normal operation.
5	$\overline{\text{RST}}$	Reset: Connect to ground to disable I ² C communications.
6	NC	NC: No connection
7	SDA ⁽¹⁾	SDA: Serial data I/O line
8	SCL ⁽¹⁾	I ² C Serial Clock Input.

1. Use 4.7k pullup resistors for I²C communication.

2 Mechanical and Electrical Specifications

2.1 Maximum Ratings

Voltage (with respect to GND unless otherwise noted)

V_{DD}	-0.3 V to +5.5 V
\overline{SHDN} , RST, SDA, SCL	-0.3 V to $V_{DD}+0.3$ V
Operating Temperature Range	-40°C to +105°C
Storage Temperature Range	-40°C to +125°C
Overpressure	1000 kPa

2.2 Operating Characteristics

V_{DD} = 2.375 V to 5.5 V, T_A = -40°C to +105°C, unless otherwise noted. Typical values are at V_{DD} = 3.3 V, T_A = +25°C.

Ref	Parameters	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Units
1	Operating Supply Voltage	V_{DD}		2.375	3.3	5.5	V
2	Supply Current	I_{DD}	Shutdown (\overline{SHDN} = GND)	—	—	1	μ A
			Standby	—	3.5	10	μ A
			Average – at one measurement per second	—	5	6	μ A
Pressure Sensor							
3	Range			50	—	115	kPa
4	Resolution			—	0.15	—	kPa
5	Accuracy		-20°C to 85°C	—	—	± 1	kPa
6	Power Supply Rejection		Typical operating circuit at DC		0.1	—	kPa/V
			100 mV p-p 217 Hz square wave plus 100 mV pseudo random noise with 10 MHz bandwidth		0.1	—	kPa
7	Conversion Time (Start Pressure and Temperature Conversion)	t_c	Time between start convert command and data available in the Pressure and Temperature registers	—	1.6	3	ms
8	Wakeup Time	t_w	Time between leaving Shutdown mode (\overline{SHDN} goes high) and communicating with the device to issue a command or read data.	—	3	5	ms
I²C I/O Stages: SCL, SDA							
9	SCL Clock Frequency	f_{SCL}		—	—	400	kHz
10	Low Level Input Voltage	VIL		—	—	$0.3V_{DD}$	V
11	High Level Input Voltage	VIH		$0.7V_{DD}$	—	—	V
I²C Outputs: SDA							
12	Data Setup Time	t_{SU}	Setup time from command receipt to ready to transmit	0	—	0.4	s
I²C Addressing							
MPL115A2 uses 7-bit addressing, does not acknowledge the general call address 0000000. Slave address has been set to 0x60 or 1100000.							

3 Overview of Functions/Operation

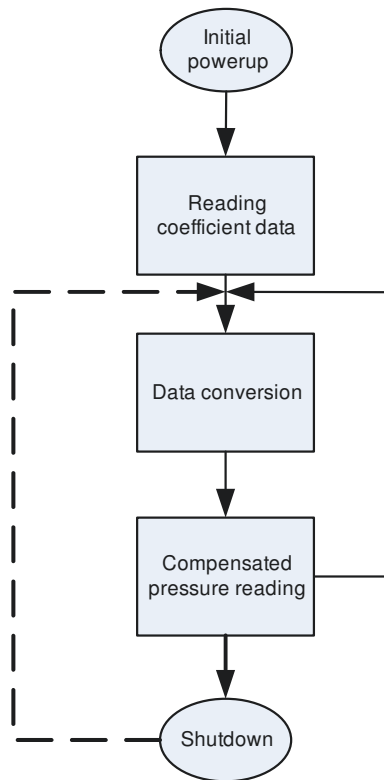


Figure 2. Sequence Flow Chart

The MPL115A interfaces to a host (or system) microcontroller in the user's application. All communications are via I²C. A typical usage sequence is as follows:

Initial Power-up

All circuit elements are active. I²C port pins are high impedance and associated registers are cleared. The device then enters standby mode.

Reading Coefficient Data

The user then typically accesses the part and reads the coefficient data. The main circuits within the slave device are disabled during read activity. The coefficients are usually stored in the host microcontroller local memory but can be re-read at any time.

It is not necessary to read the values stored in the host microcontroller multiple times because the coefficients within a device are constant and do not change. However, note that the coefficients will be different from device to device, and cannot be used for another part.

Data Conversion

This is the first step that is performed each time a new pressure reading is required which is initiated by the host sending the CONVERT command. The main system circuits are activated (wake) in response to the command and after the conversion completes, the result is placed into the Pressure and Temperature ADC output registers.

The conversion completes within the maximum conversion time, t_c (see Row 7, in the Operating Characteristics Table). The device then enters standby mode.

Compensated Pressure Reading

After the conversion has been given sufficient time to complete, the host microcontroller reads the result from the ADC output registers and calculates the Compensated Pressure, a barometric/atmospheric pressure value which is compensated for changes in temperature and pressure sensor linearity. This is done using the coefficient data from the MPL115A and the raw sampled pressure and temperature ADC output values, in a compensation equation (detailed later). Note that this is an absolute pressure measurement with a vacuum as a reference.

From this step the host controller may either wait and then return to the Data Conversion step to obtain the next pressure reading or it may go to the Shutdown step.

Shutdown

For longer periods of inactivity the user may assert the $\overline{\text{SHDN}}$ input by driving this pin low to reduce system power consumption. This removes power from all internal circuits, including any registers. In the shutdown state, the Pressure and Temperature registers will be reset, losing any previous ADC output values.

This step is exited by taking the $\overline{\text{SHDN}}$ pin high. Wait for the maximum wakeup time, t_w (see Row 8, in the Operating Characteristics Table), after which another pressure reading can be taken by transitioning to the data Conversion step.

Table 2. Device Memory Map

Address	Name	Description	Size (bits)
0x00	Padc_MSB	10-bit Pressure ADC output value MSB	8
0x01	Padc_LSB	10-bit Pressure ADC output value LSB	2
0x02	Tadc_MSB	10-bit Temperature ADC output value MSB	8
0x03	Tadc_LSB	10-bit Temperature ADC output value LSB	2
0x04	a0_MSB	a0 coefficient MSB	8
0x05	a0_LSB	a0 coefficient LSB	8
0x06	b1_MSB	b1 coefficient MSB	8
0x07	b1_LSB	b1 coefficient LSB	8
0x08	b2_MSB	b2 coefficient MSB	8
0x09	b2_LSB	b2 coefficient LSB	8
0x0A	c12_MSB	c12 coefficient MSB	8
0x0B	c12_LSB	c12 coefficient LSB	8
0x0C	Reserved*	—	—
0x0D	Reserved*	—	—
0x0E	Reserved*	—	—
0x0F	Reserved*	—	—
0x10	Reserved	—	—
0x11	Reserved	—	—
0x12	CONVERT	Start Pressure and Temperature Conversion	—

*These registers are set to 0x00. These are reserved, and were previously utilized as Coefficient values, c11 and c22, which were always 0x00.

