

Universidad de Concepción Dirección de Postgrado

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS MAGÍSTER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN FÍSICA

Caracterización Atmosférica en Zonas Extremas y su Relevancia en Astronomía

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE

MAGÍSTER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN FÍSICA

PRESENTADA POR

FERNANDO ANDRÉS CORTÉS GUERRERO

Concepción - Chile 2015

> Profesor Guía: Dr. Rodrigo Reeves Díaz Departamento de Astronomía Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Concepción

Resumen

El área de Chajnantor es una zona ubicada sobre los 5000 metros de altitud y es uno de los mejores sitios del mundo para realizar astronomía milimétrica y sub-milimétrica. El conocimiento de la cantidad de vapor de agua presente en el atmósfera es fundamental para realizar y corregir las observaciones de los radiotelescopios ubicados en este lugar.

La importancia de este trabajo radica en presentar un modelo que es capaz de estimar que cantidad de vapor de agua precipitable se encuentra en distintos puntos de la superficie del área de Chajnantor y como esta cantidad varía con la altitud dentro del mismo sitio y además temporalmente. Aportando de está manera a la comprensión de toda el área de Chajnantor y entregando información que es relevante para la instalación de nuevos instrumentos.

El presente trabajo busca ampliar la comprensión de la distribución y cantidad del vapor de agua precipitable en el área de Chajnantor; teniendo en cuenta una distribución espacial y temporal. Para esto se cuenta con un gran volumen de datos que abarcan 17 años de información atmosférica y múltiples ubicaciones dentro de está área, lo que permite realizar uno de los estudios más amplios en cuanto a la distribución de PWV dentro de la zona de Chajnantor realizados hasta ahora.

En este trabajo se encontró una relación que permite transformar desde opacidad atmosférica (medida en $350\mu m$) a vapor de agua precipitable, utilizando para ello de manera inversa el programa de modelamiento atmosférico AM. Para luego realizar comparaciones y correlaciones entre todos los instrumentos desde el año 2006 al 2014, con el fin de encontrar relaciones anuales y estacionales que permitan estimar que cantidad de vapor de agua precipitable se encuentra presente en un determinado sitio y condición siempre en comparación al sitio de APEX.

Agradecimientos

Esta tesis no podría haber llegado tan lejos de no ser por una gran cantidad de personas que continuamente me apoyaron, alentaron, me tuvieron paciencia y me tendieron una mano para poder continuar.

Agradezco a mis padres por darme continuo aliento y apoyo sin importar la distancia. Gracias por siempre estar atentos y preocupados por cada paso que daba en este camino, asi como por los comentarios, sugerencias y consejos cada vez que había un tropiezo. Sin todo este apoyo y confianza nada de esto podría haberse logrado.

A todos mis amigos y personas con las cuales compartí esta experiencia de desarrollar un magister. Palabras de agradecimiento a todos quienes compartimos el laboratorio de CePIA con quienes hemos pasado lindos momentos y creado una comunidad en torno a nuestros quehaceres y metas.

A todos aquellos que facilitaron los datos y el soporte para poder realizar este trabajo: Simon Radford, Eli Mlawer, Kentaro Motohara. A la pagina web del radio-telescopio APEX. Y finalmente al Proyecto Gemini Conicyt 32140030.

De manera especial agradecer al profesor Rodrigo Reeves, quien a pesar de no conocerme de antemano confío en mi en esta etapa para desarrollar este trabajo. Agradezco los conocimientos, palabras de apoyo, consejos y directrices que fueron entregadas dentro del tiempo que hemos trabajado juntos. Siempre en un ambiente grato en donde se agradece la confianza y sinceridad. Ha sido una gratificante experiencia desde todos los puntos de vista y he podido conocer un campo nuevo dentro de la Universidad.

A todos simplemente y de corazón gracias.

Agradecimientos 4

Hace muchos años que ya no está entre nosotros, igualmente me sigue acompañando cada día.

Gracias por ayudarme desde el cielo.

Tata a usted le dedico esta tesis.



Acrónimos

Antes de empezar este escrito propiamente tal necesitamos dejar en claro algunas de las siglas que continuamente aparecerán dentro de este trabajo:

- PWV= Precipitable Water Vapor, sigla en inglés para denominar al vapor de agua precipitable.
- WVR= Water Vapor Radiometer, sigla en inglés para denominar al radiómetro de vapor de agua. Instrumento que se utiliza para estimar la cantidad de vapor de agua precipitable en la atmósfera en el sitio de observación.
- AM = Atmospheric Model, sigla en inglés para denominar al programa computacional de modelamiento atmosférico utilizado en este trabajo.
- msnm= metros sobre el nivel del mar. Sigla utilizada para hablar sobre la altura en la que se encuentra un sitio.
- UdeC = Sigla para denominar a la Universidad de Concepción.
- ALMA = Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), sigla que denomina al Observatorio de radio más grande del mundo. Ubicado en el Llano de Chajnantor a una altitud de ~ 5000 msnm.
- \bullet APEX = Atacama Pathfinder **EX**periment
- TAO = Tokyo Atacama Observatory. Sigla para denominar al telescopio ubicado en la cima del Cerro Chajnantor a una altitud de 5640 msnm.
- CBI = Cosmic Background Imager. Sigla usada para denominar a un observatorio que estuvo en funcionamiento en el llano de Chajnantor y se dedicaba a medir el fondo de microondas.

Acrónimos 6

■ CBI1-CBI2-CBI3 = nombres de los 2 radiómetros Tipper ubicados en el sitio de CBI (CBI1 y CBI2), mientras que CBI3 esta ubicado en el sitio de APEX y mantiene el nombre producto de la continuidad del trabajo y el descubrimiento tardío de la posición de este instrumento.

- NRAO1-NRAO2 = nombres de los 2 instrumentos Tipper mientras estaban ubicados en el actual centro del arreglo de ALMA.
- CC= Cerro Chajnantor. Se refiere a la ubicación de un radiómetro Tipper en la cima del Cerro Chajnantor a una altitud de 5612 msnm.
- MJD = Modified Julian Date. Sigla referida al tiempo juliano modificado.
- JD= Julian Date. Sigla para referirse al día juliano



Índice general

Re	esumen	2
Ag	gradecimientos	3
A	crónimos	5
-	Introducción	1.0
Ι.	Introduction	16
	1.1. ¿ Cómo caracte <mark>rizamos la atmósfera?</mark>	17
	1.2. Evaluación de un sitio	20
	1.3. Datos meteorológicos	23
	1.4. Detección de vapor de agua en forma remota	28
	1.5. Radiómetros de vapor de agua	31
2.	Problema Científico y Objetivos de la Investigación.	39
	2.1. Objetivos	43
	2.1.1. Objetivo General	43
	2.1.2. Objetivos Específicos	43
3.	Sobre los Instrumentos	4 4
	3.1. Ubicación de los Instrumentos	45
	3.2. Radiómetros Tipper	48
4.	Uniformando Coordenadas Temporales	5 4
5.	Transformación desde opacidad a PWV para radiómetros Tipper.	57
	5.1. Aproximación por opacidad	57
	5.1.1. Primera aproximación: Promedio en banda angosta	60
	5.1.2. Segunda Aproximación: Promedio ponderado	61

Índice general 8

	5.2.	Aprox	imación por temperatura de brillo	. 62
		5.2.1.	Pasos para encontrar la relación de transformación	. 63
		5.2.2.	Aproximación por promedio temperatura de brillo	
			ponderada por el filtro	. 67
		5.2.3.	Cambio en la metodología y aproximación por promedio simpl	e. 70
6.	Tra	nsform	nación y análisis del Vapor de Agua Precipitable extraíd	lo
	desc	de los	instrumentos	83
	6.1.	Transf	formando opacidad en PWV	. 83
	6.2.	Correl	aciones Temporales y	
		gráfica	as PWV-PWV	. 88
	6.3.	Regres	siones Lineales para encontrar la zona de comportamiento lineal	. 91
		6.3.1.	Regresión Lineal en regiones cuadradas	. 94
		6.3.2.	Regresión Lineal en regiones circul <mark>a</mark> res	. 96
	6.4.	Regres	sión Lineal utiliz <mark>ando cortes v</mark> ertical <mark>e</mark> s en PWV_{apex}	. 99
	6.5.	Comp	ortamient <mark>o anua<mark>l de PWV</mark> <mark></mark></mark>	. 107
	6.6.	Comp	ortamient <mark>o estac<mark>ional del PW</mark>V</mark>	. 110
	6.7.	PWV	estimado desde <mark>TAO (Tokyo A</mark> stron <mark>o</mark> my Observatory)	. 119
	6.8.	PWV	estimado en la cima del Cerro Toco	. 129
7.	Rad	liómet	ros UdeC	133
	7.1.	Radió	metro UdeC-2: primera visita	. 134
	7.2.	Radió	metro UdeC-2: segunda visita	. 144
8.	Con	clusio	nes	146
9.	Refe	erencia	as Consultadas	153
Α.	Fun	cionan	niento del Software AM.	157
В.	Sist	emas '	Геmporales	161
c.	Mod	dulos d	de Python	162
D.	Coe	ficient	e de Correlación de Pearson	164
E.	Car	acterís	sticas CoolerMaster WaterCooling Seidon 120V	166

Índice general 9

F.	7. Información adicional radiómetro UdeC-2			
	F.1.	Radiómetro UdeC-2: primera visita	168	
	F 2	Radiómetro UdeC-2: segunda visita	172	



Índice de figuras

1.1.	Capas atmosféricas, ubicación y alturas aproximadas	19
1.2.	Representación de la opacidad atmosférica, según longitud de onda	19
1.3.	Ilustación satélite meteorológico	21
1.4.	Estación meteorológica y sus principales instrumentos	22
1.5.	Medición por radiosonda e instrumentos asociados	23
1.6.	Imagen radióme <mark>t</mark> ro UdeC localizado en APEX	24
1.7.	Ejemplo gráfico temperatura de brillo v/s frecuencia, con valores ex-	
	traídos desde AM	27
1.8.	Gráfica que mu <mark>estra la transmitanc</mark> ia atm <mark>osférica v/s frecuencia con </mark>	
	datos extraídos desde AM	29
1.9.	Modos de vibración mo <mark>lécula de ag</mark> ua	30
1.10.	Ubicación geográfica del área de Chajnantor	31
1.11.	Esquema de los radiómetros ubicados en las antenas de ALMA	33
1.12.	Simulación de perfiles de la línea de vapor de agua en 183 GHz con	
	diferentes cantidades de PWV	34
1.13.	Evidencia de la asimetría de la línea de vapor de agua	35
1.14.	Representación de las bandas dentro de un radiómetro para estimar	
	el perfil de la línea de vapor de agua centrada en 183 GHz	36
1.15.	Gráficas desde donde se desprenden relaciones empíricas que permiten	
	transformar desde temperatura de antena a PWV	38
2.1.	Aparente correlación temporal entre opacidad y PWV	40
2.2.	Correlación temporal entre Llano Chajnantor y Cerro Chajnantor, en	
	un periodo de 5 días	41
2.3.	Representación del desfase producto de la separación física y consti-	
	tuyentes atmosféricos	42

3.1.	Imagen radiómetro APEX, localizado al interior del radiotelescopio	45
3.2.	Aparente correlación temporal entre opacidad y PWV	47
3.3.	Fotografía radiómetro Tipper	49
3.4.	Ubicaciones espaciales de los radiómetros Tipper sobre el Llano de	
	Chajnantor a través del tiempo	50
3.5.	Esquema del radiómetro Tipper	51
3.6.	Perfil del filtro del radiómetro Tipper	53
5.1.	Gráfica de opacidad v/s frecuencia, dentro del rango de frecuencias	
	del instrumento	59
5.2.	Distribución de opacidad v/s frecuencia, dentro del rango de frecuen-	
	cia y opacidad a las cuales funciona el instrumento.	59
5.3.	Distribución esperada de temperatura de brillo promedio (\overline{T}_b) y masa	
	de aire X	64
5.4.	Distribución esperada de la temperatura de brillo v/s masa de aire,	
	donde se muestra además el ajuste exponencial esperado a estos datos.	65
5.5.	Comportamiento lineal esperado entre opacidad y PWV	66
5.6.	Resultado de ut <mark>ilizar la temperatura</mark> de an <mark>t</mark> ena promedio y ponderada	
	por la transmisividad del filtro	69
5.7.	Perfil de temperatura de brillo ponderada por el filtro del instrumento.	70
5.8.	Gráfica donde se muestran los nuevos puntos agregados a la simulación	
	y se muestra el ajuste exponencial del tipo $T_{brillo} = A \cdot e^{-BX} \dots$	74
5.9.	Gráfica que muestra 2 ajustes a los datos de opacidad v/s PWV, un	
	ajuste ponderado y otro no ponderado	76
5.10	. Porcentaje acumulado de mediciones de PWV por medio del radióme-	
	tro de APEX, para el año 2014	78
5.11	. Ajustes lineales y no lineales para los datos de simulación entre opa-	
	cidad y PWV en el Llano de Chajnantor	80
5.12	. Ajustes lineales y no lineales para los datos de simulación entre opa-	
	cidad y PWV en el Cerro Chajnantor	81
6.1.	Comparación entreel PWV obtenido desde la opacidad del radióme-	
	tro Tipper ubicado en CBI3 con respecto al PWV obtenido desde el	
	radiómetro APEX	84

6.2.	Comparación entreel PWV obtenido desde la opacidad del radiómetro	
	Tipper ubicado en la cima del Cerro Chajnantor con respecto al PWV	
	obtenido desde el radiómetro APEX	85
6.3.	Correlación en PWV para los sitios Apex-cbi3 considerando todos los	
	datos correlacionados temporalmente para el año 2012	89
6.4.	Correlación en PWV para los sitios Apex-CC considerando todos los	
	datos correlacionados temporalmente para el año 2010	90
6.5.	Primera aproximación lineal, aplicando una regresión lineal directa a	
	todos los datos	92
6.6.	Resultado de aplicar regresiones lineales dentro de secciones de la nube	
	de puntos de forma directa	93
6.7.	Representación de segmentar los datos en regiones cuadradas para	
	realizar correlaciones lineales	94
6.8.	Representación del problema de segmentar las correlaciones en PWV	
	en secciones rec <mark>tangulares </mark>	95
6.9.	Representación de cortes circulares para realizar las correlaciones li-	
	neales	97
	Representación de segmentar PWV_{APEX} en secciones verticales	99
6.11.	Regresión lineal entre PWV Apex-cbi3 2012. Donde queda de mani-	
	fiesto la recta que modela la sección lineal	104
6.12.	Regresión lineal entre PWV Apex-CC para el año 2010. Donde queda	
	•	106
6.13.	Gráfica resumen donde se muestra la comparación entre todos los	
	instrumentos, sus ubicaciones y las pendientes	109
6.14.	Ejemplo de las regresiones lineales para APEX-CBI3 del año 2014 en	
	cada estación	113
6.15.	Gráfica que muestra el cambio en la pendiente por año y por estación	
	mientras avanza el tiempo, tanto para APEX-CBI3 como para APEX-	115
0.10	CC	115
6.16.	Gráfica resumen en donde están todos los sitios comparados. Se mues-	
	tran las variaciones anuales y estacionales por cada par de instrumen-	115
0.15	tos, para todos los años posibles de realizar correlaciones	117
6.17.	Distribución de PWV a lo largo del año en el Cerro Chajnantor. Su-	101
	perposición de los datos de TAO a esta distribución	121

6.18.	Superposición de los datos de TAO a la distribución de PWV en el Cerro Chajnantor, para los años 2009-20010-2011 completos	122
6.19.	Superposición de los datos de TAO a la distribución de PWV en el	
0.10.	Cerro Chajnantor, para los años 2009-20010-2011, solo donde se con-	
	centra la mayor cantidad de datos de TAO	123
6.20.	Ubicación de los puntos de PWV desde TAO sobre la gráfica PWV_{APEX} -	
	PWV_{CC} para el año 2009	124
6.21.	. Ubicación de los puntos de PWV desde TAO sobre la gráfica PWV_{APEX} –	-
	PWV_{CC} para el año 2010	125
6.22.	. Ubicación de los puntos de PWV desde TAO sobre la gráfica PWV_{APEX} –	-
	PWV_{CC} para el año 2011	126
6.23.	Ubicación de los datos de PWV_{TAO} sobre el match APEX-CC para la	
	primavera del año 2009	127
6.24.	. Ubicación de los datos de PWV_{TAO} sobre el match APEX-CC para la	
	primavera del a <mark>ño 2010 </mark>	128
6.25.	Ubicación de lo <mark>s datos de <i>PWV_{TAO}</i> sobre e</mark> l match APEX-CC para la	
	primavera del a <mark>ño 201</mark> 0	128
6.26.	Ubicación de los datos de <i>PWV_{TAO}</i> sobre el match APEX-CC para el	
	otoño del año 2011	129
6.27.	Distribución del PWV en la cima del Cerro Toco (altitud de 5300	
	msnm.) entre el $12/08/2009$ y el $22/10/2009$	130
6.28.	Gráfica resumen donde podemos ver como son las variaciones de pen-	
	diente mientras pasa el tiempo entre los distintos instrumentos y para	101
	diferentes sitios	131
7.1.	Imagen del radiómetro UdeC-2	135
7.2.	Vista interior del radiómetro UdeC-2	137
7.3.	Fotografía de las cargas de calibración y el espejo que dirige la señal	
	hacia el radiómetro	138
7.4.	Interior del radiómetro, en donde podemos ver los distintos compo-	
	nentes que conforman el sistema de recepción de la señal. $\ \ldots \ \ldots$	139
7.5.	Fotografía tomada a la pantalla del analizador de espectros donde se	
	pueden ver las 3 bandas en las que funciona el radiómetro UdeC-2 .	140

7.6.	Figura donde se muestran las 3 bandas utilizadas por el radiómetro	
	UdeC	141
7.7.	Prueba del radiómetro en condiciones meteorológicas reales	142
7.8.	Ubicación del radiómetro UdeC-2 a un costado del radiotelescopio	
	APEX	143
7.9.	Ubicación final del radiómetro UdeC-2 a un costado de un container	
	del Radiotelescopio APEX	143
8.1.	Resultado final del modelo presentado en este trabajo	147
8.2.	Gráfica que muestra las diferencias de PWV entre las 4 estaciones	
	para el Llano de Chajnantor	149
8.3.	Gráfica que muestra las diferencias de PWV entre las 4 estaciones	
	para el Cerro Chajnantor	150
A.1.	Esquema del funcionamiento del software AM, se muestra la distribu-	
	ción de capas c <mark>o</mark> n sus respectivas características	159
D.1.	Esquema que representa las distintas situaciones que se pueden dar	
	en relación al coeficiente de correlación	165
F.1.	Imagen del equ <mark>i</mark> po de enfriamiento instalado dentro del radiómetro	
	UdeC-2	174

Índice de cuadros

3.1.	Ángulos cenitales de funcionamiento del radiómetro Tipper	52
5.1.	Tabla donde se muestran los valores finales en los cuales se realizará	
	la simulación del funcionamiento del radiómetro Tipper	71
5.2.	Resumen de archivo de salida desde AM, con PWV=1.25 mm y X=1.5	72
5.3.	Tabla resumen de resultados del promedio de temperatura de brillo,	
	para diferentes ángulos cenitales y considerando un PWV=2.5 mm	73
5.4.	Tabla resumen donde <mark>se muestran l</mark> os valo <mark>r</mark> es finales extraídos para el	
	ajuste exponencial $T_{brillo} = A \cdot e^{-BX}$	75
5.5.	Tabla resumen del pro <mark>centaje acum</mark> ulado de PWV medido por el ra-	
	diómetro Apex, bajo < 3 mm	78
6.1.	Tabla donde se condensan los parámetros de salida producto de la	
	regresión lineal. Las variaciones del coeficiente de correlación no se	
	condicen con las variaciones de la pendiente y el termino libre	98
6.2.	Tabla resumen donde se muestra el resultado de las regresiones lineales	
	anuales a todos los instrumentos emparejados temporalmente	108
A 1	Variables de salida programa AM	160

Capítulo 1

Introducción

Para la instalación y funcionamiento de un radiotelescopio (ALMA, APEX, etc.), debe caracterizarse completamente el sitio de operaciones y además tener conocimiento del comportamiento y propiedades de la atmósfera en el mismo lugar. La caracterización atmosférica de un sitio es un proceso que demora varios años con el fin de asegurar las condiciones necesarias para el funcionamiento de los diferentes instrumentos que se quieran instalar; y si bien este proceso es con bastante anterioridad a la instalación de un radiotelescopio, el comportamiento atmosférico es continuamente monitoreado para hacer las correcciones necesarias que garanticen la calidad de las observaciones.

La cantidad de PWV contenido en la atmósfera es una factor importante para poder llevar a cabo observaciones astronómicas en ondas de radio (longitudes de ondas milimétricas y sub-milimétricas). La cantidad de PWV debe ser baja (no mayor a 5 mm de PWV) y además conocida para poder corregir los efectos que esta cantidad origina en las observaciones. En el caso de ALMA, el cual es el radio telescopio más grande del mundo compuesto por 66 antenas las cuales pueden desplazarse y ubicarse en distintas posiciones dentro del área de Chajnantor conocer la distribución y cantidad del vapor de agua es fundamental para poder corregir el desfase, atenuación y despersión en la señal producto de esta cantidad. Por otra parte si existe interés de instalar un nuevo instrumento dentro del área es importante poseer una estimación de la cantidad de PWV del sitio y evaluar si cumple con las condiciones necesarias para realizar las observaciones de manera continua o en algún periodo de tiempo determinado. Por lo tanto si se logra determinar en que proporciones se encuentra la

cantidad de PWV espacial y temporalmente dentro del área en estudio podemos utilizar esta información para estimar la mejor ubicación de un instrumento de acuerdo a sus especificaciones.

Por lo tanto conocer las características de la atmósfera y la cantidad de PWV que contiene es fundamental para el funcionamiento de un radiotelescopio.

1.1. ¿ Cómo caracterizamos la atmósfera?

La atmósfera terrestre es un conjunto de varios gases distribuidos de forma inhomogénea en capas que rodean a nuestro planeta. La altura de nuestra atmósfera es de más de 100 km aproximadamente pero a pesar de su extensión más de la mitad de su masa se concentra en los seis primeros kilómetros y el 75 % de la masa está en los primeros 11 km de altura desde el nivel del mar.

La atmósfera terrestre presenta varias propiedades que nos permiten vivir en la superficie de nuestro planeta, por ejemplo en la capa de ozono absorbe parte de la radiación ultravioleta proveniente del Sol, reduce las diferencias de temperatura entre el día y la noche, además de actuar como escudo protector contra los meteoritos, entre otras.

La atmósfera bajo los 80 Km es una mezcla de gases los cuales se encuentran distribuidos heterogéneamente, los gases más importantes y sus proporciones aproximadas son (Wilson et al. Tools of Radio Astronomy):

- \blacksquare Nitrógeno $[N_2]$ 78.09 %
- \bullet Oxigeno $[O_2]$ 20.95 $\,\%$
- \blacksquare Argon [Ar] 0.93 %

Otros componentes menos abundantes pero igualmente importantes son:

• Vapor de agua $[H_2O]$. Varía erráticamente con las condiciones climáticas locales y con la altitud. Se estima que posee concentraciones entre 0-5 % y más del 50 % del total de vapor de agua en la atmósfera se encuentra bajos los 2000

metros de altitud. (Wallace & Hobbs, Atmospheric Science an Introduction Survey)

- Dióxido de Carbono $[CO_2]$. Tiene una abundancia promedio de 0.03% en la atmósfera. Muestra variaciones estacionales. Su abundancia y efectos tienen conexión con el efecto invernadero.
- Ozono $[O_3]$. Tiene una concentración máxima entre los 20 km. y los 30 km. de altura. Presenta variaciones estacionales y geográficas.

La atmósfera está estratificada en distintas capas (ver figura 1.1) de las cuales podemos mencionar:

- Tropósfera: Es la capa más cercana a la superficie terrestre y es donde se desarrolla la vida en la Tierra y ocurren la gran mayoría de los fenómenos meteorológicos. Presenta variaciones de altura desde los 8 km. en los polos a los 16 km. en el ecuador. En las capas inferiores de la tropósfera se encuentra concentrado la totalidad del vapor de agua atmosférico.
- Estratósfera: Esta capa se extiende aproximadamente entre los 10 y los 50 km. de altitud. En esta capa los gases están estratificados de acuerdo a su peso.
- Mesósfera: Se ubica aproximadamente entre los 50 km. y los 80 km. de altura y a pesar de contener menos del 0.1% de la masa atmosférica, es importante producto de los fenómenos de ionización y reacciones químicas que ocurren en esta capa.
- Ionósfera: Se encuentra entre los 90 y los 400 kilómetros de altura. En ella existen capas formadas por átomos cargados eléctricamente.
- Exósfera: es la capa más externa, donde la composición atmosférica se asemeja con el espacio exterior.

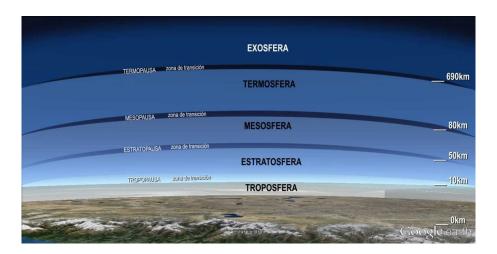


Figura 1.1: Representación de las capas atmosféricas, donde queda de manifiesto su ubicación y las alturas aproximadas a las cuales se encuentran ubicadas. Fuente imagen: Google Earth

Debido a la estratificación en capas y los componentes de las mismas, es que las características de la atmósfera como medio de propagación de la radiación (en este caso proveniente del espacio) depende entre otras cosas de la presencia de sólidos, líquidos y gases presentes en el camino del frente de ondas hasta el instrumento receptor.

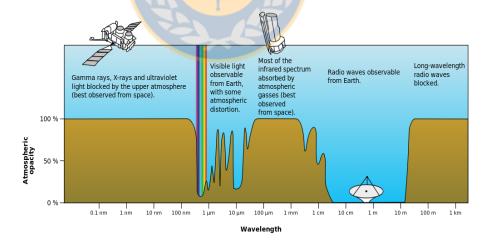


Figura 1.2: Representación de la opacidad atmosférica, se puede ver que la atmósfera presenta diferente respuesta a la señal incidente de acuerdo a la longitud de onda. Por ejemplo para radiación de alta energía la atmósfera es completamente opaca; mientras que es transparente a algunas longitudes de onda; en particular es transparente en la ondas de radio y el espectro visible. Fuente imagen: wikimedia.org

La atmósfera presenta diferentes respuestas a la radiación incidente, de acuerdo a la longitud de onda, es completamente opaca para radiación ultravioleta-rayos X y de mayor energía. Por otra parte presenta ventanas que permiten obtener información desde el universo, en este sentido la atmósfera es transparente a ondas de radio (ver figura 1.2), pero para longitudes de onda de centímetros, milimétricas y sub-milimétricas la absorción troposférica tiene que ser tomada en cuenta. Esta absorción se da a distintas proporciones debido a los constituyentes de la atmósfera. Por ejemplo, las gotas de agua absorben y dispersan las ondas de radio a frecuencias bajo los 6 GHz. La atmosféra en su conjunto, en especial la tropósfera, es la capa quien tiene un mayor efecto degradante en las observaciones en las ondas de radio. lo que se puede ejemplificar por medio de la absorción y el retardo de la radiación astronómica entrante. De los gases troposféricos que tienen una gran influencia sobre el transporte de la radiación (las comunicaciones, etc) se encuentran principalmente las moléculas de oxigeno $[O_2]$, ozono $[O_3]$ y la molécula de vapor de agua $[H_2O]$ esta última no se distribuye de manera homogénea en la atmósfera y depende en gran medida de condiciones climáticas y geográficas locales.

Por condiciones climáticas locales, se entienden la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, estudiadas en un periodo de tiempo considerable propias del sector de interés. Mientras que por condiciones geográficas locales, entendemos las condiciones geográficas propias del sector y características del mismo. Toda esta caracterización se hace en la etapa de evaluación del sitio (site testing).

1.2. Evaluación de un sitio

El proceso de site testing es donde se hacen los estudios necesarios que permiten determinar si un sitio es apto para poder instalar instrumentación científica para Radio Astronomía. Para el caso del sitio de operaciones de un radio telescopio o un conjunto de antenas como ALMA, el sitio debe cumplir algunas características importantes:

- Estar a una gran altitud. Con el fin de tener una menor cantidad de atmósfera y elementos que produzcan la dispersión y el cambio de fase de la señal entrante.
- Tener estabilidad atmosférica. En otras palabras que un porcentaje considera-

ble del año tenga condiciones propicias para la observación.

Por evaluación de un sitio entendemos la necesidad de conocer parámetros atmosféricos propios del lugar como: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, cantidad y distribución de vapor de agua, velocidad del viento, etc.

Para evaluar un sitio de forma adecuada y medir los parámetros atmosféricos existen varios métodos, que abarcan desde características globales a locales para determinar si un sitio es propicio a la instalación de un instrumento en ondas de radio. Los métodos usuales para poder caracterizar el sitio donde instalar un radio telescopio son:

■ Por medio de imágenes satelitales (ver figura 1.3). Este método permite detectar de manera global sin mayores detalles zonas de bajo contenido de agua, además de ver la estadística de nubosidad del sector.

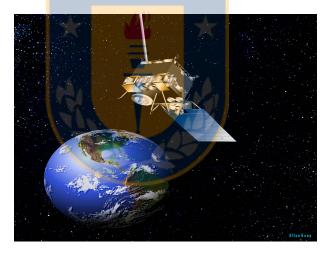


Figura 1.3: Las imágenes satelitales nos permiten tener una idea global del sitio en estudio. Podemos construir la estadística de nubosidad y agua en el sector. Fuente imagen: nasa.gov

Es un indicador de los sitios más auspiciosos para instalar un radio telescopio. Este método tiene la desventaja de ser muy costoso, no entrega detalles de una zona en particular y presenta la imposibilidad de tomar imágenes del sector de forma regular. Ejemplos de satélites meteorológicos GOES-East(EE.UU.), MTSAT-1R(Japón). Utilizan distintas bandas del espectro electromagnético para realizar las observaciones, por ejemplo: entre $0.6 \ \mu m$ - $1.6 \mu m$ sección útil

para registrar cobertura de nubes durante el día, mientras que entre 3.9 μ m-7.3 μ m detectan vapor de agua.

■ Por medio de la medición directa de los parámetros meteorológicos, por medio de una estación meteorológica (ver figura 1.4). Esto corresponde al uso de instrumentos que se encuentren en el sitio, los más importantes son: termómetros, barómetros, higrómetros y anemómetros, entre otros. De esta manera es posible obtener la información de la superficie del sitio en estudio por un largo plazo. En la figura 1.4 se muestra la estación meteorológica cerca de Coville Lake, los números indican los instrumentos que son o que miden: 1) dirección del viento, 2) velocidad del viento, 3) antena de satélite, 4) radiación solar, 5) temperatura del aire y humedad relativa, 6) antena GPS, 7) panel solar, 8) registrador de datos y baterías, 9) pluviómetro y 10) profundidad de la nieve.

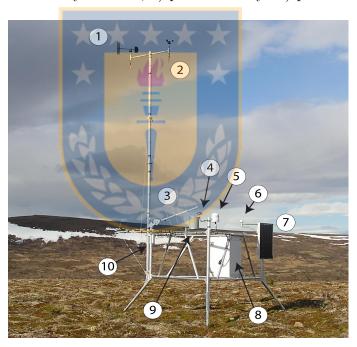


Figura 1.4: Estación meteorológica. Destinada a medir y registrar de forma regular variables meteorológicas como: temperatura, presión, humedad, etc. Desde la superficie misma del sitio en estudio, entregando información detallada de esta ubicación. Fuente imagen: http://science.nature.nps.gov/

Por medio de radiosondas, ver figura 1.5. Este método utiliza instrumentos que se encuentran adosados a un globo aerostático, figura 1.5 panel de la derecha. Posibilita caracterizar la tropósfera midiendo directamente temperatura, presión y humedad relativa a medida que el globo se eleva. Presenta desventajas como: trayectoria no controlable, pérdida de los instrumentos adosados y lanzamientos limitados por el costo.



