

# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



# UCSC

Análisis de transmisión atmosférica de señales en  
alta frecuencia en sitio con bajo nivel de PWV.

Mauricio Alonso Díaz Pavéz

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:  
**Ingeniero Civil Eléctrico**

**Profesor Guía:**  
Ricardo Bustos Placencia

Concepción, Julio de 2018

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Medio Ambiente y Energía

# Análisis de transmisión atmosférica de señales en alta frecuencia en sitio con bajo nivel de PWV.

Mauricio Alonso Díaz Pavéz

Informe de Habilitación Profesional  
Para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Julio 2018

## Resumen

La presente Tesis de Pregrado fue desarrollada en el marco del proyecto DINREG 06/2017 “*Medición de PWV en el sitio de MARI-UCSC usando Radiómetro de 183Ghz*”, financiado por la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Dentro de este contexto, el grupo del Laboratorio de Astro-Ingeniería y microondas de la UCSC (LAIM-UCSC) ha llevado a cabo una serie de estudios en un sitio del desierto ubicado aproximadamente 150 Km al Este de San Pedro de Atacama, a 4380 m de altura. El resultado de dichos estudios arrojó como conclusión que el lugar reúne las condiciones necesarias para la observación de señales extraterrestres en baja frecuencia (50 – 200 MHz). Sin embargo, estudios complementarios podrían develar si el sitio es también óptimo para el estudio de señales a frecuencias mayores que Giga-Hertz, aumentando aún más el interés científico sobre el lugar.

La medición del Vapor de Agua Precipitable (PWV) en la atmósfera forma parte de las investigaciones necesarias para determinar la ocurrencia de la hipótesis presentada anteriormente (observación de señales en alta frecuencia). Estas mediciones fueron realizadas con un radiómetro de 183 GHz que a través de la detección de las intensidades de brillo del cielo en distintas sub-bandas, es capaz de calcular el PWV existente en la columna de agua formada desde el espejo primario del radiómetro hasta el tope de la atmósfera. Es necesario además, construir una micro-red basada en energía solar para alimentar al radiómetro, dado que este se encontrará instalado en una ubicación totalmente lejana de la acción humana y de cualquier fuente de energía convencional.

El trabajo de Tesis también abordó la calibración y refaccionamiento del radiómetro de vapor de agua. La calibración se llevó a cabo considerando al radiómetro instalado en el radio telescopio APEX como instrumento patrón, esto debido a la exactitud, concordancia y calibraciones propias con las que cuenta el instrumento.

*A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la UCSC*

## Agradecimientos

Al partir rumbo a Concepción, no imagine este momento que cierra una etapa de formación inolvidable en mi vida. Ha sido un tiempo de mucho trabajo, de crecimiento y nuevos conocimientos, de grandes experiencias y de conocer personas lejos de mi tierra, mezclados con estados de ánimo de lo más diversos. Son ya seis años desde que partí de mi hogar, con algunas pocas ideas en la cabeza, y ahora que presento los resultados de mi investigación, puedo decir humildemente que tengo unas pocas más pero valiosas. Quiero en los siguientes párrafos recordar y agradecer a todas las personas que han formado parte de esta travesía.

A Ricardo Bustos, mi director de Tesis, por todas sus enseñanzas y consejos valiosos. Su apoyo fue permanente, no solamente durante mis años de trabajo en el Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas, sino también desde el momento en el que me aceptó como ayudante de los ramos que impartía en ese entonces. Mi eterna gratitud y aprecio hacia él, por su gran calidad humana, capacidad de reflexión y vocación por la enseñanza.

A mis compañeros en Ingeniería Civil Eléctrica, Diego Jesús Sánchez, Gabriel Ignacio Freire, Hugo Alberto Muñoz y Arnold Andrés Lisperguer, con quienes no tuve la suerte de compartir el mismo campo de investigación, pero si charlas enriquecedoras en clases, congresos, viajes y en el laboratorio.

Agradezco en particular a Francisco Raúl Espinoza y Roberto Aedo, miembros del Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas, quienes fueron un apoyo importante tanto en las campañas de medición en el desierto como en los distintos proyectos que se desarrollaron en el laboratorio. También extendiendo este agradecimiento a los profesores de planta de la carrera, los docentes; Guillermo Ramírez por el conocimiento entregado en el área de máquinas eléctricas, Aníbal Morales por la sabiduría y los consejos entregados en momentos oportunos, Ricardo Lizana por la cantidad de luces que me dio acerca de MatLab, José Saavedra por su orientación con respecto a tópicos relacionados a las comunicaciones digitales y en especial a Eduardo Espinosa por la rigurosidad y disciplina que logré adquirir gracias a su enseñanza.

He dedicado esta Tesis a quienes más quiero y son lo más importante en mi vida, mi familia. A ellos también quiero rendirme con mi agradecimiento más humilde, porque me han dado fortaleza en la distancia. A mi padre, porque en tus consejos y charlas de los domingos antes de abordar el bus conocí a un nuevo amigo. A mi madre, por ser mi paz, tranquilidad y mi vuelta a la inocencia. A mi hermana Camila, por ser uno de los motivos por el cual nunca rendirme. A mi hermana Catalina, quiero decirte que admiro tu inteligencia y forma ser. Y finalmente, pero no por eso menos importante a mi novia Victoria, por alentarme cada día a sacar lo mejor de mí y enseñarme a valorar lo realmente importante.

A todas las amigas y amigos que hice en Concepción - pienso en nombrarlos pero caería en injustas omisiones -, cuya amistad sincera agradezco y quiero conservar siempre con cariño. Hacen que esta historia de mi vida sea feliz y nunca solitaria.

De igual manera, agradezco por el apoyo otorgado por la Universidad Católica de la Santísima Concepción, proyecto DINREG 06/2017.

Concepción, invierno del 2018

# Tabla de Contenidos

<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABREVIACIONES</b> .....	<b>X</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>2</b>
2.1. TRABAJOS PREVIOS .....	2
2.1.1 <i>Estudios de PWV en sitios de especial interés.</i> .....	2
2.1.2 <i>Estimación de cantidad de PWV.</i> .....	3
2.1.3 <i>Refaccionamiento Radiómetro de Vapor de Agua.</i> .....	3
2.1.4 <i>Clasificación de nubes y otros meteoros.</i> .....	3
2.1.5 <i>Estudio de RFI en sitios del norte de Chile con MARI-UCSC.</i> .....	4
2.2. DISCUSIÓN .....	4
<b>3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>5</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	5
3.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	5
3.3. OBJETIVOS .....	6
3.3.1 <i>Objetivo General</i> .....	6
3.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	6
3.4. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	6
3.5. METODOLOGÍA .....	7
<b>4. DESARROLLO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>8</b>
4.1. LUGAR DE LAS MEDICIONES .....	8
4.1.1 <i>Etapa I (MARI I)</i> .....	8
4.1.2 <i>Etapa II (MARI II)</i> .....	9
4.2. RADIOTELESCOPIO APEX .....	11
4.3. OBSERVATORIO ALMA .....	12
4.4. LLANO DE CHAJNANTOR .....	14
4.5. RADIOMETRÍA DE VAPOR DE AGUA .....	15
4.5.1 <i>Clasificación de nubes.</i> .....	16
4.5.2 <i>Factores Climatológicos.</i> .....	19
4.6. INSTRUMENTACIÓN .....	21
4.6.1 <i>Cargas de Calibración.</i> .....	22
4.6.2 <i>Adquisición de Datos.</i> .....	23
4.6.3 <i>Datos de Salida del Radiómetro.</i> .....	24
4.6.4 <i>Sistema Solar Aislado (Off-Grid).</i> .....	27
4.6.5 <i>Puesta en Marcha.</i> .....	33
4.6.6 <i>Problema 1: Radiómetro</i> .....	33
4.6.7 <i>Problema 2: Micro-Red.</i> .....	35
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>37</b>
5.1. CALIBRACIÓN RADIÓMETRO 183 GHz .....	38
5.2. RESULTADOS VAPOR DE AGUA SOBRE EL SITIO DE MARI-UCSC. ....	41
5.3. ESTUDIO DE TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN SITIO DE MARI-UCSC. ....	47
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>49</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>66</b>

# Lista de Tablas

<b>Tabla 4.1 Ubicación del Sitio.....</b>	<b>8</b>
<b>Tabla 4.2 Clasificación General de Nubes.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 4.3 Variables de salida del radiómetro (Primeras 10 columnas).....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 4.4 Descripción columnas de datos en Archivos de Salida.....</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 4.5 Radiación Solar Horizontal para cada Mes. ....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 4.6 Especificaciones Eléctricas. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 4.7 Características fuente de Poder Regulada. ....</b>	<b>34</b>

# Lista de Figuras

Figura 4-1 Ubicación del sitio encontrado por MARI-UCSC. ....	9
Figura 4-2 Panorámica del sitio a medir.....	10
Figura 4-3 Mapa llano de Chajnantor con ubicación de observatorios ALMA y APEX.....	13
Figura 4-4 Panorama de 360 grados de la meseta de Chajnantor. ....	14
Figura 4-5 Promedio de absorción atmosférica 10-1000 GHz.....	15
Figura 4-6 Ilustración tipos de Nubosidad. ....	16
Figura 4-7 Vista Panorámica Nube Cirrus.....	17
Figura 4-8 Vista Panorámica Nube Cirrocúmulos.....	17
Figura 4-9 Vista Panorámica Nube Cirrostratus. ....	18
Figura 4-10 Estimación niveles de PWV en la zona. ....	20
Figura 4-11 Radiómetro de Vapor de Agua.....	21
Figura 4-12 Sub-bandas de medición sobre línea de resonancia del vapor de agua.....	22
Figura 4-13 Computador Industrial Axiomtek eBox 640-822-FL.....	23
Figura 4-14 Primeros resultados del PWV en el sitio de MARI. ....	26
Figura 4-15 Panel Fotovoltaico modelo SL250TU-30P.....	29
Figura 4-16 Controlador de carga. ....	30
Figura 4-17 Inversor de Corriente.....	31
Figura 4-18 Fusible de Protección.....	31
Figura 4-19 Esquema Eléctrico Micro-red. ....	32
Figura 4-20 Fotografía del sistema terminado. ....	32
Figura 4-21 Fotografía interior del Radiómetro. ....	33
Figura 4-22 Fotografía Fuente de Poder Regulada. ....	34
Figura 4-23 A la derecha, caja contenedora del Regulador de Carga.....	36
Figura 5-1 Canales de observación sobre la línea de emisión del vapor de agua.....	37
Figura 5-2 Correlación entre datos de PWV de MARI & APEX posterior a la calibración. ....	39
Figura 5-3 A la izquierda, ubicación del radiómetro durante la calibración con APEX. A la derecha una fotografía del Atacama Pathfinder Experiment. ....	39
Figura 5-4 Vapor de agua precipitable medido por ambos instrumentos. En azul se muestra el PWV de APEX y en negro los resultados medidos por el radiómetro utilizado en MARI. ....	40
Figura 5-5 Vapor de agua precipitable medido por ambos instrumentos. En rojo se muestra el PWV de APEX y en azul los resultados medidos por el radiómetro utilizado en MARI. ....	40
Figura 5-6 PWV MARI v/s PWV ALMA periodo del 04 al 06 de Noviembre del 2017. ....	41
Figura 5-7 Comparación valores PWV 04 -06 Noviembre 2017.....	42
Figura 5-8 PWV MARI v/s PWV APEX periodo 01 Abril al 07 de Mayo del 2018. ....	43
Figura 5-9 Comparación valores PWV.....	44
Figura 5-10 Mapa satelital ubicación geográfica de MARI y los observatorios APEX y ALMA.....	45
Figura 5-11 Correlación entre los valores de PWV medidos en MARI y APEX considerando desplazamientos de un minuto. ....	45
Figura 5-12 PWV en MARI & APEX desde el día 27/04/2018 al 07/05/2018. ....	46
Figura 5-13 PWV en MARI & APEX desde el día 27/04/2018 al 07/05/2018 con offset de 176 minutos en MARI. ....	46
Figura 5-14 Transmisión atmosférica de señales para distintos valores de PWV. ....	48
Figura B-1 Mapa Satelital con ubicación de observatorios ACT & APEX. ....	63
Figura B-2 PWV en ACT & APEX desde el día 01/07/2018 al 04/07/2018.....	63

# Abreviaciones

## Mayúsculas

PWV	: Precipitable Water Vapor
WVR.	: Water Vapor Radiometer
RS	: Radio Sondas
GPS.	: Global Positioning System
WMO	: World Meteorological Organisation
AIRS	: Atmospheric Infrared Sounder
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
ALMA	: Atacama Large Milimeter Array
APEX	: Atacama Pathfinder Experiment
MARI	: Medidor Autónomo de Radio Interferencia
ATM	: Atmospheric Transmission at Microwaves
LSA	: Large Southern Array
LMSA	: Large Millimeter Submillimeter Array
MMA	: MiliMeter Array
UCSC	: Universidad Católica de la Santísima Concepción
IF	: Frecuencia Intermedia

## Minúsculas

m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del Mar.
mm	: Milimétrico
submm	: Submilimétrico

# 1. Introducción

---

El vapor de agua es uno de los componentes de la atmósfera que tiene mayor impacto sobre las comunicaciones inalámbricas y en particular sobre las señales electromagnéticas a frecuencias superiores a 10 GHz (Alta frecuencia), que utilizan este canal como medio de propagación. Sumado a lo anterior, el Precipitable Water Vapor (en adelante PWV) tiene la característica de tener distribuciones no uniformes y por ende presenta grandes problemas para la interferometría milimétrica y sub-milimétrica. En la actualidad, Chile es sin duda considerado uno de los más importantes epicentros de la astronomía a nivel mundial debido a sus condiciones geográficas y climáticas. Y es justamente el bajo nivel de PWV existente en zonas de nuestro país lo que propicia la investigación internacional mediante la utilización de radiotelescopios. Algunos de los más destacados proyectos que han pisado suelo Chileno son; CBI (Cosmic Background Image), APEX (Atacama Pathfinder Experiment), ALMA (Atacama Large Millimeter Array), ACT (Atacama Cosmology Telescope), ASTE (Atacama Submillimeter Telescope), MARI-UCSC (Medidor Autónomo de Radio Interferencia), y otros.

Tener un bajo nivel de PWV en las zonas geográficas destinadas a la observación astronómica es importante dado que la atmósfera no es un espacio vacío, sino que se encuentra conformado por átomos y moléculas de variados elementos, tales como gases, líquidos o incluso sólidos. Estas partículas pueden producir la absorción parcial de las ondas electromagnéticas de interés, lo que sin duda es perjudicial para la obtención de datos necesarios para las investigaciones científicas. De ahí la importancia de poder medir y caracterizar los niveles de PWV presentes en la atmósfera y por ende los niveles de absorción que este producirá en las señales existentes en ciertas bandas de frecuencia. Otro efecto que tiene el vapor de agua presente en la atmósfera sobre las señales que lo atraviesan es el cambio de fase entre distintas zonas del frente de ondas.

A lo largo de la historia se han utilizado diferentes metodologías e instrumentos para obtener estas mediciones de vapor de agua precipitable de la forma más certera posible. Algunos de los instrumentos capaces de efectuar dichas mediciones son los radiómetros de vapor de agua (WVR), radiosondas (RS), radiómetros a bordo de satélites o incluso el uso de sistemas GPS. Más adelante analizaremos más en profundidad cada metodología de medición para entender de mejor forma sus principios de funcionamiento.

## 2. Revisión Bibliográfica

---

A continuación se presenta la revisión bibliográfica tomada como base para la creación del presente trabajo. Como inicio a la investigación realizada se optó por recopilar información general referente el vapor de agua presente en la atmósfera desde publicaciones científicas, dejando de lado la información alojada en foros y páginas de internet que no fueran de científicos destacados en el área, principalmente para no obtener información errada o no validada científicamente.

### 2.1. Trabajos Previos

La revisión bibliográfica revisada y utilizada se presenta a continuación. Además se realiza un pequeño y conciso comentario de cada uno de los trabajos, explicando los tópicos generales que cada uno de ellos desarrolla y además se podrá encontrar el aspecto específico en el cual la referencia fue utilizada en la Memoria de Título.

#### 2.1.1 Estudios de PWV en sitios de especial interés.

- ♣ Bustos, R., Rubio, M., Otárola, A., & Nagar, N. (2014). Parque Astronómico de Atacama: An ideal site for millimeter, submillimeter, and mid-infrared astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126(946), 1126.

En este trabajo se realiza un acabado estudio de las condiciones ideales que presenta el Parque Astronómico de Atacama para realizar investigaciones científicas obteniendo información de longitudes de onda milimétricas y sub-milimétricas. De igual manera se exponen las singulares características que producen la extrema sequedad en el clima de la zona y se comparan las mediciones de PWV realizadas en la cima del Cerro Chajnantor versus los datos obtenidos en el llano o meseta del mismo complejo geográfico.

### 2.1.2 Estimación de cantidad de PWV.

- ♣ Delgado, G., Otárola, A., Belitsky, V., Urbain, D., & Martin-Cocher, P. (1999). The determination of precipitable water vapour at Llano de Chajnantor from observations of the 183 GHz water vapour line. *ALMA Memo Series*, (271).

Este trabajo entrega una clara visión del cálculo de la cantidad de PWV existente en un determinado lugar usando radiómetros de vapor de agua. Las mediciones y métodos aquí expuestos fueron utilizados para el *site testing* del proyecto astronómico ALMA antes de su instalación en el llano de Chajnantor.

### 2.1.3 Refaccionamiento Radiómetro de Vapor de Agua.

- ♣ Hernán Felipe De la Puente Christen. (Mayo de 2011). Refaccionamiento de Radiómetros de Vapor de Agua en Banda 183GHz. Concepción, Chile. Universidad de Concepción.

La memoria de título habla sobre el trabajo de refaccionamiento realizado por el autor a los dos Radiómetros de Vapor de Agua traídos a Chile, utilizados en el *Site Testing* del proyecto ALMA y que luego de algunos años de uso continuo presentaron fallas relacionadas con los Drivers encargados del control de los motores de los equipos. Además en el trabajo realizado por el autor se explican importantes detalles técnicos y de diseño que no se tocan en profundidad en mi trabajo de tesis.