For values with less than 16 bits, the lower LSBs are zero. For example, c12 is 14 bits and is stored into 2 bytes as follows:

$$c12 \text{ MS byte} = c12[13:6] = [c12_{b13}, c12_{b12}, c12_{b11}, c12_{b10}, c12_{b9}, c12_{b8}, c12_{b7}, c12_{b6}]$$

$$c12 \text{ LS byte} = c12[5:0] \ \& \ "00" = [c12_{b5}, c12_{b4}, c12_{b3}, c12_{b2}, c12_{b1}, c12_{b0}, 0, 0]$$

3.1 Pressure, Temperature and Coefficient Bit-Width Specifications

The table below specifies the initial coefficient bit-width specifications for the compensation algorithm and the specifications for Pressure and Temperature ADC values.

Pressure, Temperature and Compensation Coefficient Specifications						
	a0	b1	b2	c12	Padc	Tadc
Total Bits	16	16	16	14	10	10
Sign Bits	1	1	1	1	0	0
Integer Bits	12	2	1	0	10	10
Fractional Bits	3	13	14	13	0	0
dec pt zero pad	0	0	0	9	0	0

Example Binary Format Definitions:

a0 Signed, Integer Bits = 12, Fractional Bits = 3 :	Coeff a0 = S I ₁₁ I ₁₀ I ₉ I ₈ I ₇ I ₆ I ₅ I ₄ I ₃ I ₂ I ₁ I ₀ · F ₂ F ₁ F ₀
b1 Signed, Integer Bits = 2, Fractional Bits = 13 :	Coeff b1 = S I ₁ I ₀ · F ₁₂ F ₁₁ F ₁₀ F ₉ F ₈ F ₇ F ₆ F ₅ F ₄ F ₃ F ₂ F ₁ F ₀
b2 Signed, Integer Bits = 1, Fractional Bits = 14 :	Coeff b2 = S I ₀ · F ₁₃ F ₁₂ F ₁₁ F ₁₀ F ₉ F ₈ F ₇ F ₆ F ₅ F ₄ F ₃ F ₂ F ₁ F ₀
c12 Signed, Integer Bits = 0, Fractional Bits = 13, dec pt zero pad = 9 :	Coeff c12 = S 0. 000 000 000 F ₁₂ F ₁₁ F ₁₀ F ₉ F ₈ F ₇ F ₆ F ₅ F ₄ F ₃ F ₂ F ₁ F ₀
Padc Unsigned, Integer Bits = 10 :	Padc U = I ₉ I ₈ I ₇ I ₆ I ₅ I ₄ I ₃ I ₂ I ₁ I ₀
Tadc Unsigned, Integer Bits = 10 :	Tadc U = I ₉ I ₈ I ₇ I ₆ I ₅ I ₄ I ₃ I ₂ I ₁ I ₀

NOTE: Negative coefficients are coded in 2's complement notation.

3.2 Compensation

The 10-bit compensated pressure output, Pcomp, is calculated as follows:

$$P_{comp} = a_0 + (b_1 + c_{12} \cdot T_{adc}) \cdot P_{adc} + b_2 \cdot T_{adc} \quad \text{Eqn. 1}$$

Where:

- Padc is the 10-bit pressure ADC output of the MPL115A
- Tadc is the 10-bit temperature ADC output of the MPL115A
- a0 is the pressure offset coefficient
- b1 is the pressure sensitivity coefficient
- b2 is the temperature coefficient of offset (TCO)
- c12 is the temperature coefficient of sensitivity (TCS)

Pcomp will produce a value of 0 with an input pressure of 50 kPa and will produce a full-scale value of 1023 with an input pressure of 115 kPa.

$$\text{Pressure (kPa)} = P_{comp} \cdot \left[\frac{115 - 50}{1023} \right] + 50 \quad \text{Eqn. 2}$$

3.3 Evaluation Sequence, Arithmetic Circuits

The following is an example of the calculation for Pcomp, the compensated pressure output. Input values are in **bold**.

$$c_{12}x_2 = \mathbf{c12} * \mathbf{Tadc}$$

$$a_1 = \mathbf{b1} + c_{12}x_2$$

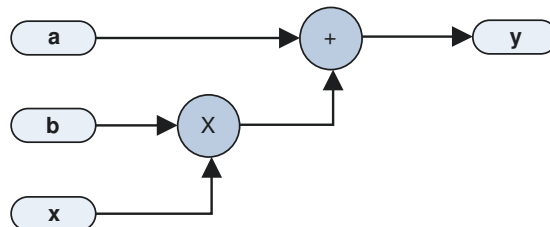
$$a_1x_1 = a_1 * \mathbf{Padc}$$

$$y_1 = \mathbf{a0} + a_1x_1$$

$$a_2x_2 = \mathbf{b2} * \mathbf{Tadc}$$

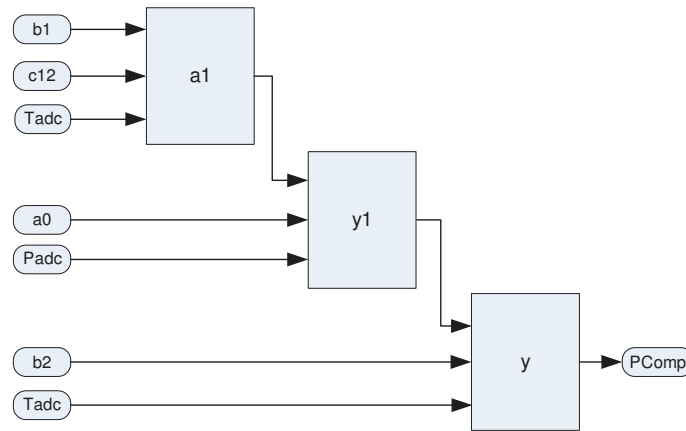
$$P_{comp} = y_1 + a_2x_2$$

This can be calculated as a succession of Multiply Accumulates (MACs) operations of the form $y = a + b * x$:



The polynomial can be evaluated (Equation 1) as a sequence of 3 MACs:

$$P_{comp} = a_0 + (b_1 + c_{12} \cdot T_{adc}) \cdot P_{adc} + b_2 \cdot T_{adc}$$



Please refer to Freescale application note AN3785 for more detailed notes on implementation.