Figura 1.5: Panel de la izquierda: Globo meteorológico, la caja plateada que cuelga desde el globo es donde se encuentran los instrumentos que toman la información de los parámetros atmosféricos, mientras el globo asciende en la atmósfera. Panel de la derecha: Imagen del receptor en donde se encuentran distintos instrumentos que realizan las mediciones. Fuente imagen: www.plymouth.edu

Utilización de radiómetros, ver figura 1.6. Equipos que permiten medir radiación electromagnética en ciertas bandas espectrales y que tienen relación con los parámetros que se desean conocer. El uso de estos equipos es de tipo remoto, pero permite obtener datos de forma constante desde la tropósfera. En la imagen reffig:radiometro se muestra el radiómetro de vapor de agua UdeC localizado en el sitio de APEX. Este instrumento en particular permite medir la temperatura de brillo del cielo en una columna de aire cenital y extraer desde esta medición la cantidad de PWV.

1.3. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos que se pudieran obtener por medio de algunos de los métodos nombrados anteriormente deben ser consistentes entre si y en vista que no



Figura 1.6: Radiómetro de vapor de Agua UdeC localizado en el sitio de APEX. Este instrumento mide la temperatura de brillo del cielo y es posible estimar cantidad de PWV.

podemos estudiar todas las capas atmosféricas de manera simultánea ni estimar variaciones rápidas o cambios imprevistos en el comportamiento atmosférico; lo que se hace es crear modelos o establecer relaciones que permitan entender la atmósfera. Para los distintos modelos, los datos de entrada con los cuales puede estimar el comportamiento atmosférico son datos obtenidos en tierra desde el sitio propiamente tal. Estos datos corresponden a temperatura, presión atmosférica y humedad relativa.

Dentro de los posibles modelos que podemos utilizar para entender la atmósfera encontramos modelos empíricos y modelos computacionales. cada cual puede, de manera independiente dar una buena aproximación del comportamiento atmosférico en el lugar de la medición.

Entre los modelos empíricos, los cuales se han obtenido por medio de mediciones directas de las cantidades y se han encontrado relaciones entre las distintas variables; tenemos por ejemplo las relaciones que aparecen en el trabajo de Delgado (Delgado et al. ALMA memo 271.1):

La atmósfera, ejerce una presión sobre la superficie terrestre, esta presión es llamada "Presión atmosférica". Esta presión decrece exponencialmente con la altitud h según la ecuación obtenida por Houghton 1997 dada como:

$$P(h) = P_0 \cdot e^{\left(-\frac{h}{H}\right)} \tag{1.1}$$

donde

- lacksquare P_0 es la presión a nivel de superficie medida en milibar [mbar]
- h es la altura, medida en metros [m]
- \blacksquare H es la escala de altura dada por $H = \frac{R\,T}{\mu g} \approx 7998\,m$
 - $R \rightarrow \text{constante molar de los gases} = 8,31451 \left[J \, mol^{-1} K^{-1} \right]$
 - $\mu \to \text{peso molecular del aire seco} = 0.02896 [kgmol^{-1}]$
 - $g \to \text{constante}$ de aceleración de gravedad = 9,8 $[m/s^2]$
 - $T(h) \rightarrow \text{es la temperatura de las distintas capas mientras aumenta la altura. T = 273 K en el ejemplo.$

La escala de altura, necesaria para estimar el vapor de agua, es $H_{[H_2O]}\approx 2$ km lo cual es mucho más pequeña que la escala de altura para el aire seco que es $H_{[air-dry]}\approx 8$ km. Considerando las diferencias de las escalas de alturas, y tomando en evidencia que el vapor de agua se encuentra presente alrededor de nosotros en distintas proporciones y de acuerdo a la altitud; los radio telescopios sub-milimétricos están en sitios montañosos con elevaciones sobre los 3000 m.

La temperatura de las capas de atmósfera va cambiando mientras aumentamos la altitud. Esta temperatura T(h) esta dada por la ecuación de Thompson (Thompson et al. 1994) la cual corresponde a:

$$T(h) = T_0 \cdot (0.98)^{h[km]} \tag{1.2}$$

donde: T_0 corresponde a la temperatura a nivel del suelo y h es la altitud a la cual se está haciendo la estimación.

Estas ecuaciones concuerdan con las observaciones realizadas por radiosondas. En el caso de la temperatura, los datos obtenidos por radiosondas y la ecuación mostrada anteriormente presentan una diferencia de un 2% en el caso límite a 8000 [m]. Siendo para todas las otras altitudes menores que este error. En el caso de la presión las mediciones y el modelo concuerdan mejor que un 0.5% a 8000 m. de altura.

La presión y la densidad de columna total de la tropósfera varía lentamente con el tiempo y la posición. Por otro lado la temperatura del aire varía rápidamente en tiempo y posición; este cambio en temperatura tiene un efecto menor en la absorción pero es un factor significativo en el cambio del indice de refracción de la señal incidente. El vapor de agua incrementa el índice de refracción del aire, retrasando la radiación, por ejemplo cuando se encuentra presente 1 mm de vapor de agua es equivalente a 6 mm de camino eléctrico extra (Nikolic et al 2013).

Debido a la mezcla imperfecta de gases en la atmósfera el vapor de agua no se distribuye de manera uniforme, moviendose en capas, este continuo movimiento estratificado del vapor de agua crea el equivalente a las turbulencias en astronomía óptica.

Además de las ecuaciones empíricas, tenemos simulaciones computacionales atmosféricas las cuales integran ecuaciones matemáticas, datos específicos de las diferentes capas atmosféricas (medidos por radiosondas), estimaciones promedio de los valores meteorológicos a nivel de suelo en largos periodos de tiempo, más modelos computacionales propios de cada una de las diferentes capas y característicos de los sitios en los cuales se hace radio-astronomía. Dentro de los programas de modelamiento atmosférico los programas AM (Paine 2004) y ATM (Juan Pardo), son los programas más utilizados para simular el comportamiento atmosférico, en ese sentido podemos modelar en cada programa, para un rango de frecuencias dado: opacidad, transmitancia, temperatura de brillo, etc. En el caso de esta tesis, el programa utilizado fue AM; este programa trabaja considerando una estratisficación atmosférica (considera capas independientes una de otra para realizar los cálculos), más datos de radiosondas lanzadas en los distintos sitios de ubicación de radio telescopios y otras mediciones de sitios similares en altitud o comportamiento meteorológico que aportan la información necesaria para simular de forma adecuada el comportamiento atmosférico en el sitio de observación. Cuando se le ingresan los valores meteorológicos estimados en la superficie (temperatura de suelo, cantidad de vapor de agua, entre otras) junto al rango de frecuencias (frecuencias mínimas, máximas y resolución en frecuencia) en el cual se quiere realizar la simulación, el programa comienza a trabajar y entrega los valores de salida que se necesita como pueden ser: opacidad, transmitancia, temperatura de brillo, etc. Una vez obtenido los valores de las cantidades que se necesitan según la frecuencia, se generan gráficos (ver figura 1.7) en donde se puede ver de manera clara el comportamiento de las cantidades dentro del rango de frecuencias requerido. Pudiendo de esta manera estudiar el comportamiento atmosférico (por medio de los parámetros de salida de AM) de un sitio en particular.

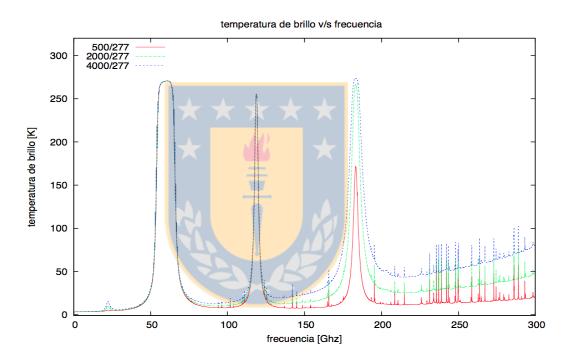


Figura 1.7: Ejemplo de gráfico utilizando valores extraídos desde el programa AM, considerando una temperatura de suelo de $277~{\rm K}$ y 3 cantidades de PWV: $500,\,2000$ y $4000~{\rm micrones}$.

1.4. Detección de vapor de agua en forma remota

La detección de gases de forma remota, por ejemplo el vapor de agua, presentes en la atmósfera se basa en que si conocemos la potencia emitida por este gas en una banda del espectro, es posible estimar la concentración de partículas que influyen en esa banda. La idea es medir la potencia en zonas del espectro para detectar la forma y la amplitud de las líneas asociadas a los efectos de los gases. En la figura 1.8 se muestra la transmitancia atmosférica en el Llano de Chajantor y como es afectada por la cantidad de vapor de agua precipitable presente en la atmósfera. Las líneas rojas, verde y azul, representan la cantidad de PWV medida en micrones (500, 2000 y 4000 micrones de PWV respectivamente). Es posible ver de esta figura que a medida que tenemos una mayor cantidad de PWV la opacidad tiene una respuesta distinta conforme a la frecuencia a la cual medimos; si nos fijamos en las caídas del continuo entre los 150 y 200 GHz nos damos cuenta de manera clara que la transmitancia es sensible a la cantidad de PWV. De la misma manera pero con respecto a la temperatura de brillo, figura 1.7, la temperatura de brillo es igualmente sensible a la cantidad de PWV en las mismas bandas. Por lo tanto si somos capaces de medir como hemos señalado, la potencia emitida, podemos estimar la cantidad de PWV que produjo un determinado perfil en la figura 1.7.

Si podemos estimar de alguna manera el perfil de una de las líneas de vapor de agua podemos utilizar un modelo (AM por ejemplo) para determinar la cantidad de PWV que produjo esa línea.

La cantidad de vapor de agua precipitable [mm] sobre una altura h_0 es una integración a lo largo de la línea de vista. Para determinar la cantidad de vapor de agua se realizan mediciones de radio en distintas bandas, dependiendo de las características del sector, en ese sentido las distintas bandas presentan distintas oportunidades de poder establecer la cantidad de vapor de agua precipitable:

- Puede medirse en el contínuo alrededor de la banda de 225 GHz combinando las mediciones hechas en el sector propiamente tal, con modelos de atmósfera.
- Para sitios con excelentes condiciones climáticas y grandes altitudes, se realizan mediciones en la banda de 183 GHz. En esta frecuencia la molécula de vapor de agua presenta un modo de resonancia importante; además en esta banda

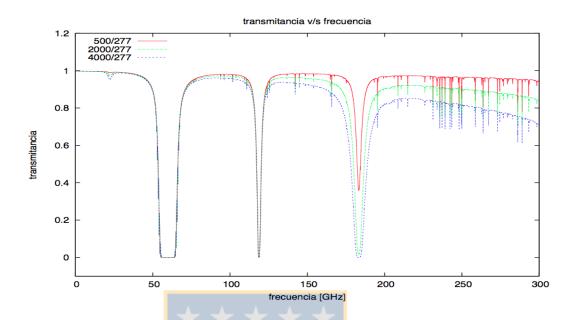


Figura 1.8: En esta imagen se muestra la transmitancia atmosférica en función de la frecuencia, en el Llano de Chajnantor para un amplio espectro de frecuencias y a distintas concentraciones de vapor de agua. En esta imagen las líneas de absorción corresponden a distintos elementos que están en resonancia a esa frecuencia e impiden la transmisión de señales a esa frecuencia en particular. De izquierda a derecha tenemos las líneas de obsorción producto de: H_2O (23.5 GHz), O_2 (57 a 63 GHz), O_2 (118.74 GHz), H_2O (183.3 GHz). Simulación hecha utilizando el programa AM.

es posible tener un buen nivel de sensibilidad para bajas concentraciones de vapor de agua (como en el caso del Llano de Chajnantor).

• A nivel del mar o en regiones con alta concentración de vapor de agua la línea de 22.235 GHz del vapor de agua es la utilizada para estimar la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera. Debido principalmente a que en en altitudes bajas la línea de 183 GHz se encuentra saturada.

Por modos de resonancia entendemos que son bandas espectrales en las que la molécula de agua presenta vibración de forma natural. Las móleculas se trasladan y rotan mientras sus átomos vibran, esta vibración es una mezcla de movimientos vibratorios simples que dependen de la complejidad de la molécula en cuestión.

Los modos de vibración simples de los cuales se origina la roto-vibración de la

molécula de agua son mostrados en la figura 1.9 y corresponden a **tensión timétrica** y **asimétrica**. Ambos movimientos corresponden a contracciones o extensiones de igual o diferente cantidad de la distancia entre los átomos de hidrógeno y el átomo de oxígeno; por otra parte la **flexión** corresponde a la variación del ángulo que hay entre los átomos de hidrógeno. La combinación de las 3 formas de vibración da origen a la roto-vibración de la mólecula de agua. Más aún la energía recibida en las bandas antes mencionadas se acopla con la dínamica propia de la molécula de agua, lo que produce una amplificación del efecto, dando origen en otras palabras a una resonancia.

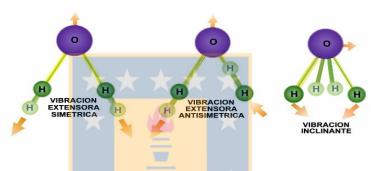
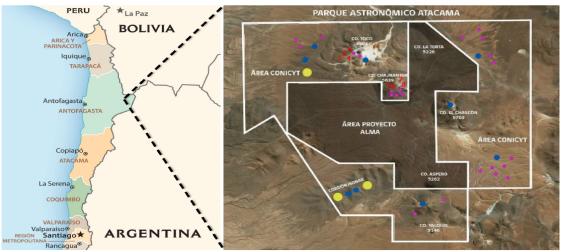


Figura 1.9: Los modos de vibración simples de los cuales se origina la rotovibración de la molécula de agua son de izquierda a derecha: tensión simétrica, tensión asimétrica y flexión. La combinación de estos tres modos vibracionales más la rotación de la molécula de agua, generan resonancia, la cual es posible verla de manera clara en ciertas regiones del espectro. Fuente imagen: http://www.creces.cl/images/articulos/1f22a6-2.jpg

Como se señalo anteriormente dependiendo de las características del sector en cual se pretende realizar la medición de la cantidad de vapor de agua se escogerá una banda de resonancia de la línea de agua. En el caso de este trabajo, el sitio en estudio corresponde al área de Chajnantor, ver figura 1.10. Este sitio tiene coordenadas $23^{\circ}01'09''$ S $67^{\circ}45'11''O$ y se encuentra en el Llano de Chajnantor, Desierto de Atacama, Región de Antofagasta, Chile. El Llano como tal esta ubicado a ~ 5050 msnm, mientras que los distintos observatorios que se encuentran dentro de esta área se encuentran alrededor de esa altitud.



Bustos et al. 2014

Figura 1.10: En el panel de la izquierda se muestra la ubicación geográfica del Parque Astronómico de Atacama, cuya altitud es de 5050 msnm ubicado en el Llano de Chajnantor. El panel de la derecha muestra el área de Chajnantor propiamente tal y la ubicación de observatorios que están o pueden estar en esta área.

Por las condiciones que presenta esta ubicación: una altitud de ~ 5000 msnm y una baja concentración de vapor de agua; la línea de vapor de agua que se utilizará para poder estimar la cantidad de PWV en el sitio será la línea ubicada en los 183 GHz. ya que esta banda presenta una alta sensibilidad a los cambios de vapor de agua en las condiciones de este sitio.

¿ Qué instrumentos son los encargados de estimar la cantidad de vapor de agua precipitable en la atmósfera en el lugar de la observación? y ¿Cómo funcionan estos instrumentos?.

1.5. Radiómetros de vapor de agua.

Los instrumentos que tienen la misión de estimar la cantidad de vapor de agua precipitable se denominan radiómetros de vapor de agua (WVR).

Dentro de los distintos observatorios repartidos por el Parque Astronómico de Atacama, se encuentran distintas cantidades y diseños de WVR. En ese sentido en el observatorio ALMA cada una de las 66 antenas que lo componen tienen incorporado

un radiómetro. El observatorio APEX de igual manera que ALMA tiene incorporado un radiómetro dentro de su estructura. Estos radiómetros estiman la cantidad de vapor de agua en la línea de vista del radiotelescopio para luego hacer una corrección por ángulo cenital y determinar la cantidad de vapor de agua en una columna sobre el radiotelescopio.

Dentro del sitio existen además radiómetros independientes de diversas instituciones, como los 2 radiómetros UdeC que se encuentran localizados uno en el sitio de operaciones de APEX y el otro en la cima del Cerro Chajnantor; existen dos radiómetros Tippers (de tipo basculantes) que han mapeado la opacidad en distintos puntos dentro del área de Chajnantor, desde antes de la instalación de los radiotelescopios que se encuentran actualmente en la zona.

De todos los WVR ubicados en el sitio de Chajnantor, menos los WVR tippers, tienen un diseño de receptor de tipo heterodino; este tipo de receptor genera nuevas frecuencias mediante la mezcla de dos o mas señales en un dispositivo no lineal. El sistema heterodino combina la frecuencia de entrada con la frecuencia generada por un dispositivo interno llamado oscilador local, de esta combinación se obtiene una señal de menor frecuencia la cual es manejable instrumentalmente. En otras palabras este diseño baja la alta frecuencia de entrada a una frecuencia posible de medir con la tecnología actual, pudiendo de esta manera ser analizada de forma eficiente.

Un diagrama simplificado del diseño heterodino de los WVR desarrollados para ALMA se ven en la figura 1.11 .

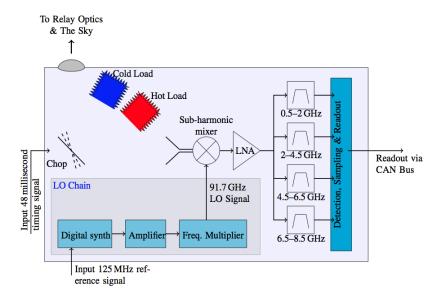


Figura 1.11: Diseño de los radiómetros ubicados en cada una de las antenas de ALMA (Nikolic et al. 2013). En este diseño el elemento denominado sub-harmonic mixer es el encargado de mezclar y producir la nueva señal resultante a partir de la combinación de la señal entrante y la señal del oscilador local. Con este sistema la frecuencia de entrada de 183 GHz es bajada a un rango de frecuencias comprendido entre 0.5 y 8.5 GHz lo que es posible medirlo con la tecnología e instrumentación existente.

El funcionamiento general de estos aparatos se basa en medir la intensidad de la línea de vapor de agua y estimar utilizando el inverso de la ecuación de transferencia radiativa la cantidad de vapor de agua que produce ese determinado perfil. Lo que hacen estos aparatos es medir en cada una de las bandas intermedias alrededor de 183 GHz la temperatura de brillo del cielo en la frecuencia de 183.3 GHz la que corresponde a la frecuencia de resonancia de la molécula de agua. La línea de vapor de agua presenta un perfil en principio simétrico cuyo centro esta ubicado en la frecuencia de 183.3 GHz, como se ve en la figura 1.12, esta figura corresponde a una simulación atmosférica realizada con el programa AM. Vemos el comportamiento de la línea de vapor de agua a medida que la cantidad de PWV aumenta, cada línea de color representa una cantidad diferente de PWV (la leyenda ubicada al costado superior izquierdo da cuenta de la cantidad de PWV que representa cada línea). La simetría de la línea se mantiene independiente de la cantidad de PWV que se encuentre presente, lo que es interesante notar es como se alcanza el estado de saturación de la línea de vapor de agua a medida que aumentamos el PWV.

Vemos a medida que la cantidad de PWV aumenta los distintos perfiles de la línea aumentan su valor en temperatura de brillo y la zona del peak de intensidad tiende a aplanarse y condunfirse con los demás perfiles, en el estado en el cual ya no es posible discriminar entre un perfil y otro es donde se habla de saturación. En el estado de saturación es posible medir una misma temperatura de brillo independiente de la cantidad de PWV, por lo cual no es posible estimar de forma clara e inequivoca la cantidad de PWV.

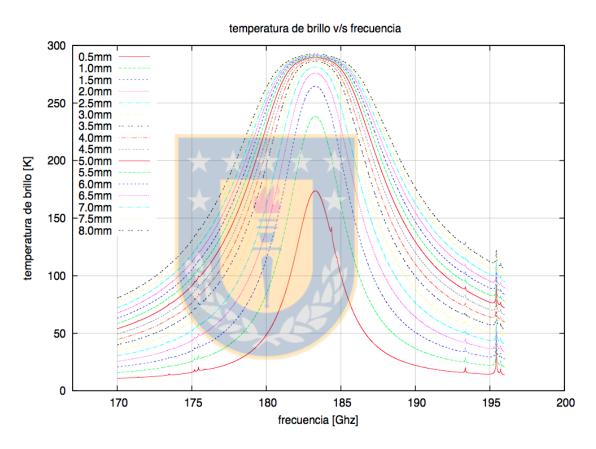


Figura 1.12: Este modelo muestra el perfil de la línea de vapor de agua centrada en 183.3 GHz. realizado por medio del programa AM para el Llano de Chajnantor. Los diferentes colores que componen las curvas del gráfico indican la cantidad de PWV que estaría presente para producir un determinado perfil. Vemos en este modelamiento que por sobre los 3.0 mm de PWV la línea de vapor de agua esta en saturación, lo que queda en evidencia por la imposibilidad de discriminar entre las diferentes curvas por sobre esta cantidad alrededor de los 183.3 GHz.

Se ha hablado en el párrafo anterior sobre la simetría de la línea de vapor de agua centrada en 183 GHz. A simple vista es simétrica, pero el trabajo de memoria

de título de Daniel Cabrera "Diseño y Simulación de etapa IF para radiómetro de vapor de agua de 183 GHz" deja en evidencia la asimetría de la línea de 183 GHz como puede verse en la figura 1.13, en este trabajo se simulan 6 bandas para estimar el perfil de la línea de vapor de agua considerando un PWV representativo del Llano de Chajnantor de 1.5 mm. Se ubican las 6 bandas de manera simétrica a ambos lados del centro del perfil de la línea de 183 GHz y es posible ver que las bandas del lado derecho pueden medir la temperatura de brillo de manera correcta sobre el perfil de la línea, mientras que las bandas del lado izquierdo sobresalen del perfil bajo estimando la medida de la temperatura de brillo. El trabajo de Daniel Cabrera deja entonces en evidencia que la línea tiene un comportamiento asimétrico.

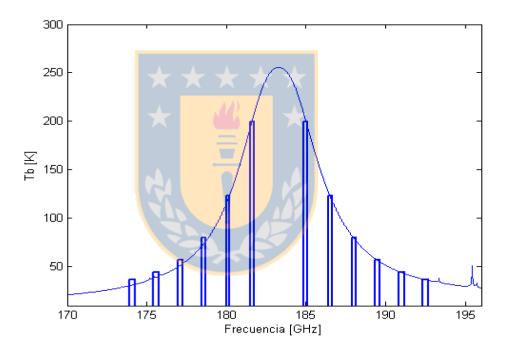


Figura 1.13: Gráfica donde queda en evidencia la asimetría de la línea de vapor de agua centrada en 183 GHz, por medio de simulaciones para el Llano de Chajnantor. Fuente de la imagen: Memoria de Título de Daniel Cabrera 2015.

La manera de medir la cantidad de vapor de agua a partir del perfil de la línea centrada en 183.3 GHz, suponiendo su simetría esta dada por la siguientes maneras:

De manera teórica tenemos que la manera de calcular el vapor de agua precipitable viene dado por la ecuación (Delgado et al. ALMA memo 271.1): siguiente:

$$PWV = \int_0^s \rho_0 e^{\left(\frac{-s}{h}\right)} ds \tag{1.3}$$

donde:

- ρ_0 densidad de vapor de agua a nivel de suelo medida en $[gr/m^3]$
- h es la escala de altura de la distribución de vapor de agua medida en [km]

En la figura 1.14 vemos la técnica que se utiliza para poder estimar la cantidad de PWV desde el perfil de la línea de 183 GHz. La intensidad de la línea de vapor de agua no puede ser medida en cada punto para reconstruir el perfil de manera completa, esto es debido a problemas instrumentales ya que no es posible construir infinitas bandas lo suficientemente delgadas o una cantidad de bandas finita que cubra de manera completa el perfil de la línea. Por lo que se recurren a ciertas bandas distribuidas sobre el perfil de la línea y en cada una de estas bandas se hace la estimación correspondiente de la temperatura de brillo.

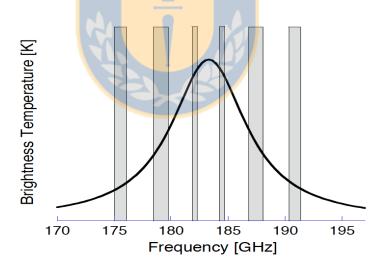


Figura 1.14: En esta imagen vemos los canales de medición o bandas, representados por las columnas grises, ubicadas sobre una línea de vapor de agua simulada (Delgado et al. ALMA Memo 271.1). La intensidad de la línea de vapor de agua no puede ser medida en su totalidad, por lo que se recurren a ciertas bandas distribuidas sobre el perfil de la línea y en cada una de estas bandas se hace la estimación correspondiente de la intensidad con el fin de reconstruir la forma de la línea para poder determinar la cantidad de PWV.

Con la intensidad estimada dentro de estas bandas es posible reconstruir la forma de la línea para por medio de aplicar modelos o simulaciones poder determinar la cantidad de PWV que es capaz de producir esa forma. La cantidad de bandas no pueden ser infinitas y lo que se hace es considerar el perfil de la línea de PWV como simétrico y distribuir un número acotado de bandas (en el caso de la figura 1.14 se tienen 3 bandas) a un lado u otro de la frecuencia central de la línea situada en 183.3 GHz; con el fin de espejar sus resultados a modo de tener el perfil completo de la línea.

Para longitudes de onda milimétricas, se tiene que para diversas temperaturas dentro del régimen que es conocido como el régimen de Raleigh-Jeans, donde se cumple que $h\nu << kT$, la temperatura de brillo es proporcional a la temperatura de emisión suponiendo que el cuerpo se comporta como un cuerpo negro. Este régimen es válido para muchas temperaturas involucradas en una radioantena y los objetos que esta observa, excepto por la emisión de fondo que no puede ser representada por la aproximación de Rayleigh-Jeans.

Dentro de un dispositivo electrónico de microondas como un WVR, todos sus elementos poseen una cierta temperatura de ruido asociado. La atmósfera misma presenta un brillo y una temperatura asociada, al cual es posible asociarle una cierta temperatura. Lo importante es poder medir las temperaturas asociadas, al instrumento en conjunto como al sistema de recepción, con el fin de poder estimar la temperatura de la atmósfera por medio de la relación siguiente:

$$T_{sistema} = T_{antena} + T_{receptor}$$
 (1.4)

por lo tanto

$$T_{antena} = T_{sistema} - T_{receptor} (1.5)$$

En el trabajo de Delgado et al (Delgado et al. Memo ALMA 271.1) se encuentra una relación entre la temperatura de antena y la cantidad de vapor de agua precipitable. Esta es una relación empírica, la que se desprende del comportamiento y relación entre ambas cantidades, visto en la figura 1.15. Esta relación es una aproximación entre las cantidades involucradas y corresponde a un polinomio de segundo grado, cuya ecuación esta dada por:

$$PWV = -0.29275 + (3.5848 \cdot 10^{-2}) \cdot T_{antena} + (1.0646 \cdot 10^{-4}) \cdot T_{antena}^{2}$$
 (1.6)

este es uno de los métodos posibles a utilizar para calcular la cantidad de vapor de agua precipitable sobre el plano de Chajnantor. De hecho los radiómetros UdeC 1 y 2 utilizan este procedimiento para poder estimar la cantidad de PWV presente en la atmósfera.

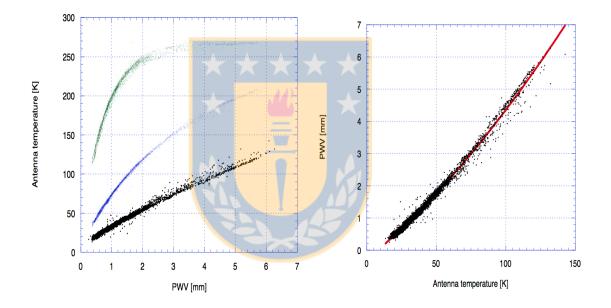


Figura 1.15: (Delgado et al Memo ALMA 271.1) El panel de la izquierda, muestra como varia la temperatura de antena para cada uno de los tres canales de frecuencia intermedia, la curva superior corresponde a una frecuencia de 1,2 GHz, la curva del centro corresponde a una frecuencia de 4,1 GHz y la curva inferior corresponde a una frecuencia de 7,6 GHz. El panel de la derecha, muestra la cantidad de vapor de agua precipitable [mm] como función de la temperatura de antena a una frecuencia de 7.6 GHz, con un ajuste de polinomio de segundo orden.

Capítulo 2

Problema Científico y Objetivos de la Investigación.

Para la elección de un sitio donde ubicar un radiotelescopio es necesario caracterizar de manera integra la zona donde se emplazara este instrumento. Esta caracterización incluye estudios geográficos, meteorológicos y atmosféricos. La caracterización y estudio de un sitio contempla varios años de trabajo previo a la instalación de cualquier radiotelescopio con el fin de garantizar las condiciones necesarias para la implementación, desarrollo y operabilidad del o los instrumentos en ese sitio en particular. Una vez instalados los instrumentos se contínua realizando un monitoreo de las variables atmosféricas para visualizar si existen variaciones ya sean aumentos o degradaciones de alguna variable debido a cambios climáticos de ciclos largos.

Existen varios trabajos previos [Bustos el al. 2009, Delgado el al., Bustos el al. 2014, Holdaway 1997, S. Radford 2000, entre otros] en los cuales han caracterizado las condiciones atmosféricas del Llano de Chajnantor o las zonas aledañas al Llano de Chajnantor, siendo estos trabajos de suma importancia para la instalación del instrumental que se encuentra actualmente en esa zona.

Sabemos que en una primera aproximación la comprensión y caracterización atmosférica de las zonas aledañas al Llano de Chajnantor, por ejemplo San Pedro de Atacama aporta valiosa información previa a las condiciones que es posible esperar en el sitio propiamente tal. Pero se sabe que las condiciones geográficas y estacionales son propias de cada sector y pueden presentar variaciones respecto a las estimaciones

de sectores remotos.

Por otra parte muchos de los estudios del área de Chajnantor relacionados a caracterización atmosférica corresponden a periodos de tiempo cortos de algunos días, meses o un año solamente. Por ejemplo la figura 2.1 muestra el comportamiento del PWV y de la opacidad en un periodo de un mes, lo que solo aporta información sobre las variaciones diurnas de ambas cantidades, además se puede pensar que hay una correlación temporal entre el PWV y la opacidad en el mismo periodo de tiempo, lo cual no es del todo evidente en la figura 2.1

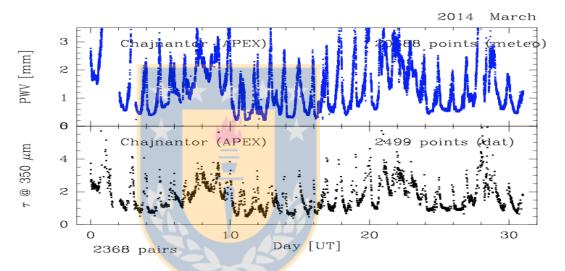


Figura 2.1: Aparente correlación temporal entre la opacidad y PWV para el sitio de APEX, en un periodo de 30 días. Simon Radford comunicación privada.

En el mismo sentido vemos que la imagen 2.2 (Bustos et al 2014) muestra el comportamiento del PWV en un periodo de 5 días para 2 sitios dentro del área de Chajnantor: Cerro Chajnantor y Llano de Chajnantor. Vemos que hay una evidente correlación temporal entre ambos PWV dentro del periodo señalado.

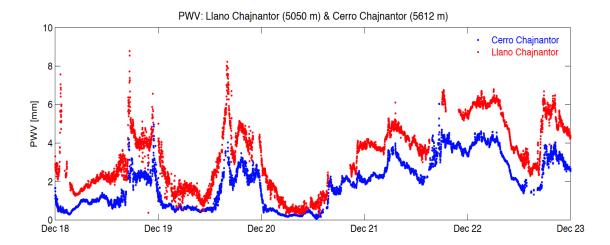


Figura 2.2: Correlación temporal entre el PWV del Llano de Chajnantor (puntos rojos) y el Cerro Chajnantor (puntos azules), dentro de un periodo de 5 días. (Bustos et al. 2014). Es posible ver como la cantidad de PWV del Cerro Chajnantor es menor que la cantidad de PWV presente en el Llano; las formas de ambas curvas son similares y presentan en general el mismo comportamiento dentro del periodo de tiempo estudiado.

¿ Por qué es necesario conocer la cantidad de PWV en un determinado sector?