### 2.1.4 Clasificación de nubes y otros meteoros.

- ♣ Watch, G. A. (2003). World Meteorological Organization. *Guidelines of Observation of Clouds and Other Meteors*.

El manual de observación de nubes y otros meteoros entrega valiosa información para determinar los distintos tipos de nubes que se pueden formar en la atmósfera. Además define una serie de métodos basados en las formas, apariencias y alturas desde superficie hasta la base de las nubes para clasificarlas.

### **2.1.5 Estudio de RFI en sitios del norte de Chile con MARI-UCSC.**

♣ Suárez Espinosa, A.A. (Enero 2016). *Estudio de RFI en sitios del norte de Chile con MARI-UCSC para instalar un radiotelescopio de baja frecuencia* (Tesis de Licenciatura.). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

La memoria de título escrita por Alexandra Suárez para optar al título de Licenciada en Astronomía habla sobre el trabajo realizado durante los años 2014–2015 con el proyecto MARI-UCSC. Tuvo como principal objetivo medir el espectro VHF en distintos lugares de la segunda región de Chile, que finalmente permitió identificar el sitio en el cual se estudiará PWV en el presente trabajo.

## **2.2. Discusión**

La literatura muestra que los estudios e investigaciones referentes al vapor de agua precipitable en sitios como el Parque Astronómico de Atacama están muy avanzados gracias a la relevancia que tiene este lugar para la comunidad científica y astronómica mundial; no obstante, al intentar encontrar fuentes o formas de obtener información referente al PWV en sitios en donde teóricamente se esperan bajos niveles de este indicador, nos encontramos con que no existe otra opción más que caracterizar nosotros mismos el lugar.

Tomar la decisión de caracterizar el lugar encontrado por el proyecto MARI (del cual se hablará más adelante en extenso) en términos del vapor de agua precipitable, significa tener que realizar la instalación de los equipos necesarios para la obtención de datos y por ser una localidad apartada, esto incluye solucionar el problema de la alimentación con energía eléctrica de los instrumentos en cuestión.

## **3. Definición del Problema**

---

### **3.1. Introducción**

A continuación se presenta la hipótesis y objetivos que se plantean para el trabajo de la memoria de título. Estos objetivos están directamente relacionados con el trabajo que actualmente se realiza en LAIM-UCSC (Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas) que busca continuar con los estudios y mediciones del proyecto denominado MARI (Medidor Autónomo de Radio Interferencia). En el pasado ya se realizaron mediciones del Espectro Electromagnético cercano a la línea de 21 cm y se verificó que efectivamente el ambiente estuviera prácticamente libre de Radio-contaminación, debido a lo cual, el sitio puede ser considerado para la instalación de futuros Radio telescopios que trabajen en baja frecuencia. Sin embargo, complementando lo anterior, el siguiente paso es entonces realizar mediciones de PWV en el sitio del proyecto para determinar si el lugar cumple las condiciones para la observación de señales en Alta Frecuencia.

La propuesta para el desarrollo de la memoria de título es lograr la caracterización de la zona geográfica en términos del PWV existente en la atmósfera y estudiar las consecuencias que presentarán los frentes de ondas que atraviesen espacios con presencia de vapor de agua. Las mediciones de PWV se llevarán a cabo utilizando un radiómetro capaz de medir potencia en tres sub bandas de la línea de resonancia del agua 183.3 GHz, datos que posteriormente deben ser procesados para obtener los resultados definitivos y finalmente concluir si el sitio escogido es óptimo o no.

### **3.2. Hipótesis de Trabajo**

Luego de la implementación y puesta en marcha del Radiómetro de Vapor de Agua y del análisis de los datos obtenidos, se espera concluir que el lugar geográfico en estudio es adecuado para el desarrollo de futuros proyectos científicos en este país. Para lo anterior, es necesario que las mediciones de PWV estén dentro del perfil de transparencia mínimo esperado.

### **3.3. Objetivos**

#### **3.3.1 Objetivo General**

El objetivo principal de mi trabajo de tesis es llevar a cabo el traslado, instalación del radiómetro de vapor de agua 183.3 GHz y el análisis e interpretación de los datos recogidos desde el instrumento que se instalará en el sitio MARI, para luego compararlos con los obtenidos en otros lugares de interés científico, como por ejemplo los valores registrados por el observatorio ALMA (Atacama Large Millimeter Array).

#### **3.3.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar y comprender el principio detrás de las mediciones de PWV.
- Llevar a cabo la puesta en marcha del radiómetro, lo que incluye el dimensionamiento y construcción de la Microred Off-Grid necesaria para alimentar al instrumento.
- Obtener medidas de temperatura de brillo del cielo y generar el post procesamiento de los datos obtenidos del radiómetro de vapor de agua.
- Llevar a cabo estudios que podrían llegar a permitir el desarrollo de un nuevo sitio astronómico para el país, lo que facilitará la atracción de enormes recursos para el desarrollo e instalación de instrumentos de primer nivel tecnológico y de alto valor a nuestra economía.

### **3.4. Alcances y Limitaciones**

La investigación comprende el análisis de transmisión atmosférica de señales en alta frecuencia en el sitio de MARI-UCSC. Para esto se estudiaron los niveles de PWV presentes en el lugar de las mediciones y a través del modelo de transferencia radiativa ATM (Atmospheric Transmission at Microwaves) se determinaron las respuestas para distintos contenidos de PWV. El vapor de agua precipitable fue medido usando un radiómetro de 183.3GHz, frecuencia en la cual la molécula de este componente atmosférico (vapor de agua) entra en resonancia, absorbiendo mucha más energía de la que se obtendría en otras bandas.

La principal limitación de la investigación es el período de tiempo de recolección de la información, que comprende seis meses de duración a partir de octubre de 2017. Esta ventana de tiempo es necesaria para poder conseguir una caracterización lo más completa posible en términos de las distintas condiciones climáticas que se puedan presentar en dicho periodo de tiempo. Aunque sería deseable poder contar con más de un año, para observar el comportamiento anual de PWV en el sitio.

### 3.5. Metodología

El desarrollo de la investigación está planificado en una única campaña en la cual se considera realizar la instalación y puesta en marcha del radiómetro a aproximadamente 150 Km al Este de San Pedro de Atacama, que es donde se encuentra ubicado el lugar de interés. El instrumento mencionado con anterioridad se encuentra instalado en el Cerro Chajnantor, en el interior del Parque Astronómico Atacama, en donde se utilizó para el *site-testing* del proyecto CCAT. Debido a esto, el equipo debe ser trasladarlo al lugar de MARI-UCSC y asegurar que su funcionamiento sea el correcto.

Para que el radiómetro posea la autonomía necesaria durante la investigación, se diseña una micro-red a base de energía solar de la cual se hablara a fondo posteriormente. Una vez que los datos se encuentren procesados y listos para su interpretación, se llevará a cabo una comparación con los obtenidos por ALMA, uno de los observatorios más importantes del mundo, con la finalidad de correlacionarlos y establecer relaciones entre ambos sitios.

## 4. Desarrollo del Problema.

---

### 4.1. Lugar de las Mediciones

El sitio que se busca estudiar fue encontrado por el proyecto MARI-UCSC que es la sigla para Medidor Autónomo de Radio Interferencia de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Corresponde a un proyecto de la línea de financiamiento QUIMAL, destinado al Desarrollo de Tecnologías de la Astronomía Nacional de CONICYT y que fue adjudicado el año 2013 por el profesor Ricardo Bustos, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, del Departamento de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Este proyecto tuvo como finalidad principal identificar potenciales sitios con bajo RFI en la Segunda Región de Antofagasta para la instalación de un futuro radio telescopio de baja frecuencia. Para esto, el equipo de MARI-UCSC, realizó mediciones desde el año 2014 [1], con el fin de recopilar datos que ayuden a llevar a cabo su cometido. El lugar se encuentra en las coordenadas que se presentan en la Tabla 4.1

**Tabla 4.1 Ubicación del Sitio.**

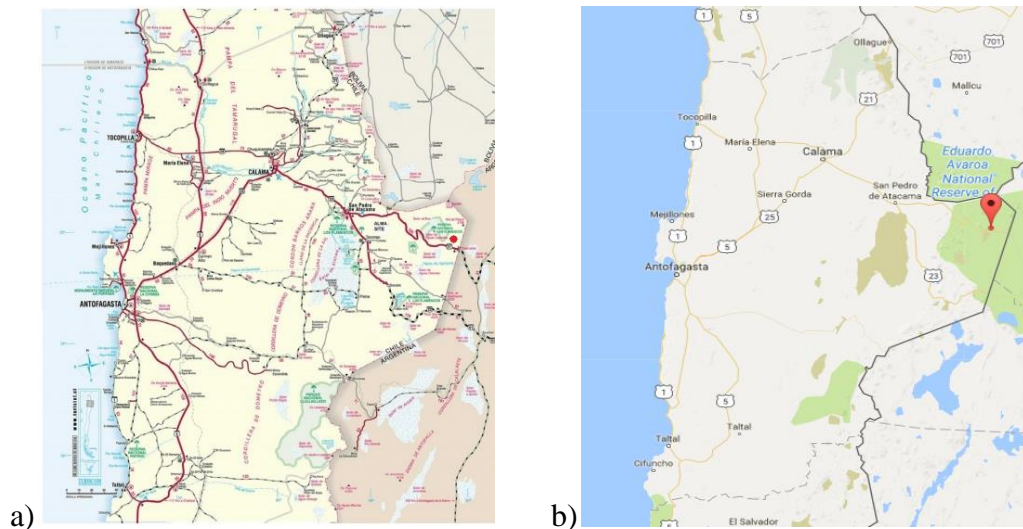
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Latitud	-23.164629
Longitud	-67.235991
Altitud	4380 msnm

#### 4.1.1 Etapa I (MARI I).

Durante el desarrollo de la primera etapa del proyecto MARI-UCSC el equipo de trabajo se dedicó durante 10 días a realizar mediciones del espectro electromagnético, específicamente en la banda de los 50 a 200 MHz, en siete distintos lugares del norte de Chile en los cuales teóricamente se esperaba encontrar poca presencia de Radio Interferencia. Dichas mediciones se efectuaron entre el 10 y el 21 de Diciembre del año 2014, luego de lo cual el equipo de trabajo concluyó que el lugar óptimo para continuar con la investigación se encuentra en las cercanías del Salar Quisiquiro.

La principal motivación del proyecto fue la búsqueda de un sitio con características únicas en el planeta, que permitieran la observación de la línea de 21cm de hidrógeno emitida durante la época de re-ionización del universo, dado que modelos teóricos indican que es la alternativa más acertada para probar la evolución de la estructura del mismo [1].

En la figura 4.1 que se muestra a continuación se pueden observar dos representaciones del mapa de la zona, indicándose en ambos casos la ubicación del sitio geográfico encontrado por el proyecto.



**Figura 4-1** Ubicación del sitio encontrado por MARI-UCSC.  
(a) Mapa Político, (b) Mapa Físico.

#### 4.1.2 Etapa II (MARI II).

Posteriormente, en la etapa II del proyecto MARI-UCSC el equipo de trabajo realizó un total de seis campañas al lugar seleccionado anteriormente. Durante estas campañas se realizaron mediciones continuas del espectro comprendido entre los 50 y 200 MHz, con la finalidad de poder caracterizar el sitio y definir si realmente reunía las condiciones necesarias para los posteriores estudios.

Luego del análisis y tratamiento de los datos recogidos en las mediciones, se llegó a la conclusión que el lugar reúne las condiciones requeridas para las investigaciones de la línea de 21cm del Hidrógeno Neutro emitida durante la época de re-ionización del universo [1]. A pesar de que en los resultados del espectro electromagnético del sitio se encontró la presencia del canal de comunicaciones de la red de satélites ORBCOMM alrededor de los 138+ MHz y una señal de comunicación proveniente de la válvula 1 del gasoducto Chile-Argentina, que emite un *status* a través de un pulso utilizando una antena que opera entre los 155 y 161 MHz. Sin embargo, sigue siendo una ubicación óptima para la observación e investigación de la línea de 21cm del Hidrógeno Neutro.



**Figura 4-2 Panorámica del sitio a medir.**

Para llegar al lugar de las mediciones, es necesario tomar la ruta que sale desde San Pedro de Atacama hacia el Paso Fronterizo Chile-Argentina (Paso Jama), y a la altura del kilómetro 135 tomar el camino de tierra que conduce a la válvula número 1 del gaseoducto Chile-Argentina. Posteriormente se deben recorrer aproximadamente 6 kilómetros por el camino de tierra. En total el tiempo estimado de llegada es de 1 hora 45 minutos, saliendo desde San Pedro de Atacama.

## 4.2. Radiotelescopio APEX.

El Atacama Pathfinder Experiment (APEX) es un radiotelescopio a 5.100 metros sobre el nivel del mar, ubicado en el Llano de Chajnantor, al interior del parque Astronómico Atacama, 50 km al este de San Pedro de Atacama construido y operado por 3 institutos de investigación europeos. El reflector principal tiene un diámetro de 12 m y consta de 264 paneles de aluminio con una precisión de superficie promedio de 17 micrómetros. El telescopio fue inaugurado oficialmente el 25 de septiembre de 2005.

El telescopio APEX está basado en un prototipo de antena construida para el proyecto ALMA (Atacama Large Millimeter Array) y está diseñado para trabajar en longitudes de onda submilimétricas, en el rango de 0.2 a 1.5 mm, entre luz infrarroja y ondas de radio. Durante sus primeros años de vida, se dedicó a buscar objetivos de interés científico para que posteriormente pudieran ser estudiados con mayor detalle por el observatorio ALMA, cuando este estuviera totalmente operativo. La astronomía submilimétrica proporciona una ventana hacia el Universo frío, polvoriento y distante, sin embargo las débiles señales del espacio son absorbidas por el vapor de agua en la atmósfera de la Tierra. Chajnantor fue elegido como el lugar para tal telescopio porque la región es una de las más secas del planeta, es más de 750 m más alta que los observatorios en Mauna Kea, Hawái y 2400 m más alta que el Very Large Telescope (VLT) en Cerro Paranal. [1]

### 4.3. Observatorio ALMA.

Durante las últimas dos décadas del siglo pasado (XX), tres protagonistas del área astronómica buscaban la forma de dar un paso en su infraestructura de observaciones, para abordar nuevos desafíos de su ciencia. Es así como instituciones de Estados Unidos, Europa y Japón buscaban por caminos individuales resolver un problema común.

Desde el año 1980 Europa preparaba su Proyecto **LSA** (Large Southern Array) que esperaba crear un arreglo de 10 antenas de 8 metros de diámetro para ser ubicado cerca de su telescopio VLT en Paranal, Chile. Más adelante la propuesta se transformó en desarrollar un área de recepción de 10000 m<sup>2</sup> utilizando 50 antenas de 16 m de diámetro, o 100 de 11 m. Se deseaba detectar energía en bandas de frecuencia menores o iguales a 350 GHz. Para lograr las resoluciones angulares deseadas, se esperaban configuraciones espaciales del orden de 10 km.

Casi simultáneamente Japón buscaba realizar el LMA (Large Millimeter Array) un arreglo de 50 antenas de 10 m de diámetro, para detectar energía en bandas entre 35 y 500 GHz, agregando luego la necesidad de bandas en 600 GHz y 900 GHz. Inicialmente proyectado para configuraciones de entre 20 m y 2000 m, finalmente se amplió el requerimiento a líneas base de hasta 10 km. Con estas últimas modificaciones, la propuesta japonesa pasó a llamarse **LMSA** (Large Millimeter Submillimeter Array).

Por otra parte, en la década del 90, Estados Unidos se interesa en desarrollar el **MMA** (MilliMeter Array), un arreglo de 40 antenas de 8 m de diámetro para medir energía en 4 bandas correspondientes a las ventanas atmosféricas entre 30 y 350 GHz. Se deseaba configurar el sistema en 4 arreglos de entre 70 y 3000 metros de líneas base.

Finalmente, luego de una serie de acuerdos de cooperación entre los distintos participantes (entre ellos el Estado Chileno como anfitrión de la infraestructura) las diferentes propuestas se transforman en un proyecto unificado denominado **ALMA** (Atacama Large Millimeter Array). ALMA concentra 50 antenas de 12 m de diámetro sobre una superficie equivalente a 5650 m<sup>2</sup>, logrando líneas base entre 150 m y 16 km. Los sistemas de recepción operan en 10 bandas ubicadas espectralmente entre 30 y 950 GHz. A lo anterior se suma luego el sub proyecto ACA (Atacama Compact Array), que comprende la instalación de 12 antenas de 7 m de diámetro más 4 antenas de 12 m de diámetro, con la finalidad de cubrir las frecuencias espaciales comprendidas entre la apertura de una antena de ALMA (12 m) y la línea base más pequeña del arreglo (150 m). Con esto se consigue lo que se conoce como **Enhanced ALMA** [2].

Ambos telescopios ALMA y APEX, observan la luz invisible a los ojos, la cual es emitida naturalmente por el Universo en ondas largas, que corresponde a una porción del espectro electromagnético que nos permite indagar el “Universo frío” que no es captado por los telescopios ópticos y es fundamental para conocer cómo se forman las estrellas y los planetas.

El vapor de agua existente en la atmósfera absorbe estas ondas, dificultando su captación en la Tierra. Es por ello que las antenas de ALMA y APEX fueron ubicadas en una de las zonas más áridas del mundo: el desierto de Atacama, debido a su sequedad, gran altitud, pocas nubes y escasez de contaminación lumínica y de interferencia de radio de las ciudades, este desierto es uno de los mejores lugares en el mundo para llevar a cabo observaciones astronómicas.