3.4 I²C Device Read/Write Operations

All device read/write operations are memory mapped. Device actions e.g. “Start Conversions” are controlled by writing to the appropriate memory address location.

- For I²C the 7-bit Device Address (from Table 2) has a read/write toggle bit, where the least significant bit is ‘1’ for read operations or ‘0’ for write operations. The Device Address is 0xC0 for a *Write* and the Device Address is 0xC1 for a *Read*.
- The most significant bit in the Command tables below is not used and is don't care (X). In examples given it's set to ‘0’.

Refer to Sensor I²C Setup and FAQ Application Note AN4481 for more information on I²C communication between the sensor and host controller.

Table 3. I²C Write Commands

Command	Binary	HEX ⁽¹⁾
Devices Address + Write bit	1100 0000	0xC0
Start Conversions	X001 0010	0x12

X = Don't care

1 = The command byte needs to be paired with a 0x00 as part of the I²C exchange to complete the passing of Start Conversions.

The actions taken by the part in response to each command are as follows:

Table 4. I²C Write Command Description

Command	Action Taken
Start Conversions	Wake main circuits. Start clock. Allow supply stabilization time. Select pressure sensor input. Apply positive sensor excitation and perform A to D conversion. Select temperature input. Perform A to D conversion. Load the Pressure and Temperature registers with the result. Shut down main circuits and clock.

Table 5. I²C Read Command Description

Command	Binary	HEX ⁽¹⁾
Device Address + Read bit	1100 0001	0xC1
Read Pressure MSB	X000 0000	0x00
Read Pressure LSB	X000 0001	0x01
Read Temperature MSB	X000 0010	0x02
Read Temperature LSB	X000 0011	0x03
Read Coefficient data byte 1	X000 0100	0x04

X = don't care

These are MPL115A2 I²C commands to read coefficients, execute Pressure and Temperature conversions, and to read Pressure and Temperature data. The sequence of the commands for the interaction is given as an example to operate the MPL115A2.

Utilizing this gathered data, an example of the calculating the Compensated Pressure reading is given in floating point notation.

I²C Commands (simplified for communication)

Device Address + write bit "To Write" = 0xC0

Device Address + read bit "To Read" = 0xC1

Command to Write "Convert Pressure and Temperature" = 0x12

Command to Read "Pressure ADC High byte" = 0x00

Command to Read "Pressure ADC Low byte" = 0x01

Command to Read "Temperature ADC High byte" = 0x02

Command to Read "Temperature ADC Low byte" = 0x03

Command to Read "Coefficient data byte 1 High byte" = 0x04

Read Coefficients:

[0xC0], [0x04], [0xC1], [0x3E], [0xCE], [0xB3], [0xF9], [0xC5], [0x17], [0x33], [0xC8]

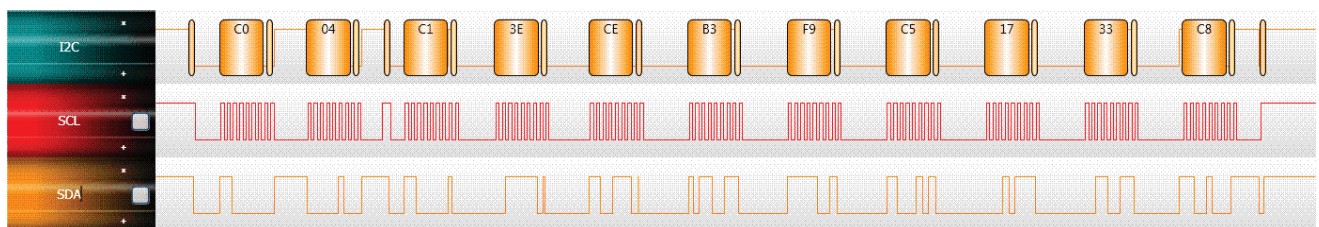


Figure 3. I²C Read Coefficient Datagram

a0 coefficient MSB = 0x3E
 a0 coefficient LSB = 0xCE a0 coefficient = 0x3ECE = 2009.75

 b1 coefficient MSB = 0xB3
 b1 coefficient LSB = 0xF9 b1 coefficient = 0xB3F9 = -2.37585

 b2 coefficient MSB = 0xC5
 b2 coefficient LSB = 0x17 b2 coefficient = 0xC517 = -0.92047

 c12 coefficient MSB = 0x33
 c12 coefficient LSB = 0xC8 c12 coefficient = 0x33C8 = 0.000790

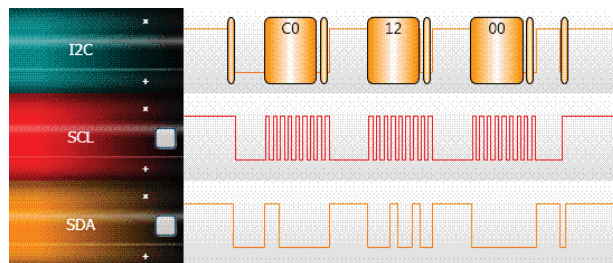


Figure 4. I²C Start Conversion Datagram
 Command to I²C Start Conversion, 0x12

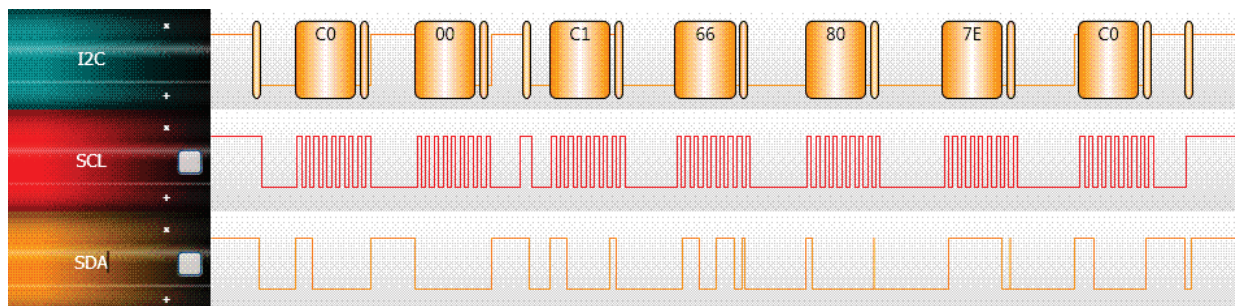


Figure 5. I²C Read Results Datagram

Pressure MSB = 0x66
 Pressure LSB = 0x80 Pressure = 0x6680 = 0110 0110 1100 0000
 = 410 ADC counts