La necesidad de comprender el comportamiento de la atmósfera y la cantidad de PWV que se encuentra en una determinada posición, viene dada por la necesidad de conocer como la presencia de ciertos gases atmosféricos (principalmente el vapor de agua) produce efectos dispersión y absorción de la señal proveniente desde una fuente extraterrestre que se desea medir en la superficie de la Tierra. En el caso de arreglos interferométricos, esto resulta de gran importancia ya que cada una de las antenas esta sujeta a factores meteorológicos locales presentando variabilidad de PWV entre cada antena; lo que se traduce en un retardo de la señal producto de la separación física entre los instrumentos y la variabilidad atmosférica, esto se muestra en la figura 2.3 (Memoria de Título Hernán de la Puente). En el caso de ALMA, conocer la cantidad de PWV permite realizar correcciones de fase para poder combinar de manera correcta la señal incidente y producir de manera adecuada las imágenes de este observatorio.

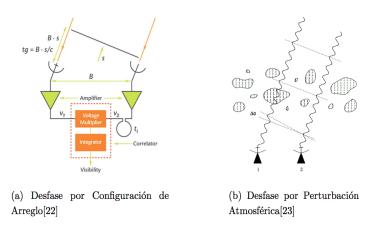


Figura 2.3: El panel de la izquierda muestra la el desfase producto de la separación física entre 2 antenas de un arreglo en donde una antena recibe la señal de forma anticipada que la otra. El panel de la derecha muestra es desfase producto de elementos presentes en la atmósfera, como por ejemplo el vapor de agua. Fuente de la figura: Memoria de Título Hernán de la Puente 2011.

En los ejemplos mostrados recientemente, vemos periodos de tiempo de no mas de un mes, dejando abierta la inquietud sobre el comportamiento atmosférico para un sitio en particular y entre sitios localizados en distintos sectores del área de Chajnantor tanto espacialmente sobre el Llano y/o en altitud; considerando periodos de tiempo mayores, de varios años por ejemplo.

Tomando en cuenta lo dicho anteriormente surgen las siguientes preguntas:

- ¿ Existirán diferencias considerables en la cantidad de PWV que es posible medir entre distintos puntos localizados sobre el área de Chajnantor?
- ¿Existirá una relación entre distintos puntos espaciales del área de Chajnantor que pueda dar cuenta de estas diferencias?
- ¿ Como será la variación temporal en la cantidad de vapor de agua precipitable; entre los diferentes sitios e instrumentos localizados en el área de Chajnantor?

Estas son las preguntas que esperamos responder dentro de esta tesis. Cuya respuesta puede dar luces importantes sobre: el comportamiento, la estacionalidad, distribución planar y espacial y variación temporal del vapor de agua precipitable en toda la zona de Chajnantor.

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

 Caracterizar el comportamiento del vapor de agua atmosférico en la zona de Chajnantor, considerando mediciones en distintos puntos, para evidenciar su comportamiento temporal de acuerdo a la ubicación geográfica y en altitud.

2.1.2. Objetivos Específicos

- Estandarizar las unidades de tiempo de los datos para poder estudiar las correlaciones temporales entre los distintos sitios e instrumentos.
- Encontrar la ecuación que permita transformar desde opacidad a vapor de agua precipitable y aplicarla a los datos de los radiómetros tipper.
- Estimar la cantidad de vapor de agua precipitable en distintos puntos sobre el área de Chajnantor.
- Encontrar las expresiones que modelan las relaciones entre los diferentes sitios en estudio.
- Modelar las variaciones del vapor de agua precipitable, tanto temporal como espacialmente, en todo el sector.
- Estudiar como varía el vapor de agua precipitable por estaciones.
- Estudiar la estacionalidad de la cantidad del vapor de agua.
- Añadir a los resultados de los modelos mediciones independientes desde otros observatorios y compararlos.

Capítulo 3

Sobre los Instrumentos

Antes de realizar cualquier tipo de análisis es necesario comprender de donde provienen los datos y como estos fueron estimados/medidos por los instrumentos, para esto se presenta en esta sección una identificación de los instrumentos, sus ubicaciones, funcionamiento, etc.

De todos los instrumentos que en esta sección se detallan se pudieron recolectar $\sim 3\cdot 10^6$ datos distribuidos en distintos puntos del área de Chajnantor y temporalmente desde el año 1997 al 2014. Siendo una de las recopilaciones de datos más grandes del sitio realizadas hasta la fecha. Lo que permite estudiar en detalle la distribución de PWV en toda el área.

El principal objetivo de este trabajo es entender la distribución de PWV en el área de Chajnantor, para ello necesitamos entender la distribución espacial del PWV, en el Llano de Chajnantor y la cima del Cerro Chajnantor. La idea subyacente detrás de este estudio es comprender como varía la distribución de PWV espacialmente sobre el Llano de Chajnantor además de entender como depende de la altura en la cual estemos realizando la observación; en vista que contamos con varios instrumentos localizados en distintas posiciones sobre el Llano y el Cerro Chajnantor, presentando diferencias de altitud considerables entre todos estos instrumentos. La cantidad de PWV va en relación inversa con las posibilidades de efectuar observaciones submilimétricas, ya que cuando se tiene una menor cantidad de PWV las observaciones en este rango son efectuadas con menor dispersión.

3.1. Ubicación de los Instrumentos.

Para estudiar la distribución espacial y temporal del PWV, se cuenta con datos de diferentes instrumentos, cuyas ubicaciones varían espacialmente en el área de Chajnantor, como también varían en altitud, en ese sentido los instrumentos localizados en el Llano de Chajnantor se encuentran a una altitud de ~ 5050 msnm, mientras que los instrumentos localizados en la cima del Cerro Chajnantor están a una altitud de ~ 5600 msnm. Los instrumentos de los cuales se poseen datos son:

Radiómetro APEX.

Este instrumento esta localizado dentro de la antena de APEX, ver figura 3.1, a una altitud de 5105 msnm. y se encarga de estimar la cantidad de PWV en la línea de vista de la antena, para luego corregir y estimar la cantidad de PWV cenital sobe el sitio de operaciones del radiotelescopio. Todos los datos de este instrumento están disponibles de forma pública en el sitio web del telescopio (http://www.apex-telescope.org/).



Figura 3.1: Imagen del radiómetro de APEX, localizado dentro del radiotelescopio desde donde recibe una parte de la señal y estima la cantidad de PWV presente en ese instante. Fuente de la Imagen: Proposal for a 183 GHz WVR Large Latin American Millimeter Array 2015.

• Radiómetros Tipper's.

Estos radiómetros, son 2 equipos idénticos. Estos instrumentos determinan la opacidad atmosférica sub-milimétrica por medio de la medición del brillo del cielo a diferentes ángulos cenitales. El diseño de estos instrumentos es del tipo

basculante, esto quiere decir que el espejo se mueve con el fin de mapear el cielo y de esta manera obtener un ajuste para la opacidad del cielo. Estos equipos se han movido dentro del área variando su posición y presentan una larga data incluyendo datos desde 1994 a la fecha.

Observatorio mini-TAO

Es el Tokyo Atacama Observatory, es un observatorio en fase de prueba ubicado en la cima del Cerro Chajnantor a una altitud de 5640 msnm. Y es el prototipo para poder instalar en un futuro un telescopio infrarrojo de 6.5 m. de diámetro. Desde este observatorio se tienen datos de PWV obtenidos mientras realizan sus observaciones.

Radiómetros UdeC.

2 radiómetros propiedad de la Universidad de Concepción. Estos instrumentos se encuentran sintonizados a la frecuencia de 183 GHz, ambos instrumentos miden de forma directa el brillo del cielo y por medio de modelos atmosféricos presentados en Delgado et. al (ALMA Memo 271.1) es posible encontrar la cantidad de PWV presente en el sitio. Uno de estos equipos esta localizado a un costado de APEX, mientras el otro esta en la cima del Cerro Chajnantor. Se trabajó en uno de estos radiómetros en la zona de Chajnantor, pero no se obtuvieron datos que fueran incluidos dentro de este trabajo.

Cerro Toco

Se obtuvieron datos de radiosondas lanzadas y radiómetros en el último trimestre del año 2009. La cima del Cerro Toco está a una altura de 5300 msnm quedando ubicado en una altura intermedia entre el Llano de Chajnantor y la cima del Cerro Chajnantor. Los datos provenientes dede esta ubicación proporcionan el tiempo en el que se efectúo la medición y la cantidad de PWV en el sitio.

Si es posible demostrar la consistencia entre los datos provenientes de diferentes instrumentos, podríamos posicionar estos instrumentos en otras ubicaciones y altitudes, confiando plenamente de los datos que obtengamos.

Cuando se revisa la literatura es posible encontrar continuamente que hay regresiones lineales entre dos cantidades, $PWV-\tau$ por ejemplo, desde las cuales se

encuentran relaciones o modelos desde donde podemos predecir información. Los cuestionamientos surgen cuando las regresiones lineales no son del todo claras o las correlaciones temporales dejan dudas. Por ejemplo en la figura 3.2 (Simon Radford, comunicación privada) es posible ver lo siguiente: el panel superior (puntos azules) muestra como varia la cantidad de PWV dentro del mes de marzo del 2014, mientras que el panel inferior (puntos negros) muestra como varía la opacidad atmosférica en el mismo período de tiempo.

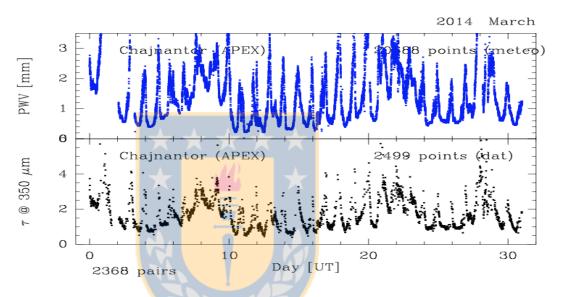


Figura 3.2: Aparente correlación temporal entre la opacidad y PWV para el sitio de APEX. Simon Radford, comunicación privada. El panel superior muestra la variación de PWV durante el mes del marzo del año 2014 mientras que el panel inferior muestra las variaciones de opacidad para el mismo período de tiempo.

En una mirada global es posible decir que existe una correlación temporal entre la variación de PWV y opacidad, ambas cantidades se comportan de forma similar dentro del mismo período de tiempo; pero ¿ Se puede decir con seguridad , que cuando medimos una cantidad de PWV tenemos una determinada opacidad?. Esta pregunta es difícil de responder si solo recurrimos a la imagen 3.2, no podemos estimar que a un PWV dado tenemos una única opacidad o viceversa, en ese sentido la correlación es pobre o no del todo clara. No es posible predecir un comportamiento o cantidad, por ejemplo si tenemos una opacidad de 2 neper no es posible estimar una única cantidad de PWV para esa opacidad, es posible dar cifras alrededor de un valor pero sin total seguridad.

De todos los instrumentos que tenemos, los radiómetros Tipper's son los únicos que no entregan de manera directa la medida de PWV presente en la atmósfera. Por esto es necesario para poder hacer las distintas comparaciones y correlaciones, encontrar alguna relación de transformación entre opacidad y PWV para poder convertir los datos provenientes de estos instrumentos; de esta manera es posible realizar comparaciones y correlaciones de forma directa en PWV entre los datos extraídos desde los radiómetros Tipper y los datos provenientes desde los otros instrumentos.

Para poder encontrar la relación de transformación entre opacidad y PWV es necesario entender como funciona el instrumento y tratar de emular su funcionamiento por medio del programa AM.

3.2. Radiómetros Tipper

Antes de hablar sobre cualquier forma de procesamiento o la descripción del proceso de transformación de los datos propiamente tal, es necesario hablar directamente de los radiómetros Tipper. Todo instrumento que mueva su espejo en ángulos fijos tiene la denominación Tipper o tipping radiometer (radiómetro de tipo basculante); en particular los radiómetros de los cuales se obtuvieron los datos trabajados en esta tesis, ver figura 3.3, son una serie de instrumentos hermanos localizados en distintos puntos de la Tierra, en particular existen 4 radiómetros idénticos al de la figura 3.3 localizados en la Antártida, Mauna Kea Hawaii, Llano de Chajnantor y Cerro Chajnantor.

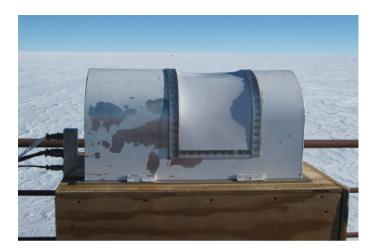


Figura 3.3: Imagen que muestra a uno de los radiómetros Tipper en funcionamiento en la Antártida. Fuente: Simon Radford.

De estos 4 instrumentos tuvimos acceso a los datos de 2 de ellos localizados en el área de Chajnantor. Las ubicaciones de ambos instrumentos no han sido fijas en el tiempo ya que han cambiado su posición varias veces en el transcurso de los años desde 1997 hasta la fecha. Es así como se han localizado en las posiciones que se detallan en la figura 3.4. El primer radiómetro Tipper fue colocado en el centro del futuro arreglo de antenas de ALMA (a un altitud de ~ 5000 msnm), en Octubre de 1997; mientras el segundo radiómetro fue colocado en el mismo sitio en Junio del 2000. En Mayo de 2005 ambos radiómetros fueron trasladados al sitio del entonces CBI (Cosmic Background Imager, a una altura de ~ 5080 msnm). En Mayo del 2006 uno de estos instrumentos se traslado a la cima del Cerro Chajnantor (a una altura de ~ 5600 msnm) desde donde envía datos hasta la actualidad. Mientras que la unidad que quedo en el sitio del CBI fue trasladado hacia el sitio del radiotelescopio APEX (ubicado a una altura de 5105 msnm) en Noviembre del año 2011, en donde se encuentra actualmente.

Gracias a estos continuos movimientos sobre el Llano de Chajnantor como en altitud a través de un período de tiempo comprendido desde 1997 a la fecha; es que estos instrumentos aportan una gran fuente de datos sobre la distribución de vapor de agua precipitable en este sitio. Inclusive es interesante notar que los radiómetros Tipper se encontraban con anterioridad a todas las radio-antenas que se encuentran ubicada en el área de Chajnantor actualmente, por lo que aportan información valiosa

de antes de la instalación de estos grandes radiotelescopios. Si consideramos que el radiómetro del radiotelescopio APEX será nuestra referencia y se instalo en el año 2006, tenemos cerca de 10 años de datos de opacidad atmosférica previa a la instalación de este y otros radiotelescopios.



Figura 3.4: Se muestra en esta figura, la distribución espacial y temporal de los radiómetros Tipper sobre el Llano de Chajnantor. Se muestran las posiciones de los radiómetros Tipper's y el año que fueron instalados en dicha posición. Los radiómetros NRAO1/NRAO-2 se encontraron en lo que es hoy el centro del conjunto de antenas de ALMA a una altitud de 5050 msnm. Mientras que las posiciones CBI-1/CBI-2 se encontraron el sitio de operaciones del CBI a 5080 msnm. De los instrumentos localizados en CBI uno fue llevado al sitio de operaciones de APEX, mientras el otro instrumento fue llevado a la cima del Cerro Chajnantor. Imagen obtenida desde Google maps.

Los radiómetros Tipper, cuyo esquema se muestra en la figura 3.5, son del tipo basculante, en otras palabras su espejo tiene la capacidad de moverse en ciertas posiciones para tomar datos (temperatura de brillo) en cada una de ellas y a partir de esas mediciones estimar una cantidad instrínseca de la atmósfera (opacidad por ejemplo) en esas condiciones particulares del cielo dentro de un barrido completo.

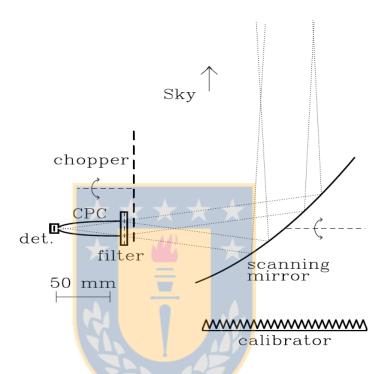


Figura 3.5: Esquema del radiómetro Tipper donde podemos ver el espejo basculante (scanning mirror), el filtro (filter), el detector (det.) y el calibrador de las mediciones. Radford & Peterson 2015.

Los ángulos a los cuales el radiómetro Tipper realiza sus mediciones están calculados de tal manera que la masa de aire en cada medición crezca de manera constante con una diferencia de masa de aire de 0.5; en el cuadro 3.1 se puede ver la masa de aire a la cual se efectúa la medición y la transformación correspondiente al ángulo cenital. En cada una de estas posiciones el radiómetro Tipper realiza una integración de 64 segundos, tomando un tiempo total de 13 minutos en realizar un barrido completo. Este instrumento determina la transparencia atmosférica submilimétrica por medio de la medición del brillo del cielo a los diferentes ángulos cenitales (Dicke et al. 1946)

Cuadro 3.1: Se muestran en la columna de la izquierda los ángulos cenitales en los cuales el radiómetro Tipper efectua sus mediciones, mientras que la columna de la derecha se muestra su transformación a la masa de aire correspondiente.

ángulo cenital [grados]	ma	sa de aire
0		1
48.18	*	1.499
60		1.998
66.42		2.496
70.52		2.993
73.39	M	3.490
75.52	7	3.989

Este instrumento posee un filtro que permite el paso de la radiación que posea frecuencias dentro de este rango, vemos en la figura 3.6 la forma y el rango de frecuencias que permite pasar este filtro. El filtro esta centrado en la frecuencia de 850 GHz y sus extremos corresponden a las frecuencias de 720.126 y 1020.246 GHz respectivamente; con su respectiva transmisividad.

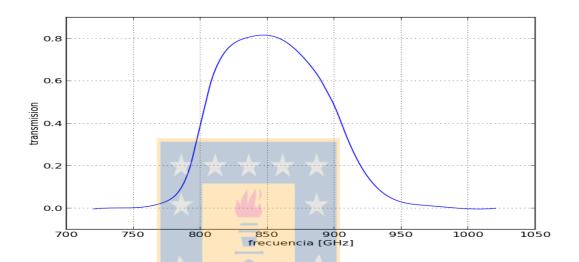


Figura 3.6: En esta figura se presenta el perfil del filtro del radiómetro Tipper. Este filtro esta dentro del rango de frecuencias de 720 a 1020 GHz. Vemos como la transmisión del filtro no es homogénea, siendo la zona de mayor transmisión alrededor de la frecuencia central.

Capítulo 4

Uniformando Coordenadas Temporales

Para poder entender los datos provenientes de los instrumentos y saber si existen relaciones causales entre uno o mas instrumentos, es necesario tener el mismo marco de referencia temporal para poder comparar los sitios y las mediciones de PWV.

Los distintos instrumentos a pesar de estar localizados en un sector común tienen formas diferentes de almacenar la información. En el caso particular de como se almacena la fecha y hora de la observación, es donde se presentan las mayores diferencias de formato, unidades, etc.

Se tiene por ejemplo que los datos del radiotelescopio APEX, fueron tomados temporalmente en tiempo local. Los datos de los radiómetros Tipper's están en formato de número de días desde el 1/1/1995. Por otra parte hay instrumentos cuyo tiempo esta en UNIX-TIME, mientras los datos provenientes desde TAO posee el tiempo en MJD. Para mayor información sobre los sistemas horarios y cual es el punto de partida para cada uno de los sistemas, consultar el apendice B.

Lo primero que es necesario uniformar es el tiempo, con el fin de poder realizar las correlaciones, observar las relaciones causales, etc. En ese sentido el sistema temporal elegido para poder establecer un sistema único, será el sistema MJD (Modified Julian Date). Se escogió este sistema debido la facilidad que presenta en cuanto a leer el número de días dentro de un gran conjunto de datos, en desmedro de los demás

sistemas.

Las ecuaciones de transformación entre las distintas cantidades a MJD son:

Transformación de Julian day (JD) a MJD

$$MJD = JD - 2400000.5$$

Transformación de Unixtime (unixt) a MJD

$$MJD = \left[\frac{unixt}{86400,0} + 2440587,5\right] - 2400000,5 \tag{4.1}$$

■ Transformación de Tiempo Local (lt) a MJD

Se utiliza el módulo de Python mktime el cual permite tomar las horas locales de los datos y por medio de una función entrega el tiempo correspondiente a unixtime. La función toma la fecha y la transforma correctamente a unixtime, es necesario sumarle la hora, min y segundos en unidades de segundos; para poder tener la respectiva trasnformación a unixtime de forma adecuada. Luego se hace la transformación indicada arriba y podemos tener nuestro tiempo en MJD.

$$start = date(int(year), int(month), int(day))$$
 (4.2)

 $Unix = mktime(start.timetuple()) + (int(hora) \cdot 60 \cdot 60) + (int(min) \cdot 60) + int(seg))(4.3)$

$$MJD = \left[\frac{Unix}{86400,0} + 2440587,5\right] - 2400000,5 \tag{4.4}$$

Transformación de Tiempo Tipper (ttipper) a MJD

Los datos de los radiómetros Tipper están en un formato que corresponde a la cantidad de días desde el 1/1/1995. Por lo tanto las variables de entrada para la tarea mktime son estos valores y luego se suma la cantidad de días desde esa fecha en unidades de segundos.

$$start = date(1995, 1, 1)$$
 (4.5)

$$untime = mktime(start.timetuple()) + (numday[i] \cdot 60. \cdot 60. \cdot 24)$$
(4.6)

$$MJD = \left[\frac{untime}{86400,0} + 2440587,5\right] - 2400000,5 \tag{4.7}$$

Las diferentes transformaciones fueron comprobadas por medio de la pagina web calendar converter (https://www.fourmilab.ch/documents/calendar/), la cual nos permite ingresar una fecha en alguno de los sistemas de unidades anteriores y transformarlo de manera adecuada en otro.

Capítulo 5

Transformación desde opacidad a PWV para radiómetros Tipper.

En vista que los radiómetros Tipper entregan más de 11 años de datos de opacidad en diferentes puntos dentro del área de Chajnantor, es necesario poder transformar desde esta cantidad a PWV con el fin de hacer las comparaciones y correlaciones necesarias para entender la distribución de PWV en el área. En esta sección se presentan los métodos realizados para poder encontrar la transformación correspondiente entre opacidad y PWV.

La opacidad atmosférica tiene dos componentes: la componente seca y la componente húmeda, en el caso de este trabajo solo estimamos la transformación producto de la componente húmeda entendida como la cantidad de PWV presente en la atmósfera en un instante determinado. Mientras que la componente seca es producto de otros gases cuyo efecto si bien existe es menor en comparación a la opacidad producida por el PWV.

5.1. Aproximación por opacidad.

Al observar los datos de los radiómetros Tipper's por primera vez y cuando se empezó a entender el funcionamiento, se supuso lo siguiente: que el instrumento en cada posición entregaba un valor de opacidad y luego realizaba el promedio de estos valores con el fin de obtener una opacidad representativa del cielo en ese momento. Los datos del radiómetro Tipper se consiguen dentro de una ventana de transmisión

importante dentro del rango de frecuencias en las cuales funciona el instrumento pero esta ventana es sensible a las condiciones atmosféricas.

Se revisó la literatura de manera exhaustiva buscando alguna relación entre la opacidad (a $350 \ \mu m$) y el PWV. Si esta relación existía bastaba con utilizarla para poder realizar la transformación correspondiente. El resultado fue que no existe una relación directa para esta longitud de onda (o frecuencia) y las relaciones en otras secciones del espectro eran relaciones empíricas propias y resultantes de los modelos utilizados en un sector (diferente a Chajnantor) en particular, por lo que no pudieron ser extrapoladas a nuestro sector de estudio. En este contexto es donde se busca una manera de simular el comportamiento del radiómetro Tipper y obtener una metodología que permita encontrar la relación de transformación entre opacidad y PWV.

Para poder acercarnos a esto realizamos lo siguiente, utilizamos el programa AM y el modelo para el llano de Chajnantor (Chajnantor.amc) de manera inversa. Esto quiere decir que a un valor de PWV y ángulo cenital tendríamos valores para la opacidad dependientes de la frecuencia. Una vez que uno ejecuta el modelo obtiene dentro del archivo de salida 2 columnas las cuales corresponden a frecuencia y opacidad. Por lo tanto el programa calculó para cada frecuencia una opacidad. Si estas cantidades son graficadas obteniene la figura 5.1, la cual muestra todo del rango de opacidades que es posible encontrar dentro de las frecuencias en las cuales funciona el instrumento. Mientras que la figura 5.2 muestra la sección correspondiente al funcionamiento del instrumento tanto en frecuencia como en opacidad, el radiómetro Tipper llega a un nivel de saturación cuando la opacidad es ~ 5 [neper].

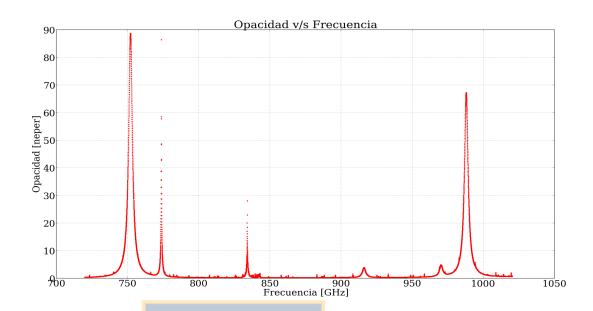


Figura 5.1: Gráfica del resultado del modelo Chajnantor.amc donde podemos ver la distribución de opacidad dependiendo de la frecuencia. Vemos que hay frecuencias en las cuales la opacidad es alta y otras frecuencias donde la opacidad es pequeña.

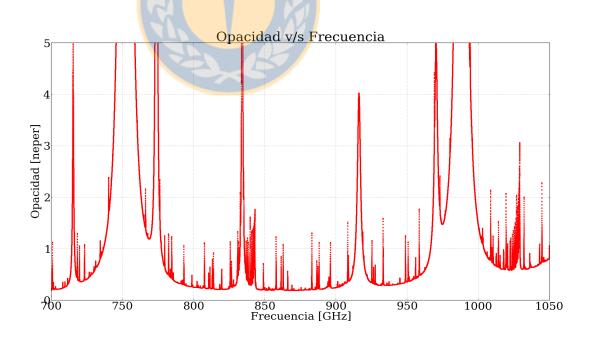


Figura 5.2: Vemos la distribución de opacidad dependiendo de la frecuencia, dentro del rango de frecuencias y opacidad en las cuales trabaja el instrumento.

La pregunta que surge en este momento es ¿Podemos encontrar una opacidad promedio dentro del rango de frecuencias en las que trabaja el radiómetro Tipper y que sea representativa dentro de la región?

5.1.1. Primera aproximación: Promedio en banda angosta

Como se ve en la figura 5.1 tenemos una distribución inhomogénea de la opacidad con la frecuencia, se pueden apreciar varios peaks de alta opacidad y zonas con una opacidad muy baja. Pero esa concepción cambia cuando se muestra solamente la sección donde trabaja el instrumento, la cual se puede ver en la figura 5.2, donde vemos que la opacidad no es homogénea. La primera idea que surgió fue poder realizar un promedio simple en una zona acotada de frecuencias alrededor del valor central de frecuencias en el que trabaja el filtro del instrumento, esta interpretación se tomó en relación a la máxima transmisión del filtro y queriendo poder estar alejados de este valor no más alla de un 1 %. Al considerar esta condición se incluye una zona de alta variación de opacidad lo que impide encontrar un promedio representativo de esta sección. Se reduce entonces la variación de frecuencias en torno al valor central del filtro, en este sentido se plantea que el error porcentual en relación al valor central de frecuencias del filtro será de un 0,01 % bajo esta nueva consideración el promedio de la opacidad se realizó con las opacidades comprendidas entre 849.9 y 850.1 GHz, o sea en una banda muy estrecha.

Entonces al PWV ingresado, obtenemos un barrido de opacidad, en el que se calcula la opacidad promedio dentro de la banda estrecha. Una vez hecho esto es posible poner ambas cantidades dentro de una misma gráfica y encontrar por medio de un ajuste la ecuación que relaciona las variables; esto último da por resultado:

$$\tau_{promedio} = 1,11882711 \cdot (PWV) + 0,08049274 \tag{5.1}$$

$$\frac{\tau_{promedio} - 0.08049274}{1,11882711} = (PWV) \tag{5.2}$$

Pero independiente de relación de transformación encontrada hay un argumento

que nos obligó a descartar esta forma de trabajar; si bien esta primera aproximación buscaba tener una opacidad promedio representativa, queda en evidencia que utilizar una banda estrecha alrededor de la frecuencia central es un error, puesto que el instrumento efectivamente es capaz de obtener la opacidad en todo el espectro permitido por el filtro y no se limita a una banda en específico. Por lo tanto esta metodología se descartó ya que no representaba de manera adecuada el funcionamiento del instrumento.

5.1.2. Segunda Aproximación: Promedio ponderado

Considerando el funcionamiento del instrumento y que el filtro que posee tiene una distribución claramente definida, la forma adecuada de realizar un promedio de la opacidad en todas las longitudes de onda sería considerando la forma y la transmitividad del filtro. Así entonces la ecuación siguiente

$$\tau_{promedio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \alpha \cdot \tau_i \tag{5.3}$$

es un indicador que la opacidad promedio resultante, será obtenida por medio de la sumatoria de la multiplicación de la transmitividad del filtro (α) por la opacidad en cada frecuencia (τ_i) y todo esto dividido por el número de elementos que estamos considerando.

Entonces en este sentido a un PWV dado al programa AM, se obtiene una opacidad para cada frecuencia dentro del rango del filtro; por lo tanto una opacidad representativa estaría dada por τ_{prom} . En el mismo sentido de lo hecho anteriormente se pusieron las cantidades τ_{prom} y PWV en un gráfico y se ajusto una recta utilizando los puntos. De esta metodología obtuvimos la siguiente relación:

$$\tau_{promedio} = 2,0555 \cdot (PWV) + 0,2620$$
 (5.4)

$$\frac{\tau_{promedio} - 0.2620}{2.0555} = (PWV) \tag{5.5}$$

Luego de este proceso y de ver que esta forma de tratar los datos no conlleva a buenos resultados del tipo:

- El promedio ponderado no es representativo de la región espectral analizada debido a estos máximos y mínimos que se encuentran insertos en ella.
- Las ecuaciones de transformación encontradas dan valores de PWV que no corresponden a la zona en estudio.

Se vuelve a plantear el problema y recapitular de la forma que el instrumento propiamente tal realiza las mediciones. Revisando el funcionamiento del instrumento, se supo que el instrumento no mide la opacidad de manera directa sino que mide la temperatura de brillo del cielo y desde esa medición realiza la estimación de la opacidad atmosférica, indicando esto que cualquier promedio de la opacidad no representa la forma de trabajo del instrumento.

Por otra parte el manual mismo del software AM, indica que "los promedios espectrales de la opacidad, coeficientes de absorción y retraso, son generalmente inútiles".

Entonces con toda esta evidencia, se replanteo el modelo y la forma de poder adquirir y tratar la información que se extrae desde AM, para poder encontrar la mejor manera de simular el funcionamiento del radiómetro Tipper y la transformación entre opacidad y PWV.

5.2. Aproximación por temperatura de brillo

Los radiómetros Tipper's son capaces de medir la temperatura de brillo del cielo en distintos ángulos y a partir de estas mediciones pueden estimar la opacidad atmosférica. Por lo tanto el valor que podríamos considerar como representativo dentro del funcionamiento de un radiómetro Tipper es un promedio de las temperaturas de brillo que mide el instrumento, o por lo menos esto sería físicamente consistente con la realidad.