Ubicado aproximadamente a 30° latitud sur, este desierto está cercado por dos cadenas de montañas: la cordillera de los Andes por el este y la cordillera de Domeyko por el oeste; cubriendo un área de 181.300 km<sup>2</sup>. Con más de 20 millones de años, este territorio se compone de cuencas de sal, arena y flujos de lava, siendo su sector más seco el situado al sur del río Loa, al oeste de la cordillera Domeyko, cercano a la comuna de San Pedro de Atacama y al pueblo de Toconao, área donde se ubican ambos telescopios. Cabe destacar que la corriente marina fría de Humboldt y el anticiclón del Pacífico son - esenciales para mantener este clima seco. En la figura 4-3 se presentan las ubicaciones de ambos instrumentos.



**Figura 4-3 Mapa llano de Chajnantor con ubicación de observatorios ALMA y APEX.**

#### 4.4. Llano de Chajnantor.

El llano de Chajnantor se encuentra emplazado en la región de Antofagasta, a unos 50 kilómetros de San Pedro de Atacama y a 5.000 metros de altitud. El lugar corresponde a una zona seca y alta donde la presencia de humedad es mínima, factor clave pues el vapor de agua presente en la atmósfera terrestre absorbe las ondas electromagnéticas, especialmente las milimétricas y submilimétricas. El llano, además de su sequedad, cuenta con un amplio espacio que permite distribuir las antenas sobre una superficie de 16 kilómetros de diámetro y su relativa cercanía a la línea del ecuador permite a ALMA observar la mayor parte del cielo, incluyendo buena parte del hemisferio norte.

Si bien el llano de Chajnantor otorga beneficios para la observación de señales provenientes del espacio, también implica desafíos constructivos relacionados especialmente con la altura y las condiciones climáticas asociadas a esta. Las características del entorno son complejas, ya que existe una alta radiación solar, menor oxígeno, baja humedad, fuerte oscilación térmica diaria (gradientes hasta de 40°C), temperaturas que alcanzan los 20°C bajo cero, fuertes vientos y temporales de nieve y hielo.



**Figura 4-4** Panorama de 360 grados de la meseta de Chajnantor.

## 4.5. Radiometría de Vapor de Agua.

Desde la década del 70 y especialmente en la actualidad, es de gran interés para la comunidad científica mundial estudiar el universo en ciertas longitudes de onda. Como por ejemplo el observatorio ALMA, que trabaja con longitudes de onda milimétricas y sub-milimétricas, esta radiación que es recibida por antenas comúnmente se ve afectada por los distintos componentes que constituyen la atmósfera, principalmente el Vapor de Agua y también otro tipo de gases, como lo son el Ozono y el Nitrógeno que se encuentran en las distintas capas atmosféricas.

Sin embargo el Vapor de Agua tiene la singularidad de poder dispersar, absorber y remitir la radiación en ciertas frecuencias. En la figura 4.5 se presentan los promedios de absorción atmosférica que sufren las ondas electromagnéticas con frecuencias comprendidas entre los 10 y 100 GHz para distintos contenidos de PWV. Por lo tanto, cuando se hace una observación al espacio utilizando Radiotelescopios, si no se tiene en cuenta la acción de las moléculas de Vapor de Agua contenidas en la atmósfera y en las nubes, probablemente lo que se esté observando sea un efecto combinado de todos estos gases sobre el frente de ondas de interés [2] [3].

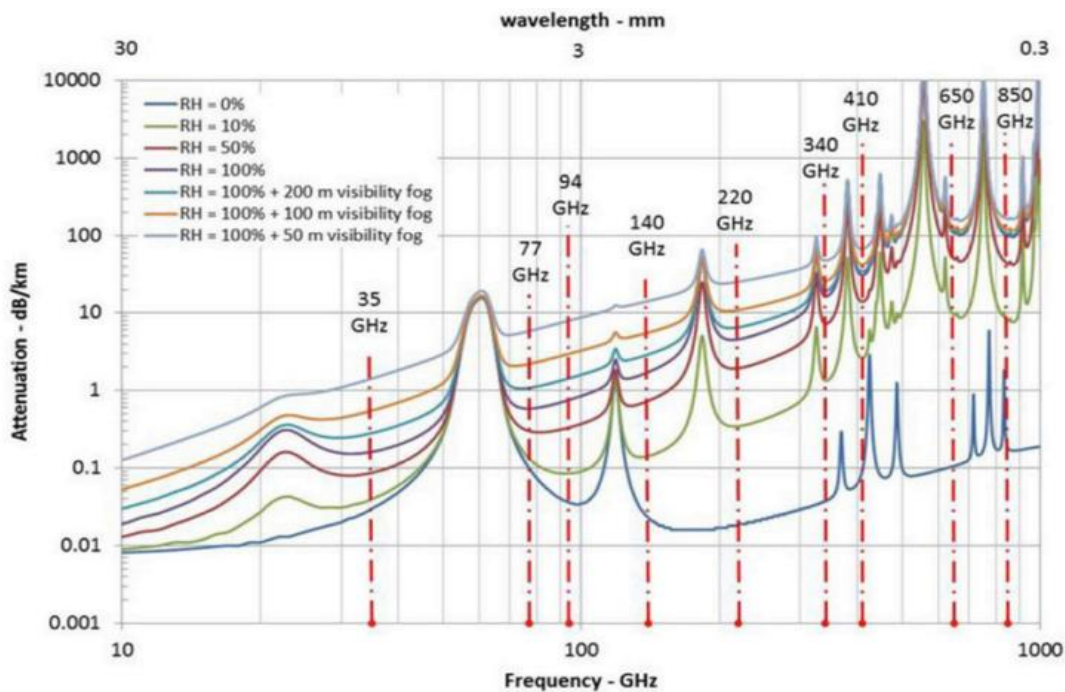


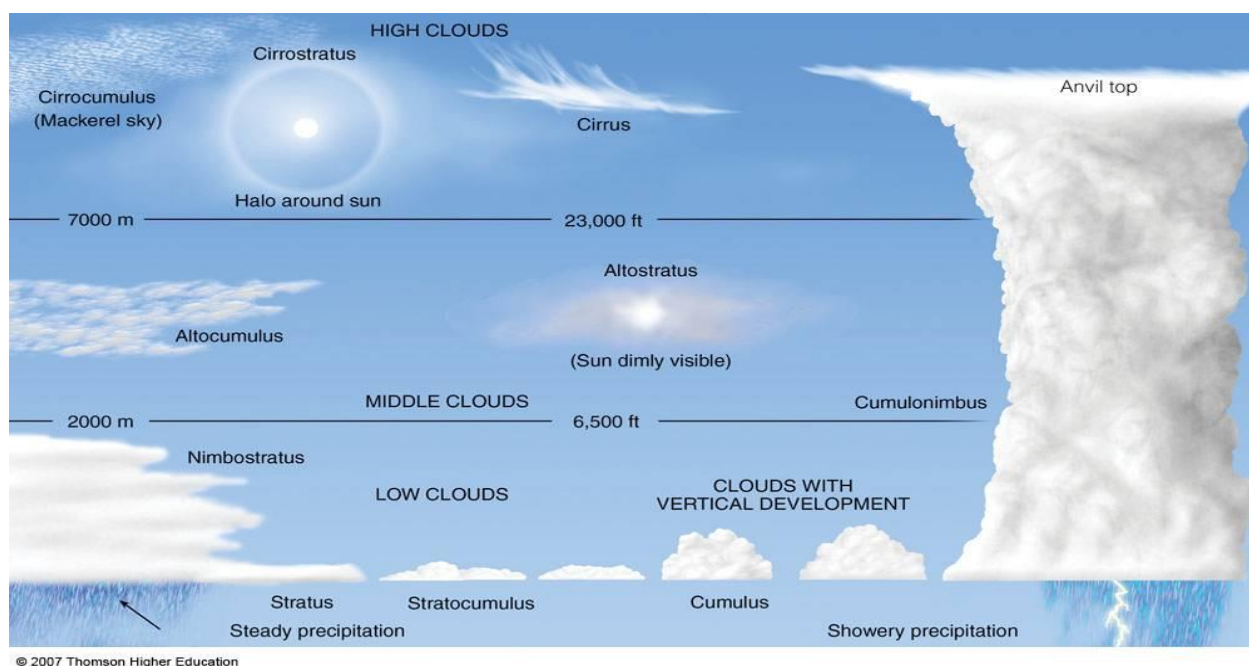
Figura 4-5 Promedio de absorción atmosférica 10-1000 GHz.

### 4.5.1 Clasificación de nubes.

Para realizar una correcta caracterización del sitio es necesario aprender a clasificar los distintos tipos de nubes que pueden presentarse en la atmósfera sobre el lugar de interés. La World Meteorological Organisation (en adelante WMO) establece criterios y métodos útiles para la clasificación de las nubes, en la tabla que se muestra a continuación se muestran las definiciones de los 10 grandes tipos de nubes según la WMO. Estos rangos consideran una estación de observación a una altura bajo los 150 msnm y clima templado [4].

**Tabla 4.2 Clasificación General de Nubes.**

Clase de nube	Tipo de nube	Altura de la base (Km)
Nubes Altas	Cirrus (Ci)	6-12
	Cirrocumulus (Cc)	6-12
	Cirrostratus (Cs)	6-12
Nubes Medias	Altostratus (As)	2-6
	Altostratus (As)	2-6
	Nimbostratus (Ns)	Superficie - 3
Nubes Bajas	Stratocumulus (Sc)	0.3 -1.350
	Stratus (St)	Superficie - 0.6
	Cumulus (Cu)	0.3-1.5
	Cumulonimbus (Cb)	0.6-1.5



**Figura 4-6 Ilustración tipos de Nubosidad.**

Gracias a las condiciones climatológicas del sitio donde se tomaron las mediciones de PWV, la mayor parte del tiempo solo se presentan nubes a gran altura. Según lo ilustrado en la figura 4.6 y revisado en la clasificación realizada por la WMO estas pueden ser [4]:

**Cirrus:** Son nubes blancas, transparentes y sin sombras internas que presentan un aspecto de filamentos largos y delgados. Estos filamentos pueden presentar una distribución regular en forma de líneas paralelas, ya sean rectas o sinuosas.

**Cirrocúmulos:** Forman una capa casi continua que presenta el aspecto de una superficie con arrugas finas y formas redondeadas como pequeños copos de algodón. Estas nubes son totalmente blancas y no presentan sombras.

**Cirrostratos:** Tienen la apariencia de un velo, siendo difícil distinguir detalles de estructura, presentando ocasionalmente un estriado largo y ancho. Sus bordes tienen límites definidos y regulares. Este tipo de nubes suele producir un halo en el cielo alrededor del Sol o de la Luna.



**Figura 4-7 Vista Panorámica Nube Cirrus.**



**Figura 4-8 Vista Panorámica Nube Cirrocúmulos.**



**Figura 4-9 Vista Panorámica Nube Cirrostratus.**

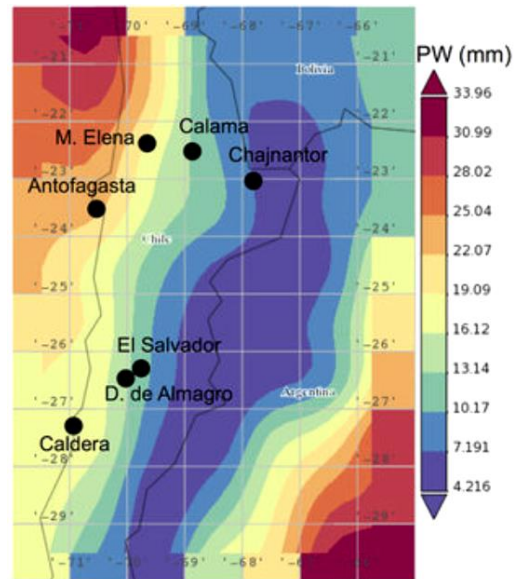
La ventaja de la existencia de esta clase de nubes en el sitio, es que son nubes conformadas de partículas de hielo, por lo que no presentan los fenómenos de atenuación y desfase del vapor de agua en la banda de interés. Debido a esto, la observación de señales provenientes del espacio se ve favorecida enormemente [3] [5].

## 4.5.2 Factores Climatológicos.

La hipótesis que se espera comprobar con las mediciones de PWV realizadas en el lugar del proyecto MARI es que efectivamente los niveles de vapor de agua son similares que los encontrados en lugares como el llano de Chajnantor. Las razones que explican la sequedad en esta zona y el bajo contenido de PWV resultan de la combinación de factores como: a) encontrarse justo bajo la rama descendente de la celda de Hadley de aire cálido y seco cuya subsidencia mantiene permanentemente activo el Anticiclón Sub-Tropical del Pacífico Sur Oriental [7]. b) la corriente marítima fría de Humboldt de las aguas en las costas del Pacífico que provoca una fuerte capa de inversión térmica a los 1000-2000 m de altura, impidiendo el paso de aire húmedo hacia capas superiores [8]. c) La Cordillera de la Costa que supera los 2000 m de altura en los bordes costeros de Chile y que, combinado con la capa de inversión térmica, es una barrera física para el paso de aire húmedo hacia el interior. d) La Cordillera de los Andes que impide el paso de humedad desde el este. e) la gran altura del lugar a 5000 m donde se supera casi la mitad de la masa atmosférica y dejando menos aire que atravesar para las señales provenientes del espacio. Esta rara y única combinación de factores junto con su baja latitud que permite tener visible al cielo tanto del Hemisferio Sur como una buena parte del Hemisferio Norte, hacen que Chajnantor y sus alrededores sean lugares únicos en el mundo e ideales para hacer observaciones en frecuencias mayores a 30 GHz [9].

Hasta ahora se conocen 3 sitios en el mundo con bajísimos niveles de PWV que permiten la transmisión y observación de señales a elevadas frecuencias (400-1000 GHz): el Polo Sur, el Cerro Mauna Kea en Hawái, y el área del Llano de Chajnantor en Chile [3, 9, 10]. Este es uno de los grandes motivos por los que se han instalado en Chajnantor un gran número de radiotelescopios. En la figura 4.10 se muestra el promedio de los valores de vapor de agua calculados utilizando estimaciones diarias derivadas de la Sonda Infrarroja Atmosférica (AIRS) a bordo del satélite Aqua de la NASA durante los años 2003-2014. Los valores de vapor de agua inferiores a 5 mm se observan sobre la cordillera de los Andes. Estos valores relativamente bajos de PWV han sido confirmados por mediciones en tierra realizadas en el Observatorio Paranal. En el caso de la meseta de Chajnantor, la cantidad de agua precipitable es típicamente de 1.0 mm y cae por debajo de 0.5 mm hasta el 25% del tiempo durante el período de Mayo a Noviembre. Durante el "Invierno Altiplánico" (desde fines de Diciembre hasta principios de Abril) el PWV es ligeramente más alto.

En la imagen también podemos observar que el sitio bajo estudio encontrado por MARI-UCSC se encuentra dentro de la zona en la cual según las mediciones de la sonda AIRS se presentan las menores cantidades de PWV, lo que sin duda apoya la hipótesis central del trabajo de tesis.



**Figura 4-10** Estimación niveles de PWV en la zona.

## 4.6. Instrumentación.

En la investigación se trabajó con un Radiómetro de Vapor de Agua que realiza mediciones en la banda de 183.3GHz. Dicho instrumento fue diseñado y construido durante los años 1996 y 1998 por las siguientes instituciones [2]:

- Mullards Radio Astronomy Observatory, Cambridge (UK).
- Onsala Space Observatory, Chalmers University of Technology (Suecia).
- SEST/OSO
- European Southern Observatory.
- Institut de Radio Astronomie Millimetrique, Francia.
- Ferilas Designs, ltd. (UK) – Software

El WVR es un receptor heterodino de doble banda lateral que fue traído a Chile junto a otro equipo de iguales características para ser utilizado durante la campaña de Site-Testing del Observatorio ALMA en el Llano de Chajnantor entre los años 1998 y 2001. Posteriormente, fue refaccionado en laboratorios de la Universidad de Concepción luego de que sufriera un desperfecto en el sistema de control de los servomotores que mueven el Espejo Primario [2]. En dicha oportunidad se le realizaron varios *Upgrades* para optimizar aún más su operación, como por ejemplo la renovación de su Hardware y Software, que permite una mejor conectividad con el equipo y la corrección del desplazamiento de los espejos, que ayuda a que los resultados obtenidos sean más exactos.



**Figura 4-31 Radiómetro de Vapor de Agua.**

La misión del Radiómetro de Vapor de Agua es medir la Temperatura de Brillo del cielo, aunque para esto primero se debe lidiar con el brillo de fondo de la Atmósfera, el cual podemos eliminar en el procesamiento de datos. El radiómetro se calibra continuamente conmutando el haz entre el cielo y dos cuerpos negros de referencia a temperaturas de unos 30 y 90 °C aproximadamente. Para nuestro caso, el instrumento recibirá los datos de temperatura de brillo en distintas sub-bandas de frecuencia ubicadas estratégicamente en la zona espectral de la línea de emisión de agua centrada en 183.3 GHz, dichas sub-bandas son [6]:

- IF1: 1.0 a 1.4 GHz (Centro 1.2 GHz, Ancho de Banda 400 MHz)
- IF2: 3.0 a 6.0 GHz (Centro 4.5 GHz, Ancho de Banda 3 GHz)
- IF3: 7.0 a 8.0 GHz (Centro 7.5 GHz, Ancho de Banda 1 GHz)

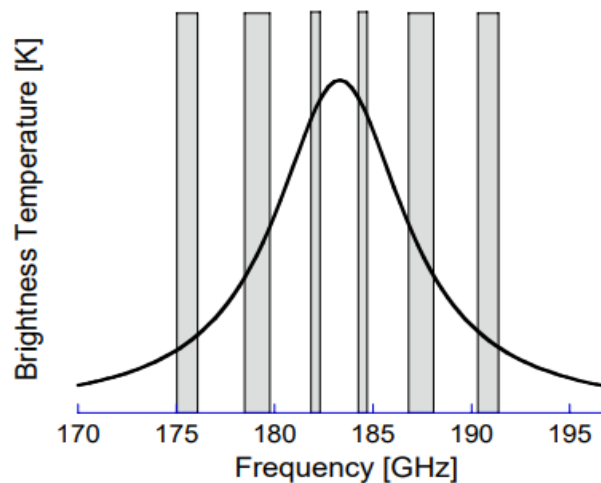


Figura 4-12 Sub-bandas de medición sobre línea de resonancia del vapor de agua.