 Temperature MSB = 0x7E
 Temperature LSB = 0xC0 Temperature = 0x7EC0 = 0111 1110 1100 0000
 = 507 ADC counts

3.5 Example of Pressure Compensated Calculation in Floating-point Notation

a0 coefficient = 2009.75
b1 coefficient = -2.37585
b2 coefficient = -0.92047
c12 coefficient = 0.000790

Pressure = 410 ADC counts
Temperature = 507 ADC counts

Pressure Compensation:

$$P_{\text{comp}} = a_0 + (b_1 + c_{12} \cdot T_{\text{adc}}) \cdot P_{\text{adc}} + b_2(c)$$

Using the evaluation sequence shown in Section 3.3:

$c_{12}x_2 = c_{12} \cdot T_{\text{adc}} = 0.000790 \cdot 507 = 0.40053$
 $a_1 = b_1 + c_{12}x_2 = -2.37585 + 0.40053 = -1.97532$
 $a_{1x1} = a_1 \cdot P_{\text{adc}} = -1.97532 \cdot 410 = -809.8812$
 $y_1 = a_0 + a_{1x1} = 2009.75 + (-809.8812) = 1199.8688$
 $a_{2x2} = b_2 \cdot T_{\text{adc}} = -0.92047 \cdot 507 = -466.67829$
 $P_{\text{Comp}} = y_1 + a_{2x2} = 1199.8688 + (-466.67829) = 733.19051$

$$\begin{aligned} \text{Pressure (kPa)} &= P_{\text{comp}} \cdot \left[\frac{115 - 50}{1023} \right] + 50 \\ &= 96.59 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$= 733.19 \cdot \left[\frac{115 - 50}{1023} \right] + 50$$

4 Solder Recommendations

1. Use SAC solder alloy (i.e., Sn-Ag-Cu) with a melting point of about 217°C. It is recommended to use SAC305 (i.e., Sn-3.0 wt.% Ag-0.5 wt.% Cu).
2. Reflow
 - Ramp up rate: 2 to 3°C/s.
 - Preheat flat (soak): 110 to 130s.
 - Reflow peak temperature: 250°C to 260°C (depends on exact SAC alloy composition).
 - Time above 217°C: 40 to 90s (depends on board type, thermal mass of the board/quantities in the reflow).
 - Ramp down: 5 to 6°C/s.
 - Using an inert reflow environment (with O₂ level about 5 to 15 ppm).

NOTE: The stress level and signal offset of the device also depends on the board type, board core material, board thickness and metal finishing of the board.

Please refer to Freescale application note AN3150, Soldering Recommendations for Pressure Sensor Devices for any additional information.

5 Handling Recommendations

It is recommended to handle the MPL115A pressure sensor with a vacuum pick and place tool. Sharp objects utilized to move the MPL115A pressure sensor increase the possibility of damage via a foreign object/tool into the small exposed port.

The sensor die is sensitive to light exposure. Direct light exposure through the port hole can lead to varied accuracy of pressure measurement. Avoid such exposure to the port during normal operation.

Please note that the Pin 1 designator is on the bottom of the package. Do not use the port as a orientation reference in production.

6 Soldering/Landing Pad Information

The LGA package is compliant with the RoHS standard. It is recommended to use a no-clean solder paste to reduce cleaning exposure to high pressure and chemical agents that can damage or reduce life span of the Pressure sensing element.