5.2.1. Pasos para encontrar la relación de transformación.

Con el fin de reproducir fielmente el funcionamiento del Tipper se realizará el procedimiento siguiente, en donde se detalla como debería ser simulado el instrumento y los pasos necesarios para poder encontrar la relación que se busca:

- Se utilizan las mismas masas de aire que utiliza el radiómtero Tipper igualmente espaciadas.
- Se utiliza el software AM, ingresando una masa de aire (ángulo cenital) y un PWV determinado, para obtener la distribución de la temperatura de brillo dentro del rango de frecuencias del filtro.
- Se encuentra un promedio de la temperatura de brillo a esa masa de aire y PWV determinado que será considerada como característica de las condiciones impuestas.
- Con el promedio de la temperatura de brillo \bar{T}_b a una misma masa de aire se obtiene un punto en la relación para poder encontrar la opacidad atmosférica en esa condiciones.
- Entonces se encuentran los puntos faltantes modificando la masa de aire X, mientras se mantiene el PWV constante. Al graficar los puntos encontrados, se distribuyen (sabemos que tendrá este comportamiento de manera anticipada) como se muestra en la figura 5.3, podemos ver como los datos se distribuyen en este gráfico y muestran un comportamiento exponencial con un rápido crecimiento en los primeros datos para llegar a un plateau donde los datos crecen lentamente.
- En vista que los puntos muestran un comportamiento exponencial, entonces es necesario un ajuste de tipo exponencial para poder obtener la relación entre ambas cantidades y de donde sea posible obtener la opacidad atmosférica bajo esas condiciones. Este comportamiento puede estar modelado por la relación siguiente:

$$\bar{T}_b = A \cdot \left(1 - e^{-BX}\right) + C \tag{5.6}$$

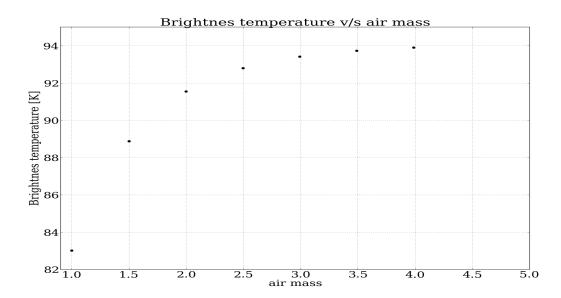


Figura 5.3: Se muestra la supuesta distribución del par ordenado temperatura de brillo y masa de aire (\bar{T}_b, X) , para exactamente los mismos valores de masa de aire en los cuales funciona el instrumento. Manteniendo un PWV constante.

En esta relación se tiene que : \bar{T}_b es la temperatura de brillo promedio del cielo, A es la temperatura ambiente, B es la opacidad atmosférica mientras X es la masa de aire, con C una constante de ajuste en unidades de temperatura.

• Al tener la relación que modela el comportamiento de los datos de la figura 5.4 y conocer los puntos \bar{T}_b y X, es posible realizar un ajuste a los datos por medio de la función antes expresada (o una relación exponencial similar) y a partir de este ajuste exponencial es posible obtener la opacidad (para las condiciones impuestas) a un mismo valor de PWV.

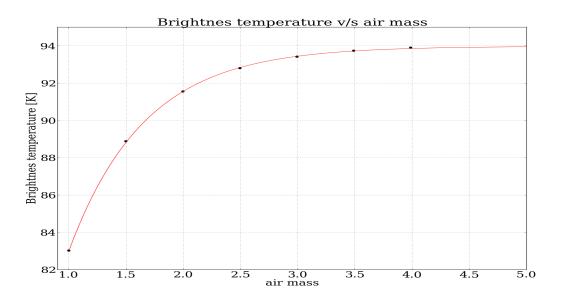


Figura 5.4: Se muestra la distribución que se espera encontrar del par ordenado (\bar{T}_b, X) , para exactamente los mismos valores de masa de aire del instrumento. Y se muestra además el ajuste exponencial representado por la línea roja. Desde ese ajuste es posible obtener la opacidad para las condiciones impuestas.

• Cuando se tiene la cantidad de PWV presente en la atmósfera (dado por la simulación) y la opacidad producto de esta cantidad de PWV se espera un comportamiento en principio lineal como se muestra en la figura 5.5, los puntos azules corresponderían a PWV y a la opacidad que se obtiene a partir del ajuste exponencial expuesto anteriormente. En la figura 5.5 debido al comportamiento de los datos es posible ajustar una función del tipo

$$\tau = m \cdot (PWV) + c \tag{5.7}$$

donde podemos ver la relación que tratamos de encontrar para lograr la transformación entre PWV y opacidad. En esta relación entonces las incógnitas son las constantes de ajuste para poder hacer válido el modelo.

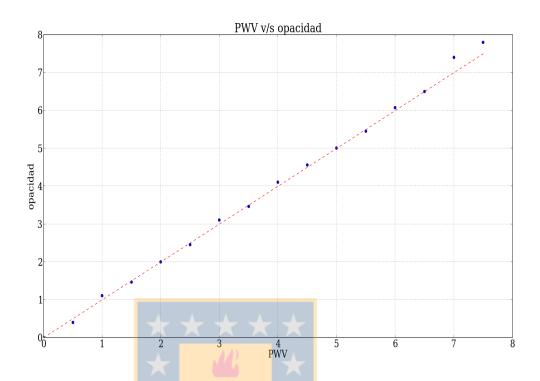


Figura 5.5: Se muestra el comportamiento entre PWV y Opacidad, una vez realizado todo el proceso. Los puntos azules se esperan encontrar desde la relación exponencial $\bar{T}_b = A \cdot \left(1 - e^{-BX}\right) + C$ donde B es la opacidad atmosférica a un PWV establecido. Mientras que la línea punteada es la recta que representaría el comportamiento entre opacidad y PWV de carácter lineal.

• Una vez que se tiene la relación bien establecida y sus constantes de ajustes determinadas, se despeja la variable de PWV y se ingresan los datos correspondientes a opacidad desde los instrumentos Tipper, esto nos permitiría poder transformar las opacidades entregadas por el instrumento en PWV y de esa manera comparar adecuadamente los distintos sitios en estudio.

Considerando los pasos descritos anteriormente tenemos una estructura de trabajo mucho más acotada y clara a seguir, con el fin de poder transformar la opacidad que entrega el radiómetro Tipper en PWV.

5.2.2. Aproximación por promedio temperatura de brillo ponderada por el filtro.

Considerando entonces que el instrumento mide temperatura de brillo, es de esperar que el filtro se aplique de manera directa sobre esta cantidad. El filtro del instrumento tiene un rango de frecuencias comprendidas entre los 720-1020 GHz y actúa realizando la ponderación correspondiente a los valores que el instrumento recibe. Con estas consideraciones la ecuación que utilizaremos para obtener una temperatura característica esta dada por:

$$\bar{T}_{ant}(\nu, X) = \alpha(\nu) \cdot T_b(\nu, X) + (1 - \alpha(\nu)) \cdot T_{amb}$$
(5.8)

Donde $T_{ant}(\nu, X)$ es la temperatura de antena dependiente de la frecuencia y de la masa de aire, $\alpha(\nu)$ es la transmisividad del filtro dependiente solo de la frecuencia, T_b es la temperatura de brillo del cielo dependiente de la frecuencia y de la masa de aire, T_{amb} es la temperatura ambiente.

Como T_{amb} no es una cantidad que se pueda obtener desde AM, lo que realizamos fue tomar todos los datos que existen en relación a la temperatura ambiente para un sitio en particular (CBI-3) y obtener el promedio de la temperaturas para el sitio en cuestión, el resultado de esto es $\bar{T}_{amb} = 269,3$ K.

Con el fin de poder maximizar la transmisión del filtro, en vez de utilizar de manera directa el coeficiente de transmitividad $\alpha(\nu)$, utilizamos el coeficiente normalizado

$$\alpha_N(\nu) = \frac{\alpha(\nu)}{\alpha_{max}(\nu)} \qquad 0 \le \alpha_N \ge 1$$
 (5.9)

por lo tanto la ecuación a utilizar queda de la manera siguiente

$$\bar{T}_{ant}(\nu, X) = \alpha_N(\nu) \cdot T_b(\nu, X) + (1 - \alpha_N(\nu)) \cdot \bar{T}_{amb}$$
(5.10)

Por medio del programa AM hacemos el barrido correspondiente en frecuencias dentro del rango que permite el filtro, utilizando un mismo PWV a una masa de aire constante y obtenemos $\bar{T}_{ant}(X_1)$, repitiendo el proceso con el mismo PWV pero para distintas masas de aire igualmente espaciadas (tal como funciona el instrumento) se obtienen aplicando la ecuación anteriormente descrita el par de datos temperatura de antena promedio $(\bar{T}_{ant}(X))$ y masa de aire (X).

Al poner en una gráfica los puntos, se encuentra la característica exponencial. Por medio de Python utilizando la tarea **curve_fit** de **scipy.optimize** (más información de esta tarea revisar apendice C) se estiman los parámetros de ajuste de la función que modela este comportamiento. Estos parámetros de ajuste corresponden a la opacidad, temperatura ambiente y la constante de temperatura C.

Al colocar las cantidades PWV y τ del cielo dentro de un gráfico, observamos en este caso un comportamiento lineal, siendo posible ajustar la recta que mejor modele este comportamiento, obteniendo entonces la pendiente y el termino libre; pudiendo obtener la ecuación que transforme de τ a PWV.

Obtenemos la relación entre PWV y τ , para el Llano de Chajnantor de la forma siguiente:

$$\tau = 0.7044 \cdot PWV + 0.5442 \tag{5.11}$$

Como podemos ver en la figura 5.6 los valores obtenidos oscilan en torno a un comportamiento lineal, es posible decir que no es un comportamiento perfectamente lineal; además el modelo deja de ser lineal a PWV mayores que 2.5 mm, empezando a decaer desde ese punto, siendo el modelo a PWV mayores que 3 mm inconsistente con el fenómeno físico que se pretende representar; puesto que a mayor PWV la opacidad debe ser mayor, cosa que no vemos en el modelo que acabamos de reproducir.

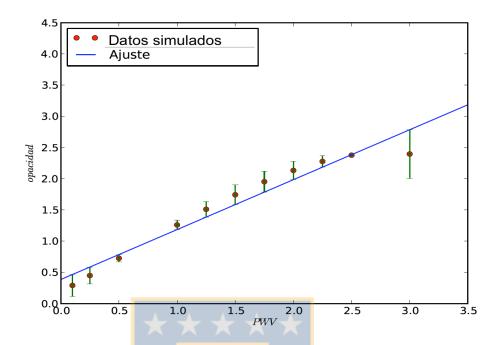


Figura 5.6: Resultado de utilizar la temperatura de antena promedio y ponderada por la transmisividad del filtro. Vemos que los datos no se comportan de manera lineal de forma clara si no que oscilan alrededor del comportamiento lineal y además a valores sobre 2.5 mm, el comportamiento carece de todo sentido físico.

En vista del problema visto en el método anterior, se realizó un nuevo cambio a la ecuación que permite encontrar la temperatura de antena usando la siguiente relación:

$$\bar{T}_{ant}(\nu, X) = \left[\alpha_N(\nu) \cdot T_b(\nu, X) + (1 - \alpha_N(\nu)) \cdot \bar{T}_{amb}\right] \cdot \frac{\alpha(\nu)}{\alpha_{max}}$$
 (5.12)

el termino $\frac{\alpha(\nu)}{\alpha_{max}}$ es una modulación por ganancia lo que ayuda a eliminar las contribuciones de las alas y valores externos máximos fuera de la zona de sensibilidad del filtro.

A pesar de intentar nuevamente el ajuste obtenido no es satisfactorio, puesto que la temperatura promedio que obtenemos a partir de estos modelos no es representativa de toda la zona del filtro como puede verse en la figura 5.7. De hecho la idea era poder subestimar la contribución de las alas pero se ve que a pesar de ponde-

rar las contribuciones estas siguen aportando de sobre manera a la temperatura que obtenemos por medio de este método.

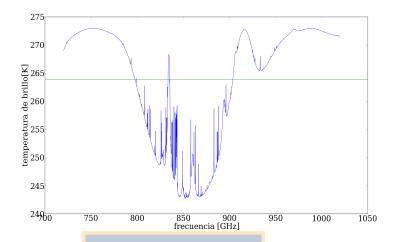


Figura 5.7: Se muestra el perfil de temperatura al aplicarle el filtro, representado por la línea azul. Mientras que la línea verde representa la temperatura promedio que se obtiene al ocupar las ecuaciones detalladas anteriormente. Vemos que el promedio de temperatura no es representativo de toda la sección comprendida dentro de los rangos en los que funciona el filtro.

Replanteamos algunos puntos del modelamiento con el fin de poder disminuir los errores, incertezas o simplemente dar mayor solvencia al método empleado. Es así como se modifican algunas consideraciones para poder encontrar los ajustes esperados que reproduzcan de manera adecuada el comportamiento del radiómetro Tipper y transformen opacidad en PWV.

5.2.3. Cambio en la metodología y aproximación por promedio simple.

En este punto hacemos una modificación importante al proceso, el instrumento propiamente tal realiza mediciones espaciadas igualmente en masas de aire, pero si nos fijamos en los ángulos en los cuales estas masas de aire se encuentran, vemos que desde la posición cenital a una masa de aire 2 tenemos un rápido salto en ángulos para luego variar lentamente en ángulos cenitales en comparación a los 2 primeros valores. En el rango óptico la masa de aire varía considerablemente entre 1 y 2 masas

de aire siendo este comportamiento representado por la recta de Bouguer. Lo que puede traducirse en que los mayores cambios de masa de aire se producen entre los 0° y los 60° de ángulo cenital.

En este contexto vemos que los ángulos del instrumento si bien mapean todo el cielo, no logran mapear adecuadamente la zona del cielo donde efectivamente se realizan las observaciones y donde el cambio de masa de aire es más significativo para los fines astronómicos. Por esta razón se decide abandonar el espaciamiento igualitario en masa de aire y se plantea un barrido en ángulos de elevación equidistantes entre sí, cuya separación será de 5° , por lo tanto las estimaciones por medio del programa AM estarán dadas para los siguientes ángulos y masas de aire que son mostrados en el cuadro 5.1:

Cuadro 5.1: En esta tabla se indica en la primera columna que valores corresponden a los ángulos originales del radiómetro Tipper, mientras que en la columna 2 se muestran los nuevos ángulos en los cuales se realizaran las simulaciones, mientras que la tercera columna muestra la masa de aire a la cual corresponde dicho ángulo cenital.

	ángulo cenital	$masa\ de\ aire$
valor r <mark>a</mark> dióme <mark>tro</mark>	0	1
	5	1,003
	10	1,015
	15	1,0352
	20	1,064
	25	1,103
	30	1,154
	35	1,22
	40	1,303
	45	1,413
valor radiómetro	48,18	1,499
	50	1,554
	55	1,742
$valor\ radi\'ometro$	60	1,998
	65	2,363
$valor\ radi\'ometro$	66,42	2,496
valor radiómetro	70,52	2,993
valor radiómetro	73,39	3,490
valor radiómetro	75,52	3,989

este cambio en los valores de ángulos (masas de aire) permite simular con mayor detalle la temperatura de antena promedio, teniendo un barrido en ángulos cenitales mucho más fino en comparación al método original. De esta forma se aumento el número de puntos en los cuales se hace el ajuste exponencial de 7 a 19 puntos, pudiendo de esta manera disminuir la incertidumbre de la estimación de los parámetros de ajuste, entre los cuales están la opacidad y la temperatura de ambiente.

Para todas las combinaciones entre PWV y ángulo cenital desde el programa AM, obtenemos una tabla con 3 columnas: frecuencia [GHz] (con una resolución en frecuencia de $\Delta\nu=20,0$ MHz), opacidad [neper] y temperatura de brillo [K]. A modo de ejemplo de un archivo de salida se muestra la tabla 5.2

Cuadro 5.2: Muestra de un archivo de salida desde programa AM,para el llano de Chajnantor, considerando PWV=1.25 mm y X=1.5

fre	c [GHz]	au	$T_b[K]$
7	20,14	5,01	26 <mark>8,50</mark>
7	20,16	5,01	26 <mark>8,51</mark>
7	20,18	5,01	2 <mark>6</mark> 8,51
7	20,20	5,01	268,52
7	20,22	5,02	268,53
7	20,24	5,02	268,54
	•	•	
	•		
1	020,16	9,20	271,49
1	020,18	9,22	271,49
1	020,20	9,24	271,49
10	020,22	9,28	271,49
10	020,24	9,35	271,49

Para cada una de la combinaciones de PWV y ángulo cenital (en donde se consideró el plano de referencia fuera del instrumento) calculamos la media de la temperatura de brillo, de forma tangible es calcular la media de la columna 3 de la tabla 5.2.

$$\bar{T}_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} T_b \tag{5.13}$$

Entonces utilizando el programa AM, se hace un barrido en PWV [0.25, 0.5, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5, 2.75, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0 (mm)], para cada cantidad de PWV se hace un barrido en los ángulos cenitales mencionados con anterioridad y se obtiene una temperatura de brillo promedio. El resultado de este proceso es mostrado a modo de ejemplo en la la tabla 5.3 para un PWV de 2.5 mm en el Llano de Chajnantor.

Cuadro 5.3: Tabla resumen para \bar{T}_b para las diferentes combinaciones entre PWV=1.25 mm y todo el barrido de ángulos cenitales en el Llano de Chajnantor

A A	A A	
ángul <mark>o</mark> cenital [°]	X	$\bar{T}_b[K]$
0	1.000	223.26802
5	1.003	223.54495
10	1.015	224.4066
15	1.035	225.82442
20	1.064	227.82885
25	1.103	230.38428
30	1.154	233.48452
35	1.220	237.12705
40	1.305	241.25017
45	1.413	245.78797
48.18	1.499	248.83943
50	1.554	250.62518
55	1.742	255.58362
60	1.998	260.40193
65	2.363	264.72664
66.42	2.496	265.80791
70.52	2.993	268.44046
73.39	3.490	269.79448
75.52	3.989	270.53798

Utilizando los valores de la tabla 5.3 y utilizando la relación

$$T_{brillo} = A \cdot e^{-BX} \tag{5.14}$$

que es la relación de ajuste a los datos que utiliza Simon Radford (encargado de radiómetros Tipper), donde A es la temperatura efectiva de atmósfera, B es la opacidad y X es la masa de aire. Como es posible ver en la figura 5.8 el ajuste no pasa por todos los puntos por lo tanto podríamos decir que no tenemos un buen ajuste visualmente hablando. Pero a pesar de esta diferencia visual y en contra del ajuste aplicado anteriormente los valores de las constantes de ajuste representan efectivamente el comportamiento físico del sitio, como se puede ver en la tabla 5.4.

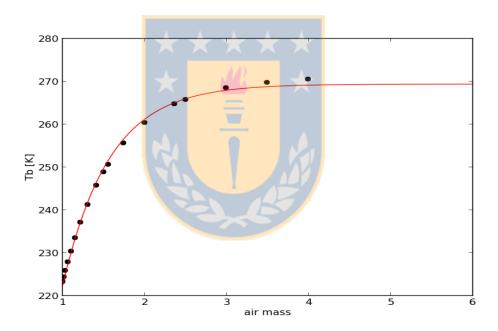


Figura 5.8: La línea roja representa el ajuste exponencial, mientras que los puntos negros son los datos obtenidos por medio de AM (X, \bar{T}_b). Este ajuste es correspondiente al Llano de Chajnantor. Vemos que el ajuste $T_{brillo} = A \cdot e^{-BX}$ no pasa por sobre todos los puntos, lo que podría indicar que es un mal ajuste, pero a diferencia del modelo anteriormente probado este nuevo ajuste representa de forma correcta las condiciones del sitio en estudio.

Cuadro 5.4: Tabla resumen donde se muestran los valores finales extraídos para el ajuste exponencial $T_{brillo} = A \cdot e^{-BX}$ por cada valor de PWV. Se muestra la cantidad de PWV, la temperatura del cielo y la opacidad a esta condición, más sus respectivos errores.

PWV [mm]	Temperatura (A) [K]	Opacidad (B) [n]	Error	Error
	Cielo		Temperatura	Opacidad
0.25	241.2	0.61	2.3	0.01
0.5	260.3	260.3 0.882		0.009
1.0	268.2 1.459		0.4	0.009
1.25	269.3	1.747	0.3	0.009
1.5	270.0	2.03	0.2	0.01
1.75	270.5	2.31	0.2	0.01
2.0	270.8	2.59	0.1	0.01
2.25	271.0	2.86	0.1	0.01
2.5	271.2	3.12	0.1	0.01
2.75	271.3	3.38	0.1	0.02
3.0	271.5	3.62	0.1	0.02
3.5	271.6	4.08	0.1	0.04
4.0	271.84	4.48	0.09	0.05
5.0	272.05	5.10	0.07	0.08

Con la información contenida en la tabla 5.4, es posible construir un gráfico entre opacidad y PWV, junto a los errores asociados a estas cantidades. En ese sentido se grafíca la opacidad (τ) v/s PWV y de esta gráfica se extrae la relación lineal entre ambas cantidades. A una primera vista los datos se comportan de manera lineal, pero surge una complicación que queda en evidencia en la figura 5.9. Aquí podemos ver que la opacidad crece monotonicamente con la cantidad de PWV, dando origen a un comportamiento lineal perfecto hasta 3 mm de PWV, sobre este valor la opacidad continua creciendo pero se aleja del comportamiento lineal, al mismo tiempo que los puntos sobre 3mm de PWV aumentan el error asociado a la medición. En este caso se tiene efectivamente un comportamiento lineal claro, pero también se pueden ver puntos que se alejan de este comportamiento (de forma menos agresiva por decirlo de alguna manera que en modelos anteriores).

La idea es encontrar una recta que represente de mejor manera el comportamiento de los puntos dentro en la gráfica. La recta que esperamos encontrar es del tipo:

$$\tau = m \cdot (PWV) + c \tag{5.15}$$

Para encontrar esta recta utilizamos 2 tareas de Python:

- Polyfit: realiza un ajuste a los datos por medio de mínimos cuadrados no ponderados. El método se basa en en minimizar el error cuadrático entre los datos y la curva del ajuste.
- Leastsq: realiza un ajuste a los datos por medio de mínimos cuadrados ponderados, los datos con errores pequeños tienen un mayor peso en el ajuste que los datos con errores grandes. El método se basa en en minimizar la suma de los cuadrados de un set de ecuaciones.

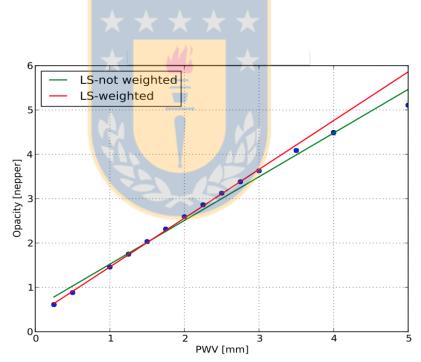


Figura 5.9: Se muestra en esta imagen dos formas de realizar el ajuste lineal a los datos extraídos desde el ajuste exponencial $T_{brillo} = A \cdot e^{-BX}$. Los puntos azules corresponden a los datos extraídos desde la exponencial; la recta verde representa un ajuste lineal sin ponderación por el error asociado a los datos mientras que la recta roja representa un ajuste lineal ponderado por el error asociado a los datos. Vemos que los puntos bajo 3 mm de PWV están en perfecto acuerdo lineal mientras que los puntos sobre 3 mm de PWV se comienzan a desviar del comportamiento lineal.

Como se puede observar en la figura 5.9 los datos sobre 3 mm de PWV se alejan del comportamiento lineal del resto de los datos, al mismo tiempo que los errores asociados al ajuste exponencial son mayores, por lo que el ajuste por mínimos cuadrados sin ponderar por la medida del error, crea una recta (línea de color verde) pero que no es representativa del comportamiento colectivo de los puntos, ya que la función de ajuste es sensible a valores extremos, lo que se traduce en que los puntos más alejados del comportamiento lineal tienen una gran influencia en la pendiente y punto de corte de la recta de ajuste. Por otro lado cuando se realiza un ajuste por mínimos cuadrados ponderados por la medida del error, vemos que la recta de ajuste (línea roja) presenta un buen acuerdo con todos los datos bajos 3 mm de PWV ya que todos estos datos presentan un error asociado a la medición más acotado y pequeño en comparación a los datos sobre 3 mm de PWV.

La pregunta que hay que responder en este punto esta dada de la siguiente manera: ¿ 3 mm de PWV es un punto considerable para asegurar que hasta esa cantidad deberíamos tener un comportamiento lineal o estamos siendo arbitrarios en esta decisión ? o por otra parte ¿ 3 mm de PWV es un punto notable dentro de la distribución de PWV hasta donde se considere la linealidad de los datos o estamos frente a un nuevo error del proceso del modelo?

Una primera impresión nos diría que el valor de 3 mm de PWV es una medida arbitraria para considerar el comportamiento lineal sobre el llano de Chajnantor. Sin embargo cuando revisan los archivos climáticos de APEX (Annual weather data http://www.apex-telescope.org/weather/year_weather/) se encuentra un dato interesante; las concentraciones de PWV medidas por el radiómetro de APEX, se encuentran estudiadas y segmentadas en porcentajes representativos, como se muestra en la figura 5.10, donde podemos ver las diferentes zonas donde se agrupa el porcentaje acumulado de medición de PWV; observamos que prácticamente todas las mediciones de PWV están bajo los 5 mm, mientras que la zona de color rojo corresponde al sector donde si bien se mide la cantidad de PWV el observatorio APEX no realiza observaciones.

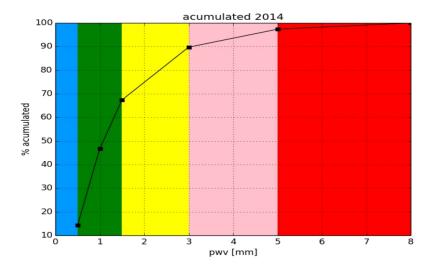


Figura 5.10: Porcentaje acumulado de mediciones de PWV por medio del radiómetro de APEX, para el año 2014. Fuente: http://www.apex-telescope.org/

Considerando las estadisticas proporcionadas por APEX, se puede ver que el porcentaje más representativo de PWV se encuentra bajo los 3 mm. Se puede resumir esta información en la tabla 5.5 donde se muestran los porcentajes de mediciones hasta los 3 mm de PWV, siendo siempre estos un gran porcentaje del total de mediciones realizadas en este sitio.

Cuadro 5.5: Tabla resumen donde se muestra comparativamente la cantidad de PWV acumulado dentro de los años en el sitio de APEX. La primera columna corresponde al año y la segunda muestra el porcentaje acumulado aproximadamente bajo los 3 mm de PWV.

Año	Porcentaje acumulado < 3 mm
2007	$\sim 60\%$
2008	$\sim 70\%$
2009	$\sim 68\%$
2010	$\sim75\%$
2011	$\sim 65\%$
2012	$\sim 70\%$
2013	$\sim 55\%$
2014	~ 90 %

Por lo tanto, si se considera la información entregada por el radiómetro de APEX, podemos decir que efectivamente una recta que represente el comportamiento del PWV debe modelar de manera adecuada un barrido de PWV ≤ 3 puesto que en este rango se presentan de manera preponderante la mayor concentración de mediciones a lo largo de los años para el Llano propiamente tal.

Ya justificada la segregación o poca ponderación de los datos por sobre los 3 mm de PWV en la figura 5.9, surge una nueva interrogante: ¿Por qué la recta que modela opacidad v/s PWV no pasa por el origen?. Es posible pensar que a una medición de PWV=0 tendriamos una opacidad=0, pero esto no es del todo correcto: la opacidad se relaciona con la concentración y densidad de gases troposféricos que atenúan y dispersan la señal proveniente de fuentes fuera de nuestro planeta. En este sentido se tiene que hablar de componentes secas y húmedas de la opacidad, las cuales se refieren a la opacidad producto a gases ajenos al vapor de agua y a la opacidad producto de este componente respectivamente. Todos los gases por lo tanto contribuyen de alguna manera a la opacidad atmosférica. Entre los gases que más aportan a la opacidad está el vapor de agua precipitable, pero no es el único gas que interviene con la señal, de hecho el mismo programa AM utiliza una mezcla de gases distribuidos en ciertas proporciones dentro de sus capas para poder modelar de manera adecuada la opacidad, entre estos otros gases encontramos al ozono (O_3) por ejemplo, que aporta al fenómeno de la opacidad. Por lo tanto el corte de la recta ponderada con el eje de la abscisa, viene dado y entendido por otros gases que se encuentran presentes en la atmósfera en el llano de Chajantor y tienen una contribución menor pero significativa a la opacidad sobre el sitio y producen este offset de la recta de ajuste ponderado.

Por lo tanto, bajo estas consideraciones se puede asegurar que el modelo realizado y la recta ponderada obtenida, representa de manera adecuada el comportamiento atmosférico en el sitio estudiado. Aplicando el método a las dos locaciones donde se encuentran los radiómetros Tipper's, Llano de Chajnantor y Cerro Chajnantor, tenemos que las rectas que dan cuenta de la relación entre la opacidad y PWV son:

• Llano de Chajnantor (línea roja en la figura 5.11)

$$\tau_{cp} = 1,0996 \cdot (PWV_{tipper_{cp}}) + 0,3605 \tag{5.16}$$

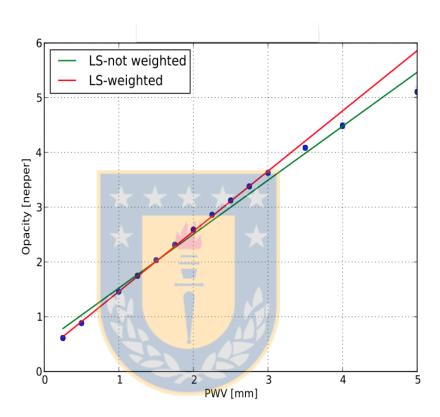


Figura 5.11: Relación entre opacidad y PWV en el Llano de Chajnantor, la línea roja es el ajuste lineal ponderado por la estimación de los errores en opacidad. La línea verde es el ajuste lineal no ponderado a los datos.

• Cerro Chajnantor (línea roja en la figura 5.12)

$$\tau_{cc} = 1,1745 \cdot (PWV_{tipper_{cc}}) + 0,3324 \tag{5.17}$$

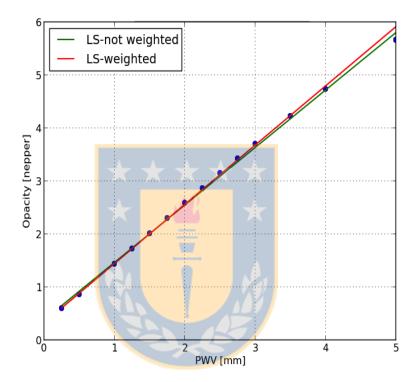


Figura 5.12: Relación entre opacidad y PWV en el Cerro Chajnantor, la línea roja es el ajuste lineal ponderado por la estimación de los errores en opacidad. La línea verde es el ajuste lineal no ponderado a los datos.

Se pudo encontrar las relaciones que permiten transformar desde opacidad a PWV para las dos ubicaciones donde están localizados los radiómetros Tipper. Pero antes de avanzar hay que hacer hincapié en los modelos de AM que permitieron realizar estas transformaciones.

Los dos modelos utilizados para simular las condiciones en el Llano y en el Cerro Chajnantor son:

Chajnantor.amc

Este modelo esta optimizado para la zona del Llano de Chajnantor a una altitud de ~ 5000 msnm.

Sairecabur.amc

Este modelo esta optimizado para el Cerro Sairecabur, distante 35 Km. al nor-oeste de Chajnantor. Representando el comportamiento en la cima de este cerro a una altitud de 5525 msnm. Si bien este no es el modelo preciso para el Cerro Chajnantor, es un buena aproximación por varias razones:

- Representa el mismo accidente geográfico; en otras palabras el modelo representa un cerro y no otro tipo de estructura.
- Las alturas y condiciones climáticas son similares.
- Si bien el cerro Sairecabur esta a una distancia considerable desde el Llano de Chajnantor, las condiciones locales producto de la altitud son prácticamente las mismas. Y no debería existir una gran diferencia en cuanto a las condiciones climáticas existentes en Sairecabur y las presentes en el Cerro Chajnantor.

Para mayor información sobre el funcionamiento del programa AM y datos específicos de los dos modelos utilizados revisar el apéndice A.

Capítulo 6

Transformación y análisis del Vapor de Agua Precipitable extraído desde los instrumentos

6.1. Transformando opacidad en PWV.

Cuando se tienen y se confía en las ecuaciones que relacionan la opacidad con PWV para los sitios donde se encuentran los radiómetros Tipper's (Llano de Chajnantor y Cerro Chajnantor), hay que despejar el PWV y obtenemos la ecuación que permite transformar directamente desde opacidad a PWV para cada sitio.