#### 4.6.1 Cargas de Calibración.

El radiómetro se calibra utilizando dos cargas, una carga tibia de aproximadamente 30 °C (303 K) y una carga caliente de aproximadamente 90°C (365 K). El control de temperatura es un bucle de realimentación on-off que funciona calentando las cargas a su temperatura de referencia. Las cargas son estables en relación a su temperatura de referencia, dentro de 9 horas la variación de temperatura es  $\pm 0,02$  K y durante un período de 24 horas, la variación de temperatura alcanza un 0.1 K para la carga tibia y 0.2 K para la carga caliente [6].

## 4.6.2 Adquisición de Datos.

El sistema del radiómetro inicia sus operaciones como servicio autónomo cada vez que se enciende el Computador Industrial encargado de comandar al instrumento, luego de que el Sistema Operativo termine su secuencia de inicialización se ejecuta el programa responsable de generar y almacenar los datos en tiempo real. La información que registra el sistema consiste en voltajes proporcionales a la potencia detectada por el receptor en cada una de las sub bandas en frecuencia intermedia. Además, se registra la temperatura medida en las dos fuentes de referencia radiométrica (Hot y Warm), para realizar la calibración del sistema.

Posterior al almacenamiento de los datos anteriormente señalados, es necesario aplicar una etapa de post procesamiento de datos. La finalidad de esta etapa es transformar las lecturas de voltaje registradas por los instrumentos, en valores radiométricos como temperaturas de ruido, temperaturas de sistema, estimaciones de cantidad de vapor de agua, etc.

A continuación se muestra el computador Industrial existente en el Radiómetro.



Figura 4-14 Computador Industrial Axiomtek eBox 640-822-FL.

### 4.6.3 Datos de Salida del Radiómetro.

Al inicio del funcionamiento del radiómetro, el instrumento debe preparar las cargas de calibración elevando su temperatura hasta las referencias pre-ajustadas. Al mismo tiempo, el espejo principal realiza un recorrido de los dos ejes de rotación pasando por la totalidad de los ángulos que componen cada eje. Una vez que el barrido de los ejes de rotación termina, el radiómetro apunta el haz de recepción hacia el Cenit y comienza la generación de datos en tiempo real. Como se mencionó en el capítulo anterior, la información que registra el sistema consiste en voltajes proporcionales a la potencia detectada por el receptor en cada una de las tres sub bandas. Además, se registra la temperatura medida en las dos fuentes de referencia radiométrica, usadas para realizar la calibración del sistema. Además, se entregan los valores de temperatura de las tres bandas, así como también registra los ángulos de elevación y azimut en los cuales se realiza la medición. El radiómetro de vapor de agua mide y almacena la información detallada anteriormente por cada segundo que transcurre en operación, luego de dos horas de observación el radiómetro realiza un barrido entre el cenit y el horizonte ( $90^{\circ}$ – $180^{\circ}$ ) con la finalidad determinar el PWV a distintas elevaciones.

En la tabla 6.1 se presentan las columnas de información que entrega el radiómetro en sus archivos de salida y un extracto de 10 datos obtenidos el día 04 de Noviembre del 2017. La fecha que se muestra en datos se encuentra en “*Julian Date*”, que corresponde a un sistema de fechas generalmente usado en astronomía y que asigna a cada uno de los 365.5 días del año un numero correlativo, así por ejemplo el 31 de enero en juliano es el 31 pero el 01 de febrero correspondería al día 32 en este calendario. La dirección de observación del radiómetro se encuentra definida por las coordenadas azimuth y elevación, en donde azimuth corresponde el ángulo que forma el haz del instrumento y el norte, medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador.

**Tabla 4.3 Variables de salida del radiómetro (Primeras 10 columnas).**

Julian Date	HH	MM	SS,S	F	IF1	IF2	IF3	THot	TWarm
308,750013888889	18	0	0,20	72	0,466887	1,39375	1,18594	96,20230	32,14740
308,750026620370	18	0	1,20	83	0,418723	1,26656	1,01928	96,2040	32,1471
308,750038194444	18	0	2,30	87	0,451317	1,36739	1,15429	96,1900	32,1421
308,750049768519	18	0	3,30	83	0,420568	1,26475	1,01802	96,2045	32,1483
308,750061342593	18	0	4,30	72	0,466112	1,39397	1,18608	96,2016	32,1470
308,750072916667	18	0	5,30	83	0,420484	1,26559	1,01881	96,2025	32,1473
308,750085648148	18	0	6,30	87	0,452694	1,36653	1,15396	96,1881	32,1422
308,750097222222	18	0	7,40	83	0,422296	1,26434	1,01797	96,2037	32,1485
308,750108796296	18	0	8,40	72	0,467512	1,39373	1,18609	96,2006	32,1475
308,750120370370	18	0	9,40	83	0,422064	1,26513	1,01870	96,2016	32,1476

**TABLA 4.3 Variables de salida del radiómetro (Últimas 7 columnas).**

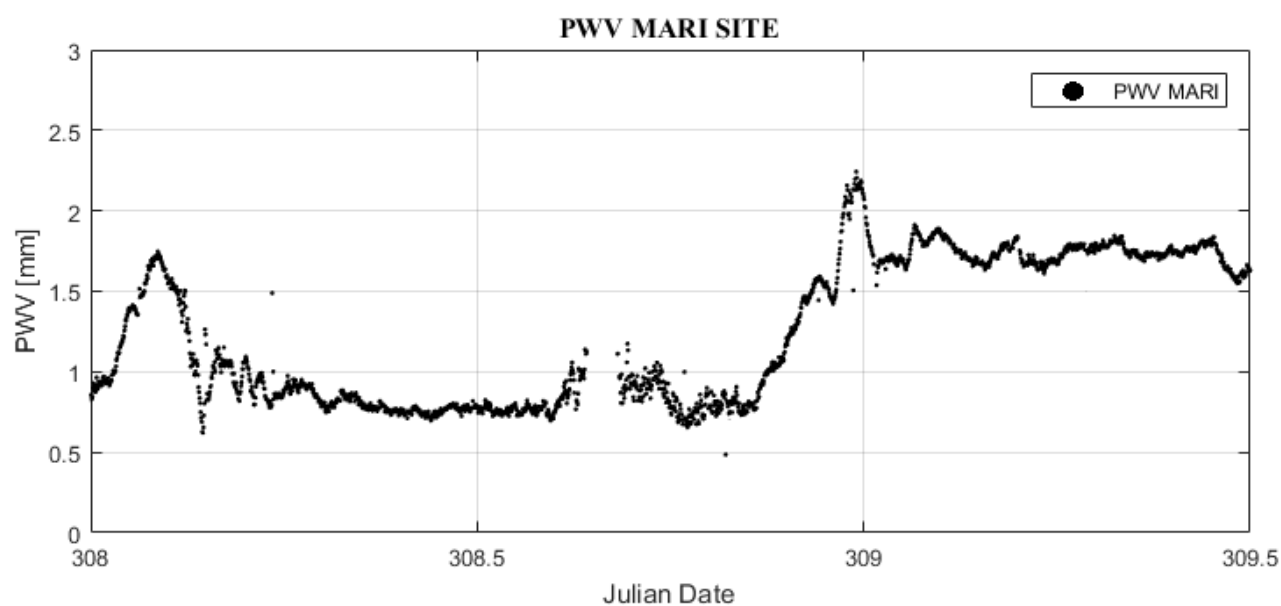
VGunn	Tint	V8.0	V5.0	V2.5	Azimut	Elevación
9,42052	88,1810	7,96803	4,98131	2,49080	0	90
9,42057	88,1798	7,96809	4,98135	2,49083	0	90
9,41995	88,1793	7,96779	4,98108	2,49055	0	90
9,42063	88,1802	7,96807	4,98134	2,49082	0	90
9,42048	88,1813	7,96803	4,98131	2,49079	0	90
9,42061	88,1810	7,96809	4,98136	2,49084	0	90
9,41992	88,1798	7,96780	4,98110	2,49056	0	90
9,42062	88,1814	7,96810	4,98136	2,49083	0	90
9,42042	88,1830	7,96802	4,98131	2,49080	0	90
9,42051	88,1823	7,96807	4,98134	2,49083	0	90

En la tabla 4.4 se describen las variables de salida del radiómetro para cada columna. Esos archivos de salida se denominan “raw data” y son los ficheros que finalmente utilizaremos para realizar el post procesamiento de los datos obtenidos.

**Tabla 4.4 Descripción columnas de datos en Archivos de Salida.**

Identificador	Descripción
Julian Date	Fecha de adquisición del dato en calendario juliano.
HH	Horas desde el último cambio de fecha UTC [Horas].
MM	Minutos desde el último cambio de fecha UTC [Minutos].
SS.S	Segundos desde el último cambio de fecha UTC [Segundos].
F	Identificador fuente radiométrica (Hot, Warm o Sky)
IF1 IF2 IF3	Potencia Primer Canal de Frecuencia Intermedia [Volts].
THot TWarm	Termómetros de las fuentes de calibración radiométrica [°Celsius].
VGunn	Voltaje Diodo Gunn en Receptor [Volts].
V8.0 V5.0 V2.5	Calibradores de voltaje para las cargas de referencias [Volts].
Azimut	Angulo de azimut del haz de recepción con respecto al norte [Grados].
Elevación	Angulo de elevación del haz con respecto al horizonte [Grados].

En la figura 4.14 se observan los primeros resultados obtenidos a partir de los datos recogidos desde el radiómetro de vapor de agua, estos datos corresponden a los días 04 y 05 de Noviembre del 2017 y se calcularon utilizando el algoritmo elaborado por el Ph. Dr. Ricardo Bustos Placencia, que incluye calibraciones realizadas con el radio telescopio APEX. Los resultados son consistentes con los resultados esperados, dado que el día 05 de noviembre se observó a simple vista una mayor cantidad de nubosidad en la atmósfera sobre el sitio de MARI, lo que explica el aumento de PWV en la mitad derecha de la curva.



**Figura 4-15 Primeros resultados del PWV en el sitio de MARI.**

#### 4.6.4 Sistema Solar Aislado (Off-Grid).

La primera fase de la investigación se llevó a cabo durante la primera semana de octubre del año 2017, en donde se realizó el montaje del sistema autónomo del Radiómetro de Vapor de Agua. Para el montaje se considera la construcción de una Micro-red Off-Grid solar, que suministrará al Radiómetro la energía necesaria para su correcto funcionamiento. Además, debido a la naturaleza extrema del sitio y las características del proyecto, la micro-red debe ser lo suficientemente robusta para soportar las condiciones adversas del clima y además ser de libre mantenimiento.

En la zona de investigación las condiciones de irradiación<sup>1</sup> solar son especialmente buenas, debido a la ubicación del mismo (Desierto de Atacama). Los valores promedio de radiación solar mensual horizontales fueron extraídos desde el *Data Center Atmospheric* propiedad de la NASA y se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Radiación Solar Horizontal para cada Mes.**

Mes	Radiación Solar Horizontal [kWh/m <sup>2</sup> /día]
Enero	8.32
Febrero	7.71
Marzo	6.93
Abril	6.08
Mayo	5.21
Junio	4.73
Julio	4.99
Agosto	5.79
Septiembre	7.10
Octubre	8.02
Noviembre	8.77
Diciembre	8.84

---

<sup>1</sup>El modelo utilizado para la transferencia radiativa en cielo despejado es el modelo CLIRAD-SW, el cual considera las interacciones de la radiación con la atmósfera por bandas espectrales de manera independiente.

Conociendo los valores de radiación solar horizontal en el lugar de instalación de los paneles fotovoltaicos podemos utilizar las fórmulas de dimensionamiento eléctrico para conocer los requerimientos mínimos necesarios para mantener el suministro eléctrico constante al radiómetro.

- El instrumento consume una potencia nominal de aproximadamente 100 [W] y debe funcionar las 24 hrs del día, por lo cual, utilizando la ecuación 6.1 la demanda diaria de energía corresponde a 2.4[kWh/día].

$$E = P \cdot t \quad (6.1)$$

donde,

$E$  : demanda total diaria [Wh],

$P$  : potencia consumida [W], y

$t$  : tiempo [h].

- Considerando un factor de radiación aproximado de 7 [kWh/m<sup>2</sup>/d] y un factor de pérdidas igual al 20% de la energía, mediante la ecuación 6.2 se obtiene que la potencia bruta a instalar son 411[Watts peak] o [Wp]. Debido a lo anterior y considerando que siempre nuestros diseños deben estar preparados para el peor escenario posible, se decide instalar dos paneles fotovoltaicos de 250 [W] c/u y conectarlos en paralelo.

$$P_t = \frac{(1 + f_p) \cdot E}{f_r} \quad (6.2)$$

donde,

$P_t$  : potencia necesaria [Wp],

$f_p$  : factor de pérdidas [%],

$E$  : demanda diaria [Wh], y

$f_r$  : factor de irradiación solar [kWh/m<sup>2</sup> /día].

- Fijando la tensión del sistema en 12[V], asignando una autonomía de 1 día para asegurar la disponibilidad de suministro eléctrico al instrumento, considerando una eficiencia del 80% en las baterías y un porcentaje de capacidad de descarga del 60% de las mismas. Se obtiene que el banco de baterías debe tener la capacidad de almacenar una energía igual a 5000 [Wh], resultando en que como mínimo debe almacenar 416[Ah].

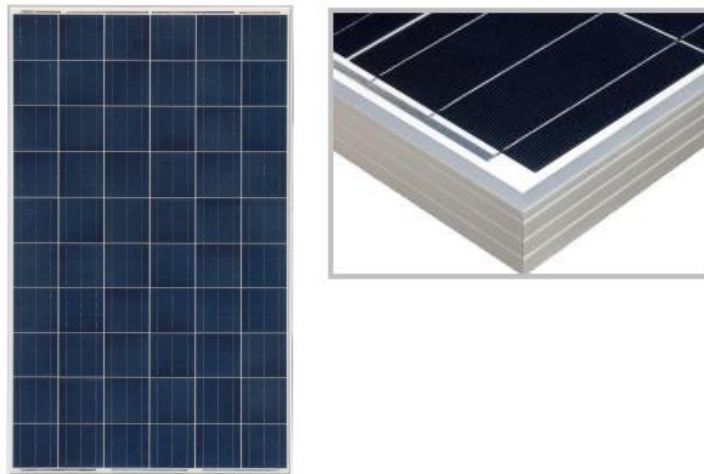
$$E_a = \frac{E \cdot a}{eff_b \cdot f_d} \quad (6.3)$$

donde,

- $E_a$  : energía necesaria [Wh],
- $E$  : demanda diaria [kWh/día],
- $a$  : autonomía del sistema [día],
- $eff_b$  : eficiencia de las baterías [%], y
- $f_d$  : factor de descarga de las baterías [%].

- Para el caso del controlador de carga, se considera utilizar como mínimo uno de 35 [A] y el inversor de voltaje de 120 [W].

Los componentes de la micro-red fueron adquiridos en comercios locales especializados en energía solar para asegurar la calidad y confiabilidad de los mismos. Para el caso de los paneles fotovoltaicos, los escogidos fueron módulos que implementan tecnología policristalina de 250 W de potencia y 12 Vdc en la salida de los mismos. En la figura 4.16 se presenta una fotografía de los paneles y en la tabla 4.6 se entregan sus características eléctricas.



**Figura 4-16 Panel Fotovoltaico modelo SL250TU-30P.**

**Tabla 4.6 Especificaciones Eléctricas.**

<b>Modelo SL250TU-30P</b>		
Potencia Máxima ( $P_{max}$ )	(W)	250
Máximo Voltaje ( $V_{mp}$ )	(V)	31.02
Máxima Corriente ( $A_{mp}$ )	(A)	8.06
Corriente de Corto Cto. ( $I_{sc}$ )	(A)	8.82
Voltaje Cto. Abierto ( $V_{oc}$ )	(V)	36.99
Eficiencia de las Células	(%)	17.46
Eficiencia de los Módulos	(%)	15.40

El regulador de carga se coloca entre el arreglo de paneles fotovoltaicos y el banco de baterías. Básicamente se encarga de controlar el flujo de energía que circula entre ambos elementos para realizar un llenado óptimo de las baterías y alargar su vida útil. El control del flujo de energía se realiza mediante el monitoreo de los parámetros de Intensidad y Voltaje que se están inyectando en el arreglo de acumuladores. Dicho flujo dependerá del estado de carga de los mismos y la energía generada por los paneles. El regulador de carga a utilizar es el que se muestra en la figura 4.17, tiene la capacidad de manejar 50 A de corriente continua y la entrada de voltaje puede ser en 12/24 V<sub>dc</sub> según sea el nivel de tensión del sistema.

**Figura 4-17 Controlador de carga.**

El inversor de voltaje utilizado en la Micro-red es el que se muestra en la figura 4.18. Su función es la de convertir la tensión DC proveniente del banco de baterías en una señal de voltaje alterno de amplitud  $220 V_{RMS}$  y  $50 Hz$  para alimentar el radiómetro de vapor de agua. Debido a las características del sistema se escogió un inversor de onda cuadrada que por lo general son más compactos, generan menos temperatura y son más económicos.