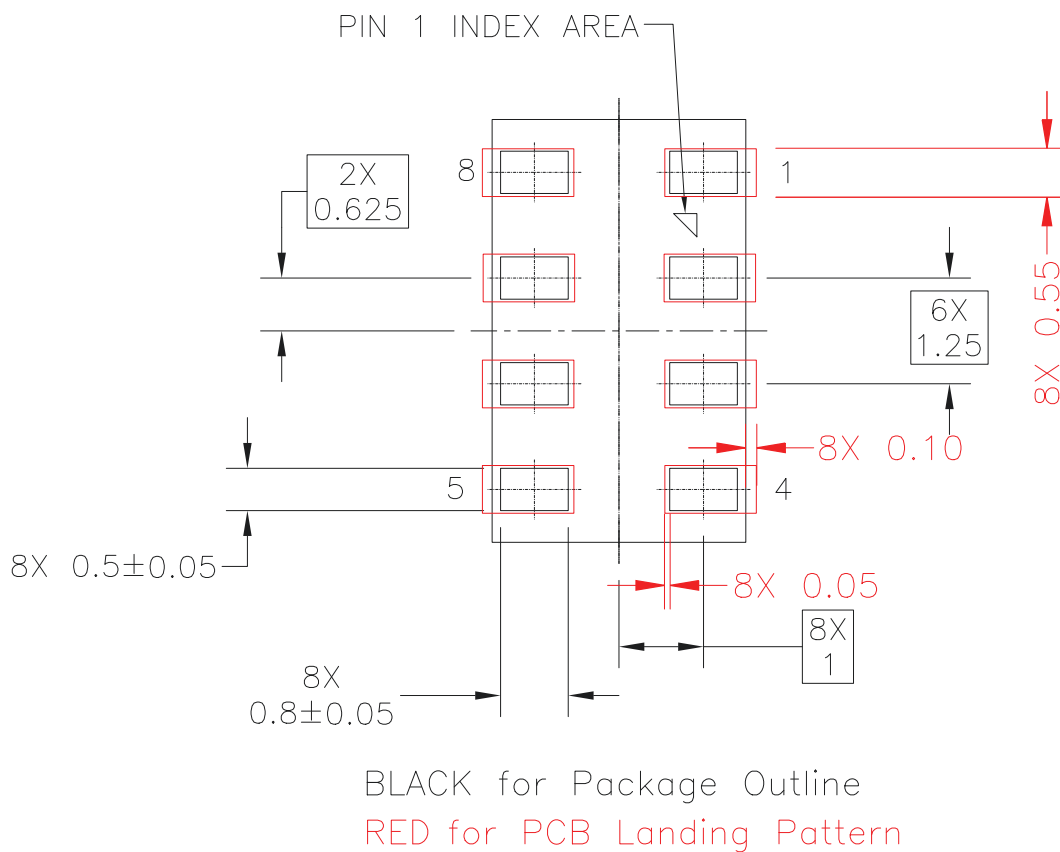


Figure 6. MPL115A2 Recommended PCB Landing Pattern

7 Tape and Reel Specifications

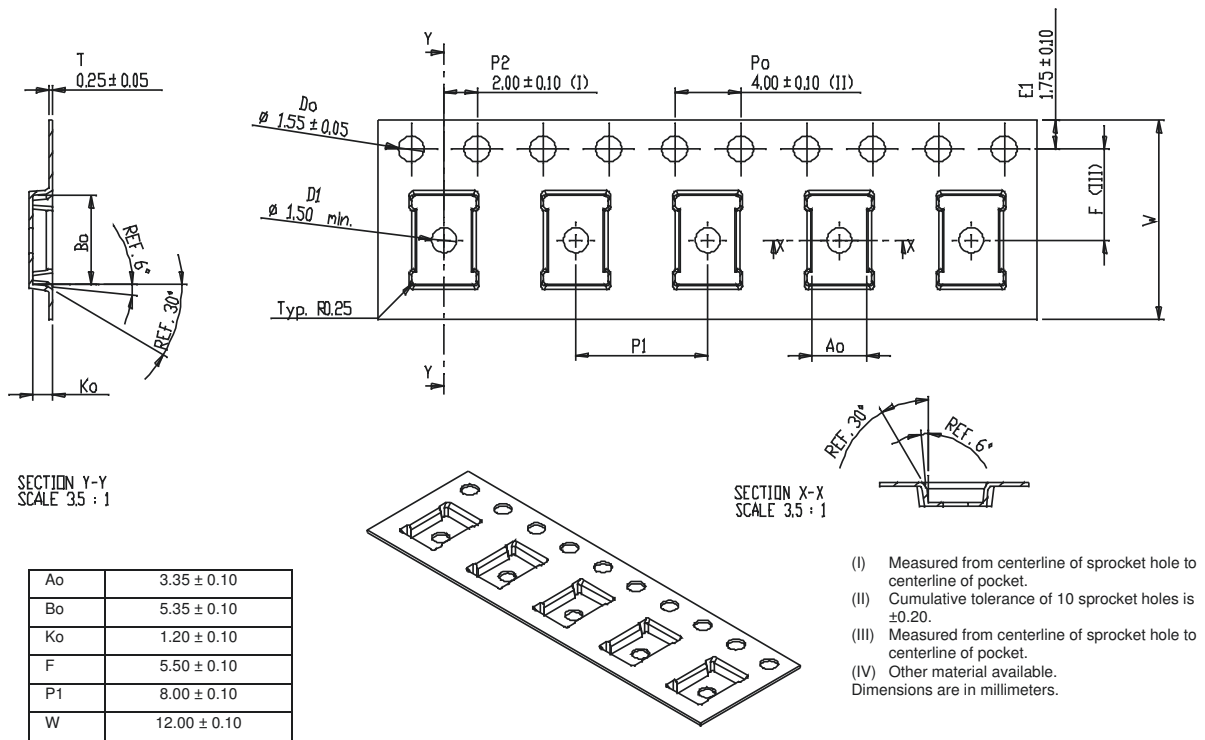


Figure 7. LGA (3 x 5) Embossed Carrier Tape Dimensions

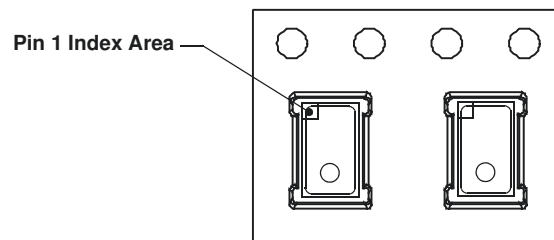
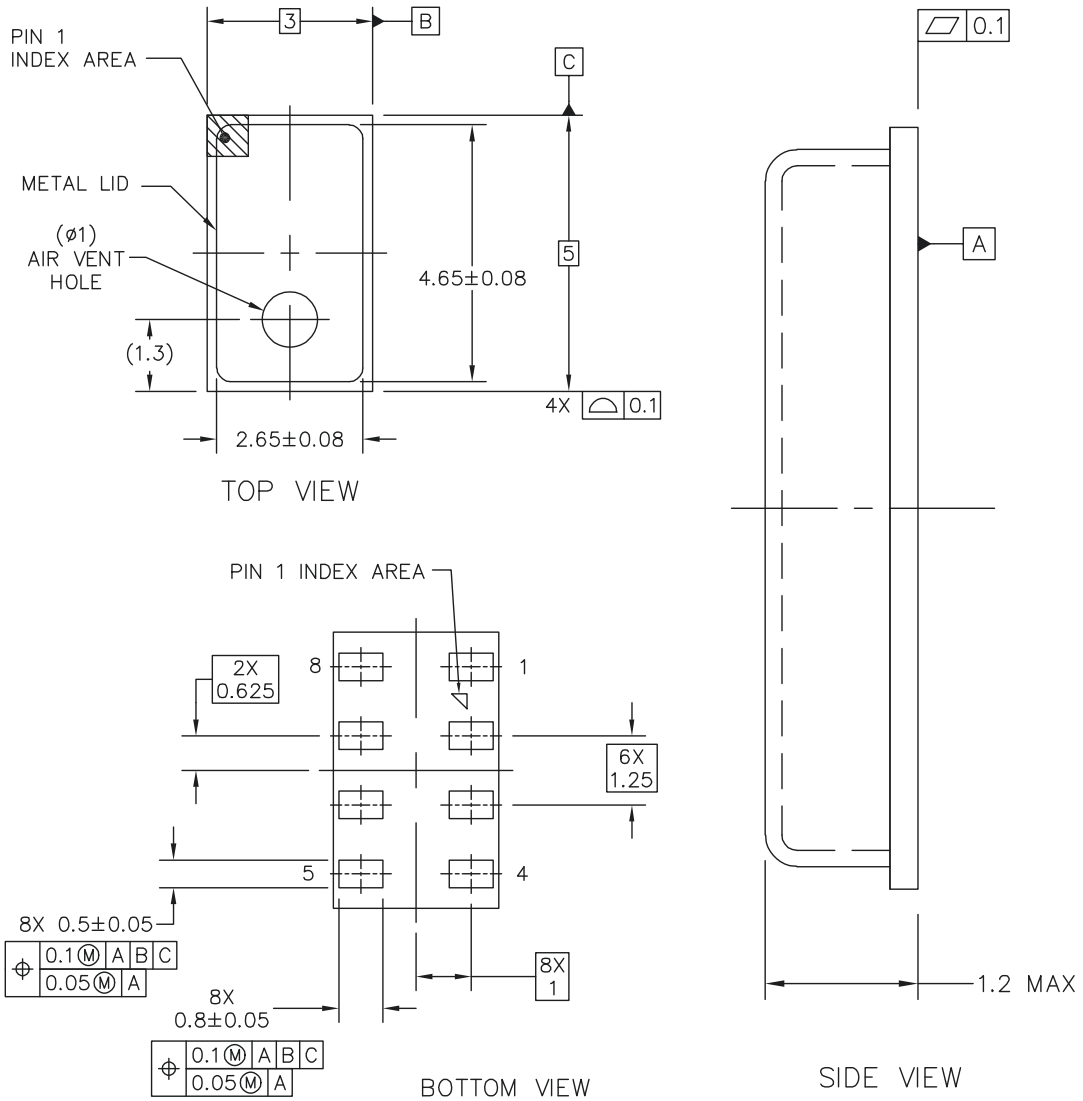