Para el Llano y el Cerro Chajnantor, las ecuaciones de transformación que se aplican de manera directa a los datos son respectivamente

$$\frac{\tau_{cp} - 0.3605}{1.09969} = PWV_{tipper_{cp}} \tag{6.1}$$

$$\frac{\tau_{cc} - 0.3324}{1.1745} = PWV_{tipper_{cc}} \tag{6.2}$$

el resultado que obtenemos de este proceso tanto para el Llano de Chajnantor como para el Cerro Chajanantor es mostrado en las figuras 6.1 y 6.2:

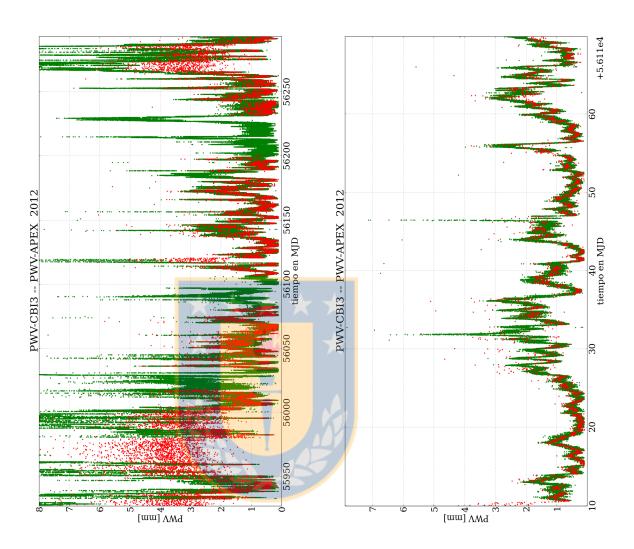


Figura 6.1: Se muestra de forma comparativa el PWV obtenido por medio de la transformación desde el instrumento Tipper en la ubicación CBI3 (puntos rojos); mientras que los puntos verdes corresponden a las mediciones directas de PWV realizadas por el radiómetro de APEX. El panel izquierdo muestra la distribución de PWV dentro del año 2012, mientras que el panel derecho muestra una sección de los datos para el mismo año. Salta a la vista que ambas estimaciones de manera independientes de PWV son comparables. El eje X expresa el tiempo en MJD mientras el eje Y muestra el PWV en mm.

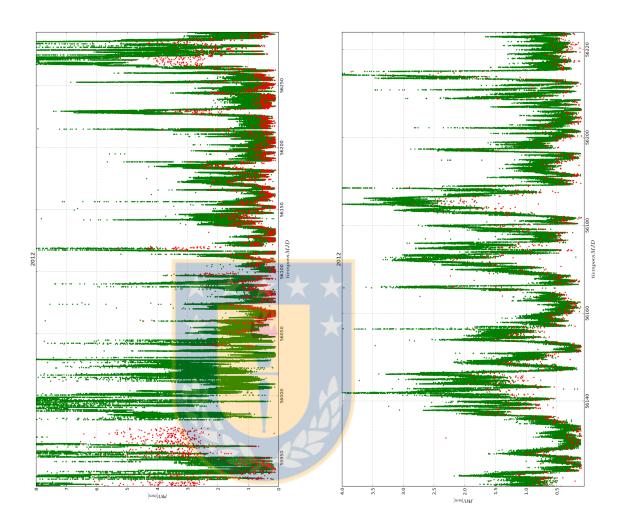


Figura 6.2: Se muestra de forma comparativa el PWV obtenido por medio de la transformación desde el instrumento Tipper ubicado en la cima del Cerro Chajnantor (puntos rojos); mientras que los puntos verdes corresponden a las mediciones directas de PWV realizadas por el radiómetro de APEX. El panel izquierdo muestra la distribución de PWV dentro del año 2012, mientras que el panel derecho muestra una sección de los datos para el mismo año. Es posible ver la diferencia de mediciones de PWV entre ambos sitios, las mediciones del Tipper en el Cerro siempre son menores que las mediciones realizadas por el radiómetro de APEX. Esta diferencia sistemática era esperable debido a la diferencia de altura entre los sitios.

Las figuras 6.1, 6.2 muestran la variación de PWV en el transcurso de un año, para 2 localidades del área de Chajnantor: Llano y Cerro. En las figuras se graficaron los datos provenientes del radiómetro de APEX (puntos verdes) y sobre estos datos se graficaron los datos (puntos rojos, ya transformados desde opacidad) provenientes del radiómetro Tipper. Se puede ver directamente que las estimaciones de PWV entre los instrumentos son comparables.

Como podemos ver de las figuras 6.1 y 6.2, las transformaciones desde opacidad a PWV (puntos rojos) presentan un buen acuerdo con las mediciones del radiómetro de APEX (puntos verdes), mostrando una clara y evidente correlación temporal entre los PWV transformados desde la opacidad con las mediciones directas del sitio de APEX; no hay momento en que los valores de PWV_{tipper} no sigan el comportamiento de las mediciones del radiómetro de APEX.

En el caso del Llano de Chajnantor (figura 6.1) podemos ver que los valores de PWV (transformados desde la opacidad de los radiómetros Tipper's) están como se ha dicho correlacionados temporalmente, además la cantidad de PWV que mide el radiómetro de APEX y el valor encontrado desde el modelo, son congruentes y se manifiesta este buen acuerdo en prácticamente todos los match temporales, salvo las regiones con una sobre densidad de PWV (el PWV es mayor a 8 mm), en donde ambos instrumentos están en saturación e imposibilitados de poder estimar la cantidad de PWV presente en la atmósfera en ese instante de la medición. El panel de la izquierda de la figura 6.1, muestra de forma integra las mediciones de PWV del radiómetro de APEX y los valores obtenidos de la transformación, para el año 2012; podemos apreciar que en todo el período las cantidades de PWV que pueden estimar ambos instrumentos son prácticamente idénticas. El panel izquierdo de la figura 6.1 muestra un zoom realizado al panel izquierdo y viene a comprobar el buen acuerdo entre el PWV_{APEX} y el $PWV_{tipper-llano}$ en un período de 60 días, donde vemos que ambas cantidades se mueven conjuntamente en el tiempo, ubicandose los puntos rojos (representativos del PWV_{tipper}) dentro de la distribución de mediciones del radiómetro de APEX. Este comportamiento se debe a dos factores principalmente, que las diferencias de altura entre estos dos sitios en particular es cero (radiómetro Tipper CBI3, se encuentra a un costado de antena de APEX) y las diferencias de temperatura son cero (todo el Llano se modeló conforme a una temperatura promedio de 273 K). Algo que hay que hacer notar dentro de este análisis es la cantidad

de mediciones que entregan ambos instrumentos. El radiómetro de APEX obtiene mediciones de la cantidad de PWV cada 1 minuto, en específico la cantidad de puntos que entregó el instrumento para el año 2012 fueron ~ 427000 mediciones, mientras el radiómetro Tipper ubicado en CBI3 entrego ~ 75000 datos. Por este motivo los puntos verdes debido a la densidad que presentan, parecieran un continuo en desmedro de los datos del radiómetro Tipper cuyo datos en muchos casos podemos individualizar.

Si nos enfocamos ahora en el Cerro Chajnantor, figura 6.2, podemos ver como se mantiene la correlación temporal, y los PWV de ambos sitios mantienen un comportamiento común, esto es un indicador que existe conexión causal entre ambas locaciones, más aun la diferencia en la medida del PWV entre ambos sitios es sistemáticamente consistente, vemos claramente que la medida de $PWV_{tipper-cerro}$ es menor que la cantidad de PWV que estima el radiómetro de APEX lo que era esperado debido a: la diferencia de altura (~ 500 m) que existe entre el Llano y la cima del Cerro chajnantor, y por otro lado la diferencia de temperaturas que existe los sitios, mientras que para el Llano de Chajnantor la temperatura promedio es 273 K, para la cima del Cerro Chajnantor la temperatura promedio es de 267 K; siendo esta diferencia importante en la comparación y entendimiento de los modelos. Al igual que en el caso anterior hay que decir que la cantidad de datos que entregan ambos instrumentos es diferente, mientras el radiómetro de APEX entrega ~ 427000 datos, la cantidad de datos que obtenemos a partir del radiómetro Tipper ubicado en la cima del Cerro Chajantor alcanza la cifra de ~ 5700 datos.

6.2. Correlaciones Temporales y gráficas PWV-PWV

Como se ha encontrado la forma de estimar el PWV a partir de los datos de opacidad y hemos visto que hay una correlación temporal entre ambas cantidades, necesitamos estimar si existe una correlación entre las cantidades de PWV entre los distintos instrumentos. Las gráficas que deseamos generar son del tipo PWV_{apex} v/s PWV_{tipper} , pero con una condición que es importante mencionar: la correlación entre los PWV se establecerá solo entre cantidades que se encuentren previamente correlacionadas de forma temporal. Los gráficos del tipo PWV-PWV, en caso de que las cantidades estuvieran efectivamente correlacionadas temporalmente y sus valores de PWV puestos en una gráfica presentan un comportamiento bien definido revelaría una conexión causal entre los sitios en estudio.

Para poder crear las figuras (PWV-PWV) es necesario hacer match temporales entre los datos, para asegurarnos que estamos comparando de forma adecuada y simultánea ambos sitios. Para realizar esta correlación temporal se utilizó el programa TOPCAT. El método de hacer los match temporales consistió en encontrar las coincidencias de los instrumentos Tipper y el radiómetro de APEX, con una distancia temporal entre ambas mediciones de no más de 1 min. Esta cantidad fue escogida en vista de la separación e independencia de los datos del radiómetro de APEX, instrumento que funciona como nuestro standard y norma de medición. Por lo tanto el match busca todas las coincidencias temporales entre los datos del radiómetro Tipper en relación a los datos del radiómetro de APEX que se encuentren dentro de un minuto de separación. Una vez realizada la correlación temporal, TOPCAT genera un archivo de salida solo con los match temporales, en este archivo se encuentran 5 columnas: las dos primeras corresponden a los datos de APEX (tiempo al que fueron tomados los datos y cantidad de PWV registrada), las columnas 3 y 4 corresponden a los datos de los radiómetros Tipper (tiempo al que fueron tomados los datos y cantidad de PWV registrada), mientras la ultima columna corresponde a la separación existente entre ambas cantidades.

Con este archivo de salida, estan las condiciones para gráficar de manera adecuada los PWV_{APEX} v/s PWV_{tipper} correlacionados temporalmente. A modo de ejemplo presentamos los gráficos obtenidos para la correlación en PWV para los sitios APEX-CBI3 para todo el año 2012 (figura 6.3) y la correlación en PWV para los sitios APEX-CC para todo el año 2010 (figura 6.4). Estos resultados son similares y van en la misma dirección que los resultados obtenidos por S. Radford dentro de sus trabajos, en especial con las gráficas obtenidas dentro de Radford & Peterson 2015, aunque las correlaciones en ese trabajo no se realiza en PWV y tiene un análisis diferente.

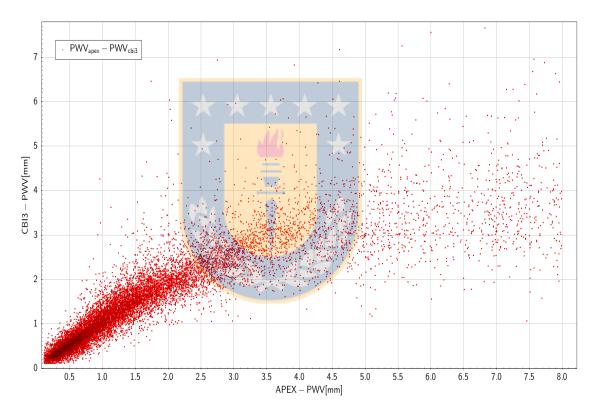


Figura 6.3: Correlación en PWV para los sitios Apex-cbi3 considerando todos los datos correlacionados temporalmente para el año 2012. El eje x representa el PWV_{APEX} en mm. mientras el eje y representa el PWV_{tipper} en mm.

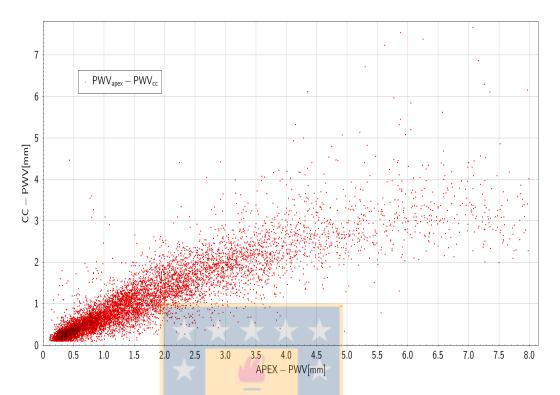


Figura 6.4: Correlación en PWV para los sitios Apex-CC considerando todos los datos correlacionados temporalmente para el año 2010. El eje x representa el PWV_{APEX} en mm. mientras el eje y representa el $PWV_{tipper-cerro}$ en mm.

De las figuras anteriores se puede decir lo siguiente: en ambos casos los datos se agrupan y presentan un comportamiento común, vemos que parecieran tener un comportamiento lineal hasta una cierta zona y luego de eso empieza a verse un fenómeno de dispersión y separación de los datos. Vemos además que los datos presentan un sesgo en todas las direcciones; el sesgo obvio viene dado por la imposibilidad de medir valores de PWV menores que cero, pero además consideramos solo los valores en PWV mayores que 0.1 mm tanto para el radiómetro de APEX como para los radiómetros Tipper. El siguiente sesgo se da para las cantidades superiores de PWV, este sesgo esta puesto en 8 mm de PWV para ambos instrumentos. El sesgo inferior (0.1 mm de PWV) viene dado por la resolución y mínimo valor que puede medir el instrumento de APEX, por otro lado el sesgo superior (8 mm de PWV) viene dado por el estado de saturación y además APEX solo detecta valores de PWV hasta ese límite (aunque no observa objetos astronómicos). Todos esos sesgos quedan de manifiesto en las figuras 6.3-6.4 y los puntos dentro de estos límites corresponden a la zona útil de los datos para continuar con nuestro análisis.

Dentro de las gráficas de PWV-PWV podemos identificar dos zonas de comportamiento de los datos, hay una zona donde los datos están fuertemente correlacionados y presentan un comportamiento lineal, mientras que hay otra zona donde la correlación es pobre y los datos presentan una gran dispersión no pudiendo modelarse esta región; esta sección donde la dispersión domina es producto de varíos factores entre ellos tenemos: el tiempo en que los instrumentos obtienen una medición, mientras APEX obtiene datos cada un minuto el radiómetro Tipper obtiene un dato cada 13 minutos por lo que las condiciones atmosféricas pueden variar en ese lapso de tiempo, otro de los factores que influyen en esta zona de dispersión o colas, son los distintos niveles de saturación de los instrumentos ya que los radiómetros tipper están en un estado de saturación a ~ 5 neper, el radiómetro APEX cierra sus observaciones a los 8 mm de PWV.

Ambas regiones (lineales y colas) tienen que tener un punto en común desde donde una termina y la otra comienza, siendo este punto (o en realidad alrededor de este punto) donde se comienza a perder la linealidad de nuestros datos.

Como se ha dicho hay una zona de comportamiento lineal en las correlaciones de PWV que miden los instrumentos, esta zona da información necesaria para establecer la relación causal entre los sitios en estudio. Por lo tanto la búsqueda de esta zona de comportamiento lineal y la relación que modela esta región es el paso siguiente dentro del análisis de los datos. Entonces hay que distinguir la zona de comportamiento lineal y la recta que modela esta zona, buscando un alto compromiso entre una gran cantidad de datos (sobre un 60 % de los datos) y un claro comportamiento lineal.

6.3. Regresiones Lineales para encontrar la zona de comportamiento lineal.

Si se aplica de forma directa una regresión lineal a los datos obtenemos una primera forma de entender el problema del comportamiento lineal. Para ello se utilizó de manera directa el módulo de python **linregress**. Si no usamos alguna restricción

obtenemos una recta que no se ajusta al comportamiento macro de los puntos, como puede verse en la figura 6.5. En esta figura la relación lineal que se obtuvo no representa ni la región lineal ni un comportamiento general de nuestra distribución de datos. Por lo que aplicar de manera directa la función a todos nuestros datos nos entrega un mal ajuste lineal.

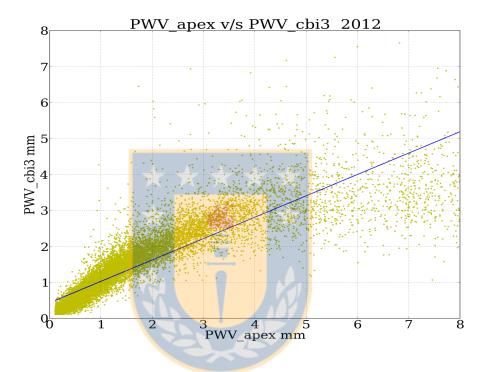


Figura 6.5: Primera aproximación de regresión lineal aplicando la función linregress a todo el conjunto de datos. Vemos que la recta que entrega este proceso no corresponde al comportamiento de todos los datos.

En vista del resultado anteriormente visto se decide dividir en regiones crecientes toda la extensión de nuestros datos y realizar la regresión lineal en cada una de estas regiones para identificar cual es la región donde el comportamiento es efectivamente lineal. A modo de ejemplo presentamos la figura 6.6 en donde vemos todas las rectas que se producen al momento de seccionar nuestros datos de alguna manera. En vista de las múltiples rectas que obtuvimos nos vemos enfrentados a utilizar algunos de los parámetros de correlación o error que nos entrega el modulo, para discriminar entre las rectas e identificar la que mejor represente el comportamiento de la parte lineal, más información en apéndice D. Aunque se intentó con todos los parámetros de salida que ofrecía el módulo de Python, no hay una forma efectiva utilizando solo

esa información de discriminar adecuadamente la recta que representa la zona lineal de nuestros datos, esto es debido a la forma como están distribuidos los datos dentro del gráfico.

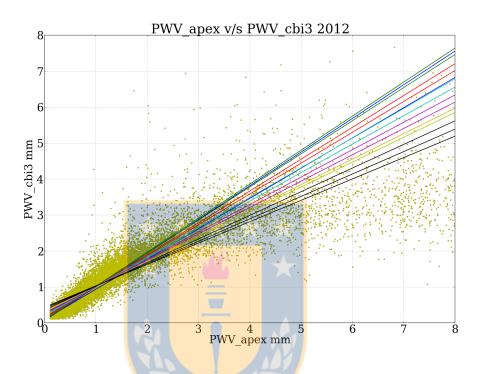


Figura 6.6: Resultado de aplicar regresiones lineales dentro de distintas secciones de los datos. Todas las rectas son posibles soluciones lineales al comportamiento de los datos. El problema en este caso es discriminar de forma correcta cual es la recta que representa de mejor manera la sección lineal de los datos.

El método que utilizaremos para poder encontrar la zona de comportamiento lineal y la recta que lo modela será el siguiente:

- Dividir la sección útil de los datos en secciones espaciadas de manera igualitaria.
- Realizar regresiones lineales, con todos los puntos dentro de cada una de las secciones. Estas regresiones se hacen por medio de las tareas de Python:
 - linregress: Calcula una línea de regresión. Este modulo calcula una regresión de mínimos cuadrados para un conjunto de datos.
 - curve_fit: utiliza mínimos cuadrados no lineales para adaptarse a los datos por medio de una función generalizada f.

Ambos módulos tienen características similares y diferencias. Linregress nos entrega coeficientes de ajuste que podemos utilizar para elegir una recta por sobre la otra, mientras que curve_fit nos permite encontrar los coeficientes de ajuste y sus respectivos errores.

■ En vista que surgirán varias rectas (una por cada sección), tendremos que discriminar e identificar la recta que mejor modele el comportamiento lineal de la mayor cantidad de datos.

6.3.1. Regresión Lineal en regiones cuadradas.

En esta aproximación se realizó una segmentación cuadrada de los datos. Este método se basó en generar secciones cuadradas de información, por ejemplo los datos comprendidos entre 0 mm y 1 mm de PWV tanto para el radiómetro de APEX como para el radiómetro Tipper, 0 mm y 2 mm de PWV tanto para el radiómetro de APEX como para el radiómetro Tipper, etc. Esta distribución es mostrada en la figura 6.10 . Dentro de cada una de las distintas regiones se procedió a realizar regresiones lineales, dejando de forma flotante la pendiente y el termino libre.

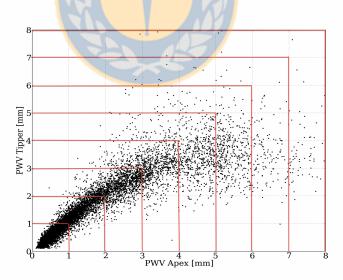


Figura 6.7: Representación del problema de segmentar las correlaciones en PWV en secciones cuadradas. Dentro de las cuales se realizarán las correlaciones lineales.

Las rectas que se obtienen de la aproximación lineal difieren mucho una de otras tanto en pendiente como en el termino libre. Debido a la forma que poseen las distri-

buciones de los datos en los gráficos PWV-PWV, es complicado juzgar cual de todas las rectas es la que mejor representa el comportamiento lineal del conjunto de datos, es por esto que nos apoyamos en el coeficiente de correlación para poder establecer la mejor recta, mas información ver apéndice C. Un coeficiente de correlación alto (sobre un 80%) indica que los datos presentan una alta relación lineal entre ellos; por lo menos dentro del rango que estamos considerando.

Si bien este método tiene una lógica en cuanto a poder separar en regiones y obtener las regresiones en cada una, no representa una buena aproximación a los datos en forma macroscópica, puesto que los cortes verticales y horizontales de cada región son separaciones muy estrictas de los datos, como podemos ver en la figura 6.8 en las esquinas que separan ambas regiones tenemos datos que son menores que una condición pero mayores que otra, por ejemplo un dato puede tener las siguientes coordenadas $PWV_{apex} > 1mm$ y $PWV_{tipper} < 1mm$. Bajo esta condición la forma en que se efectua la regresión lineal se ve afectada por la forma del corte y la cantidad de datos que cumplen una condición pero no la otra.



Figura 6.8: Representación del problema de segmentar las correlaciones en PWV en secciones rectangulares. Donde podemos ver que el corte en nuestros datos son separaciones fuertes y que generan que existan datos cuyas coordenadas cumplan con una condición pero no cumplan con la otra generando un problema a la hora de realizar la regresión lineal.

Por lo tanto efectuar un procesamiento en estas condiciones nos llevara de manera inequívoca a errores en encontrar la sección de comportamiento lineal y la recta que modela adecuadamente esta sección.

6.3.2. Regresión Lineal en regiones circulares.

Considerando el error en el corte de los datos del método anterior, se decide hacer cortes circulares considerando radios constantes y crecientes de manera de evitar un sesgo muy marcado entre una región y otra.

Para esta nueva forma de encontrar regiones de comportamiento lineal, utilizamos dos formas de aproximarnos:

- Aproximación por radio constante

 En esta aproximación las regiones donde estamos considerando los datos que usaremos para la regresión lineal, estarán dentro de una región circular de radio constante (radios: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8 [mm]).

 En esta aproximación el error detectado, es que el radio constante excluye efectivamente puntos notables que desearíamos tener dentro de nuestro análisis ([1.1], [2,2], etc) ya que quedan excluidos por la forma de las regiones.
- Aproximación por radio constante y que pase por un punto En esta forma de aproximarse a la región de comportamiento lineal, deseamos encontrar las regiones, queriendo generar radios constantes pero que estos radios pasen por ciertos puntos particulares ([1,1][1.5,1.5][2,2]...[8,8][8.5,8.5]). Con el fin de superar el problema detectado en el método anterior.

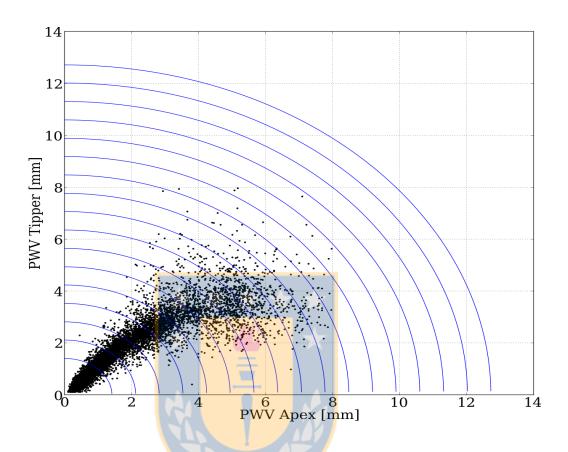


Figura 6.9: Representación del problema de segmentar las correlaciones en PWV en secciones circulares. Vemos que los incrementos son suaves pero a la vez son más dispersos los datos que se van agregando no aportando de forma clara a la regresión lineal.

Al igual que en la aproximación rectangular, los resultados que obtenidos en cuanto a las rectas no son satisfactorios, ya que tenemos una multiplicidad de rectas pero ninguna forma de discriminar adecuadamente cual de ellas y en que región representan de manera correcta el comportamiento lineal que deseamos encontrar.

Sin importar el método que utilicemos hasta este momento, el principal problema detectado es la forma de discriminar la recta adecuada. Deseamos modelar un comportamiento lineal y para ello necesitamos encontrar solo una recta que modele de forma adecuada la región donde este comportamiento ocurre a una mayor cantidad de datos posible. Para ello el principal discriminante que tenemos es el coeficiente de correlación de Pearson (más información en el apéndice C), el cual da una medida

de la relación lineal entre las dos variables, considerando la totalidad de los datos; este último factor es preponderante para que no confiemos del todo en este indicador, ya que al encontrar puntos muy alejados del comportamiento lineal el factor de correlación cambia de forma drástica; en otras palabras es sensible a la cantidad de puntos y la ubicación de los mismos. Por otra parte cuando aumentamos el número de datos o en otras palabras aumentamos el radio, el coeficiente de correlación puede aumentar o disminuir en torno a un valor de manera despreciable, pero las diferencias de las pendientes son considerables por poco que varíe el coeficiente de correlación, como se muestra en la tabla 6.1, estos valores, nos hacen dudar de la capacidad de utilizar este coeficiente como un indicador valido para interpretar la zona de comportamiento lineal.

Cuadro 6.1: Datos de salida desde la regresión lineal (linregress), usando método de secciones rectangulares para los datos de Apex-CBI3 para el año 2012. Podemos ver que para pequeñas variaciones del coeficiente de correlación la pendiente y el termino libre varían de manera considerable.

PWV	pendiente	término	coeficiente	error de la	suma	número	Δ datos
		libre	de correlación	estimación	RSS	datos	
pwv < 1.0	0.841	0.100	0.649	0.007	125.772	7715	0
pwv < 1.5	0.936	0.071	0.797	0.004	273.905	10754	3039
pwv < 2.0	0.946	0.078	0.835	0.003	468.09	12783	2029
pwv < 2.5	0.921	0.102	0.849	0.003	667.766	13995	1212
pwv < 3.0	0.885	0.133	0.856	0.002	882.181	14831	836
pwv < 3.5	0.858	0.159	0.857	0.002	1113.74	15409	578
pwv < 4.0	0.825	0.189	0.856	0.002	1335.90	15813	404
pwv < 4.5	0.792	0.222	0.846	0.002	1640.91	16129	316
pwv < 5.0	0.761	0.253	0.839	0.002	1924.65	16383	254
pwv < 5.5	0.732	0.283	0.828	0.002	2241.70	16572	189
pwv < 6.0	0.708	0.310	0.818	0.002	2549.90	16721	149
pwv < 6.5	0.690	0.330	0.809	0.002	2856.40	16833	112
pwv < 7.0	0.657	0.368	0.794	0.002	3221.11	16955	122
pwv < 7.5	0.623	0.407	0.784	0.002	3602.34	17104	149
pwv< 8.0	0.594	0.441	0.771	0.002	4005.14	17223	119
pwv <8.5	0.594	0.441	0.771	0.002	4005.14	17223	0

En vista de todos estos inconvenientes se decide abandonar los métodos antes señalados y se cambia la metodología para poder encontrar la región de comportamiento lineal de los datos.

6.4. Regresión Lineal utilizando cortes verticales en PWV_{apex}

El criterio que utilizaremos en esta oportunidad se basa en lo siguiente:

Realizar cortes verticales en PWV_{apex} . Ya que el instrumento que consideramos como el referencia de calibración y sobre el cual consideramos el match temporal es el radiómetro de APEX. Es el término independiente sobre el cual estimaremos las relaciones.

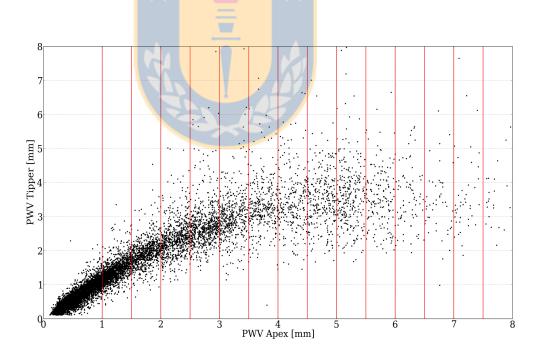


Figura 6.10: Representación de segmentar PWV_{APEX} en secciones verticales. En este caso a medida que vamos tomando secciones más grandes los datos nuevos no presentan cortes gruesos o dispersiones significativas que pusieran nuevamente el método en duda.

- Es necesario encontrar los errores asociados a nuestros parámetros de ajuste, para esto se utiliza la función curve_fit en desmedro de lineregress. Comparativamente hablando curve_fit entrega prácticamente los mismos valores de las constantes de ajuste que lineregress más los errores asociados a estas constantes.
- Dentro de cada sección se hace la regresión lineal y se comparan las respectivas rectas, para identificar la que representa de mejor manera el comportamiento lineal.

Siguiendo el procedimiento descrito nos damos cuenta de nuevas complicaciones:

- factor-r: no es el mejor indicador que permite discriminar de manera adecuada la mejor correlación. Es sensible a los datos, por lo que datos fuera del comportamiento lineal por poco que estos sean, modifican de manera sustancial el valor de este parámetro.
- Se intenta asociar el valor de la pendiente a la sección lineal de los datos. Se postulo que la pendiente más alta sería la que representaría de mejor manera la zona lineal. Este postulado no se comprueba de forma adecuada, ya que se encontraron rectas con pendientes similares y distinto número de datos en las regiones que modelaban, pero ninguna forma practica de poder discriminar cual era la recta adecuada.
- Vemos que cuando dejamos completa libertad a la función de ajuste, esta función modifica tanto la pendiente como el corte en la ordenada para encontrar la mejor recta que describe un comportamiento lineal dentro de la región donde esta trabajando. Estos dos grados de libertad son tan variables que resulta complicado estimar cual es la recta correcta. Pero una cosa que resulta más inquietante es la existencia del corte en la ordenada, este valor no representa una condición física real, ya que cuando hay una cantidad nula de PWV medida en el sitio de APEX necesariamente debemos encontrar la misma cantidad estimada por el radiómetro Tipper ya sea el instrumento localizado en el Llano o en el Cerro Chajnantor.

Para poder corregir estas dificultades planteamos las siguientes ideas:

 Forzar la regresión lineal a tener solo un grado de libertad. Utilizaremos la función de ajuste

$$PWV_{tipper} = m \cdot (PWV_{apex}) \tag{6.3}$$

donde el término libre se ha elegido como cero, para que la relación lineal parta efectivamente desde el origen del sistema coordenado y con esta restricción permitiremos que sea solo la pendiente la que tenga la capacidad de variar libremente para producir el mejor ajuste. Esta forma de entender el problema representa de forma adecuada las condiciones reales que se producen entre los diferentes sitios.

 Se ve que las dos primeras regiones (que son las más acotadas) son las que concentran de manera preponderante la mayor cantidad de datos en comportamiento lineal. A partir de esto encontraremos el promedio de las pendientes de la regresión lineal para las dos primeras regiones

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2}{2} \tag{6.4}$$

este promedio será el indicador para poder estimar la zona de comportamiento lineal.

• Una vez conocemos este promedio, se utiliza para poder estimar que recta modela el comportamiento de la sección lineal. Para esto se realiza el siguiente análisis, se considera la pendiente promedio como un parámetro, a partir de este valor se calcula la diferencia porcentual entre la pendiente de la recta dentro de la región en estudio y el valor de la pendiente promedio.

$$diferencia\ porcentual = \frac{|m - \bar{m}|}{\bar{m}} \cdot 100\%$$
 (6.5)

Se establece una tolerancia para el valor de la diferencia porcentual dentro de la

cual consideramos que nos encontramos dentro de la región de comportamiento lineal.