**Figura 4-18 Inversor de Corriente.**

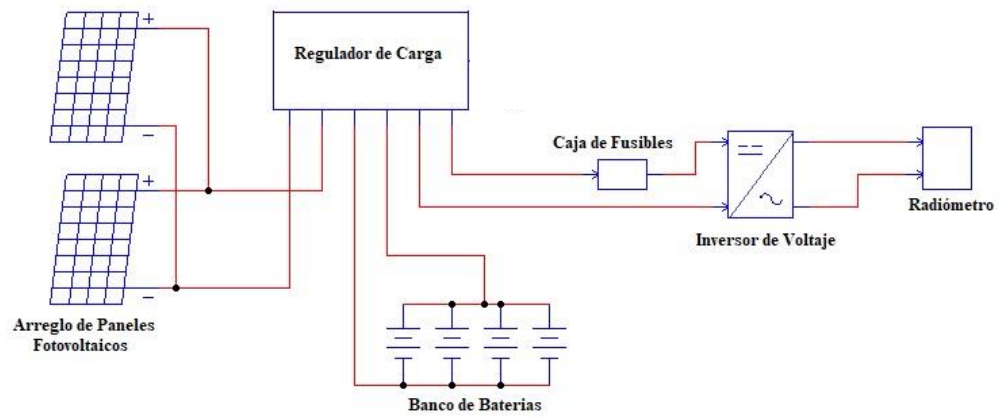
La Micro-red cuenta con fusibles que le proveen protección contra corto circuitos o posibles fallas que involucren un aumento excesivo del flujo de corriente hacia el radiómetro. Los fusibles empleados se presentan a continuación en la figura 4.19. La selectividad de las protecciones fue diseñada utilizando criterios que aseguran el correcto funcionamiento de los equipos y su óptimo resguardo en caso de fallas.



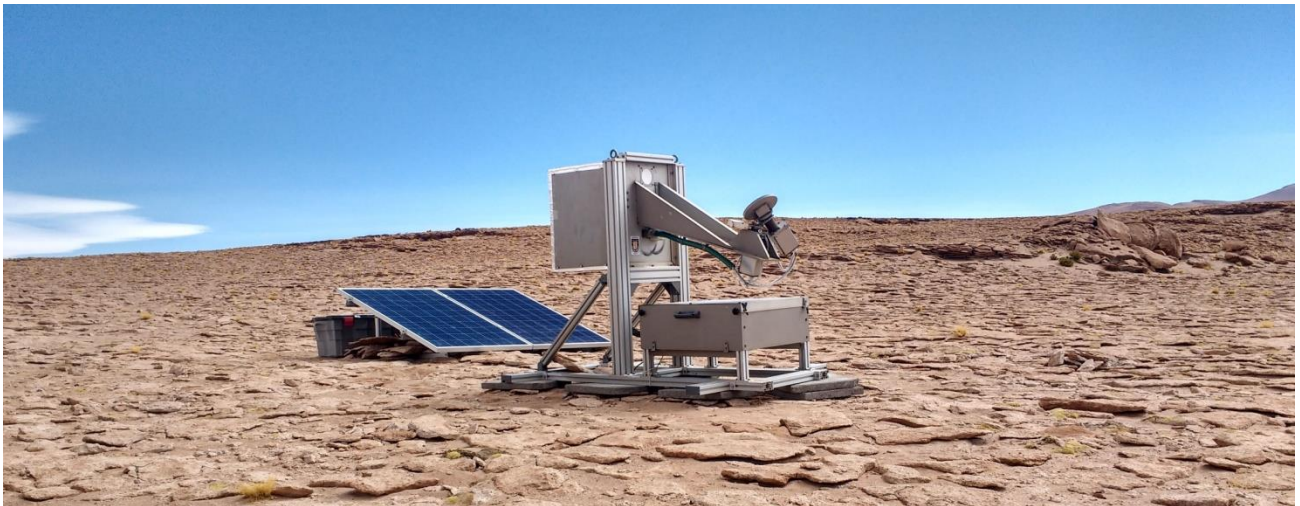
**Figura 4-19 Fusible de Protección.**

El banco de baterías implementado en la Micro-red se encuentra compuesto por baterías de ciclo profundo fabricadas en plomo ácido (AGM- Absorption Glass Mat). Estos acumuladores tienen la característica que no requieren de mantenimiento alguno para su óptimo funcionamiento, además soportan ciclos de descarga más profundos y son más resistentes a golpes y vibraciones.

En la figura 4.19 se presenta el diagrama esquemático de la micro-red diseñada. En la ilustración se observa la configuración de los paneles fotovoltaicos y las conexiones entre los distintos componentes del sistema.



**Figura 4-19 Esquema Eléctrico Micro-red.**



**Figura 4-20 Fotografía del sistema terminado.**

#### 4.6.5 Puesta en Marcha.

Luego del armado de la estación solar (Micro-red) se procede a preparar el terreno en donde se ubicara el Radiómetro. Esta preparación comprende la nivelación del área escogida para que el instrumento posea la firmeza necesaria y pueda soportar las inclemencias del clima presentes en la zona. También se necesita orientar al radiómetro a azimuth cero (norte instrumental) para obtener mediciones correctas.

#### 4.6.6 Problema 1: Radiómetro

Una vez que todos los elementos del sistema se encontraron listos se realizó la interconexión para comprobar el correcto funcionamiento de cada etapa. Fue aquí en donde se detectó que el Radiómetro no encendía. Posteriormente se procede a verificar la alimentación del instrumento, atribuyéndole a esto la falla. Sin embargo, luego de las mediciones y análisis de los resultados encontrados se concluye que la falla se encontraba en el interior del Radiómetro por lo que se procede a retirar las cubiertas externas de la etapa digital y a realizar testeos en los puntos de posibles fallas.

En la figura 4.21 se muestra el interior del sector del Radiómetro que aloja gran parte de los componentes digitales del instrumento, en donde por ejemplo podemos encontrar el computador industrial encargado de ejecutar todas las acciones programadas para la adquisición de datos, también podemos encontrar los distintos filtros que se encargan de mejorar la calidad del suministro que alimenta al equipo, puertos de conexión al instrumento, etc.



**Figura 4-21 Fotografía interior del Radiómetro.**

Finalmente, luego de descartar otras posibles fallas, se encontró que la fuente de poder del computador industrial había resultado dañada luego de que el consumo de corriente requerido por los motores encargados de mover los espejos aumentara posiblemente por causa de una mayor resistencia mecánica en el eje de los mismos, al pasar un prolongado tiempo sin moverse. La fuente de poder no fue capaz de suministrar tal nivel de corriente y se quemó.

Dada la premura por solucionar el problema, se opta por cambiar la fuente de poder completa por una de igual voltaje de salida ( $24 V_{DC}$ ) pero de una potencia mayor a la anterior (mínimo 150 W). Debido a lo aislado del lugar y a la dificultad de encontrar una fuente regulada con esas características se decide viajar hasta la ciudad de Calama, en donde luego de una larga búsqueda se encuentran opciones factibles para dar solución a la falla y que finalmente la solucionaron.

En la figura 4.22 se presenta la nueva fuente de poder utilizada en el Radiómetro y en la tabla 4.7 se muestran sus principales características.



**Figura 4-22 Fotografía Fuente de Poder Regulada.**

**Tabla 4.7 Características fuente de Poder Regulada.**

<b>Fuente Regulada SPS24V10A</b>	
Voltaje Entrada	100-120 $V_{AC}$ /60Hz 200-240 $V_{AC}$ /50Hz
Voltaje Salida	24 $V_{DC}$
Corriente Max. Salida	10 A
Potencia Max. Salida	240 W
Peso	739 g
Dimensiones	20x5x11 cm

#### 4.6.7 Problema 2: Micro-Red.

Si bien en un primer momento la Micro-red funcionaba a la perfección, luego de un tiempo se presentó una falla en el regulador de carga, que consistía en que dicho componente dejaba de hacer el control de flujo de energía desde los paneles al banco de baterías, ocasionando que luego de un determinado tiempo las baterías se descargaran y por ende el radiómetro se apagara. El desperfecto también era causante de que la pantalla del regulador de carga no respondiera al presionar los distintos botones de configuración existentes en él.

Luego de analizar las posibles fallas que podían estar causando el problema, se llegó a la conclusión de que las elevadas temperaturas existentes al interior de la caja estaban causando estragos con los semiconductores del regulador de carga. Para solucionar este inconveniente se procedió a estudiar las principales fuentes de calor y condiciones que contribuían a la ocurrencia del desperfecto, encontrándose que la gran cantidad de radiación solar incidente en la cubierta de plástico negro y la nula ventilación al interior de la caja eran las principales causantes.

Las soluciones fueron las siguientes:

- Se cubrió la cubierta de plástico de la caja con un material reflectante y con características de aislante térmico, para asegurar que la mayor parte de radiación solar fuera reflejada al ambiente y no absorbida por el cuerpo de la caja.
- Se instaló un pequeño ventilador ubicado cerca de la superficie disipadora del regulador de carga, para que generara una corriente de aire y la temperatura fuera disipada con mayor efectividad.
- Se optimizó la distribución de las cajas plásticas, dejándolas en una posición en la cual los paneles pudieran ofrecerles sombra durante el mayor tiempo posible, y de esta manera evitar la sobre exposición a la radiación solar sobre los baúles plásticos. En la figura 4.23 se muestra el resultado final luego de las modificaciones realizadas.



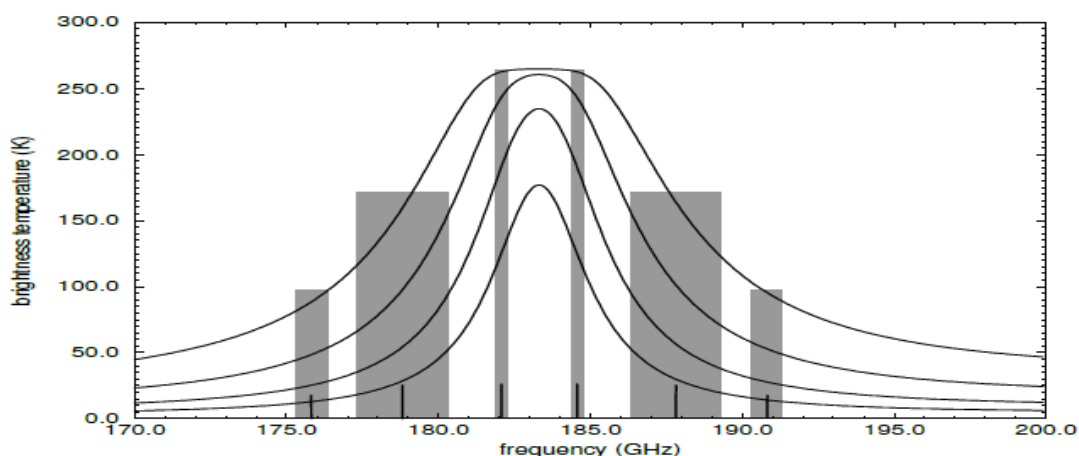
**Figura 4-23 A la derecha, caja contenedora del Regulador de Carga.**

## 5. Análisis de resultados.

---

Durante el tiempo que el radiómetro de vapor de agua se encontró en el sitio del proyecto MARI registrando los valores de PWV de la atmósfera, debió someterse a condiciones extremas de funcionamiento (gran altura sobre el nivel del mar, vientos a grandes velocidades, temperaturas altísimas durante el día y bajo cero durante las noches). Debido a esto la micro red en varias oportunidades dejó de suministrar energía al radiómetro, ocasionando lagunas en los datos de salida. Los problemas más importantes que fueron detectados en el sistema se detallan en el capítulo 6.5 de la tesis.

Los datos recolectados se procesan utilizando un script escrito en lenguaje Matlab que es presentado en el anexo A.1. Este programa recibe como entrada las potencias medidas por los tres canales en que el radiómetro mide temperaturas de brillo, los cuales se muestran en la siguiente ilustración y se representan como rectángulos superpuestos a las distintas temperaturas de brillo de las moléculas de vapor de agua presentes en la atmosfera, indicando en que zonas de la línea de emisión se están midiendo potencias.



**Figura 5-1** Canales de observación sobre la línea de emisión del vapor de agua.

El programa usa la calibración que fue realizada comparando los datos del radiómetro con los del radio telescopio APEX para entregar valores de PWV correctos. Estos datos posteriormente son comparados con el vapor de agua medido por los radiómetros de los observatorios ALMA y APEX, con la finalidad de realizar la estadística que determinará si el sitio tiene las condiciones necesarias para la observación de fuentes extraterrestres en alta frecuencia.

## 5.1. Calibración Radiómetro 183 GHz.

Con la finalidad de obtener datos fidedignos de PWV, el día 07 de mayo del 2018 se instala el radiómetro en las inmediaciones del proyecto APEX durante cinco días. Teóricamente las mediciones de vapor de agua en ambos instrumentos debían ser aproximadamente los mismos para cada instante de tiempo, eso se traduce en que gráficamente las curvas deben superponerse la una a la otra. En la práctica nos encontramos con los resultados que se muestran en la figura 5-4, en donde claramente se puede observar que el algoritmo que calcula la cantidad de PWV medido por el radiómetro a partir de las intensidades de brillo está desajustado, generando una diferencia entre las curvas.

Para solucionar esta descalibración no basta con sumar o restar un offset a las señales para lograr igualarlas, dado que las diferencias de vapor de agua no son parejas durante todo el tiempo que duró el registro de datos. Una solución mucho más acertada es encontrar los coeficientes que mejor modelen la interpolación entre el PWV de APEX y los datos de potencia medidos por el radiómetro en MARI. Luego de usar la herramienta *cftool* de Matlab para calcular dichos coeficientes, se decide trabajar con una interpolación lineal con un polinomio de quinto grado. El modelo encontrado es el siguiente:

Linear model Poly5:

$$f(x) = p_1 \cdot x^5 + p_2 \cdot x^4 + p_3 \cdot x^3 + p_4 \cdot x^2 + p_5 \cdot x + p_6 \quad [mm] \quad (7.1)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p_1 = 1.77e - 08 \quad [mm/K^5]$$

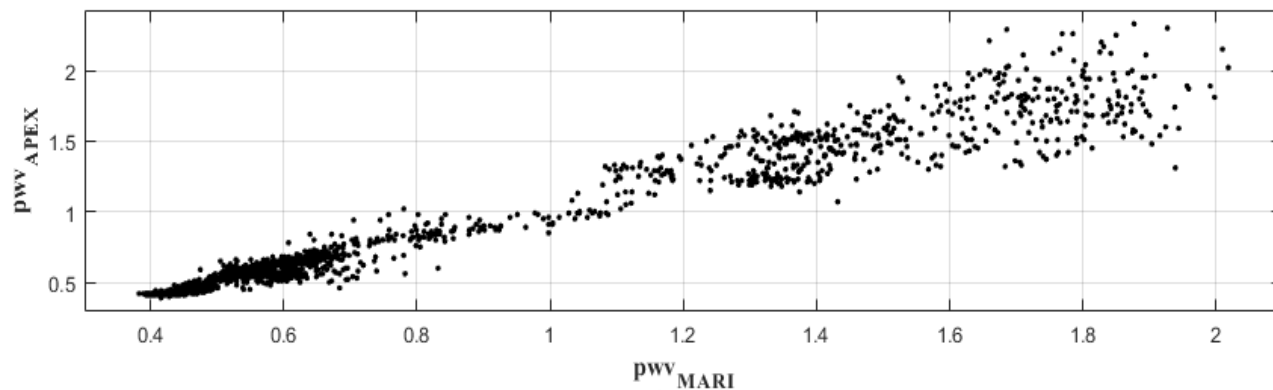
$$p_2 = -3.717e - 06 \quad [mm/K^4]$$

$$p_3 = 0.0002891 \quad [mm/K^3]$$

$$p_4 = -0.01008 \quad [mm/K^2]$$

$$p_5 = 0.1809 \quad [mm/K]$$

$$p_6 = -0.915 \quad [mm]$$

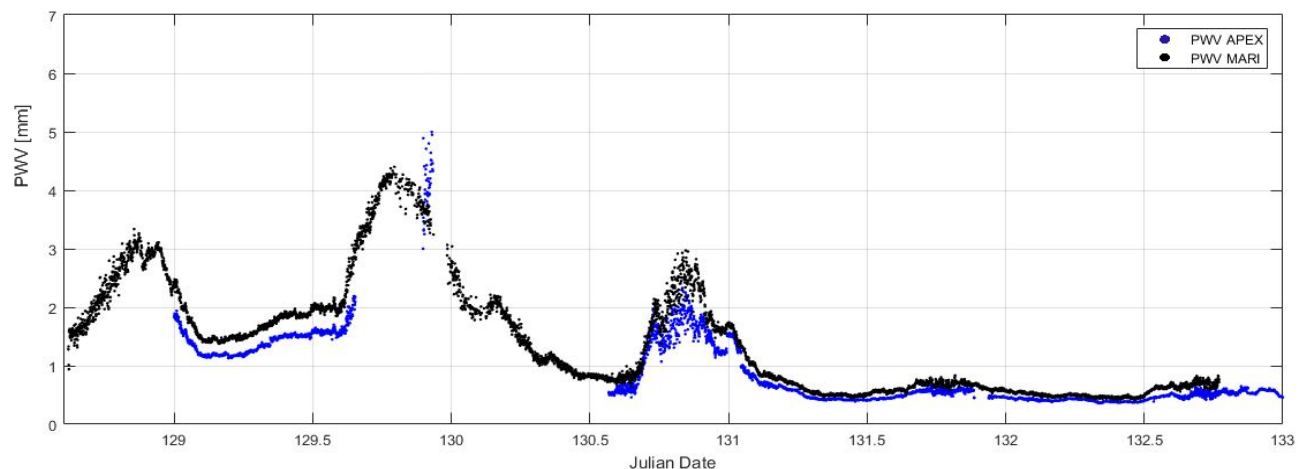


**Figura 5-2** Correlación entre datos de PWV de MARI & APEX posterior a la calibración.

Posterior a la calibración con el polinomio encontrado, la correlación entre el PWV medido por el radiómetro y APEX es de 0.978 con una desviación estándar de 0.0265. En la figura 5-2 se presenta el grafico con la correlación de los datos, en donde se observa que el valor obtenido concuerda con la realidad de las mediciones que se muestran en la figura 5-5.