Figure 8. Device Orientation in Chip Carrier

PACKAGE DIMENSIONS



NOTES:

1. ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS.
2. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M-1994

© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	MECHANICAL OUTLINE	PRINT VERSION NOT TO SCALE
TITLE: LGA 8 I/O, 3 X 5 X 1.25 PITCH, SENSOR 1.2MAX MM PKG	DOCUMENT NO: 98ASA10829D	REV: A
	CASE NUMBER: 2015-02	10 MAR 2010
	STANDARD: NON-JEDEC	

**CASE 2015-02
ISSUE A
LGA PACKAGE**

Table 6. Revision History

Revision number	Revision date	Description of changes
8	06/2012	<ul style="list-style-type: none">• Updated graphic on page 1, Section 2.2 Operating Characteristics: Ref 7: Conversion Time: changed Typ from 3.0 to 1.6, Section 3.0 Overview of Functions/Operation: Reading Coefficient Data deleted statement that reading of coefficients may be executed only once, Table 2: added Size (bits) column in table, added new Section 3.4 I²C Device Read/Write Operations
9	10/2012	<ul style="list-style-type: none">• Changed Example Binary format definitions b1 signed From: 7 To: 13, added F₁₁ to Coeff b1, b2 and c12 on page 6.• Removed MPL115A2T2 from ordering table.

How to Reach Us:

Home Page:
freescale.com

Web Support:
freescale.com/support

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits based on the information in this document.

Freescale reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale makes no warranty, representation, or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale data sheets and/or specifications can and do vary in different applications, and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "typicals," must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale sells products pursuant to standard terms and conditions of sale, which can be found at the following address: freescale.com/SalesTermsandConditions.

Freescale, the Freescale logo, Altivec, C-5, CodeTest, CodeWarrior, ColdFire, C-Ware, Energy Efficient Solutions logo, Kinetis, mobileGT, PowerQUICC, Processor Expert, QorIQ, Qorivva, StarCore, Symphony, and VortiQa are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc., Reg. U.S. Pat. & Tm. Off. Airfast, BeeKit, BeeStack, ColdFire+, CoreNet, Flexis, MagniV, MXC, Platform in a Package, QorIQ Qonverge, QUICC Engine, Ready Play, SafeAssure, SMARTMOS, TurboLink, Vybrid, and Xtrinsic are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.

© 2013 Freescale Semiconductor, Inc.

Document Number: MPL115A2
Rev. 9
02/2013



Radiosonda Vaisala RS92-SGP



Rendimiento probado de las mediciones de ptu

La Radiosonda Vaisala RS92-SGP totalmente digital ofrece el nivel más elevado a nivel mundial de rendimiento de mediciones de PTU gracias al sensor de presión Vaisala BAROCAP*, El sensor de temperatura Vaisala F-THERMOCAP*, y el sensor de humedad Vaisala H-HUMICAP*.

¡Nuevo! Gps con correlación de código

La Radiosonda Vaisala RS92-SGP tiene un código robusto de correlación con el receptor de GPS. Este receptor tiene un motor de búsqueda sumamente rápido que asegura que sean seguidos todos los satélites a la vista. También tiene 12 canales para el seguimiento de señales. El filtrado de la señal de GPS y su amplificación producen un índice excelente de señal –a- ruido: La RS92-SGP en gran medida es inmune a la interferencia de radar u otras fuentes de RF. Si ocurre una avería o mal funcionamiento, una función independiente de vigilancia reiniciará instantáneamente la radiosonda con el fin de minimizar la brecha de seguimiento. El resultado: usted obtiene una disponibilidad continua, con alta resolución de datos de viento, desde la liberación de la radiosonda hasta la altura de estallido.

Features

- Un nivel más elevado de medición y desempeño de PTU
- Tecnología GPS de correlación de código para disponibilidad continua de datos de viento
- La transmisión estable cumple con la norma ETSI EN 302 054-1

Transmisión totalmente digital de datos

La transmisión totalmente digital de datos de la Radiosonda Vaisala RS92-SGP ofrece ventajas importantes sobre la transmisión analógica de datos. La disponibilidad de datos durante el sondeo es excelente y siempre se detectan los errores de telemetría. El transmisor digital también consume mucha menos potencia que el transmisor analógico, y en la banda hay disponibles muchos más canales.

Cumple con las normas etsi para la banda de 400 mhz

La RS92-SGP cumple en su totalidad con las norma europeas ETSI para radioondas que operan en la banda de los 400 MHz, EN 302 054-1. El objetivo de esta norma es el de regular el uso de la banda meteorológica de 400 MHz con el fin de mejorar a nivel mundial la disponibilidad de datos meteorológicos.

¡Nuevo! Conjunto de verificación en tierra gc25

La verificación en tierra de la Radiosonda Vaisala RS92-SGP se lleva a cabo por medio del Conjunto de Verificación en Tierra Vaisala GC25, en una capacidad independiente, y por el equipo en tierra. Este último, a través del enlace de telemetría, lee automáticamente los coeficientes de calibración. El GC25 se utiliza para reacondicionar el sensor de humedad, lo cual remueve cualquier posible contaminación química para asegurar una precisión excelente de la medición de la humedad. La configuración de la frecuencia del transmisor es una tarea simple, que consiste en desplazarse en el despliegue hasta la frecuencia correcta.

CAL-4 CALIBRADO

Los sensores de PTU del RS92-SGP son calibrados por la máquina de calibración CAL-4. Diseñada por Vaisala y construida en nuestros talleres, la CAL-4 es la máquina de calibración más avanzada del mundo, para la producción masiva de sensores de PTU.