- Si se considera una tolerancia de un 1% somos demasiado estrictos en cuanto a nuestras regiones y no encontraremos cambios entre la recta de una región y la pendiente promedio; o por otra parte encontraremos que todas las pendientes tienen diferencias porcentuales mayores a este valor, impidiendo una correcta discriminación.
- Si se considera una tolerancia de un 5 % abrimos un gran rango de posibilidades pero se tiene el problema de que varias rectas están separadas con la misma tolerancia desde el valor promedio de las pendientes. Por lo que caemos nuevamente en el problema de distinguir cual de las rectas es la correcta.
- Nos damos cuenta que queremos una buena estimación entre el número de datos y la forma de los mismos en la gráfica, en otras palabras que se encuentren en un comportamiento lineal. De forma empírica vemos que todas aquellas rectas con diferencia porcentual mayor a un 5% ya dejan de representar la zona de linealidad abarcando puntos que presentan dispersión. Por lo tanto la diferencia porcentual máxima que podemos tolerar esta bajo este valor.
- De forma empírica se logró testear que la tolerancia que es posible aceptar es un 3 % en donde aun podemos ver el comportamiento lineal, teniendo un gran número de los datos totales dentro de este margen y podemos discriminar de forma clara la recta que modela esta región.

Entonces, debido a la forma de los datos se elige de manera empírica, una tolerancia en relación a la pendiente promedio de un 3 %. Por lo tanto mientras se aumente la cantidad de puntos a considerar por medio del crecimiento de las regiones se puede como las pendientes de las rectas se alejan o acercan de este valor. La recta de regresión lineal cuya diferencia porcentual (entre la pendiente y el valor promedio) se acerque sin superar el valor de 3 % será la que consideraremos como la recta adecuada que modela el comportamiento lineal. Finalmente las restricciones que fueron consideradas validas para poder realizar las regresiones lineales y encontrar la recta que represente de mejor manera la sección lineal de los datos son:

- Se construyen las gráficas $PWV_{apex} PWVtipper$
- \blacksquare Cortes rectos en el PWV_{apex}
- Se utiliza la función de ajuste curve_fit ya que da los coeficientes de ajuste y los errores asociados a los mismos.
- Se fuerza el ajuste lineal a que posea solo un grado de libertad. Siendo la pendiente la única que pueda variar libremente y se condiciona al modelo a que pase por el punto (0,0). Esto con el fin de representar el comportamiento físico del sitio.
- Se escogerá la recta que representa el comportamiento lineal como aquella cuya pendiente presente una diferencia porcentual que no supere el 3 % con respecto al valor promedio de las pendientes que modelan las dos primeras regiones.
- La zona de comportamiento lineal puede variar dependiendo de la concentración de los datos, el sitio en estudio, el año, la altura, etc. Por lo mismo no es único para todas las situaciones y tiene que determinarse de forma independiente.

Bajo estas restricciones se realizan las regresiones lineales separados por año para todos los sitios a los cuales tuvimos acceso a los datos.

Con este procedimiento encontramos las relaciones entre todos los instrumentos. Siguiendo el camino de los ejemplos expresados con anterioridad mostramos:

■ Para el Llano de Chajnantor (APEX-CBI3 2012)

Encontramos la siguiente expresión lineal, que relaciona la cantidad de PWV medida en APEX con la cantidad medida en CBI3:

$$PWV_{CBI3} = (1,051 \pm 0,002) \cdot PWV_{APEX} \tag{6.6}$$

La forma de los datos y la relación que modela el comportamiento lineal se muestra en la figura 6.11

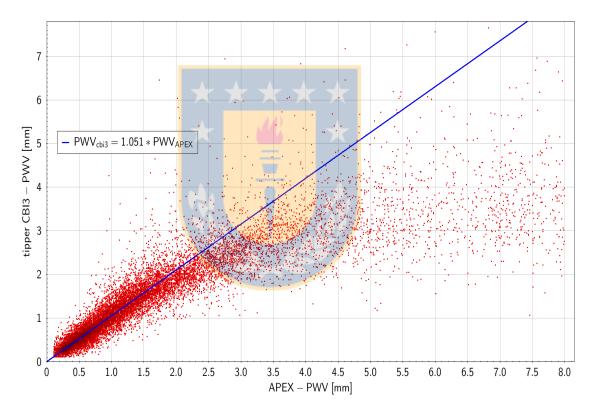


Figura 6.11: Se muestra la regresión lineal entre PWV Apex-cbi3 2012. Los puntos rojos son las muestras emparejadas temporalmente entre ambos sitios y la línea azul muestra la regresión lineal encontrada para estos datos. Se puede ver que la región comprendida hasta un $PWV_{apex} < 2.0mm$ corresponde efectivamente a la zona lineal de los datos, donde la recta azul se localiza al medio de la dicha distribución; para luego dar lugar a la zona de no linealidad. En este caso representativo del Llano de chajnantor vemos que la relación entre ambos sitios responde a una relación $1 \sim 1$.

■ Para la Cima del Cerro Chajnantor (APEX-CC 2010)

En este caso se tomó una consideración extra a las condiciones que va impusimos al Llano propiamente tal. Si nos fijamos en la forma que tiene la distribución de los datos, podemos darnos cuenta que de forma natural ocurre un fenómeno de estancamiento por decirlo de alguna manera, en el cual independientemente que los valores de $PWV_{apex} < 1$ [mm], los valores de $PWV_{tipper-cerro}$ [mm] forman un plateau por debajo de nuestra gráfica. Entendiendo que aunque el PWV_{apex} aumente el $PWV_{tipper-cerro}$ no aumenta de manera considerable. Esta zona que podría considerarse menor en extensión, tiene una fuerte influencia en la manera de ejecutar la regresión lineal ya que concentra parte importante de los datos, por que marca una tendencia de la distribución y por la forma que posee genera ajustes poco realistas a nuestro problema. Revisando todos los gráficos de correlación para el Cerro Chajnantor, nos damos cuenta que la zona donde está este sesgo inferior en los datos está acotada entre 0 [mm] y 0.5 [mm] de PWV_{apex} por lo que el procedimiento para poder estimar de manera adecuada la zona de comportamiento lineal y la recta que define este comportamiento se realizaran restando del calculo la zona comprendida entre 0 [mm] y 0.5 [mm] de PWV_{apex}. Garantizando de esta manera un comportamiento lineal estable, sin una tendencia producto de la distribución de los datos y acorde a la física entre ambos sitios.

Encontramos la siguiente expresión lineal, que relaciona la cantidad de PWV medida en APEX con la cantidad medida en la cima del Cerro Chajnantor:

$$PWV_{CC} = (0.686 \pm 0.002) \cdot PWV_{APEX} \tag{6.7}$$

La forma de los datos y la relación que modela el comportamiento lineal se muestra en la figura 6.12

Es posible entonces interpretar que la diferencia entre lo que mide el radiómetro Tipper del CC corresponde a un 68 % de lo que mide el radiómetro de APEX. En general los resultados obtenidos de las regresiones lineales muestran una pendiente de 0.67, lo que indica una diferencia porcentual de un 33 % entre la cantidad de PWV en el Cerro Chajnantor y APEX. Esta misma diferencia fue encontrada previamente

por Bustos et al. 2014. entre los mismos sitios. Otorgando consistencia a nuestro modelo.

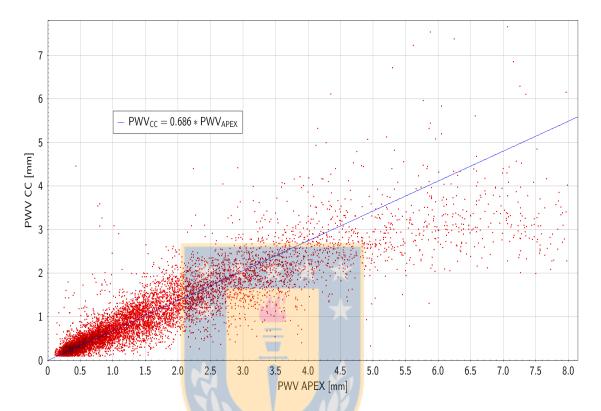


Figura 6.12: Se muestra la regresión lineal entre PWV Apex-CC para el año 2010. Los puntos rojos son las muestras emparejadas temporalmente entre ambos sitios y la línea azul muestra la regresión lineal encontrada para estos datos. Se puede ver que al contrario de la figura 6.11 la zona de no linealidad es menos densa y extendida. Por otro lado la zona de comportamiento lineal pareciera extenderse hacia todo el conjunto de datos. Este caso representativo del Cerro Chajnantor vemos que la relación entre ambos sitios responde a una relación aproximada de $PWV_{CC} \sim 0.7 \ PWV_{APEX}$

6.5. Comportamiento anual de PWV

Una vez que realizado el análisis de los sitios por año es posible darse cuenta de como es la variación de las pendientes entre dos sitios, lo que indica lo fuerte o débil de la relación y cual es el comportamiento global de la cantidad de PWV contenido en la atmósfera para distintas locaciones. Resumimos toda esta información en la tabla 6.2. Esta tabla da la información condensada sobre la correlación que existe entre las cantidades de PWV involucradas. Podemos ver que las pendientes de las regresiones para los instrumentos ubicados en el Llano de Chajnantor se encuentran alrededor del valor 1, lo que indica claramente que sobre toda la extensión del Llano la cantidad de PWV es constante y se distribuye de manera uniforme, por lo cual mediciones en algún punto determinado indicarían de manera inequívoca la cantidad de PWV que podríamos encontrar en otro sitio localizado sobre el Llano a una altura similar a los instrumentos que hemos considerado en este caso. Mientras que si nos fijamos en las pendientes de las relaciones de la regresión entre los instrumentos del Llano y la cima del Cerro Chajnantor, nos damos cuenta que estas pendientes están alrededor de $m \sim 0.66$ lo que indica que independiente de los valores que podemos medir en el Llano de Chajnantor siempre encontraremos una menor cantidad de PWV en la cima del Cerro Chajnantor y por medio de esta relación podemos estimar la cantidad de PWV que podríamos medir conociendo una de las dos cantidades involucradas.

Cuadro 6.2: Tabla resumen donde se muestra el resultado de las regresiones lineales anuales a todos los instrumentos emparejados (match) temporalmente. La primera columna indica los sitios que fueron emparejados y el año que se analizo. La columna 2 muestra el valor de la pendiente del ajuste lineal, mientras la columna 3 muestra el error asociado a la pendiente.

	pendiente (m)	error pendiente	
cbi1-cbi2			
2005	0.983	0.009	
2006	0.95	0.01	
2009	1.00	0.01	
a-cbi1			
2006	1.127	0.003	
2007	1.134	0.002	
2008	1.188	0.003	
2009	1.081	0.002	
2010	1.087	0.002	
a-cbi3			
2011	_0.943	0.003	
2012	1.051	0.002	
2013	1.098	0.002	
2014	1.005	0.001	
cbi1-cc			
2006	0.615	0.008	
2009	0.656	0.007	
2010	0.664	0.008	
a-cc			
2006	0.660	0.002	
2009	0.692	0.002	
2010	0.686	0.002	
2011	0.630	0.002	
2012	0.680	0.003	

Interesante es darse cuenta que las pendientes de cada relación se mueven alrededor de una valor común, pero varian conforme a los años y la altura entre los sitios involucrados. Como se puede ver en la figura 6.13

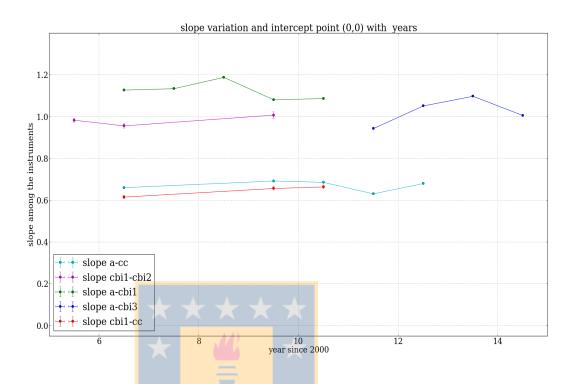


Figura 6.13: Se presenta en forma gráfica los resultados de la tabla 6.2. El eje x corresponde a los años medidos desde el año 2000, mientras el eje y corresponde al valor de las pendientes extraídas desde la regresión lineal. En esta figura se muestra de manera resumida una comparación entre todos los instrumentos, sus ubicaciones y las pendientes que correlacionan 2 instrumentos. Las líneas y círculos: verdes, azules y magenta, corresponden al comportamiento entre instrumentos localizados en el Llano de Chajnantor. Por otra parte, las líneas y círculos: cyan y rojos corresponden al comportamiento entre instrumentos en Llano y el Cerro Chajnantor. Las distintas ubicaciones del comportamiento de las pendientes por sitio en estudio corresponden a las diferencias considerables de altitud entre los sitios.

Un comportamiento que se desprende de la figura 6.13 y que entrega seguridad en la forma de hacer la comparaciónes es la línea magenta ya que representa la razón de los radiómetros Tipper y oscila prácticamente alrededor del valor 1, lo que indica que ambos instrumentos estiman de manera idéntica la opacidad y por medio de la transformación aplicada se traduce en una misma cantidad de PWV. Esta consistencia entre los radiómetros Tipper es fundamental para poder estabilidad al modelo propuesto y hacer las respectivas comparaciones con el radiómetro APEX sin perder generalidad.

En la imagen 6.13 se muestran varios aspectos interesantes que se desprenden del análisis. Es posible ver dos secciones de datos que se encuentran distribuidos dentro de la imagen. Las pendientes comprendidas entre 0.9 y 1.2 corresponden a los instrumentos ubicados en el Llano de y como se hizo mención anteriormente sus valores oscilan en torno a pendiente 1 lo que es señal de un comportamiento uniforme para los instrumentos localizados sobre el Llano. Los cambios más significativos entre las pendientes para los instrumentos en el Llano no superan el 20%. La cantidad de PWV puede ser considerada constante, a pesar de ver saltos o caídas dentro de una pendiente en particular, estas altas pendientes pueden asociarse a eventos locales o eventos climáticos fuertes en un determinado año. La otra sección clara se encuentra comprendida entre las pendientes 0.6 y 0.7 la cual corresponde a una zona estrecha de la gráfica en donde no se aprecian grandes variaciones entre los instrumentos y sitios comparados (Llano y Cerro). La diferencia promedio entre los valores de PWV_{cerro} en comparación al valor de PWV_{APEX} de un 33%, lo cual es un valor cercano (36 %) al encontrado en Bustos et al. 2014 para las mismas ubicaciones. La diferencia considerable entre PWV y la posición de las pendientes en la gráfica se debe a la diferencia de altura considerable entre los sitios que se están comparando ~ 500 m.

Lo importante de poder visualizar las razones de PWV en la forma presentada en la figura 6.13, radica en que podemos comparar de manera directa con las mediciones del radiómetro de APEX y obtener una idea de la cantidad de PWV para un período de tiempo en particular. Además de visualizar de manera clara el efecto de altitud en la cantidad de PWV por medio de las diferentes ubicaciones de las pendientes comparadas entre instrumentos ya que cada par de instrumentos posee una diferencia de altura significativa que queda en evidencia dentro de esta imagen.

6.6. Comportamiento estacional del PWV

Tenemos un estudio anual por ubicación entre los instrumentos y conforme a la variación en las pendientes año a año surge una pregunta de forma natural ¿El cambio en las pendientes solo existirá de manera anual o habrán cambios producto de las estaciones al largo de un mismo año ?

Para poder encontrar una respuesta a este cuestionamiento realizamos el siguiente procedimiento:

- Se divide temporalmente nuestros datos en 4 partes, cada una corresponde a una estación del año en particular. La división en cada estación se realiza considerando los eventos astronómicos que nos indican los inicios y términos de cada uno de estos periodos; de esta manera tenemos:
 - Verano: el comienzo de está estación esta marcado por el solsticio de verano el cual ocurre en el hemisferio sur alrededor del 21 de Diciembre, mientras que su término está establecido por el equinoccio de otoño el cual ocurre alrededor del 21 de Marzo en el hemisferio sur. El Verano es una época a la cual es común asignarle altas temperaturas, pero en la zona de los Andes centrales, es cuando se producen la mayor cantidad de lluvias y mal tiempo. Considerando este factor, es interesante ver si este evento climático se refleja de manera clara como un cambio en la pendiente dentro de nuestros datos.
 - Otoño: esta estación comienza astronómicamente, cuando ocurre el equinoccio de otoño el 21 de Marzo en el hemisferio sur y termina con el solsticio de invierno evento que ocurre el 21 de Junio.
 - Invierno: comienza con el solsticio de invierno el 21 de Junio en el hemisferio sur y finaliza con el equinoccio de Primavera alrededor del 21 de Septiembre en el hemisferio sur.
 - Primavera: esta estación comienza con el equinoccio de primavera el cual ocurre entre el 21 y el 23 de Septiembre en el hemisferio sur y termina con el solsticio de verano el 21 de Diciembre.
- Se utiliza el mismo método que empleamos para el análisis anual.
- La función de ajuste curve_fit es un método robusto (o insensible) para los valores atípicos en comparación a linear_regress, pero es sensible al número de datos. Al momento de dividir los datos emparejados temporalmente y aplicarle las restricciones necesarias, hay estaciones cuya densidad de datos deja de ser representativa. Por lo tanto cuando se tienen menos de 100 datos en un gráfico

o región, la función curve_fit no es un buen indicador de la relación entre ambas cantidades.

Una forma de visualizar el comportamiento lineal y poder ver las diferencias entre las estaciones para un mismo año es construir un gráfico como el de la figura 6.14 en donde de forma simultánea podemos ver el comportamiento de los datos y la recta que modela de mejor manera la región lineal de los datos. Podemos ver como los datos se distribuyen en las diferentes estaciones, teniendo comportamiento distintos una estación de la otra.



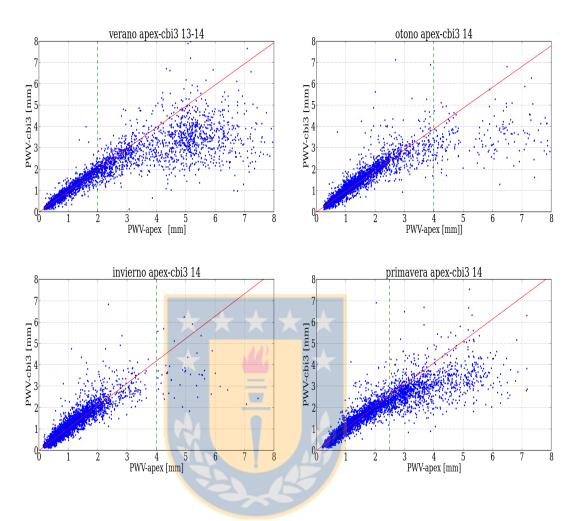
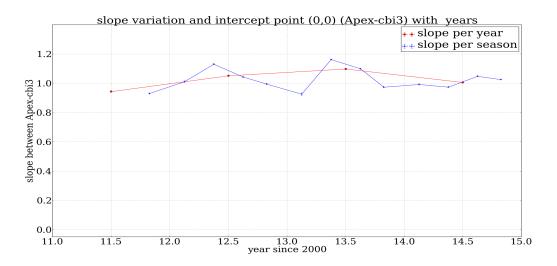


Figura 6.14: Se muestra un ejemplo de las regresiones lineales para APEX-CBI3 del año 2014 en cada estación. El eje X corresponde a la cantidad de PWV en el radiómetro de referencia (APEX), mientras el eje Y corresponde a la cantidad de PWV medida por un radiómetro Tipper, los puntos azules corresponden a los datos emparejados temporalmente, mientras la línea roja representa la recta de ajuste lineal y finalmente la línea punteada verde corresponde a la zona donde se consideró el comportamiento lineal de los datos. Vemos como cada una de las estaciones presenta sus particularidades como: distribución, cantidad, región lineal, etc.

Es posible darse cuenta que en la figura 6.14 cada una de las estaciones tiene un comportamiento propio y diferente a las demás. Podemos ver que el verano tiene una distribución amplia de los datos por sobre toda la gráfica en comparación a las otras estaciones presentando por esta razón la zona no lineal más amplia; esto da cuenta del efecto pronosticado como consecuencia del Invierno Boliviano, donde

la cantidad de PWV aumenta significativamente llegando a niveles demasiado altos para los instrumentos impidiendo las observaciones astronómicas (en el caso de APEX). Este aumento significativo del valor de PWV llega hasta los niveles de saturación de los instrumentos aumentando el comportamiento no lineal de los datos. En vista de la forma que tienen los datos y un sesgo por debajo de características dominantes para el ajuste, esta estación fue la más compleja de poder ajustar. El otoño y la primavera, son dos estaciones en las cuales los datos presentan un marcado comportamiento lineal y sus colas (zonas de no linealidad) pueden o no estar extendidas. El invierno es una estación caracterizada por una zona acotada donde todos sus puntos se encuentran dentro de una región densamente poblada, tiende a no presentar zonas de no linealidad o en el caso que estas existan son escasos datos los que la componen y su distribución no se aleja de la recta que representa la zona lineal.

Una vez que aplicado el método y graficados los valores de las pendientes para cada estación y son ubicadas junto al valor de la pendiente anual, como es posible ver en la figura 6.15, es posible notar cosas bastante interesantes.



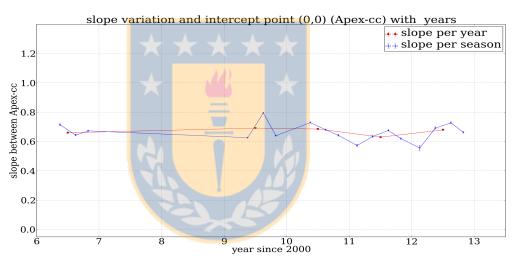


Figura 6.15: La figura muestra el cambio en la pendiente por año y por estación mientras avanza el tiempo. El panel superior muestra como varían las pendientes para el Llano de Chajnantor (APEX-CBI3), mientras el panel inferior muestra las variaciones de pendientes para el Cerro Chajnantor (APEX-CC). Los círculos rojos corresponden a las pendientes anuales y en este gráfico están localizados de forma representativa al centro de sus respectivos años (el circulo correspondiente al año 2012 está localizado en el punto 12.5). Los puntos azules son las pendientes por estación (verano, otoño, invierno, primavera) y están distribuidos en ese mismo orden dentro del espacio que cubre un año (para el caso del 2012, las estaciones están entre los puntos 12 y 13). Vemos que la distribución de los puntos azules es alrededor de los círculos rojos para el año en estudio, demostrando la consistencia entre las pendientes por estación y la pendiente anual, por cada año.

De la figura 6.15 podemos ver lo siguiente:

- Las pendientes de cada una de las distintas estaciones son diferentes, siendo más o menos pronunciadas respecto al valor anual. Lo que indica que hay estaciones donde el valor de PWV aumenta o disminuye, haciendo variar la relación entre los instrumentos.
- Se puede ver de forma clara desde la figura 6.15 que los valores de pendientes estacionales se distribuyen alrededor del valor central. Por lo tanto se puede decir que el valor anual que se encontró en una primera instancia viene dado por una especie de promedio de los valores estacionales.
- No fue observado que las pendientes por estación presenten una correlación entre diferentes sitios, por lo cual se puede inferir que cada sitio en forma estacional responde de manera diferente a un periodo del año.
- Dependiendo de los sitios en estudio y el año que estamos considerando, veremos que hay estaciones del año donde la cantidad de PWV es más o menos alta en relación al comportamiento anual.

Siguiendo el análisis para todos los sitios, se presenta la figura 6.16, en esta figura resumimos el comportamiento para todos los sitios e instrumentos en todos los años del presente trabajo donde pudimos realizar comparaciones y match temporales. Se puede ver en la figura 6.16 de forma condensada el comportamiento anual de un determinado instrumento comparado con APEX (representado por los círculos) mientras que el comportamiento estacional está representado por los puntos. Los colores dentro del gráfico hacen mención a una correlación instrumental en particular: el conjunto verde corresponde a la correlación entre APEX y CBI1, el conjunto azul corresponde a la correlación entre APEX y CBI3, el conjunto magenta corresponde a la correlación entre CBI2 y CBI1, el conjunto cyan corresponde a la correlación entre APEX y CC, finalmente el conjunto rojo corresponde a la correlación entre CBI1 y CC.

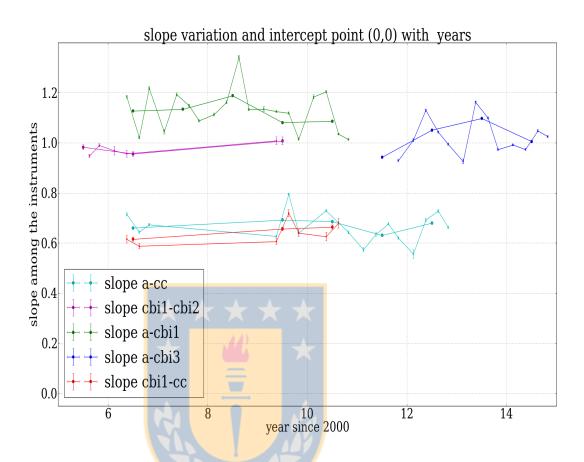


Figura 6.16: En esta figura se muestra de forma condensada una comparación entre las correlaciones de los instrumentos, los sitios donde se encuentran y las pendientes que dan cuenta de esas correlaciones. El eje x corresponde a los años medidos desde el año 2000, mientras el eje y corresponde al valor de las pendientes. Las líneas, c írculos y puntos: verdes, azules y magenta, corresponden al comportamiento entre instrumentos localizados en el Llano de Chajnantor. Por otra parte, las líneas, círculos y puntos: cyan y rojos corresponden al comportamiento entre instrumentos en Llano y el Cerro Chajnantor. Los círculos corresponden al valor de la pendiente que se desprende del comportamiento anual de una correlación, mientras los puntos corresponden a los valores de las pendientes por estación. La clara separación entre las pendientes localizadas en la parte superior del gráfico y las pendientes localizadas en la parte central, se debe a la diferencia de altura que existe entre los sitios donde están localizados los instrumentos, para los sitios en el llano la diferencia de altura no supera los 60 metros, mientras que para los instrumentos entre el Llano y el Cerro Chajnantor la diferencia de altura es de ~ 600 m

Vemos claramente de esta imagen que tenemos dos agrupaciones claramente definidas; las correlaciones que dan cuenta del comportamiento del Llano de Chajnantor, ubicadas en la parte superior cuyas pendientes están entre 0.95 < m < 1.3, mientras que las correlaciones que dan a entender el comportamiento del Cerro Chajnantor en relación al Llano, se encuentran acotadas entre 0.6 < m < 0.7. Las diferencias de pendientes entre los instrumentos y los sitios (Llano y Cerro Chajnantor) están dadas principalmente por las diferencias de alturas existentes entre los sitios. Los radiómetros Tipper ubicados en CBI1-CBI2 se encontraban a la misma altura (~ 5050 msnm.) y por consiguiente miden el PWV de manera idéntica teniendo entonces pendiente ~ 1 . Mientras que las correlaciones entre APEX-CBI1 tienen una diferencia de altura entre ambos sitios de $\sim 55m$ (considerando que APEX se encuentra a 5105 msnm y el radiómetro Tipper a 5050 msnm) por lo que sus pendientes son mayores, indicando que la cantidad de PWV que se mide en el sitio CBI es mayor que la cantidad medida en el sitio de APEX. Las correlaciones entre APEX-CBI3 se encuentran alrededor del valor de pendiente ~ 1 y ambos instrumentos se encuentran a la misma altura ($\sim 5105 \text{ msnm}$); aqui las diferencias entre las mediciones podría corresponder a la distinta forma de estimar los PWV. Por otra parte completamente distinta las correlaciones hechas entre instrumentos localizados en el Llano de Chajnantor y el Cerro Chajnantor se encuentran dominadas por una diferencia de altura de aproximadamente ~ 600 m entre los sitios, lo que conlleva a decir y desprender desde la gráfica que como las pendientes son pequeñas en relación a los valores del llano, siempre mediremos menos cantidad de PWV en la Cima del Cerro Chajnantor comparado con las estimaciones hechas en la superficie del Llano. Se comprueba de forma general que las pendientes estacionales rodean a la pendiente anual para todos los instrumentos y que el valor de pendiente anual corresponde aproximadamente al promedio de las pendientes estacionales, entregando solvencia al modelo que estamos presentando.

Los radiómetros Tipper siguen presentado una relación estacional 1:1 lo que sigue permitiendo establecer las comparaciones necesarias con los demás instrumentos de manera anual y estacional. Las pendientes estacionales si bien varían se mantienen alrededor de los valores anuales, las variaciones estacionales indican que existen estaciones secas y húmedas en relación a la pendiente anual, lo que es posible asociar a las condiciones climáticas propias de cada estación.

6.7. PWV estimado desde TAO (Tokyo Astronomy Observatory)

Una vez hemos resuelto de forma integra el comportamiento de PWV sobre el llano de Chajnantor y el Cerro Chajnantor, tanto de forma anual como de forma estacional. Obtuvimos acceso a datos de PWV provenientes del observatorio TAO, ubicado en la cima del Cerro Chajanantor a una altitud de 5640 msnm. Este observatorio estima de manera diferente la cantidad de PWV sobre el sitio de observación, para esta estimación utiliza dos métodos diferentes:

- Estima PWV utilizando datos de imágenes de banda-angosta, con un filtro N1875. Cada set de datos consiste en ~ 9 marcos con tiempos de exposición entre 120-180 segundos de exposición cada uno.
- El PWV es obtenido desde datos de imagen usando filtro N191 utilizando la eficiencia del sistema (syseff).

Para ambos casos la forma de estimar el PWV es:

- Obtienen la eficiencia del sistema (como eficiencia incluyendo la atmósfera, telescopio e instrumentos) usando estrellas detectadas en el último marco de cada set de datos.
- Encuentran la transmitancia atmosférica media usando un sistema de eficiencias de imágenes de las bandas H-Ks tomadas juntas con el set de datos.
- El PWV es extraído usando la relación transmitancia-PWV calculada por ATRAN.
- $\bullet\,$ El PWV es corregido por masa de aire para obtener $PWV_{cenital}$

Las estimaciones de PWV que realiza el observatorio TAO, las realiza junto a sus observaciones las cuales están hechas en ciertas épocas del año que cumplen las mejores condiciones para observar sus objetos astronómicos. Podemos ver en la figura 6.19 como los datos de PWV provenientes de TAO (PWV_{TAO}) se distribuyen solo en ciertos lugares de la distribución anual de PWV del cerro chajantor (obtenido a partir del radiómetro Tipper). Indicado la forma parcelada de hacer las observaciones y estimaciones de PWV para este observatorio. Los datos de PWV provenientes de TAO se ubican es posiciones tan específicas dentro de la distribución de PWV del cerro Chajnantor, que indican claramente que las condiciones de observabilidad para este observatorio son especiales y requieren condiciones atmosféricas que solo se dan en ciertas circunstancia y horas dentro de un día.

Cuando vemos las distintas gráficas donde se superponen el comportamiento y distribución de PWV_{TAO} sobre el PWV_{cerro} nos damos cuenta de las condiciones temporales y estacionales a las cuales fueron tomados los datos. Vemos que las horas del día corresponden solo a atardeceres o amaneceres y estas mediciones parecieran tener una preferencia estacional ya que ubican en la misma zona de datos. Esta estacionalidad corresponde principalmente a la primavera y en un caso al otoño.

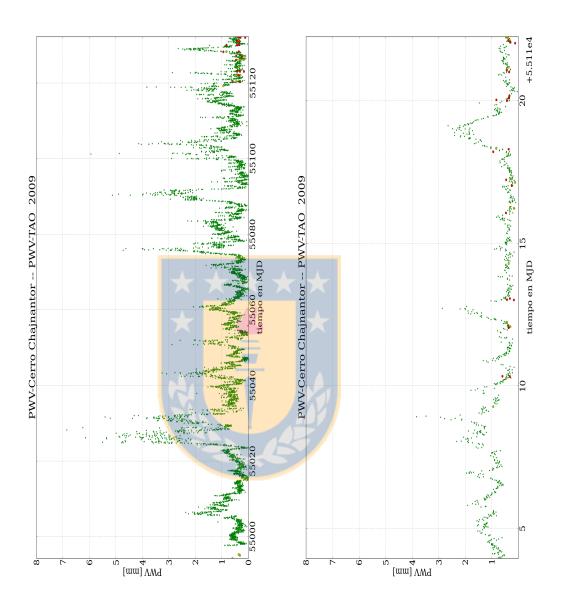


Figura 6.17: Distribución de PWV a lo largo del año en el cerro Chajnantor, los puntos verdes corresponden a la distribución de $PWV_{tipper-cerro}$ a lo largo del año, mientras que los puntos rojos corresponden a los puntos medidos por el observatorio TAO. Observamos que los datos de tao están solo en ciertas posiciones, lo que indica que las condiciones de observabilidad para este observatorio son específicas.