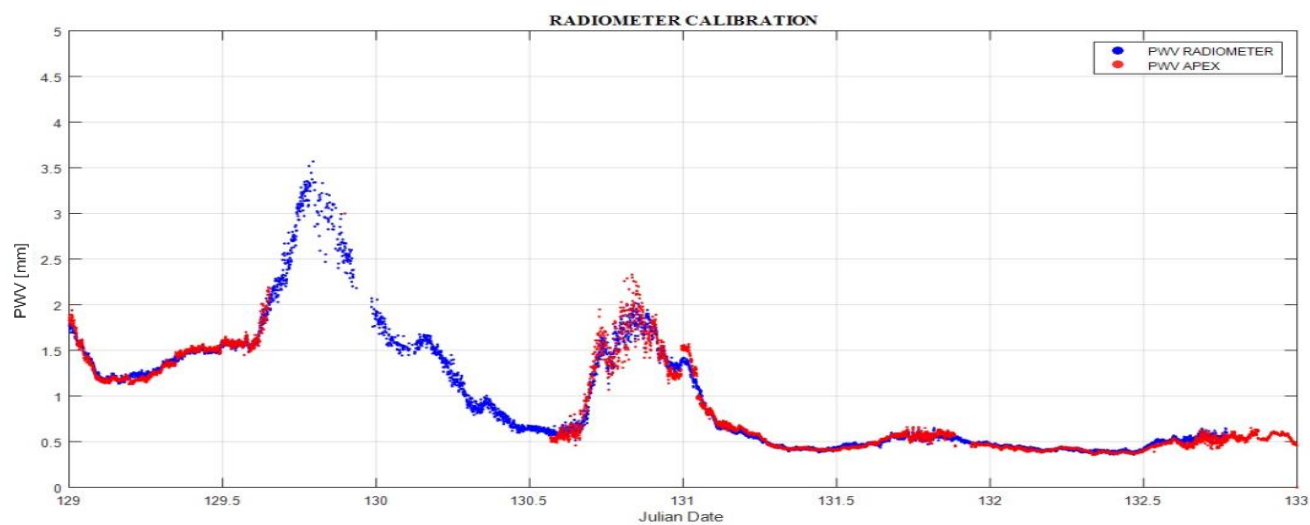


**Figura 5-3** A la izquierda, ubicación del radiómetro durante la calibración con APEX. A la derecha una fotografía del Atacama Pathfinder Experiment.



**Figura 5-4 Vapor de agua precipitable medido por ambos instrumentos. En azul se muestra el PWV de APEX y en negro los resultados medidos por el radiómetro utilizado en MARI.**

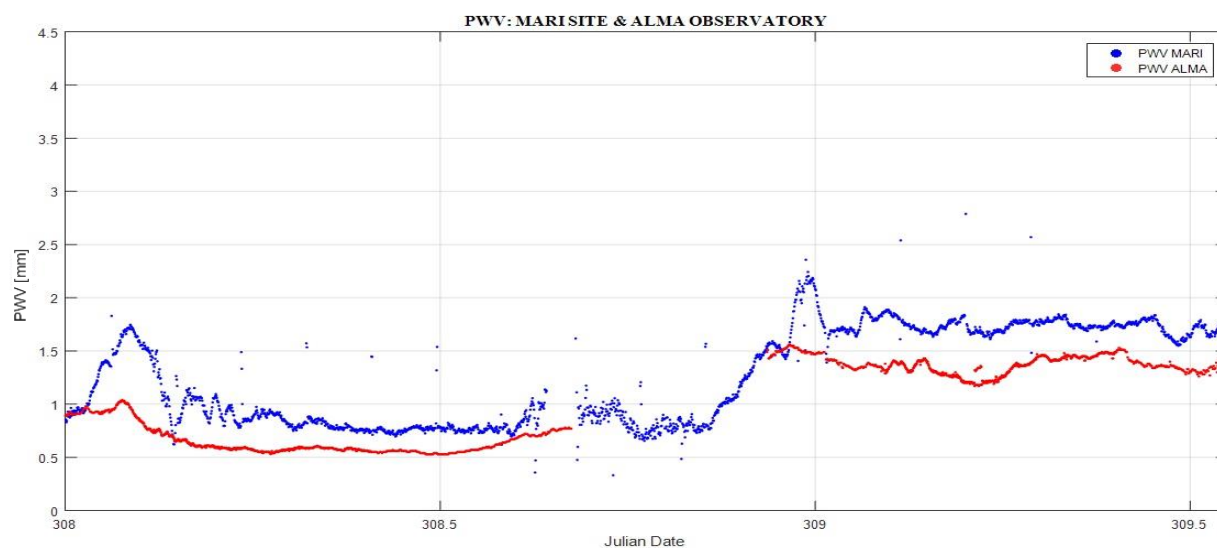
Una vez que el algoritmo de cálculo de PWV del radiómetro se encontró ajustado se repitió el ejercicio de graficar las señales de vapor de agua del instrumento en cuestión versus el de APEX, con la finalidad de asegurar que esta vez los niveles medidos fueran más similares, obteniéndose el gráfico que se presenta en la figura 5-5. Aquí se observa que las curvas prácticamente se superponen, certificando que los valores de vapor de agua del radiómetro son correctos y fiables. En las series de datos utilizadas para hacer la calibración se alcanza a registrar un episodio de mal clima (viento a grandes velocidades.), en el que el telescopio APEX cerró el obturador del instrumento para cuidar la integridad de los equipos, explicándose así el periodo de tiempo sin datos en su registro.



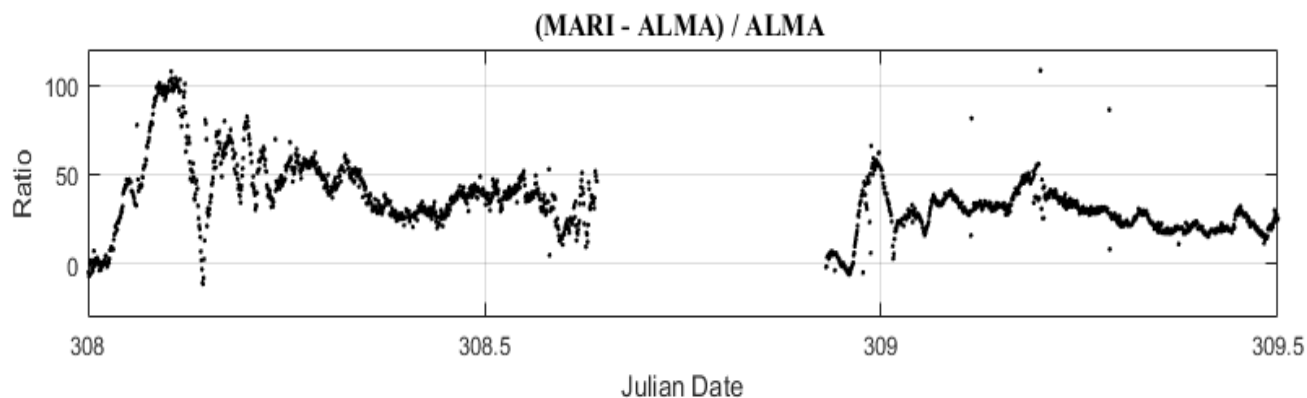
**Figura 5-5 Vapor de agua precipitable medido por ambos instrumentos. En rojo se muestra el PWV de APEX y en azul los resultados medidos por el radiómetro utilizado en MARI.**

## 5.2. Resultados Vapor de Agua sobre el sitio de MARI-UCSC.

Los datos obtenidos desde el radiómetro instalado en el sitio de MARI-UCSC son comparados con los valores de PWV registrados en APEX y ALMA, con la finalidad de determinar la calidad del sitio bajo estudio. El primer grupo de datos que se obtuvieron corresponden a los días 04, 05 y 06 de noviembre del año 2017, que en calendario juliano corresponde a los días 308, 309 y 310 respectivamente, estos datos se presentan en el gráfico de la figura 5-6. Los valores de PWV medidos por ALMA y el radiómetro instalado en MARI muestran tendencias similares en sus variaciones, esto se debe a que ambos sitios se encuentran aproximadamente a 60,2 km de distancia, produciendo que masas de aire con contenidos de humedad similares se presenten en la atmósfera sobre estos sitios. Sin embargo, dado que el lugar bajo estudio se encuentra 820 metros más abajo que el llano de Chajnantor, en MARI se debe atravesar una mayor cantidad de atmósfera y por ende una mayor cantidad de masa de aire y moléculas de vapor de agua. Esto explica el hecho de que el PWV medido por los radiómetros en ALMA sea en promedio un 35.7% menor que el registrado en MARI.



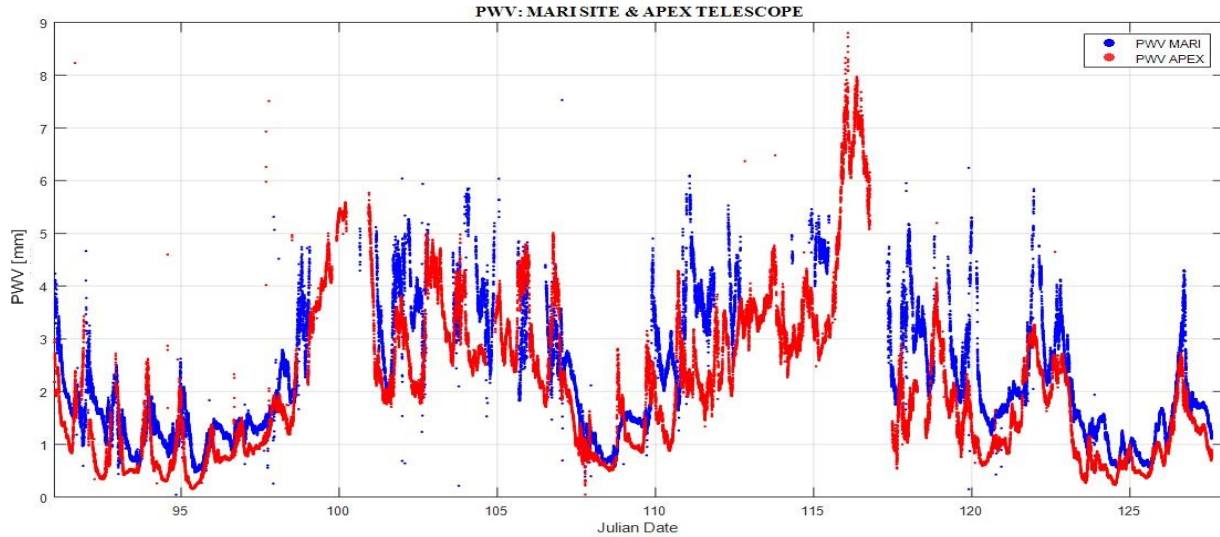
**Figura 5-6 PWV MARI v/s PWV ALMA periodo del 04 al 06 de Noviembre del 2017.**



**Figura 5-7 Comparación valores PWV 04 -06 Noviembre 2017**

En la figura 5-97 se presentan los resultados de calcular el porcentaje para cada par de puntos de las series de datos (PWV MARI / PWV ALMA), los segmentos de la gráfica que se encuentran en negativo corresponden a los momentos cuando el vapor de agua precipitable es menor en MARI. Se observa que fueron tan solo algunos pequeños instantes donde el PWV del sitio bajo estudio logro ser menor al registrado por ALMA. Para calcular estos porcentajes se utiliza la ecuación 7.2.

En la figura 5-8 se presentan los resultados registrados por el radiómetro instalado en el sitio de MARI y los obtenidos por el observatorio APEX en el periodo comprendido desde el 01 de abril del 2018 hasta el 07 de mayo del mismo año. Se observa que solo en pequeños instantes de tiempo el PWV medido en el sitio de MARI es menor al de APEX, esto se debe a los mismos motivos explicados con anterioridad, en donde la diferencia de altura entre ambos lugares era la principal responsable del aumento de PWV en el caso del sitio bajo estudio.



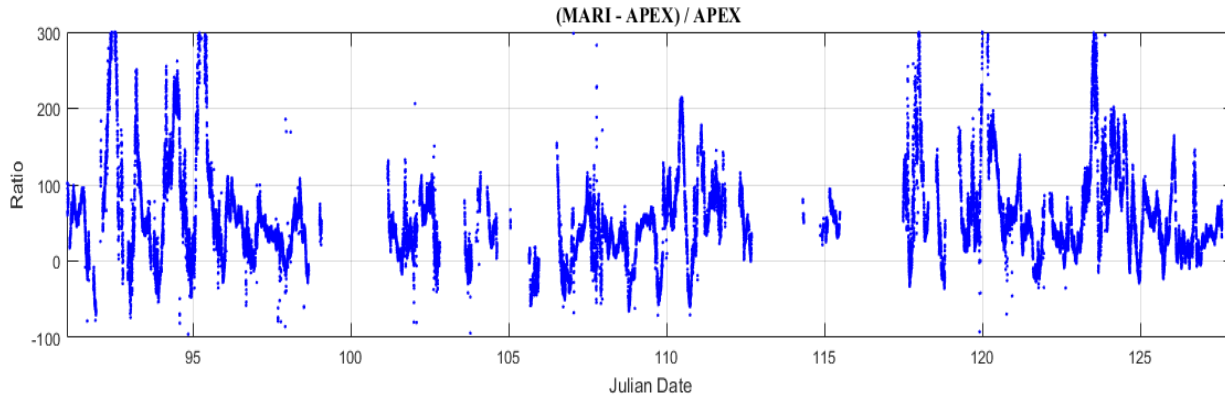
**Figura 5-8 PWV MARI v/s PWV APEX periodo 01 Abril al 07 de Mayo del 2018.**

En la figura 5-9 se presentan los resultados de calcular el porcentaje para cada par de puntos ( $PWV_{APEX} / PWV_{MARI}$ ), los segmentos de la gráfica que se encuentran en negativo corresponden a los momentos cuando el vapor de agua precipitable es menor en MARI. La expresión que fue utilizada para obtener la curva resultante es la que se muestra a continuación en 7.2. Se observa que si bien la mayoría del tiempo las condiciones atmosféricas son más favorables en APEX, en MARI se presentan episodios de varias horas en donde la visibilidad del sitio es casi del 80% mejor en términos del PWV presente en su atmósfera.

$$\frac{PWV_{MARI} - PWV_{APEX}}{PWV_{APEX}} \cdot 100 \quad (7.2)$$

$PWV_{MARI}$  = Vapor de agua precipitable registrado en MARI para un instante dado.

$PWV_{APEX}$  = Vapor de agua precipitable registrado en APEX para un instante dado.



**Figura 5-9 Comparación valores PWV**

De los datos presentados en la figura 5-8 también se puede calcular el tiempo promedio que tardan las masas de aire en desplazarse entre MARI y el lugar donde se emplaza el radio telescopio APEX, esto podemos hacerlo calculando minuto tras minuto la correlación entre ambas series y encontrando el punto cuando es máxima. Para realizar lo anterior se decidió que debido a la naturaleza cambiante de los datos de vapor de agua era necesario encontrar un modelo matemático que represente los resultados de correlación obtenidos. Lo anterior fue calculado utilizando la herramienta *cftool* de Matlab, obteniéndose el siguiente polinomio de grado ocho:

Linear model Poly8:

$$f(x) = p_1 \cdot x^8 + p_2 \cdot x^7 + p_3 \cdot x^6 + p_4 \cdot x^5 + p_5 \cdot x^4 + p_6 \cdot x^3 + p_7 \cdot x^2 + p_8 \cdot x + p_9 \text{ [mm]} \quad (7.2)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p_1 = 3.951e - 21 \text{ [mm/K}^8\text{]}$$

$$p_2 = -5.179e - 18 \text{ [mm/K}^7\text{]}$$

$$p_3 = 2.272e - 15 \text{ [mm/K}^6\text{]}$$

$$p_4 = -2.799e - 13 \text{ [mm/K}^5\text{]}$$

$$p_5 = -4.036e - 11 \text{ [mm/K}^4\text{]}$$

$$p_6 = 5.045e - 09 \text{ [mm/K}^3\text{]}$$

$$p_7 = 2.684e - 08 \text{ [mm/K}^2\text{]}$$

$$p_8 = 0.0003571 \text{ [mm/K}^1\text{]}$$

$$p_9 = 0.7536 \text{ [mm/K]}$$

El resultado luego de buscar la correlación minuto tras minuto y posteriormente calcular el modelo que más se aproxima a los datos reales se presenta en la figura 5-11, en donde se observa que en promedio las masas de PWV tardan en llegar desde APEX hasta MARI 176.3 minutos. Lo que corresponde a que las nubes aproximadamente recorran 60 Km en 3 horas, significando que se mueven a una velocidad estimada promedio de 5.5 metros por segundo. En la figura 5-10 se muestra una figura con las ubicaciones de MARI y los observatorios ALMA y APEX, que se emplazan en el parque astronómico Atacama, específicamente en el llamo de Chajnantor.

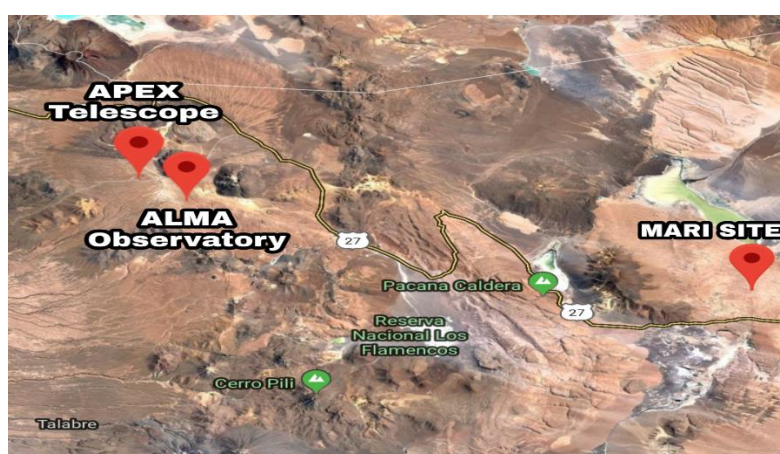


Figura 5-10 Mapa satelital ubicación geográfica de MARI y los observatorios APEX y ALMA.