Información técnica

Sensores Meteorológicos

TEMPERATURA	VAISALA F-THERMOCAP CABLE CAPACITIVO
Rango de medición	+60°C a -90°C
Tiempo de respuesta (flujo 63.2%, 6m/s)	250 kW
1000 hPa	<0.4 s
100 hPa	<1 s
10 hPa	<2.5 s
Resolución	0.1°C
Exactitud	
Total de incertidumbre en sondeo (*)	0.5°C
Repetibilidad en calibración (**)	0.15°C
Reproductibilidad en sondeo (***)	
1080 - 100 hPa	0.2°C
100 - 20 hPa	0.3°C
20 - 3 hPa	0.5°C

HUMEDAD	VAISALA H-HUMICAP
Capacitor de película delgada, diseño de doble sensor calentado	
Rango de medición	0 a 100% RH
Resolución	1% RH
Tiempo de respuesta	
6 m/s, 1000 hPa, +20°C	<0.5 s
6 m/s, 1000 hPa, -40°C	<20 s
Exactitud	
Total de incertidumbre en sondeo (*)	5% RH
Repetibilidad en calibración (**)	2% RH
Reproductibilidad en sondeo (***)	2% RH

PRESIÓN	SENSOR DE SILICÓN VAISALA BAROCAP
Rango de medición	1000 hPa a 3 hPa
Resolución	0.1 hPa
Exactitud	
Total de incertidumbre en sondeo (*)	
1080 - 100 hPa	1.5 hPa
100 - 3 hPa	0.6 hPa
Repetibilidad en calibración (**)	
1080 - 100 hPa	0.4 hPa
100 - 3 hPa	0.3 hPa
Reproductibilidad en sondeo (***)	
1080 - 100 hPa	0.5 hPa
100 - 3 hPa	0.3 hPa

DIMENSIONES Y PESO	
Dimensiones	220 x 80 x 75 mm
Peso, batería activada por agua	Aprox. 250 g
Peso, batería seca	Aprox. 290 g

BATERÍA	
Batería activada por agua	8 V, nominal
Tiempo de operación	135 min.
Batería seca	9.5V, nominal
Tiempo de Operación	135 mins

TELEMETRÍA

Tipo de transmisor	Sintetizado
Banda de frecuencia	403 MHz
Rango de sintonización	400-406 MHz
Estabilidad de frecuencia, 90% probabilidad	Según EN 302054 -1 (ETSI)
Desviación, pico a pico	4.8 KHz.
Ancho de banda de emisión,	Según EN 302054-1
Potencia de salida (modo alta potencia)	60 mW min
Modulación	GFSK
Enlace descendente de datos	2400 baudios, digital
Ciclo de medición	1 s

RECEPTOR GPS CORRELACIONADO CON EL CÓDIGO	
Número de canales	12
Exactitud de navegación	
Incertidumbre de posicionamiento, horizontal	10 m
Incertidumbre de posicionamiento, vertical	20 m
Incertidumbre de medición de velocidad (***)	0.15 m/s

Estaciones fijas y móviles (SA off, PDP <4)(****)
 Incertidumbre de medición de viento 0.2 m/s (desviación estándar de diferencias, k = 1 nivel de confiabilidad)

*) 2 sigma (k=2) nivel de confiabilidad (95.5%)

Incertidumbre acumulada incluyendo:

- Repetibilidad
- Estabilidad a largo plazo
- Efectos debidos a las condiciones de la medición
- Efecto dinámico
- Efectos debidos a la electrónica de las mediciones

Para humedad T > -50°C
 Para presión T < 45°C

**) Desviación estándar de diferencias entre dos calibraciones sucesivas repetidas, k = 2 nivel de confiabilidad

***) Desviación estándar de diferencias en dobles alrededores

****) La Disponibilidad Selectiva (SA) fue desactivada el 1 de mayo d 2000. La Dilución de Posición de Precisión (PDOP-siglas en Inglés) describe el efecto de la actual geometría satelital GPS sobre la exactitud de los hallazgos de la radiosonda de viento
 Nota: las especificaciones dadas más arriba del desempeño de la presión, temperatura y humedad solo son válidas cuando se usa el Conjunto Vaisala de Verificación en Tierra GC25 para llevar a cabo la verificación en tierra, incluyendo el reacondicionamiento del sensor de humedad.



Vaisala Oyj
 Helsinki, Finland
 Tel. (+358 9) 894 91
 Fax: (+358 9) 8949 2876
 Email: metsales@vaisala.com

For more detailed contact information and for other Vaisala locations visit us at: www.vaisala.com

Bibliografía

- [1] K. E. Trenberth, "Climate diagnostics from global analyses: conservation of mass ECMWF analyses," *J. Clim*, vol. 4.
- [2] A. Hall and S. Manabe, "The Role of Water Vapor Feedback in Unperturbed Climate Variability and Global Warming." *J. Climate*, vol. 12, p. 2327–2346, 1999.
- [3] N. M. Fernández L.I., Meza A.M., "Determinación del contenido de vapor de agua precipitable (pwv) a partir de mediciones gps: primeros resultados en argentina." *"Geoacta" V.34 n.2, ISSN 1852-7744.*
- [4] P. J. M. Malgorzata Szczodrak and C. Gentemann, "Comparision of amsr-e retrievals of total water vapor over the ocean with ship based measurements," *Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science University of Miami, Florida.*
- [5] N. M. Fernández L.I., Meza A.M., "Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the global positioning system," *"Geophysical Research Letters, VOL 22, NO17, Pages 2365-2368.*
- [6] W. Timothy, Lyons, T. Christopher, Reinhard, and J. Noah, "Atmospheric oxygenation three billion years ago," *Nature Review (Nature)*, Bibcode:2014Natur.506..307L. doi:10.1038/nature13068.
- [7] J. Schopf, "Earth's Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution," *Princeton University Press, Princeton, N.J., 1983.*
- [8] Era-interim asimilation model. [Online]. Available: <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>
- [9] Ncep-ncar (r1) asimilation model. [Online]. Available: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ncep-ncar-r1-overview>
- [10] "Standard atmosphere," *International Organization for Standardization*, vol. ISO 253, 1975.
- [11] J. K. Hargreaves, *The Solar-Terrestrial Environment An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere*, May 1995.
- [12] R. P. Turco, "Upper atmosphere aerosols: properties and natural cycles." *The Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft: A first program Report, Nasa Ref. Pub.*, vol. 1272, pp. 63–82, 1992.
- [13] . Murry L. Salby, "The Influence of Planetary-Wave Transience on Horizontal Air Motions in the Stratosphere," *J. Atmos*, vol. 49, pp. 405–421, 1992.