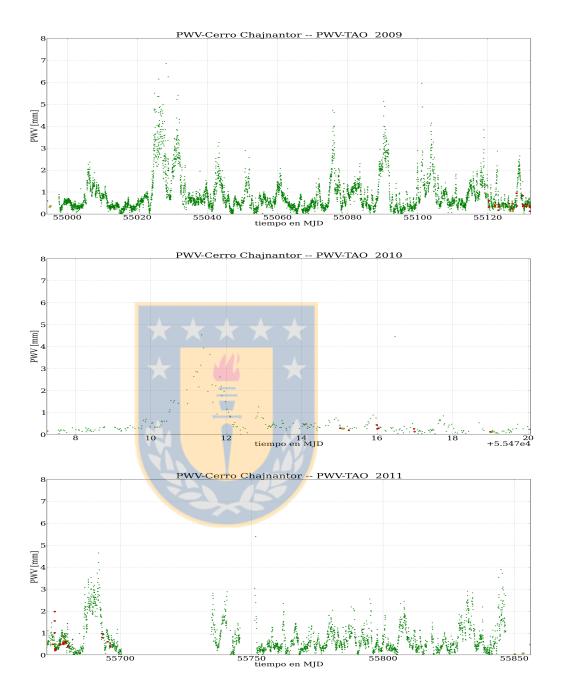


Figura 6.18: Distribución de PWV a lo largo del año en el cerro Chajnantor, los puntos verdes corresponden a la distribución de $PWV_{tipper-cerro}$ a lo largo del año, mientras que los puntos rojos/amarillos corresponden a los puntos medidos por el observatorio TAO. Observamos que los datos de tao están solo en ciertas posiciones, lo que indica que las condiciones de observabilidad para este observatorio son específicas.

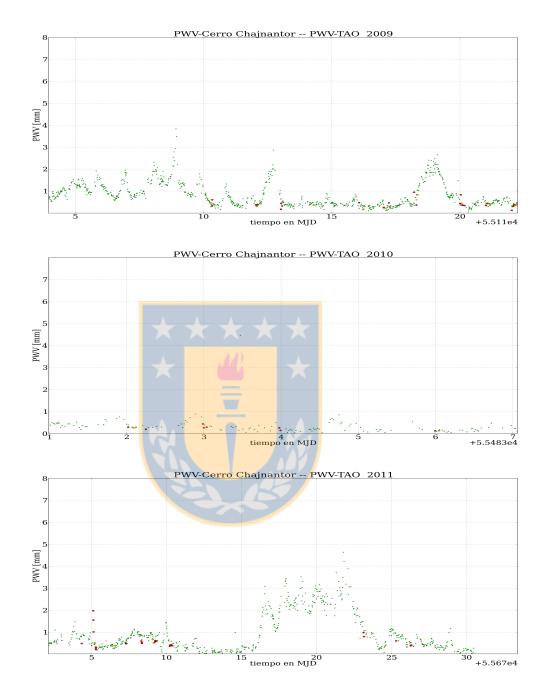


Figura 6.19: Se muestra en esta imagen solo la sección con mayor cantidad de datos de TAO superpuestos a los datos del radiómetro Tipper. Los puntos verdes corresponden al PWV_{CC} mientras que los puntos rojos corresponden a los datos de TAO.

Teniendo en cuenta que los datos de TAO están tomados de forma totalmente independientes a los datos que nosotros procesamos, pueden ser usados como un elemento de testeo de nuestro método, ya que está ajeno a cualquier intervención nuestra; si nuestro modelo es correcto y representa de alguna manera el comportamiento del PWV en la zona de Chajnantor los datos de TAO debieran seguir este modelo o acoplarse lo mejor posible a las predicciones propuestas, como el ajuste lineal que propusimos, como la razón entre el PWV_{APEX} y $PWV_{tipper-cerro}$, la recta de ajuste que propusimos debiera representar cualquier medición de PWV hecha en el Cerro Chajnantor. Por lo tanto el PWV medido por TAO debiera ajustarse a esa recta y caer dentro de la nube de puntos que vimos con anterioridad. Como vemos en la figura 6.20 los datos de TAO siguen el comportamiento esperado, caen dentro de la nube de PWV que se forma a partir de los instrumentos (radiómetro APEX y

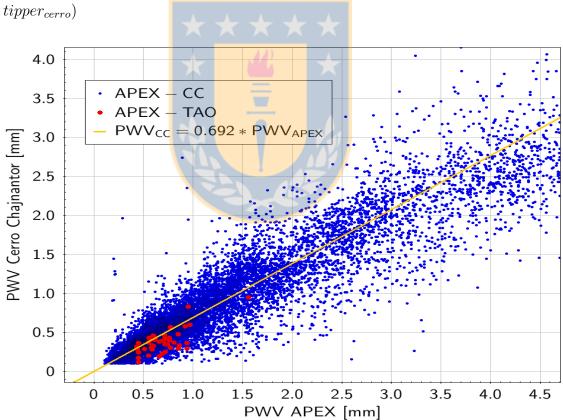


Figura 6.20: Ubicación de los puntos de PWV desde TAO sobre la gráfica $PWV_{APEX} - PWV_{CC}$ para el año 2009. Vemos como los datos independientes de TAO siguen el modelo propuesto ubicandose sobre la nube de datos APEX-CC y siguiendo el ajuste lineal, lo que indica que el modelo lineal encontrado es satisfactorio.

Para los datos que corresponden al año 2009, como se puede ver desde la figura 6.20, los datos están agrupados en la zona baja del gráfico, prácticamente todos bajo la recta que modela el ajuste y algunos de estos puntos sobre la recta que señala el comportamiento lineal. Algo similar se puede ver en la figura 6.21, que representa la ubicación de las mediciones de PWV en TAO para el año 2010, donde los datos de PWV_{TAO} se distribuyen por debajo de la recta de ajuste, dentro de la nube de puntos de PWV. En ambos casos el comportamiento de los datos de PWV_{TAO} al ubicarse bajo la recta de la regresión lineal, indica que el valor estimado de la cantidad de vapor de agua precipitable en el sitio de TAO es menor que el valor medido por el radiómetro de APEX.

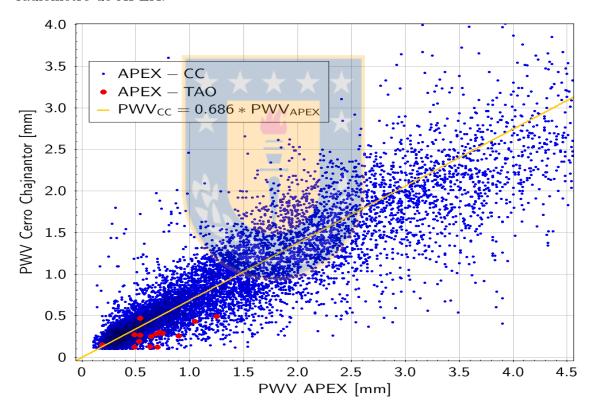


Figura 6.21: Ubicación de los puntos de PWV desde TAO sobre la gráfica $PWV_{APEX} - PWV_{CC}$ para el año 2010. Vemos como los datos independientes de TAO siguen el modelo propuesto ubicandose sobre la nube de datos APEX-CC y por debajo del ajuste lineal lo que indica que la cantidad de PWV en TAO para ese año en particular es considerablemente menor que la medición en APEX.

Por último la distribución de los datos de PWV_{TAO} del año 2011 se muestra en la figura 6.22. Los datos de PWV_{TAO} están distribuidos sobre la línea que representa el ajuste lineal de los datos. Hay 3 puntos que se escapan de la nube, siendo estos valores totalmente atípicos para las estimaciones de TAO, pudiendo ser mediciones mal hechas o tomadas en tiempos que no correspondían respecto a las condiciones que se necesitan para la observación de este observatorio, sobre esos puntos no tenemos mayor información.

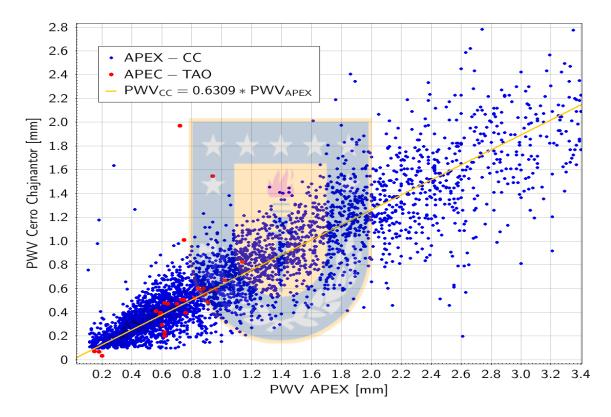


Figura 6.22: Ubicación de los puntos de PWV desde TAO sobre la gráfica $PWV_{APEX} - PWV_{CC}$ para el año 2011. Vemos como los datos independientes de TAO siguen el modelo propuesto ubicandose sobre la nube de datos APEX-CC, los datos de este año siguen de forma considerable el ajuste lineal predicho indicando que la relación encontrada es representativa del sitio y el año en estudio.

La pregunta que surge de manera natural es: ¿Cuánto menor es la cantidad de PWV que se estima en el observatorio TAO en comparación con el radiómetro de APEX?. Esta pregunta no tiene una respuesta en este trabajo, ya que para responderla deberíamos poder tener la capacidad de utilizar el método de regresión lienal y obtener por medio de este método la recta que modela el comportamiento entre

los datos de PWV estimados en TAO con los datos de PWV medidos en APEX. Este método nos está negado para estos datos, debido a la baja cantidad de datos (N° datos < 100) por lo cual el método se vuelve altamente sensible a valores extremos y cada dato que tengamos pesa lo suficiente para poder hacer tender la pendiente del ajuste a uno u otro valor.

Una vez hemos hecho este análisis, se puede interpretar nuevamente los datos de PWV_{TAO} pero en esta ocasión dentro de los periodos estacionales en los cuales fueron tomados los datos. Es así como se toman como base el comportamiento del PWV entre dos instrumentos (APEX-tipper_{cerro}) de manera temporal, esto es lo que se puede ver en la figuras 6.23,6.24,6.25,6.26, donde se han puesto la totalidad de los datos de TAO, separados por las estaciones donde fueron tomados, estas estaciones son preferentemente primavera y otoño; y podemos nuevamente comprobar que los datos de TAO estan ubicados dentro de la nube de puntos y siguen el comportamiento lineal estimado a partir de la regresión lineal de los radiómetros APEX/tipper_{cerro} lo que reafirma la consistencia de nuestro estudio.

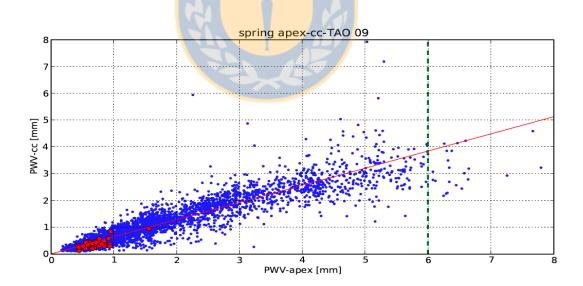


Figura 6.23: Ubicación de los datos de PWV_{TAO} sobre el match APEX-CC para la primavera del año 2009. Los datos de TAO se encuentran dentro de la nube de puntos y localizados en PWV bajos (PWV < 1) lo que da cuenta del bajo PWV que se estima por parte de este observatorio. Los datos de TAO siguen el comportamiento lineal estacional predicho.

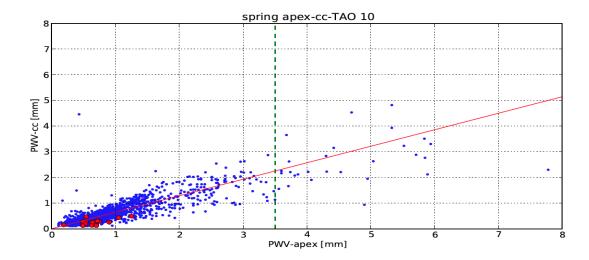


Figura 6.24: Ubicación de los datos de PWV_{TAO} sobre el match APEX-CC para la primavera del año 2010. Los datos de TAO se encuentran dentro de la nube de puntos y localizados en PWV bajos (PWV < 1) lo que da cuenta del bajo PWV que se estima por parte de este observatorio. Los datos de TAO siguen el comportamiento lineal estacional predicho.

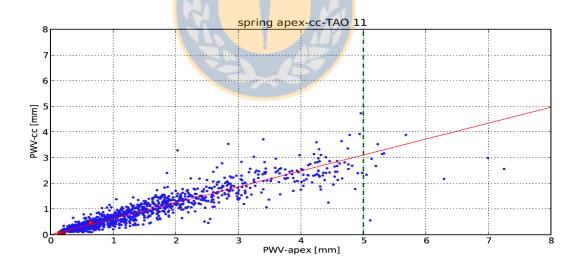


Figura 6.25: Ubicación de los datos de PWV_{TAO} sobre el match APEX-CC para la primavera del año 2010. Los datos de TAO se encuentran dentro de la nube de puntos y localizados en PWV bajos (PWV < 1) lo que da cuenta del bajo PWV que se estima por parte de este observatorio. Los datos de TAO siguen el comportamiento lineal estacional predicho.

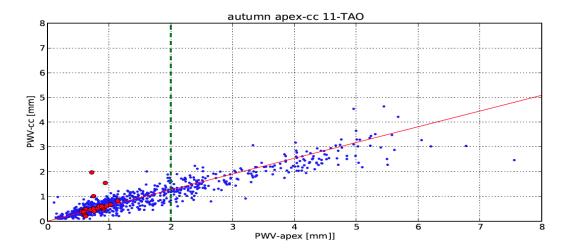


Figura 6.26: Ubicación de los datos de PWV_{TAO} sobre el match APEX-CC para el otoño del año 2011. Los datos de TAO se encuentran dentro de la nube de puntos y siguen el comportamiento lineal estacional predicho dentro de esta estación. Vemos que hay 3 puntos que se alejan de la distribución de puntos del match, dando cuenta de posibles errores de medición o condiciones adversas a la medición en ese instante.

6.8. PWV estimado en la cima del Cerro Toco

Otra de las ubicaciones en donde se midió de forma independiente la cantidad de PWV y se pudo tener acceso a los datos fue la cima del Cerro Toco a una altitud de ~ 5300 msnm.

Los datos provenientes desde el Cerro Toco estaban cifrados en formato **netcdf** y fueron tomados en la Cima del Cerro Toco, altiplano chileno en el desierto de Atacama, las mediciones se efectuaron entre 12/08/2009 y 22/10/2009. La toma de los datos meteorológicos fue producto de usar un algoritmo de recuperación óptima basada en la estimación de Milosevich et al. 2009, y ajustando mediciones de radiosondas como una conjetura inicial y las mediciones de PWV se realizaron por medio de mediciones radiométricas.

El algoritmo en el cual se basa la estimación de las condiciones atmosféricas sobre el sitio de ACT toma en cuenta un modelo similar al usado por AM en donde secciona la atmósfera en distintas capas y en cada una de estas ejecuta su algoritmo.

Para poder tener las estimaciones correspondientes a las propiedades intrínsecas de cada una de las capas, se utilizaron lanzamientos de radiosondas, las cuales fueron lanzadas cada aproximadamente 4 minutos, con lo que se consiguió una gran densidad de información para los días en estudio. La distribución de los datos de PWV dentro del tiempo de estudio, se muestra en la figura 6.27, donde podemos ver como es la variación en la cantidad de PWV en el periodo de tiempo que fueron realizadas las mediciones.

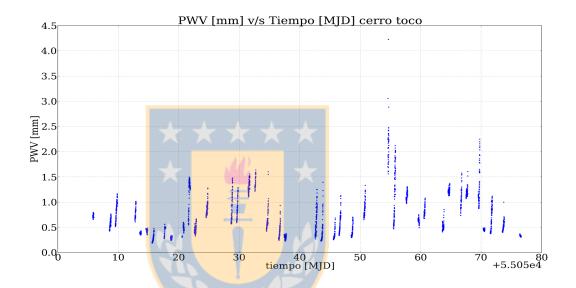


Figura 6.27: Distribución del PWV en la cima del Cerro Toco (altitud de 5300 msnm.) entre el 12/08/2009 y el 22/10/2009. Vemos estos perfiles verticales producto de las mediciones radiométricas en periodos cortos de tiempo.

Lo interesante de estos datos, es que fueron tomados de manera independiente, directa y con gran presición, sobre una ubicación en el área de Chajnantor, la cual se encuentra a una altura intermedia entre el Llano de Chajnantor y el Cerro Chajnantor por lo que su estudio es de fundamental importancia para poder comprender el comportamiento en altitud del PWV en la zona, aportando justamente con un dato clave al localizarse a una altura intermedia entre las dos ubicaciones mencionadas en este trabajo.

En vista que sabemos cuando fueron tomados los datos y el valor de PWV medido, estandarizamos el tiempo a MJD y la cantidad de PWV a mm y de esta forma podemos realizar match temporales y encontrar por los procedimientos descritos anteriormente la recta que modela el comportamiento lineal, extraer la pendiente de la recta y posicionarla dentro de la figura 6.16, lo que aportaría a la comprensión de la distribución de PWV en altitud dentro del sector.

Después de todo este proceso encontramos que la pendiente que mejor modela el comportamiento lineal de los datos es $m=0.896\pm0.002$. Vemos que esta pendiente es cercana a la unidad, lo que indica que el valor de PWV que se puede estimar desde la cima del Cerro Toco, a pesar de estar ~ 300 m más alto que el llano propiamente tal, no es muy diferente que el que podemos estimar desde el llano mismo.

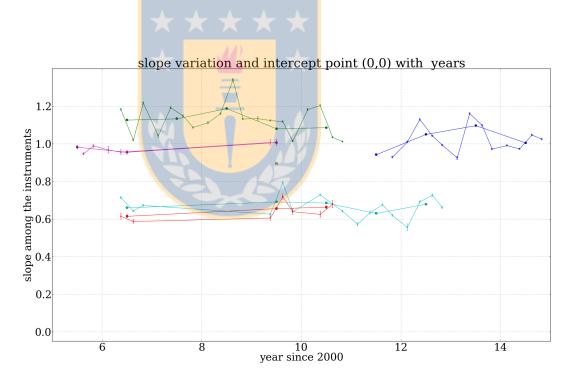


Figura 6.28: Gráfica resumen donde podemos ver como son las variaciones de pendiente mientras pasa el tiempo entre los distintos instrumentos y para diferentes sitios. Recordar que las líneas, círculos y puntos de color: magenta, verde y azul corresponden a instrumentos localizados en el Llano de Chajnantor mientras que las líneas, círculos y puntos de color: cyan y rojo corresponden a pendientes de instrumentos localizados en el Cerro Chajnantor. El punto amarillo corresponde a la pendiente encontrada para la ubicación del Cerro Toco.

En la figura siguiente 8.1 se muestra el resultado de incorporar la pendiente de PWV_{TAO} v/s PWV_{APEX} a la imagen 6.16. Obviamente solo agregamos un punto dentro de la gráfica, ya que en la escala temporal (eje x) la unidad de tiempo esta en años y los datos de TAO se encuentran dentro de algunos meses, por lo cual no es posible hacer un estudio más en detalle de este sitio, como sería un estudio estacional para el Cerro Toco .

Lo importante de poder contar con este punto dentro de la gráfica (figura 6.16) es que nos damos cuenta como la diferencia de altura influye en la cantidad estimada del PWV. Vemos además que las pendientes no siguen un comportamiento lineal mientras nos elevamos sobre el llano, más bien parecieran seguir un comportamiento exponencial decreciente.



Capítulo 7

Radiómetros UdeC

Dentro de la zona de Chajnantor, hay dos instrumentos de propiedad de la Universidad de Concepción, destinados a medir PWV. Estos dos radiómetros de vapor de agua, se encuentran, uno en la cima del Cerro Chajnantor y otro en el sitio de operaciones de APEX, los cuales llevan por nombre UdeC-1 y UdeC-2 respectivamente.

Estos radiómetros han servido para caracterizar el sitio de operaciones de ALMA y han sido pieza fundamental para caracterización atmosférica del mismo sitio; apoyando el proceso de site testing durante la etapa previa a la instalación de cualquier antena del entonces proyecto ALMA (hoy en funcionamiento). Estos equipos estuvieron completamente operativos entre los años 1998 al 2002, en este año el UdeC2 presenta una falla y queda inoperativo. Esta falla, el paso del tiempo y la instalación de más equipos y con mayor presición han hecho que estos equipos pasen a un segundo plano dentro de los instrumentos localizados en el área de Chajnantor.

Los radiómetros UdeC han sido desarrollados en Suecia y sirvieron para ejecutar el site testing de ALMA. Son propiedad de Universidad de Concepción y son material instrumental que puede seguir siendo utilizado para obtener datos científicos, así como están disponibles a las personas que quieran trabajar, ampliar y/o modernizar las capacidades de los mismos con el fin de poder tener actualizado este instrumento y contribuir de esta forma a hacer ciencia en uno de los sectores mas extremos del mundo y que cuenta con la mayor cantidad de instrumentos de ultima generación. En esta vía por ejemplo hay trabajos de estudiantes de ingeniería los cuales han

efectuado refacciones a algunos elementos internos de estos instrumentos con el fin de poder extender su vida útil. En esta categoría se encuentra el trabajo de memoria de título Refaccionamiento de Radiómetros de Vapor de Agua en Banda de 183 GHz, Hernán Felipe De la Puente Christen. En la memoria antes mencionada se abordaron los siguientes tópicos sobre el radiómetro:

- Rediseño e implementación total de sección Backend de los instrumentos.
- Reemplazo del sistema de motores que controlan el espejo principal.
- Desarrollo de los drivers de comunicación USB para controladores de motores.
- Desarrollo de los drivers para el sistema de Adquisición de datos.

Los radíometros UdeC desde el año 2002, no han estado en funcionamiento y han sido intervenidos en algunas ocasiones por ejemplo: en el marco de la memoria de título de De la Puente, mencionada anteriormente o visitas aisladas de miembros de la Universidad.

7.1. Radiómetro UdeC-2: primera visita.

En esta sección se darán los principales trabajos realizados al radiómetro UdeC-2, los detalles o consideraciones que pudieran entorpecer la lectura fueron trasladados al apéndice F en donde se puede encontrar en profundidad problemas y soluciones enfrentadas en este trabajo.

Una parte no menos importante de este trabajo de tesis es trabajar en los radiómetros UdeC, con el fin de poder volverlos a dejar en funcionamiento e intentar utilizar si es posible datos que obtengamos desde este instrumento dentro de este trabajo de tesis. Como estos instrumentos se encuentran en la zona de Chajnantor la única forma de tener contacto con ellos es viajando hasta las instalaciones de ALMA (San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta), donde podremos tener acceso al instrumento propiamente tal e intervenirlo con el fin de dejarlo en funcionamiento. El radiómetro UdeC al que pudimos accesar y manipular es el radiómetro UdeC-2, el cual se encontraba en el sector de Machine Shop, OSF (Centro de Operaciones)

de ALMA, edificación ubicada a ~ 3000 msnm siendo este el sitio de operaciones permanentes localizado a la mayor altitud de Chile. Este radiómetro se encontraba en ese sector hace bastante tiempo y no se conocían las condiciones en las cuales se encontraba, ya sean eléctricas o mecánicas y los desperfectos a los cuales estaba sometido y que lo tenían inoperativo desde hace bastante tiempo.

El radiómetro UdeC es en una primera instancia un instrumento de grandes proporciones en donde podemos ver (ver figura 7.1) una gran caja plateada dentro de la cual se encuentran todos los componentes que permiten la detección de la señal y los aparatos que permiten recepcionarla y almacenarla. Por otra parte destaca el brazo que sale de esta caja plateada en cuya terminación encontramos el espejo que permite direccionar la señal de la columna de vapor de agua hacia el radiómetro propiamente tal. Originalmente este radiómetro era del tipo tipper, con un espejo basculante que permitía medir la temperatura de brillo del cielo en distintos ángulos cenitales, en la actualidad el motor esta descompuesto, por lo que solo esta midiendo la temperatura de brillo del cielo de manera cenital.



Figura 7.1: Radiómetro UdeC-2 donde podemos ver el cuerpo central del radiómetro (caja gris) y el brazo saliente en cuyo termino se encuentra el espejo que dirige la señal hacia el interior del radiómetro para ser detectada y almacenada.

El radiómetro responde a pruebas basicas de encendido, paso de corriente, co-

nexón a internet y acceso al computador interno del radiómetro. Antes de sufrir el desperfecto que lo dejo inactivo, solo la banda 3 se encontraba activa y midiendo brillo del cielo.

Para verificar si el funcionamiento de los componentes internos que son los encargados de estimar la cantidad de PWV, funcionan correctamente, fue necesario recrear condiciones de vapor de agua dentro del taller donde estaba el instrumento. Para esto se utilizo un hervidor como emisor de vapor de agua, generando una columna de vapor sobre el espejo del radiómetro lo que aseguraría que podemos tener mediciones a partir de esta columna. A pesar de tener una alta concentración de PWV en suspención de forma directa sobre el espejo del radiómetro el instrumento no mostraba ningún tipo de respuesta frente a esto. Una de las primeras refacciones que se realizaron al radiómetro fue limpiar y pulir la superficie del espejo primario, con el fin de aumentar la reflectividad del mismo. A pesar de esto la medición de la señal proveniente de la columna de vapor de agua sigue sin ser detectada. El instrumento no era sensible a la columna de vapor de agua que le presentábamos ya que esta columna era muy densa para el instrumento por que lo que rápidamente entraba en saturación e impedía entregar datos de forma significativa, por último podemos decir que el vapor de agua producido por medio de un hervidor no necesariamente esta en una forma de vibración que permita ser detectada por nuestro instrumento.

Por otra parte, pudimos observar que las mediciones que obtenia el radiómetro eran sensibles a movimientos, golpes, etc. afectando las mediciones de forma considerable, haciendo variar el nivel base de la banda dos de manera notoria. Este comportamiento poco usual para un instrumento diseñado para trabajar en condiciones extremas, motiva el hecho de indagar en el funcionamiento interno del radiómetro, ya que es un indicador de algún problema de conexión o interacción entre elementos que no deberían estar en contacto.

Después de varias pruebas infructuosas, se decide abrir el radiómetro, quitándole sus tapas laterales y exponiendo sus componentes internos. Podemos ver de inmediato como un gran volumen del radiómetro esta utilizado por las fuentes de poder, computadores, alimentación, etc. Mientras que el radiómetro propiamente tal o la parte que ejecuta la detección esta confinada en una pequeña sección, que podemos distinguir en la figura 7.2 como la caja blanca y pequeña que se encuentra suspendida

cerca de la tapa superior.



Figura 7.2: Podemos ver parte del interior del radiómetro UdeC-2 dentro de la estructura principal podemos ver que en la parte inferior se encuentra en computador y la fuente de poder que alimentan al sistema mientras la zona de recepción o el radiómetro propiamente tal está dentro de la pequeña caja blanca que se encuentra suspendida cerca de la tapa superior.

Podemos ver además de la caja donde se encuentra el radiómetro propiamente tal, las 2 cargas de calibración, ver figura 7.3, las que se encuentran a temperaturas físicas conocidas y diferentes entre ambas cargas . Estas cargas caliente y tibia estaban a temperaturas de 30° C y 90° C respectivamente; son utilizadas para poder calibrar las mediciones de temperatura de brillo. Además en la misma figura 7.3 vemos un espejo, que tiene la capacidad de moverse y dirigir hacia la bocina la señal proveniente de los distintos emisores: el cielo y de cada una de las cargas de calibración. Este espejo se mueve y se detiene en cada una de las 3 posiciones que tiene permitido integra en esa posición y cambia a la siguiente; por lo tanto el radiómetro en si, observa emisión del cielo, carga caliente, cielo, carga tibia, cielo y así continuamente; cada uno de estos pasos demora 3 segundos por que podemos decir este radiómetro esta midiendo efectivamente el cielo solamente un tercio del tiempo total.

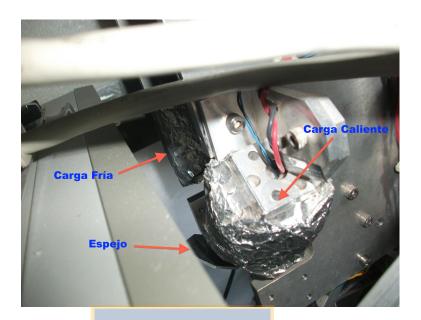


Figura 7.3: Fotografía tomada al interior de la caja metálica del radiómetro en donde podemos ver las posiciones de las cargas de calibración fría y caliente y el espejo octogonal que cambia su posición para poder integrar información desde el cielo y ambas cargas.

En el interior de la caja blanca que veíamos suspendida en la figura 7.2 se encuentran todos los elementos de recepción de la señal y que nos permiten recopilar la información, modificar la frecuencia de la señal entrante y bajarla a frecuencias medibles con la tecnología actual, una vez hecho esto la señal es separada y medida en las 3 bandas en las cuales funciona el instrumento. Podemos ver entonces en la figura 7.4 los principales elementos que permiten la recepción, transformación y separación de la señal:

- Bocina para señal de 183 GHz. Es el componente que permite recepcionar la señal (análogo a una antena o espejo de telescopio).
- Mixer (mezclador). Es el encargado de tomar la señal entrante a una frecuencia determinada y mezclarla con una señal de frecuencia fija producida de forma artificial por un oscilador local dentro de la caja del radiómetro. De esta mezcla sale una señal cuya frecuencia es posible de ser medida por la electrónica convencional existente.
- LO (local oscilator). El oscilador local es un componente dentro del radiómetro que tiene por función generar una señal conocida la cual se va a mezclar dentro

del mixer para poder bajar la frecuencia a la señal de entrada.

- Vemos la zona de separación de banda lateral y las 3 bandas en las cuales se separa la señal y permite estimar la temperatura de brillo del cielo.
- LNA (low noise amplifier). Un amplificador de bajo ruido es el encargado de subir la señal que ha sido previamente trabajada de alguna manera sin agregar (o agregar muy poco) ruido en el proceso.
- Sensor de temperatura. Nos permite conocer la temperatura dentro del radiómetro.

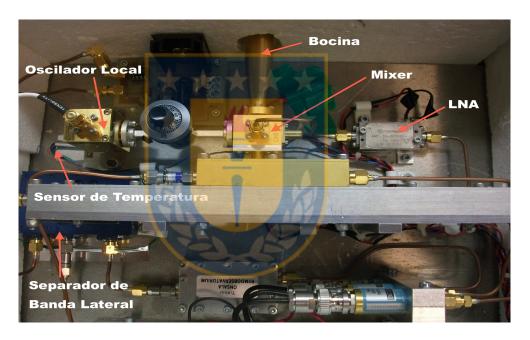


Figura 7.4: Interior del radiómetro, en donde podemos ver los distintos componentes que conforman el sistema de recepción de la señal.

Una vez abierta la caja del radiómetro, pudimos ver sus componentes y el estado en el que se encontraban (figura 7.4), detectando de forma casi automática que uno de los cables metálicos de la banda 2 no estaba conectado de forma adecuada, prácticamente estaba suelto y al momento de golpear al instrumento este cable oscilaba en su posición provocando que se transmitiera la señal de manera intermitente para luego quedar en una posición de contacto pero alcanzando un nivel de señal base diferente al original.

Utilizando las llaves de torque adecuadas se procedió a conectar de forma correcta el cable y verificar las conexiones de los demás cables y conectores que podrían estar afectos al mismo problema. El cable de la banda 2 además de no estar bien conectado presenta una soldadura defectuosa entre el cable y el conector, lo que afecta de manera considerable las perdidas de retorno y como se transmite la señal por este cable. Se aplica soldadura a esta sección con el fin de poder solucionar el problema de transmisión. Cuando esto esta hecho, verificamos el funcionamiento de las bandas, los anchos a los cuales cada una trabaja y si efectivamente están midiendo de forma adecuada. Estos resultados pueden verse en la figura 7.5

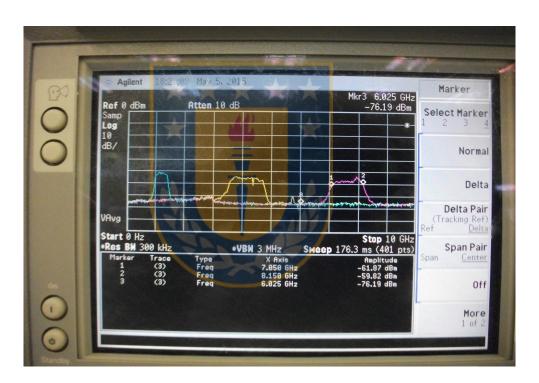


Figura 7.5: Fotografía tomada a la pantalla del analizador de espectros que nos permite visualizar de manera clara las distintas bandas en las que funciona el radiómetro asi como sus anchos. Pudimos por medio de este y otros aparatos poder verificar el funcionamiento de las 3 bandas del radiómetro UdeC-2. Desde la izquierda a derecha tenemos: la banda 1 (1.0 a 1.4 GHz.), la banda 2 (3.0 a 6.0 GHz) y la banda 3 (7.0 a 8.0 GHz.).