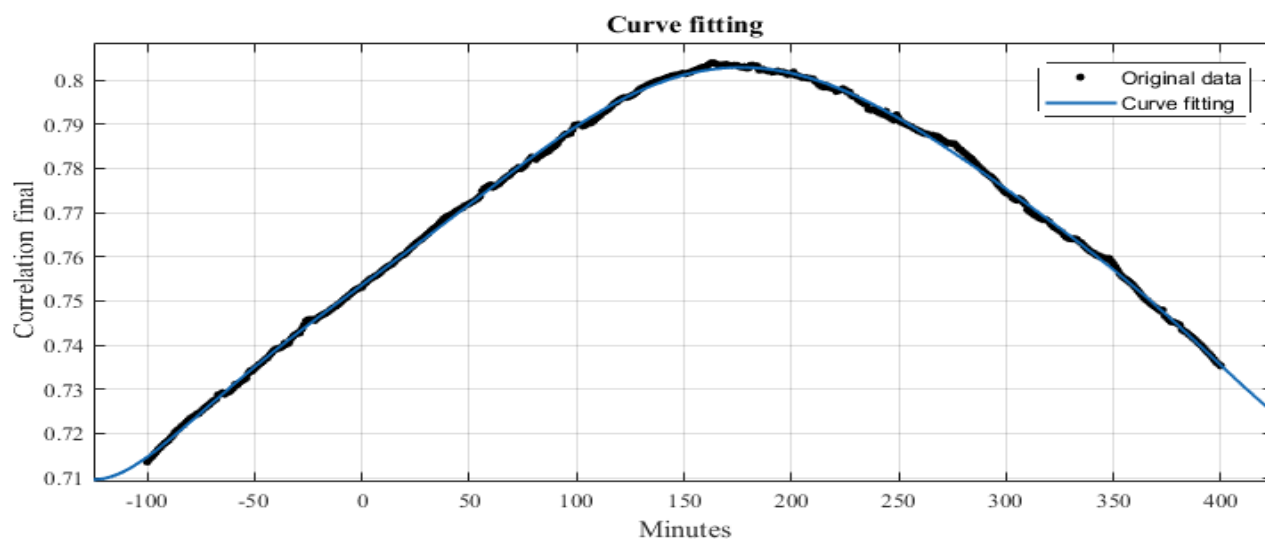
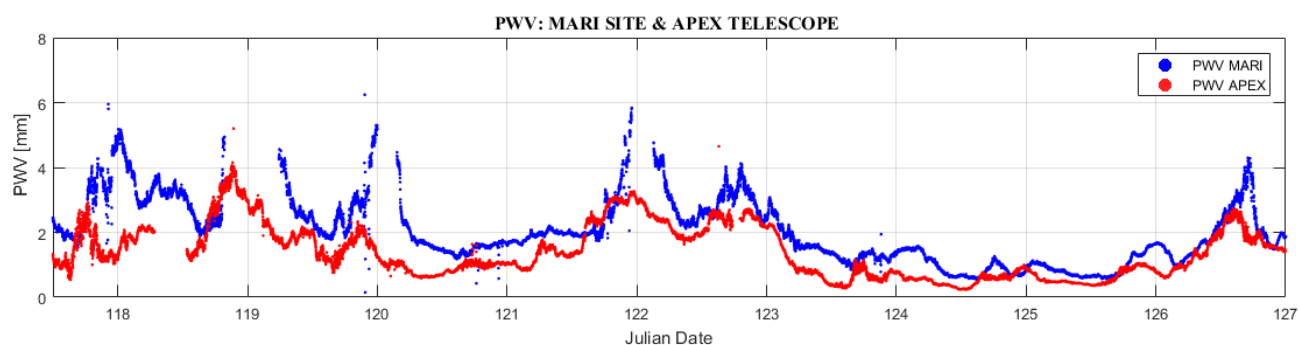
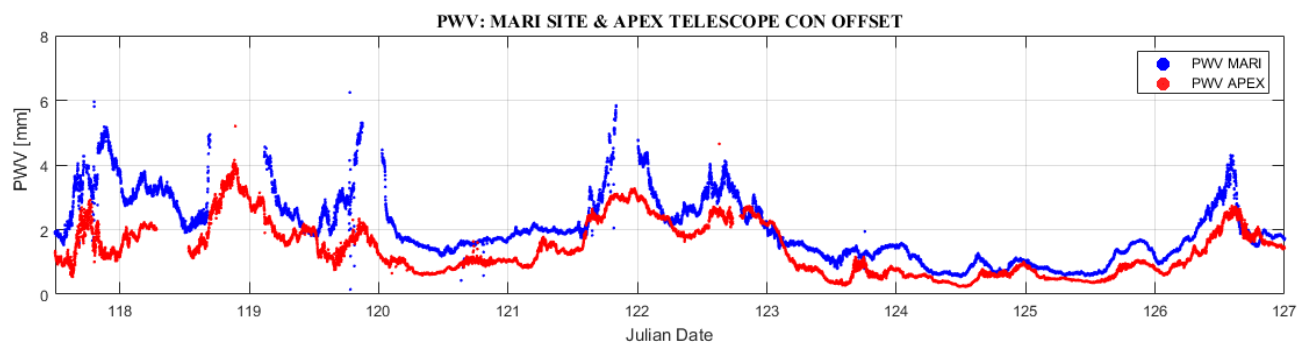


Figura 5-11 Correlación entre los valores de PWV medidos en MARI y APEX considerando desplazamientos de un minuto.

Gráficamente si aplicamos el offset calculado a los datos, retrocediendo todos los valores de vapor de agua de MARI en el tiempo encontrado para la correlación máxima, se obtiene que las tendencias de ambas curvas se superponen en el eje de las abscisas como se observa en la figura 5-13, indicando que el offset calculado es correcto. La correlación al desplazar los datos de MARI en 173.6 minutos es igual a 80.2%



**Figura 5-12 PWV en MARI & APEX desde el día 27/04/2018 al 07/05/2018.**



**Figura 5-13 PWV en MARI & APEX desde el día 27/04/2018 al 07/05/2018 con offset de 176 minutos en MARI.**

### 5.3. Estudio de transmisión de señales en sitio de MARI-UCSC.

Para realizar el estudio de transmisión de señales en alta frecuencia se utilizará el modelo de transferencia radiativa ATM (Atmospheric Transmission at Microwaves, Pardo et al [2001b]) [11] que es utilizado por la gran mayoría de observatorios de ondas milimétricas y submilimétricas. Como entrada, el modelo solo requiere que ingresemos los promedios de PWV y las frecuencias máxima y mínima en las cuales queremos observar las transmisiones atmosféricas [12].

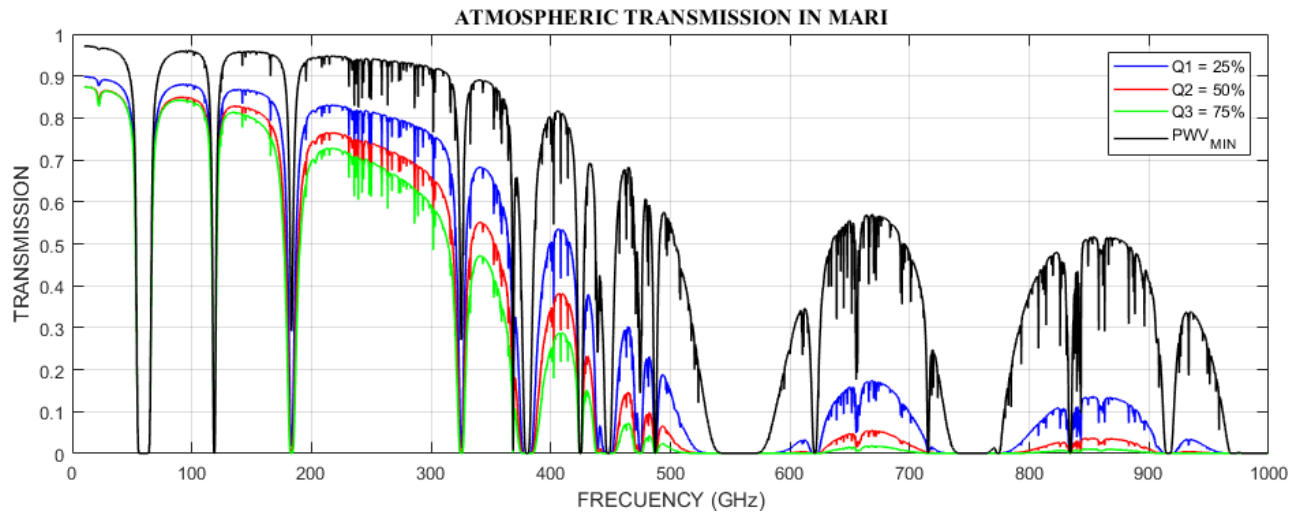
En base a los datos obtenidos por el radiómetro de vapor de agua en el sitio de MARI podemos calcular los siguientes indicadores estadísticos para el intervalo comprendido desde el 01 Abril al 07 de Mayo del 2018:

$$Q_1 = 1.685 \text{ mm (25\%)}$$

$$Q_2 = 2.807 \text{ mm (50\%)}$$

$$Q_3 = 3.889 \text{ mm (75\%)}$$

Se decidió considerar como indicadores representativos a los cuartiles de la muestra de datos, por el significado práctico que estos tienen. El cuartil 1 ( $Q_1$ ), indica que el 25% de los datos eran menores o iguales a 1.685 mm de vapor de agua precipitable, el cuartil 2 ( $Q_2$ ) coincide con el valor estadístico de la mediana y significa que el 50% del tiempo total de observación los datos de PWV fueron iguales a 2.803 mm. Para los tres valores encontrados se calcula a través del modelo ATM la curva que describirá el comportamiento de la transmisión de señales entre 10 y 1000 GHz, la magnitud de transmisión para los distintos casos de PWV está representada por valores entre 0 y 1, que denotan el porcentaje de la potencia inicial que lograría ser recibida en la superficie del terreno. A modo de referencia se incluye la curva de transmisión correspondiente al mínimo valor de PWV registrado por el radiómetro de 183 GHz, este valor se presenta en algunas oportunidades en forma de peak, por lo que no se puede considerar como un valor valido para análisis estadísticos representativos. Los resultados se presentan en la figura 7-14.



**Figura 5-14 Transmisión atmosférica de señales para distintos valores de PWV.**

Es importante dejar en claro que el análisis de transmisión de señales realizado es en base a los datos medidos entre el 01 Abril al 07 de Mayo del 2018. Para este periodo de tiempo se observa que entre los días 98 - 107 y 110 - 120 el PWV fue bastante alto, tanto en APEX como en MARI (ver figura 5-8), esto trae como consecuencia un aumento en los indicadores estadísticos extraídos desde la muestra de datos de MARI, pero que no son 100% representativos de la atmosfera sobre el sitio.

## 6. Conclusiones.

---

Los resultados encontrados tras esta investigación sugieren que el sitio de MARI cumple con las condiciones atmosféricas para realizar observaciones a ondas milimétricas y submilimétricas, aun cuando la calidad del lugar no es tan buena como los registros de PWV en Chajnantor (ALMA y APEX). Esto por estar a menor altura y cercano al sector oriente del altiplano, expuesto a mayor humedad proveniente del lado Argentino. Sin embargo, la cantidad de datos recogidos durante mi tesis no me son suficientes para determinar con exactitud la viabilidad de la observación de señales en las frecuencias anteriormente mencionadas, dado que para eso es necesario una gran cantidad de tiempo de análisis, en donde se puedan estudiar los niveles de PWV en todas las estaciones y fenómenos climatológicos presentes en el año.

Luego de finalizar el plazo establecido para mantener el radiómetro en el sitio de MARI, este fue reinstalado en el cerro Toco a 10 Km del observatorio ALMA, específicamente en las inmediaciones del observatorio ACT. Los resultados luego de los primeros días de funcionamiento en ese lugar se presentan en el Anexo B de la tesis.

## Anexo A

# Scripts de MatLab creados para el procesamiento de datos

Durante el transcurso de la investigación, fueron creados varios códigos y programas para el análisis, procesamiento, visualización y comparación de los datos registrados por el radiómetro. Este tipo de documentos complementa el análisis práctico de los cálculos presentados en la Tesis, además resulta de especial interés dejar un registro de ellos para trabajos futuros que puedan derivarse de esta investigación.

## A.1 Código procesamiento de datos

```

filename = 'APEX_ABRIL_MAYO.csv';
delimiter = ';';
formatSpec = '%s%s%[\n\r]';
fileID = fopen(filename,'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'TextType',
'string', 'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);
APEX_ = [dataArray{1:end-1}];

clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray ans;

date = APEX_(:,1);
pwv = str2double(APEX_(:,2));
formatIn = 'yyyy-mm-ddTHH:MM:SS';
mat = str2mat(date);
fecha = datevec(mat,formatIn);

% Calculo fecha juliana
ano = fecha(:,1);
mes = fecha(:,2);
dia = fecha(:,3);
hor = fecha(:,4)./24;
min = fecha(:,5)./1440;
sec = fecha(:,6)./86400;
cont = 1;

%Asignacion de dias
for j=1:length (dia)-1
    if dia(j) ~= dia(j+1)
        cont = cont+1;
    end
end

dia1 = round (dia);
ano1 = ano - 2000;
fechastr = [dia1 mes ano1];
fechastr1 = int2str(fechastr);
jul =zeros(length(fechastr1)-1, 1);

for j=1:length (dia)

    jul(j)=calculate_diajuliano(strrep(fechastr1(j,:), ' ',''));
end

time = jul + hor + min + sec;
infox = [time pwv];

minutes = zeros(cont*1440,1);
hour = zeros(cont*1440,1);
k = 0;
q = 0;

```

```

dia_jul(1) = jul(2);

clear w c p q i j k dia_ini
%%
base_datos = infox;
date = (base_datos(:,1));
pwv_pat = (base_datos(:,2));
pwv_final = zeros(cont*1440,1);
ttrb = jul(1):1/(60*24):jul(end)+1;
ttrb1 = ttrb(1:length(ttrb)-1);
time1 = ttrb1;
j = 1;
timelro = round(time1,5);
datelro = round(date,5);
time1 = timelro;
date = datelro;
for i=1:length(time1)
    if j > length(date)
        pwv_final(i,1:2) = [time1(i) NaN];

    else if time1(i)==date(j)
        pwv_final(i,1:2) = [time1(i) pwv(j)];
        j = j+1;
    else
        pwv_final(i,1:2) = [time1(i) NaN];
    end
end
end

% plot(pwv_final(:,1),pwv_final(:,2)','*r'); hold on
% plot(date,pwv,'.b');
clear ans i w j posi time

%load reduced data from a1_get_data_wvr1_MMY_MMY
% CHOOSE ONE k

%k=4; load data_1710-1711; m1=277;m2=309;
k=5; load data_2903-0705; m1=91;m2=128;

% Define the number of days: nd
nd=length(wvr1(1,1,:));
% Define total number of datapoints
nt=nd*1440;

% Get data for each parameter to one single vector of data

tt=squeeze(wvr1(:,1,:));tt_final=reshape(tt,1,nt);
trx1=squeeze(wvr1(:,2,:));trx1_final=reshape(trx1,1,nt);
trx2=squeeze(wvr1(:,3,:));trx2_final=reshape(trx2,1,nt);
trx3=squeeze(wvr1(:,4,:));trx3_final=reshape(trx3,1,nt);
ta1=squeeze(wvr1(:,5,:));ta1_final=reshape(ta1,1,nt);
ta2=squeeze(wvr1(:,6,:));ta2_final=reshape(ta2,1,nt);
ta3=squeeze(wvr1(:,7,:));ta3_final=reshape(ta3,1,nt);
az=squeeze(wvr1(:,10,:));az_final=reshape(az,1,nt);
el=squeeze(wvr1(:,11,:));el_final=reshape(el,1,nt);
tint=squeeze(wvr1(:,12,:));tint_final=reshape(tint,1,nt);

```

```

% Eliminate Ta3 larger than 100 K

for i=1:nt
    if ta3_final(i)>100
        ta3_final(i)=NaN;
    end
end

% new attempt Mar 22, 2017
tarb=ta2_final-ta3_final;

% FINAL ATTEMPT 12-Apr-2017
% CALIBRACION MAURICIO DIAZ_ APEX MAYO 2018
p1 = 1.77e-08 ;
p2 = -3.717e-06 ;
p3 = 0.0002891 ;
p4 = -0.01008 ;
p5 = 0.1809 ;
p6 = -0.915 ;
offset = 0.005975685;

pwv_UCSC = p1.*tarb.^5+p2.*tarb.^4+p3.*tarb.^3+p4.*tarb.^2+p5.*tarb+p6+offset;

% Eliminate PWV data at elevation different than 90 deg
j=1;
for i=2:nt-1
    if el_final(i)~=90
        pwv_UCSC(i-1:i+1)=NaN;
    end
end

% Remove PWV less than 0.0 mm

for i=1:nt
    if pwv_UCSC(i) < 0
        pwv_UCSC(i)=NaN;
    end
end
for i=1:nt
    if pwv_UCSC(i) > 10
        pwv_UCSC(i)=NaN;
    end
end
time_UCSC = tt_final(1:cont*1440);
pwv_UCSC_final = pwv_UCSC(1:cont*1440);

pwv_APEX_final = pwv_final(:,2)';

ratio=(pwv_UCSC_final-pwv_APEX_final)./pwv_APEX_final.*100;
ratio_set = zeros(cont*1440,1)';

```

```

for z=1:length(ratio)-1
    if z>180
        ratio_set(z)=(pwv_UCSC_final(z-180)-
pwv_APEX_final(z))/pwv_APEX_final(z)*100;
    end
end

time_set = tt_final - 0.125;

pwv_offset_ucsc = zeros(cont*1440,1)';
ku = 0;
for y=-100:1:400
    ku = ku +1;
    corr = y;
    ka(ku) = y;
for t=1:length(ratio)-1
    if corr > 0
        if t < length(ratio)-corr
            pwv_offset_ucsc(t) = pwv_UCSC_final(t+corr);

            else
                pwv_offset_ucsc(t) = NaN;
            end
        end

        if corr < 0
            if t > abs(corr)
                pwv_offset_ucsc(t) = pwv_UCSC_final(t-abs(corr));
            else
                pwv_offset_ucsc(t) = NaN;
            end
        end
    end

end

correlation = corrcoef(pwv_offset_ucsc,pwv_APEX_final,'Rows','complete');
correlation_final(ku) = correlation (2,1);
end

plot(ka,correlation_final,'.')

%Grafica resultados
figure('Name','VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])
plot(tt_final,pwv_UCSC,'.b'); hold on;
plot(time1,pwv_final,'.r');
axis([time1(1) time1(end) 0 9])
title('PWV: MARI SITE & APEX TELESCOPE','FontName','times new roman','FontSize',
12);
grid on
legend ('PWV MARI','PWV APEX')
xlabel ('Julian Date')
ylabel ('PWV')