BIBLIOGRAFÍA

- [14] A. Coster, A. Niell, F. Solheim, V. Mendes, P. Toor, Buchmann, K., and C. Upham, "Measurements of precipitable water vapor by gps, radiosondes, and a microwave water vapor radiometer," p. 625–634., 1996.
- [15] E. Chuvieco, "Fundamentos de teledetección espacial, 2da edición," *Editorial RIALP*, 1995.
- [16] "Report of the eos data panel, earth observing system, data and information system," *Data Panel Report, Vol. IIa., NASA Technical Memorandum 87777*, 1986.
- [17] "Nrc committee on earth science and applications from space, a community assessment and strategy for the future, earth science and applications from space, national imperatives for the next decade and beyond." *The National Academies Press, Washington DC, USA* , 2007.
- [18] A. Wexler, "Vapor pressure formulation for water in the range 0° to 100C °," *A Revision J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 80A, p. 775 ff., 1976.
- [19] —, "Vapor pressure formulation for ice," *A Revision J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 81A, pp. 5–20, 1977.
- [20] A. L. Buck, " New equations for computing vapor pressure and enhancement factor," *Advances in Space Research*, vol. 20, pp. 1527–1532, 1991.
- [21] "Sensirion sht 71 datasheet, humidity and temperature sensor, page 8/10," 2011.
- [22] J. J. Braun, "Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System," *PhD.Tesis, University of Colorado.*, 2004.
- [23] University of wyoming, upper air observations. [Online]. Available: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [24] W. M. Organization, *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos*. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, 1996. [Online]. Available: <http://books.google.com.ar/books?id=kfFjAAAACAAJ>
- [25] H. Berg, "Allgemeine Meteorologie." *Dümmler, Bonn.*, 1948.
- [26] Protocolo i2c. [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
- [27] microcontroladores pic. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=PIC18F452>
- [28] modulos xbee pro 868. [Online]. Available: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-pro-868>
- [29] Gps trimble lassen sky ii. [Online]. Available: <http://www.trimble.com/embeddedsystems/lassensk2.aspx?dtID=support>
- [30] Tiny bootloader for pic microcontrollers. [Online]. Available: <http://www.etc.ugal.ro/cchiculita/software/picbootloader.htm>
- [31] R. J. Ross and W. P. Elliot, "Tropospheric Water Vapor Climatology and Trends over North America:1973-93," 1996.

- [32] Xbee rf modules. [Online]. Available: http://www.digi.com/pdf/ds_xbeepr868.pdf
- [33] J. Bava and A. Sanz, "Microondas Para Recepcion Satelital," *Buenos Aires, HASA*, 1995.
- [34] Xctu utility. [Online]. Available: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf
- [35] J. E. Epeloa, B. J. A, and G. Rodriguez, "Thermal Model of Radiosonde System," *Bostom Comsol Conference*.
- [36] S. B., R. A., S. J., and H. C., "Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics," *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, D23104, doi:10.1029/2010JD014457*, 2010.
- [37] M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, "GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 97, no. D14, pp. 15 787–15 801, 1992. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1029/92JD01517>
- [38] M. Bevis, S. Businger, S. Chiswell, H. T., R. Kanthes, C. Anthes, Rocken, and R. Ware, "Gps meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water," 1994.
- [39] V. Mendez, G. Prates, Santoa, G., and L. Langley, "An Evaluation of the accuracy of models for the determination of the weighted mean temperature of the atmosphere." *Proceeding of ION 2000, National Technical Meeting, Anaheim, CA, USA*.
- [40] Solbrig, "Untersuchngen uber die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems." *Diploma Thesis, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany.*, 2000.
- [41] T. Emardson and H. Derks, "On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapor in the European atmosphere." *Meteorological Applications* 7, 61–68, 2000.
- [42] Red sirgas. [Online]. Available: <http://www.sirgas.com>
- [43] A. Coster, F. Niell, V. Solheim, P. Mendes, K. Toor, C. Buchmann, and Upham, "Measurements of Precipitable Water Vapor by GPS, Radiosondes, and a Microwave Water Vapor Radiometer," *ION GPS-96, 625-640*.
- [44] J. J. Brehm and W. J. Mullin, "Introduction to the structure of the matter: A course in modern physics," *Ed. Wiley*, 1989.
- [45] J. A. Bava, "Antenas para radiÓmetros en onda milimÉtrica con haces mÚltiples," PhD thesis, Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, Argentina, 2010.
- [46] F. T. U. R. K. Moore and A. K. Fung-Addison, *Microwave Remote Sensing Active and Passive*. Addison Weslwy Publishing Company, 1981.
- [47] J. C. Comiso and C. L. Parkinson, "Satellite-Observed Changes in the Arctic." *Physics Today*.
- [48] J. Peng, "Polarimetric microwave radiometer calibration," *University of Michigan*, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

- [49] M. A. Janssen, “Atmospheric remote sensing by microwave radiometry,” *Ed. John Wiley and Sons*, 1993.
- [50] J. Sobrino, “Teledetección,” *Servicio de publicaciones de la Univ. de Valencia*, 2000.
- [51] W. R. Spencer and F. J. Wentz, “Ssmi rain retrievals within a unified all- weather ocean algorithm,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 55, no. 9, pp. 1613–1627, 1998.
- [52] F. J. Wentz and T. Meissner, “Ssmi rain retrievals within a unified all- weather ocean algorithm,” *Proposal 121599A-1. Remote Sensing Systems*, vol. CA, no. 66, p. 66, 2000.
- [53] —, “Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), journal = RSS Tech. Proposal 121599A-1. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, 66 pp, 2000, version 2: AMSR Ocean Algorithm.”
- [54] R. A. Menzerotolo, “Rain rate retrieval algorithm for aquarius/sac-d microwave radiometer,” PhD thesis, M.S. University of Central Florida, Orlando, FL, 2010.
- [55] Suominet gps network. [Online]. Available: <http://www.suominet.ucar.edu/>
- [56] S. K. Biswas, “Brightness temperature calibration of sac-d/aquarius microwave radiometer (mwr),” PhD thesis, M.S. University of Central Florida, Orlando, FL, 2012.
- [57] E. J., M. M., and B. J., “Estimación de Vapor de Agua Integrado Sobre Tierra Utilizando los Datos del Radiómetro MWR de la Misión SACD-Aquarius,” *IEEE Latin America Transactions*.
- [58] M. N. Deeter, “A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean,” *Geophysical Research Letters*, vol. 34, 2007.