```

## A.2 Código calibración del Radiómetro

```

filename = 'APEX.csv';
delimiter = ',';
formatSpec = '%s%s%[\n\r]';
fileID = fopen(filename,'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'TextType',
'string', 'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);
APEX_ = [dataArray{1:end-1}];

clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray ans;

date = APEX_(:,1);
pwv = str2double(APEX_(:,2));
formatIn = 'yyyy-mm-ddTHH:MM:SS';
mat = str2mat(date);
fecha = datevec(mat,formatIn);

% Calculo fecha juliana
ano = fecha(:,1);
mes = fecha(:,2);
dia = fecha(:,3);
hor = fecha(:,4)./24;
min = fecha(:,5)./1440;
sec = fecha(:,6)./86400;
cont = 1;
%Asignacion de dias
for j=1:length (dia)-1
    if dia(j) ~= dia(j+1)
        cont = cont+1;
    end
end
%%
dial = round (dia);
ano1 = ano - 2000;
fechastr = [dial mes ano1];
fechastr1 = int2str(fechastr);
jul =zeros(length(fechastr1)-1, 1);

for j=1:length (dia)

    jul(j)=calculate_diajuliano(strrep(fechastr1(j,:), ' ',''));

end

time = jul + hor + min + sec;
infox = [time pwv];

minutes = zeros(cont*1440,1);
hour = zeros(cont*1440,1);
k = 0;
q = 0;

```

```

for i=1:(cont*24*60)-1
    minutes(i) = k;
    k = k + 1;
    if k > 59
        k = 0;
    end
end
minutes (cont*1440) = 59;

for p=1:(cont*24*60)-1
    hour(p) = q;
    if minutes(p+1) == 0 && p ~= 1
        q = q + 1;
        if q > 23
            q = 0;
        end
    end
end
hour(cont*1440) = 23;

dia_jul = zeros(cont*1440,1);
c = 0;
for w=1:(cont*24*60)-1
    dia_jul(w+1) = jul(2) + c;
    if hour(w+1) == 23 && minutes(w+1) == 59
        c = c + 1;
    end
end
dia_jul(1) = jul(2);
direc = [dia_jul, hour, minutes];

hour_ = hour./24;
minutes_ = minutes./1440;
time_jul = dia_jul + hour_ + minutes_;

clear w c p q i j k dia_ini hour minutes
%%
base_datos = infox;
date = (base_datos(:,1));
pwv_pat = (base_datos(:,2));
pwv_final = zeros(cont*1440,1);
% timel = round(time_jul,4);
timelro = round(time_jul,5);
datelro = round(date,5);
timel = timelro;
date = datelro;

for i=1:length(date)-1

    for j = 1 : length(timel)-1
        if date(i) == timel(j)
            pwv_final(j) = pwv_pat(i);
        end
    end
end
end

```

```

for w = 1 : length(time1)-1
    if pwv_final(w) == 0
        pwv_final(w) = NaN;
    end
end

clear cont ans i w j posi time
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

k=5; load data_1710-1711; m1=129;m2=133;

% Load fitted average of WVR1 daily cycle
load fit_average

% Define the number of days: nd
nd=length(wvr1(1,1,:));
% Define total number of datapoints
nt=nd*1440;

% Obtain maximum temperature of Tint for each day
for i=1:nd
    max_tint_dia(i)=max(wvr1(:,12,i));
end

% Obtain deviations from fit_average for each day
for i=1:nd
    dia(i)=-0.0003183.*max_tint_dia(i).^2+0.2371.*max_tint_dia(i)-44.02;
end

% Get corrections for fit_average for each day
for i=1:nd
    fit_average_corrected(:,i)=fit_average+dia(i);
end

% Get data for each parameter to one single vector of data

tt=squeeze(wvr1(:,1,:));tt_final=reshape(tt,1,nt);
trx1=squeeze(wvr1(:,2,:));trx1_final=reshape(trx1,1,nt);
trx2=squeeze(wvr1(:,3,:));trx2_final=reshape(trx2,1,nt);
trx3=squeeze(wvr1(:,4,:));trx3_final=reshape(trx3,1,nt);
ta1=squeeze(wvr1(:,5,:));ta1_final=reshape(ta1,1,nt);
ta2=squeeze(wvr1(:,6,:));ta2_final=reshape(ta2,1,nt);
ta3=squeeze(wvr1(:,7,:));ta3_final=reshape(ta3,1,nt);
pwv_delgado=squeeze(wvr1(:,8,:));pwv_delgado_final=reshape(pwv_delgado,1,nt);
pwv_pc=squeeze(wvr1(:,9,:));pwv_pc_final=reshape(pwv_pc,1,nt);
az=squeeze(wvr1(:,10,:));az_final=reshape(az,1,nt);
el=squeeze(wvr1(:,11,:));el_final=reshape(el,1,nt);
tint=squeeze(wvr1(:,12,:));tint_final=reshape(tint,1,nt);

% Eliminate Ta3 larger than 100
for i=1:nt
    if ta3_final(i)>100
        ta3_final(i)=NaN;
    end
end

tarb=ta2_final-ta3_final;
tarb_final = tarb(1:5760)';

```

```

% CALIBRACION MAURICIO DÍAZ_ APEX MAYO 2018
    p1 = 1.77e-08 ;
    p2 = -3.717e-06 ;
    p3 = 0.0002891 ;
    p4 = -0.01008 ;
    p5 = 0.1809 ;
    p6 = -0.915 ;
    offset = 0.005975685;

    pwv_md = p1.*tarb.^5 + p2.*tarb.^4 + p3.*tarb.^3 + p4.*tarb.^2 + p5.*tarb +
p6 + offset;

% first calibration with APEX
pwv_rb=p1.*tarb.^3+p2.*tarb.^2+p3.*tarb+p4;

% Eliminate PWV data at elevation different than 90 deg
j=1;
for i=2:nt-1
    if el_final(i)~=90
        pwv_delgado_final(i-1:i+1)=NaN;
        pwv_pc_final(i-1:i+1)=NaN;
        pwv_rb(i-1:i+1)=NaN;
        % el_final(i)=NaN;
    end
end

% Eliminate PWV data larger than 10 mm
for i=1:nt
    if pwv_delgado_final(i)>10
        pwv_delgado_final(i)=NaN;
    end
    if pwv_pc_final(i)>10
        pwv_pc_final(i)=NaN;
    end
end

% Recalibration of pwv_pc
% pwv_pc_final=pwv_pc_final-0.0127;
pwv_pc_final=pwv_pc_final-0.145530004588;

% Remove fit_average to pwv_pc
pc1=reshape(pwv_pc_final,1440,nd);

for j=1:nd
    for i=1:1440
        pc3_calib(i,j)=pc1(i,j)-fit_average_corrected(i,j);
    end
end

% pwv_pc_final_calib back to a single vector
pwv_calib=reshape(pc3_calib,nt,1);

% Final calibration
pwv_calib=pwv_calib+0.00597952612;

% Remove PWV greater than 8.0 mm

```

```

for i=1:nt
    if pwv_calib(i) > 8.0
        pwv_calib(i)=NaN;
    end
end

% Remove PWV less than 0.0 mm

for i=1:nt
    if pwv_calib(i) < 0
        pwv_calib(i)=NaN;
    end
end

if k==1
    pwv_wvr1(:,1)=tt_final;
    pwv_wvr1(:,2)=pwv_calib;
end

if k==2

% Clock correction. Added 4 minutes and 15 seconds.
    extratime=0/24+4/(24*60)+15/(24*3600);
    for i=1:nt
        tt_final(i)=tt_final(i)+extratime;
    end

% Remove PWV < 0.0 mm
for i=1:nt
    if pwv_rb(i) < 0
        pwv_rb(i)=NaN;
    end
end

%Elimina los datos de PWV mayores a 3mm de APEX
for w = 1 : length(time1)-1
    if pwv_final(w) > 3
        pwv_final(w) = NaN;
    end
end

%Grafica resultados
figure('Name','VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])

plot(tt_final,pwv_md,'.b'); hold on;
plot(time1,pwv_final,'.r'); hold on;
axis([129 133 0 5])
title('RADIOMETER CALIBRATION','FontName','times new roman','FontSize', 12);
grid on
legend ('PWV RADIOMETER','PWV APEX')
xlabel ('Julian Date')
ylabel ('PWV')

```

### A.3 Código procesamiento datos ALMA

```

%% Initialize variables.
filename = 'C:\Users\Mauricio Alonso\Desktop\LAIM PWV - copia\ALMA1\PWV_02-
06_11_2017.csv';
delimiter = ',';
startRow = 2;

%% Format for each line of text:
formatSpec = '%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%s%[\n\r]';

%% Open the text file.
fileID = fopen(filename,'r');

%% Read columns of data according to the format.
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'TextType',
'string', 'HeaderLines', startRow-1, 'ReturnOnError', false, 'EndOfLine',
'\r\n');

%% Close the text file.
fclose(fileID);

%% Create output variable
data = [dataArray{1:end-1}];

%% Clear temporary variables
clearvars filename delimiter startRow formatSpec fileID dataArray ans;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
date = str2mat(data(:,1));
pwv = str2double(data(:,2));
formatIn = 'yyyy-mm-ddTHH:MM:SS';
fecha = datevec(date,formatIn);

dia = fecha(:,3);
hor = fecha(:,4)./24;
min = fecha(:,5)./1440;
sec = fecha(:,6)./86400;

jul = 0:length (dia)-1;

for i=1:length (dia)
    if dia(i)==06
        jul(i)=310;
    end
end

time = jul' + hor + min + sec;
% plot (time,pwv, '.')

```

```

% DATA MARI

mari = xlsread('RADIOMETER_DATA_2017.xlsx');
x = mari(:,1);
y = mari(:,2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
pwv_mari = y(5760:7920);
pwv_mari(1076) = NaN;
pwv_mari(1461) = NaN;
pwv_mari(2256) = NaN;
pwv_mari(991) = NaN;
time_mari = x(5760:7920);
pwv_alma = pwv;
time_alma = time;
pwv_almaa = pwv_alma(1:1791);
time_almaa = time_alma(1:1791);

clear jul dia hor i fecha min sec mari data date formatIn time pwv x y pwv_alma
time_alma

time_patron = (308:1/(60*24):309.5)';

alma1 = pwv_almaa(1:965);
alma3 = pwv_almaa(966:1791);
vacio = length(time_patron)-(length(alma1)+length(alma3));
alma2 = NaN(vacio,1);
j = 0;
o = 0;
% alma_pwv = [alma1 alma2 alma3];

for i=1:2161
    if i <= 965
        alma_pwv(i)=alma1(i);
    end

    if i >= 966 && i <= 1335
        j = j+1;
        alma_pwv(i)=alma2(j);
    end

    if i >= 1336
        o = o+1;
        alma_pwv(i)=alma3(o);
    end
end

alma_pwv = alma_pwv';
mari_pwv = pwv_mari(1:2161);
ratio=(mari_pwv-alma_pwv)./alma_pwv.*100;

```

```
figure('Name','Estadística [Nov 2017]','NumberTitle','off','Color',[1 1 1])
subplot(2,1,1)
plot(time_patron, ratio, '.k');
axis([time_patron(1) time_patron(end) -30 120])
title('(MARI - ALMA) / ALMA ', 'FontName', 'times new roman', 'FontSize', 12);
grid on
xlabel ('Julian Date')
ylabel ('Ratio')
```

## Anexo B

# Estudios posteriores con el Radiómetro de 183 GHz.

Luego de finalizar el tiempo designado para el registro de datos de PWV en el sitio de MARI, el radiómetro fue reinstalado en las inmediaciones del observatorio ACT (Atacama Cosmology Telescope) con la finalidad de medir el vapor de agua sobre la atmósfera del cerro Toco y compartirlos con los otros observatorios que ahí se emplazan (CLASS, POLAR BEAR, y Simons Array en el futuro). Los resultados preliminares se muestran a continuación.

Los datos registrados por el radiómetro instalado en ACT al igual que los de MARI, fueron comparados con los del observatorio APEX. Ambos telescopios se encuentran separados a tan solo 7.5 km tal y como se observa en la figura B-1, sin embargo que lo marca una real diferencia entre los valores de vapor de agua precipitable esperados es que APEX se emplaza a 5.100 msnm y ACT aproximadamente a 5.700 msnm. Esos 600 m de diferencia entre los observatorios causan una caída del PWV teórica del 12%. En la figura B-2 se presentan los valores de PWV medidos por ACT & APEX entre los días 01/07/2018 y 04/07/2018.



Figura B-1 Mapa Satelital con ubicación de observatorios ACT & APEX.

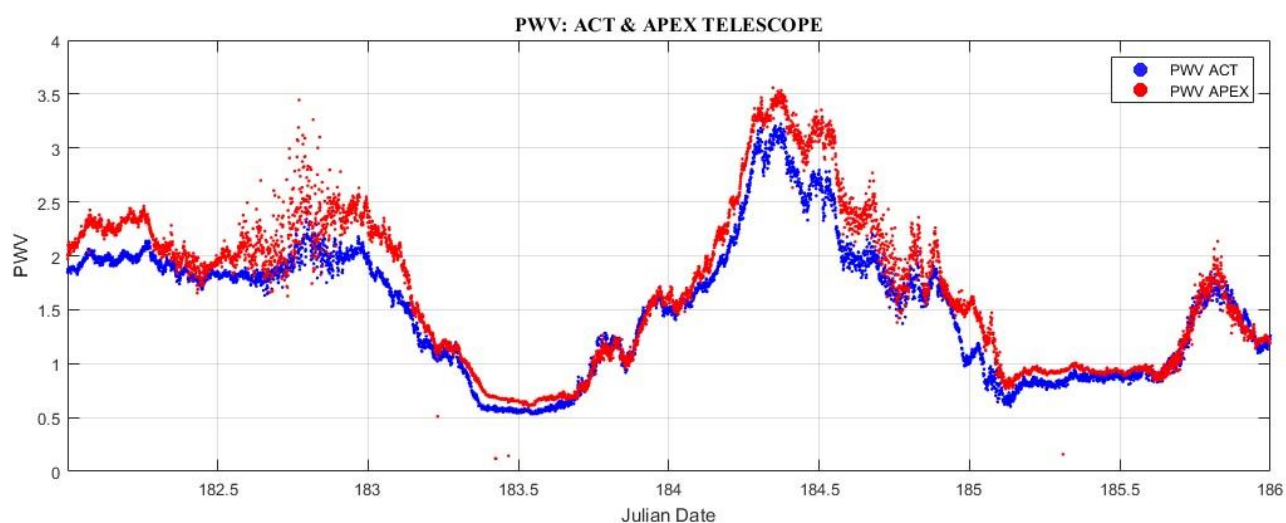


Figura B-6-1 PWV en ACT & APEX desde el día 01/07/2018 al 04/07/2018.

Los resultados obtenidos luego del procesamiento de datos son los esperados, dado que las curvas siguen las mismas tendencias en términos de las variaciones de PWV en el tiempo, con la diferencia de que los valores registrados por el radiómetro en ACT mantienen ese 12% teórico menor de diferencia en promedio. Además se puede notar que dada la cercanía geográfica entre ambos lugares no se aprecia un Offset significativo entre las series de datos, indicando que las masas de PWV no uniforme que existen en la atmósfera, en general son similares para ambos casos.

## 7. Referencias Bibliográficas.

---

- [1] Suárez Espinosa, A.A. (Enero 2016). *Estudio de RFI en sitios del norte de Chile con MARI-UCSC para instalar un radiotelescopio de baja frecuencia* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [2] Hernán Felipe De la Puente Christen. (Mayo de 2011). *Refaccionamiento de Radiómetros de Vapor de Agua en Banda 183GHz*. Concepción, Chile.: Universidad de Concepción.
- [3] Bustos, R., Rubio, M., Otárola, A., & Nagar, N. (2014). Parque Astronómico de Atacama: An ideal site for millimeter, submillimeter, and mid-infrared astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126(946), 1126.
- [4] Atlas Internacional de nubes: Manual de Observación de Nubes y otros Meteoros. (1993), Organización Meteorológica Mundial.
- [5] Radford, S. J., Butler, B. J., Sakamoto, S., & Kohno, K. (2001). ALMA Memo 3 4 *Atmospheric Transparency at Chajnantor and Pampa la Bola*. ALMA Memo Series, Aug.
- [6] Delgado, G., Otárola, A., Belitsky, V., Urbain, D., & Martin-Cocher, P. (1999). “*The determination of precipitable water vapour at Llano de Chajnantor from observations of the 183 GHz water vapour line*”. ALMA Memo Series, (271).
- [7] Garreaud, R. 2011, RevMexAA, 41, 5, “*The climate of northern Chile: mean state, variability and trends*”.
- [8] Muñoz, R., et al. 2010, J. Climate, 24, 1013, “*The coastal boundary layer at the eastern margin of the Southeast Pacific (23.4 S, 70.4 W): cloudiness-conditioned climatology*”
- [9] Bustos, R., et al. 2014, PASP, 126, 946, 1126-1132. “*Parque Astronómico de Atacama: An ideal site for millimeter, submillimeter, and mid-infrared astronomy*”.
- [10] Radford, S., and Peterson, J. 2016, PASP, 128, 075001, “*Submillimeter atmospheric transparency at Mauna kea, at the South Pole, and at Chajnantor*”

[11] Pardo, J. R., Cernicharo, J., Lellouch, E., & Paubert, G. (1996). Ground-based measurements of middle atmospheric water vapor at 183 GHz. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,

[12] Cernicharo, J., Thum, C., Hein, H., John, D., Garcia, P., & Mattioco, F. (1990). Detection of 183 GHz water vapor maser emission from interstellar and circumstellar sources. *Astronomy and Astrophysics*,