Cuyas características estan dadas por las siguientes especificaciones y entendidas como se muestra en la figura 7.6 que fueron corroboradas de manera experimental dentro de los laboratorios de ALMA.

- IF1, rango de frecuencias de: 1.0 a 1.4 GHz. El centro de la banda esta ubicado en 1.2 GHz y posee un ancho de banda de 400 MHz.
- IF2, rango de frecuencias de: 3.0 a 6.0 GHz. El centro de la banda esta ubicado en 4.5 GHz y posee un ancho de banda de 3 GHz.
- IF3, rango de frecuencias de: 7.0 a 8.0 GHz. El centro de la banda esta ubicado en 7.5 GHz y posee un ancho de banda de 1 GHz.

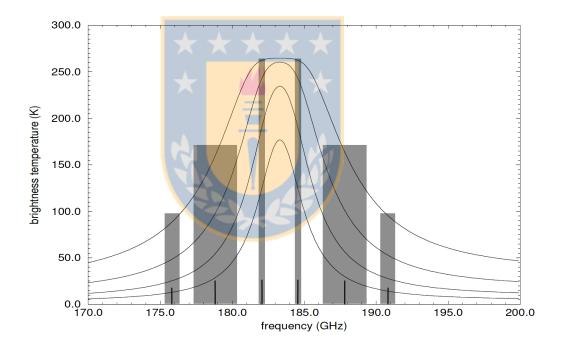


Figura 7.6: En esta figura se muestran las 3 bandas utilizadas por el radiómetro UdeC. Se muestran distintos perfiles de temperatura de brillo y las 3 bandas del radiómetro superpuestas. Cada uno de las bandas tiene las siguientes especificaciones: IF1 abarca desde 1.0 a 1.4 GHz cuyo centro esta en 1.2 GHz y el ancho de banda es de 400 MHz, la IF2 abarca desde 3.0 a 6.0 GHz cuyo centro esta en 4.5 GHz y el ancho de banda es de 3 GHz, por último la IF3 abarca desde 7.0 a 8.0 GHz cuyo centro esta en 7.5 GHz y el ancho de banda es de 1 GHz. Imagen obtenida desde la Memoria de Título Refaccionamiento de Radiómetros de Vapor de Agua en Banda de 183 GHz, Hernán Felipe De la Puente Christen

Luego de una reparación y reemplazo de material interno, para saber como el radiómetro efectúa la medición fue necesario poner el el instrumento fuera del taller midiendo directamente al cielo, como se puede ver en la figura 7.7. En esta condición se probó que el radiómetro funcionaba.



Figura 7.7: Prueba del radiómetro una vez instalado el nuevo cable y en condiciones meteorológicas reales (fuera del taller). El radiómetro estaba midiendo directamente al cielo y detectando el vapor de agua presente en el cielo en ese instante representado por las nubes.

Se realizaron diversas pruebas al radiómetro con las cuales fue posible descartar errores y corregir fallas. Una vez el equipo funcionaba adecuadamente fue trasladado al sitio de operaciones de APEX. La elección de este sitio corresponde a poder dejar el radiómetro UdeC-2 conectado a la corriente de forma directa, acceso a internet y lo principal es que se encuentre cerca de un instrumento que sirva de calibrador como es el radiómetro de APEX, como puede verse en la imagen 7.8; esta cercania es importante para poder estandarizar las mediciones al radiómetro de APEX. La imagen 7.9 muestra la ubicación final del radiómetro UdeC-2 en el sitio de APEX, en donde se encuentra en la actualidad midiendo de forma directa al cielo.



Figura 7.8: Podemos ver en esta imagen, el radiómetro UdeC-2 a la derecha y la antena de APEX de fondo en donde se encuentra el radiómetro del observatorio. La distancia que separa ambos instrumentos es de $\sim 25 \mathrm{m}$



Figura 7.9: Ubicación final del radiómetro UdeC-2 a un costado de un container del Radiotelescopio APEX, en donde se encuentra conectado a energía eléctrica e internet. El radiómetro en esa posición se encuentra midiendo hacia la posición cenital. La cercanía entre ambos instrumentos permite calibrar las mediciones.

El radiómetro UdeC-2 se dejo entonces midiendo en el sitio de APEX a 5105 msnm. a un costado de uno de los container de operaciones del observatorio, conectado a la corriente y a internet. La conección a internet fue hecha de tal manera que pudiéramos tener acceso al computador interno del radiómetro desde cualquier lugar.

De esta visita los logros fueron:

- Se limpio y pulió el espejo primario del radiómetro, aumentando la reflectividad de este y la posibilidad de recibir la radiación.
- Se comprobaron las frecuencias en las cuales funcionan las 3 bandas del radiómetro.
- Se reemplazo un cable defectuoso y ajustaron las conexiones de los demás cables.
- Las 3 bandas IF se encuentran funcionando.
- Se rescataron los datos previos a la falla que inhabilito al equipo. Se comprobó la toma de datos a partir de las mediciones que realizamos, en el sitio de ALMA (3000 msnm.) y en el llano de Chajnantor.
- Se corrigió el problema de corte de energía en el que entraba el radiómetro producto de la fuente de poder que se sobre-calentaba.
- Se ubicó el radiómetro en el sitio de APEX, a un costado de uno de los containers y está conectado a energía electrica e internet.
- Se puede accesar a la información contenida en el radiómetro vía remota.

7.2. Radiómetro UdeC-2: segunda visita.

Debido a problemas de calentamiento interno del radiómetro y a las altas mediciones de temperaturas de receptor, se visita nuevamente el sitio de Chajnantor. Se sabe de continuas desapariciones del instrumento producto de la nieve y problemas de arranque posteriores a estos episodios. Se decide intervenir el radiómetro para poder bajar la temperatura interna del mismo, para esto se instaló un dispositivo enfriador que permite disipar el calor de manera efectiva y solucionó el problema de sobre calentamiento interno de este instrumente.

El equipo se dejo midiendo, continua con las 3 bandas en funcionamiento y un sistema de enfriamiento que hace su trabajo a la perfección.

Los datos de este radiómetro no han sido procesados ni utilizados en este trabajo en vista de las intervenciones que hemos realizado y debido principalmente a que el periodo de calibración bajo el cual podemos tener seguridad que los datos extraídos desde el radiómetro son comparables con los datos del radiómetro de APEX, es de 6 meses por lo menos. Con estas consideraciones, aun quedan intervenciones que realizar y pruebas que hacer con el fin de garantizar la integridad de las mediciones y que el equipo quede en condiciones optimas para una estimación adecuada de la temperatura de brillo y su posterior transformación a PWV.

Capítulo 8

Conclusiones

El modelo presentado en esta tesis responde a la necesidad de conocer y caracterizar el comportamiento del vapor de agua atmosférico en la zona de Chajnantor, zona extrema ubicada en la región de Antofagasta a más de 5000 msnm en el altiplano chileno. En el área de Chajnantor se encuentran en este momento los más importantes radiotelescopios del mundo dedicados a la observación milimétrica y sub-milimétrica e infrarrojo medio, como son: ALMA, APEX, ACT, mini-TAO.

El modelo presentado en esta tesis utiliza al radiómetro de vapor de agua ubicado en el sitio de APEX como calibrador y sobre el se realizan las correlaciones y comparaciones necesarias para dar forma al modelo presentado. Este modelo muestra las razones de PWV entre los distintos instrumentos localizados en el área de Chajnantor y como cambian en el tiempo. Indicando cuantas veces más o menos de PWV tenemos en un sitio en comparación a APEX. Todo este análisis a forma de conclusión se muestra de forma condensada en la figura 8.1.

Se puede ver claramente de esta imagen que tenemos dos agrupaciones claramente definidas; las razones (anuales y estacionales) que dan cuenta del comportamiento del Llano de Chajnantor, ubicadas en la parte superior cuyas pendientes anuales están entre 0.95 < m < 1.2, mientras que las razones (anuales y estacionales) que dan a entender como se comporta el PWV del Cerro Chajnantor en relación al Llano (radiómetro APEX), se encuentran acotadas entre 0.6 < m < 0.7. Las diferencias de pendientes entre todos los instrumentos y los sitios (Llano y Cerro Chajnantor) están dadas principalmente por las diferencias de alturas existentes entre los sitios. El radiómetro APEX que se encuentra a un costado del radiotelescopio a una altura

de 5105 msnm es como se ha dicho la referencia para las razones entre PWV, los demás instrumentos se encuentran en alturas bajo o sobre este nivel, dando origen a las distintas ubicaciones dentro de la figura 8.1.

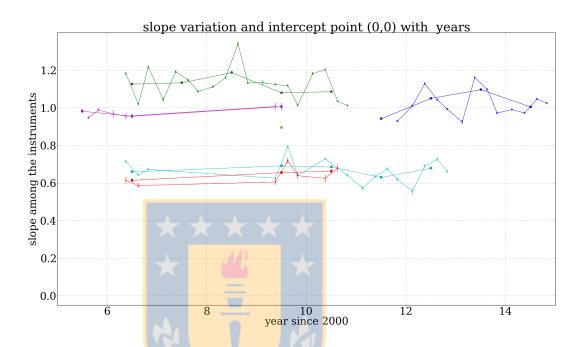


Figura 8.1: Resultado final del modelo presentado en este trabajo. Podemos ver como son las variaciones de pendiente (por lo tanto de PWV) mientras pasa el tiempo entre los distintos instrumentos y para diferentes sitios. Recordar que las líneas, círculos y puntos de color: magenta, verde y azul corresponden a instrumentos localizados en el Llano de Chajnantor mientras que las líneas, círculos y puntos de color: cyan y rojo corresponden a pendientes de instrumentos localizados en el Cerro Chajnantor. El punto amarillo corresponde a la pendiente encontrada para la ubicación del Cerro Toco, el cual se encuentra a una altura intermedia ~ 5300 msnm.

Los 2 radiómetros Tipper ubicados en el área de Chajnantor recordemos que han cambiado sus posiciones y este continuo movimiento ha servido de base para poder realizar este trabajo. Estos instrumentos, junto a los instrumentos desplegados por el área de Chajnantor nos han otorgado la posibilidad de modelar el área como se ha hecho en esta oportunidad, utilizando una cantidad de datos sin precedentes hasta este momento.

Los radiómetros Tipper ubicados en CBI1-CBI2 se encontraban a la misma altura (~ 5050 msnm.) y por consiguiente miden el PWV de manera idéntica teniendo entonces pendiente ~ 1 . Mientras que las correlaciones entre APEX-CBI1 tienen una diferencia de altura entre ambos sitios de $\sim 55m$ (considerando que APEX se encuentra a 5105 msnm y el radiómetro Tipper a 5050 msnm) por lo que sus pendientes son mayores, indicando que la cantidad de PWV que se mide en el sitio CBI es mayor que la cantidad medida en el sitio de APEX. Las correlaciones entre APEX-CBI3 se encuentr<mark>an alrededor del valor de pe</mark>ndiente ~ 1 y ambos instrumentos se encuentran a la misma altura (~ 5105 msnm); aqui las diferencias entre las mediciones podría corresponder a la distinta forma de estimar los PWV. Por otra parte completamente distinta las correlaciones hechas entre instrumentos localizados en el Llano de Chajnantor y el Cerro Chajnantor se encuentran dominadas por una diferencia de altura de aproximadamente ~ 600 m entre los sitios, lo que conlleva a decir y desprender desde la gráfica que como las pendientes son pequeñas en relación a los valores del Llano, siempre mediremos menos cantidad de PWV en la Cima del Cerro Chajnantor comparado con las estimaciones hechas en la superficie del Llano. Un hecho importante es que la cantidad de PWV que estimamos en la cima del Cerro Chajnantor es alrededor de un $\sim 33\,\%$ menor que la presente en el Llano, esto esta en acuerdo con el resultado obtenido en Bustos et al. 2014., en donde se estima la diferencia entre ambas ubicaciones en un 36 %.

Si se centra la mirada en las pendientes estacionales es posible notar algo sumamente interesante. Los radiómetros Tipper (lineas y puntos magenta) siguen presentado una relación estacional 1:1 lo que sigue permitiendo establecer las comparaciones necesarias con los demás instrumentos de manera anual y estacional. Se comprueba de forma general que las pendientes estacionales rodean a la pendiente anual para todas las razones entre instrumentos y que el valor de pendiente anual corresponde aproximadamente al promedio de las pendientes estacionales. En las distintas estaciones tenemos diferentes cantidades y distribución de PWV, por lo que se tienen estaciones secas y húmedas refereridas al valor de pendiente anual. La estación más seca es el invierno ya que las condiciones de bajas temperaturas hacen que la cantidad de PWV en la atmosféra sea baja. Por otro lado la estación más húmeda es el verano ya que en el altiplano andino se produce el invierno boliviano y la cantidad de PWV aumenta de manera notoria, produciendo en los gráficos PWV-PWV grandes y difusas colas, como puede verse en la figura 8.2.

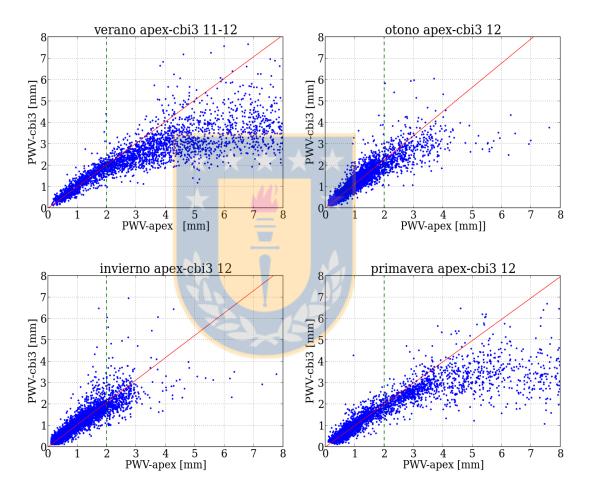


Figura 8.2: Gráfica que muestra las diferencias de PWV entre las 4 estaciones para el Llano de Chajnantor. Es posible ver como el invierno presenta cantidades bajas de PWV, mientras el verano presenta una gran cola producto de las condiciones climáticas de esa estación en particular.

En la figura 8.2 podemos ver como los datos del invierno se concentran en una zona bastante acotada, casi sin presencia de colas, indicador que la cantidad de PWV es efectivamente baja para todo el período, mientras que la primavera comienza a mostrar rasgos de colas producto de la transición a la época húmeda del verano. Estás colas que aparecen dentro de todos los gráficos (no solo los estacionales) son producto de varios efectos juntos: las condiciones meteorológicas del período de tiempo comprendido, la granularidad de los datos, los diferentes niveles de saturación de los instrumentos por ejemplo.

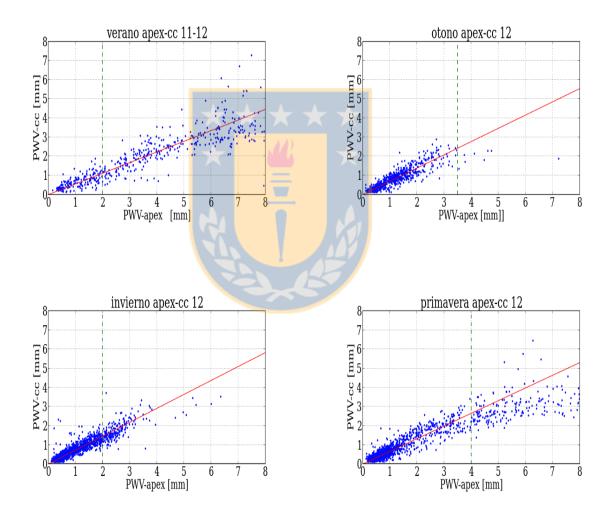


Figura 8.3: Gráfica que muestra las diferencias de PWV entre las 4 estaciones para el Cerro Chajnantor. Es posible ver como el invierno presenta cantidades bajas de PWV, mientras el verano presenta una pendiente baja en relación a las otras estaciones y a su valor anual, producto de las condiciones climáticas de esa estación en particular.

En la imagen 8.3 es posible ver que en la cima del Cerro Chajnantor las estaciones presentan un comportamiento similar al mostrado en el Llano, siendo el verano la estación mas húmeda y la que presenta una gran cola, mientras que el otoño e invierno presentan estacionalidad seca cuyos datos se confinan a pequeñas cantidades de PWV. Es posible ver de la figura 8.3 que el verano tiene una pendiente baja en relación a las otras estaciones y respecto a la pendiente anual. Esto tiene sentido si consideramos que el invierno boliviano afecta de manera importante al Llano de Chajnantor en desmedro del Cerro, lo que hace que la cantidad de PWV que mide el radiómetro de APEX sea considerablemente mayor que lo que podemos estimar desde el radiómetro Tipper ubicado en la cima del Cerro Chajnantor. La caída sistemática del valor de la pendiente durante los veranos para el Cerro Chajnantor es un indicador de estacionalidad, en donde la influencia del invierno boliviano en conjunto con una altura menor de la capa de inversión térmica producen que la cantidad de PWV que se encuentra en el Llano de Chajnantor sea menor que la cantidad estimada desde el radiómetro Tipper localizado en la cima del Cerro; este comportamiento se evidencia de manera clara entre los instrumentos localizados en el Cerro y el Llano ya que las diferencias de altura y cantidad de PWV son considerables para visualizar este fenómeno.

Los datos provenientes desde: el observatorio mini-TAO ubicado en la cima del Cerro Chajnantor y de la cima del Cerro Toco, aportaron de manera sobresaliente a nuestro modelo. Ya que estos datos fueron tomados de manera totalmente independiente a los demás sitios y entregan en ambos casos el PWV de manera directa. Al introducir estos datos dentro de nuestro modelo y realizar las correlaciones necesarias se pudo comprobar que estos datos responden de manera adecuada a nuestro modelo, ya que se distribuyen sobre el PWV obtenido desde el radiómetro Tipper de manera satisfactoria y se ubican de manera adecuada dentro de las nubes de los gráficos PWV-PWV siguiendo las correlaciones lineales encontradas con anterioridad. Los datos provenientes desde la cima del Cerro Toco aportan con un punto importante dentro del análisis que se realizó ya que se encuentra a una altura intermedia entre el Llano de Chajnantor y la cima del Cerro Chajnantor aportando con datos que permiten dar luces sobre el comportamiento del PWV con la altitud.

Por lo tanto las mediciones de PWV provenientes desde el observatorio mini-TAO y la cima del Cerro Chajnantor ayudaron a comprobar la consistencia del modelo y aportan un punto importante para entender como cambia el PWV con la altura. A

pesar que la cima del Cerro Toco se encuentra $\sim 300 \mathrm{m}$ sobre el Llano la cantidad de PWV que podemos estimar en esta ubicación es un 10 % menor que la cantidad de PWV que mide el radiómetro de APEX. Observando como la cantidad de PWV cambia con la altura, y gracias al aporte de la cima del Cerro Toco, se infiere el comportamiento exponencial entre ambas cantidades, aunque con la cantidad de sitios que fueron analizados no es posible llegar a un ajuste que represente este comportamiento.

Nuestro modelo por lo tanto entrega la información necesaria para comprender la distribución de PWV espacialmente sobre el Llano de Chajnantor, en altitud y como la cantidad de PWV cambia de manera anual y estacional, desde el año 2006 hasta el año 2014. Con esta información puede estimarse el PWV en otras zonas dentro del área del Chajnantor y ver la factibilidad de instalar un instrumento de acuerdo a las condiciones de PWV que presenta la zona.

Capítulo 9

Referencias Consultadas

• Autor: C. Donald Ahrens

Título: Meteorology Today an introduction to weather, climate,

and the environment

Datos de publicación: Second Edition 1985

Editorial: West Publishing Company

• Autor: Wilson, Rohlfs, Hüttemeister

Título: Tools of Radio Astronomy

Datos de publicación: fifth edition 2008

Editorial: Springer

• Autor: John D. Kraus

Título: Radio Astronomy

Datos de publicación: Segunda edición 1988

Editorial: McGraw-Hill

• Autor: Bernard Burke and Francis Graham-Smith

Título: An Introduction to Radio Astronomy Datos de publicación: Second Edition 2002

Editorial: Cambridge University Press

Autor: Raúl González Duque

Título: Python para todos

Datos de publicación: licencia Creative Commons Reconocimiento 2.5 España.

• Autor: G. Rubilar

Título: Clases sobre computacin científica con Python,

usando IPython notebooks.

Datos de publicación: Versin en espaol de Scientific Python Lectures de J.R.

Johansson

■ Autor: J. Wallace & P. Hobbs

Título: Atmospheric Science an Introduction Survey

Datos de publicación: Second edition

Editorial: Volume 92 in the INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES

Autor: Mark Taylor

Título: TOPCAT-Tool for OPerations on Catalogues And Tables. Version 4.2-3

Datos de publicación: 14 April 2015. Starlink User Note253

Autor: Andrés Marzal & Isabel Gracia

Título: Introducción a la programación con Python

Datos de publicación: Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos.

Universitat Jaume

Autor: Murry L.Salby

Título: Fundamentals of Atmospheric Physics

Datos de publicación: Volumen 61 in las Series Internacionales de Geofisica

1996

Editorial: Editorial Academic Press

Autor: Wilson, Rohlfs, Hüttemeister

Título: Tools of Radio Astronomy

Datos de publicación: fifth edition 2008

Editorial: Springer

Autor: Hernán Felipe De la Puente Christen

Título: Memoria de Título Refaccionamiento de Radiómetros de Vapor de Agua

en Banda 183GHz"

Datos de publicación: 2008

- G. Delgado et al., 1999, ALMA Memo 271.1
- R. Bustos et al., 2000, ALMA Memo 333.
- R. Bustos et al., 2014. arXiv:1410.2451v1
- Paine, 2004, SMA Tech. Memo 152; Cambridge: Harvard Univ.
- S. Radford., 2011, arXiv:1107.5633v1
- S. Radford., 2000, ALMA Memo 334.
- Otárola et al., 2009, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, vol. 45, núm. 2, pp. 161-169
- Radford & Peterson, 2015, PASP
- Holdaway et al., 1997, MMA Memo 187.
- R. Hills et al., ALMA Memo 352.
- Nikolic et al 2013. arXiv:1302.6056v1
- http://www.apex-telescope.org/
- http://www.almaobservatory.org/
- http://library.nrao.edu/alma.shtml
- https://www.fourmilab.ch/documents/calendar/

- http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/
- https://www.python.org/
- https://github.com/gfrubi/clases-python-cientifico
- http://www.timeanddate.com/worldclock/
- https://www.astro.uni-koeln.de/nanten2/
- https://www.arm.gov/publications/backgrounders/docs/doe-sc-arm-p-09-013.pdf
- http://www.astro.caltech.edu/tjp/CBI/
- http://legacy.nrao.edu/alma/site/Chajnantor/instruments/
- https://www.cv.nrao.edu/~demerson/almapbk/construc/chap14/chap14.html
- http://www.submm.caltech.edu/sradford/
- http://www.ccatobservatory.org/index.cfm
- https://www.cfa.harvard.edu/spaine/am/

Apéndice A

Funcionamiento del Software AM.

Si queremos obtener el comportamiento real de la atmósfera o mediciones precisas de ciertas variables (temperatura, presión, velocidad del viento, etc) podemos utilizar métodos directos de medición, lo que implica la instalación de estaciones meteorológicas ademas de lanzamientos de globos aerostáticos con radiosondas para obtener detalles de las diferentes capas de la atmósfera. Esto ultimo no es un proceso eficiente ni económico ya que los globos se mueven dependiendo de la dirección del viento impidiendo un ascenso 100 % vertical, además las radiosondas rara vez son encontradas después de un ascenso. En este panorama es donde entran mediciones hechas por los medios descritos y modelos computacionales que toman como base estas mediciones y permiten simular el comportamiento atmosférico de una manera fiel y confiable, para distintas condiciones, lugares, etc.

Para simular las condiciones atmosféricas en un sitio en particular (por ejemplo, Llano de Chajnantor) utilizamos programas computacionales que nos permiten simular y recrear el comportamiento atmosférico de manera confiable y precisa. En ese sentido el software AM, nos permite obtener una gran cantidad de datos sobre la atmósfera considerando las condiciones de algún lugar de observación (Chajnantor, Sairecabur, Mauna Kea, etc). Cada sitio tiene condiciones particulares que lo hacen único, por lo que poder simular todos los sitios del mundo con una alta precisión o comprensión de su comportamiento atmosférico es una tarea complicada. Varias campañas de toma de datos, han contribuido a poder caracterizar sitios específicos (Chajnantor, Sairecabur, Mauna Kea, etc) con gran detalle, en ese sentido a partir de las mediciones se han creado modelos que representan lo mejor posible el com-

portamiento de la atmósfera. Por ejemplo, uno de los modelos que se han utilizado en esta tesis ha sido **Chajnantor.amc**, este modelo se ha construido considerando mediciones de 187 radiosondas entre los años 1998 a 2002 justamente sobe el llano de Chajnantor, el perfil de O_3 ha sido derivado de mediciones de ózono-sondas'voladoras realizadas en San Cristobal, Galapagos entre los años 1998-2002, así como estudios realizados para determinar promedios de las temperaturas, presiones, etc. en el llano de Chajnantor. Con todas estas consideraciones y mediciones se ha creado/utilizado este modelo como una buena representación de las condiciones atmosféricas del Llano de Chajnantor. Por otra parte para simular el comportamiento atmosférico del Cerro Chajantor, utilizamos el modelo **Sairecabur.amc**; si bien este modelo fue construido en base a datos tomados en el cerro Sairecabur, ubicado a 35 Km al NW de Chajnantor, puede ser utilizado como una buena aproximación a las condiciones del Cerro Chajnantor ya que estamos comparando dos cerros, lo que garantiza que tenemos dos sitios geomorfológicamente idénticos y que presentan condiciones de temperaturas, presiones, etc. similares.

Para poder simular de la mejor manera posible la atmósfera y ser consistentes con las mediciones realizadas por las radiosondas, el programa AM trabaja en capas atmosféricas, divide la columna cenital en capas y cada una de estas capas tienen características bien definidas de presión temperatura, porcentaje de gases, etc. Un ejemplo de esta división por capas se muestra en la figura A.1, podemos ver en este ejemplo que viene una radiación incidente con algún ángulo y entra en la capa superior, para salir finalmente por la parte inferior con las variables medidas simuladas por el programa consistentes con las mediciones instrumentales. Cada una de las distintas capas tienen sus características bien definidas como la altura, presión, temperatura, etc. y la comprensión de estas características es necesaria para poder estimar de manera correcta como cada una de estas capas influye en el paso de la señal incidente.

El programa hace cálculos secuenciales y recursivos dentro de las capas para poder simular el comportamiento atmosférico y las condiciones propias de cada capa, siendo esto necesario para poder tener buen acuerdo con las observaciones hechas con radiosondas. Una vez el programa trabaja sobre todas las capas encuentra el valor final de recepción que obtendríamos con un instrumento en la superficie de la tierra bajo las condiciones especificadas.

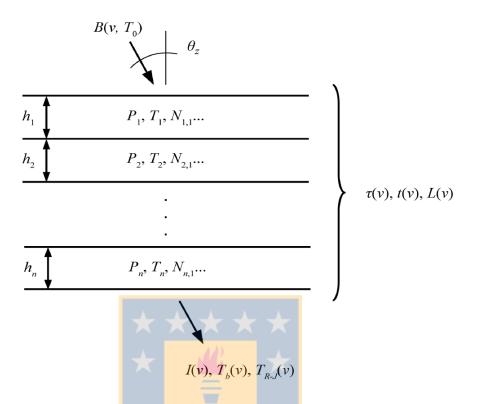


Figura A.1: Esquema del funcionamiento del software AM, donde se muestra la distribución de capas con sus respectivas características. En cada capa el programa calcula y modela el comportamiento atmosférico para finalmente entregar los valores de salida pedidos.

Los modelos Chajnantor.amc y Sairecabur.amc utilizan ciertas variables de entradas para poder funcionar, estas son: las frecuencia mínima y máxima en unidades de Giga-Hertz, ángulo cenital en grados, PWV en micro-metros y la temperatura de suelo en Kelvin. A partir de estos valores de entrada el modelo es capaz de reconstruir el comportamiento atmosférico y entregar las variables de salida que nosotros especifiquemos.

Sabiendo que las variables de entrada son entregadas por el usuario y podemos manipular el programa dentro de los rangos que nosotros estimemos convenientes, podemos utilizar este programa de manera tal que podemos reconstruir el funcionamiento de algunos instrumentos, en ese sentido por ejemplo las frecuencias de entradas pueden corresponder a los valores mínimos y máximos de un filtro que po-

sea el instrumento, mientras que con el ángulo cenital podemos simular distintas masas de aire, por ultimo la temperatura del suelo nos permite modelar sitios con similares características pero con temperaturas diferentes y observar como la temperatura incide en las condiciones atmosféricas que estamos interesados en estudiar.

Además debemos indicarle al modelo cuales serán las variables de salida que necesitamos y las unidades en las cuales queremos obtener estas cantidades, las posibilidades de variables de salida se muestran en la tabla A.1

Cuadro A.1: Variables de salida programa AM

Espectro de Salida	variable	unidades
Frecuencia	f	Hz , kHz, MHz, THz, cm^{-1}
Opacidad	tau	neper, db
Transmitan <mark>c</mark> ia	tx	none
Radiancia	I ((()	$watt \cdot cm^{-2} \cdot GHz^{-1} \cdot sr^{-1}$
Diferencia de ra <mark>diancia</mark>	I_{diff}	$watt \cdot cm^{-2} \cdot GHz^{-1} \cdot sr^{-1}$
Temperatura de brillo	T_b	K
de Planc <mark>k</mark>	_	
Temperatura de brillo	T_{rj}	K
Rayleigh-Je <mark>a</mark> ns		
Temperatura de sistema	T_{sys}	K
Rayleigh-Jeans		
Factor Y	Y	none
Exceso de Camino o retraso	L	km, m, cm, mm, um, s, ps, fs
Coeficiente de Absorción	k	internal

En el caso de este trabajo podemos necesitar: frecuencia, opacidad, transmitancia, radiancia, temperatura de brillo de Planck, etc. Para un correcto funcionamiento del modelo necesitamos indicar claramente que variables de salida necesitamos y sus unidades correspondientes.

Apéndice B

Sistemas Temporales

- Local time (tiempo local), es la medida del tiempo propio del sitio donde se realiza la observación. Depende de la longitud donde realizamos la observación.
- UNIX-TIME (Tiempo Unix) es un sistema utilizado para la descripción de instantes de tiempo. Se define como la cantidad de segundos transcurridos desde la medianoche UTC del 1 de enero de 1970, sin contar segundos intercalares.
- Julian Day (Día juliano) es el número de días y fracción transcurridos desde el mediodía del 1 de enero del año 4713 a. C.
- Modified Julian Day (MJD, Día Juliano Modificado). Si queremos tener los días julianos de las fechas actuales, nos enfrentamos a numeros bastantes grandes e inmanejables, por lo que se realizó una modificación para poder escalar y hacer las cifras manejables. Los MJD es creado por medio de la sustracción de 2400000.5 desde el día juliano; la cantidad resultante representa el numero de días transcurridos desde la media noche UT del 17 de Noviembre de 1858.

Apéndice C

Modulos de Python

• curve_fit de scipy.optimize

Función scipy.optimize.curve_fit(f, xdata, ydata, p0=None, sigma=None, absolute_sigma=False, check_finite=True, **kw)[source]

Usa el metodo de cuadrados minimos no lineales para ajustar una función **f** a los datos. Tiene los siguientes parámetros :

- f: la función modelo, f(x, ...). Esta función toma la variable independiente como el primer argumento y los parametros ajustables para adaptarse como los argumentos restantes.
- xdata : la variable independiente donde el dato es medido.
- ydata : variable dependiente
- p0 : punto inicial de los parametros

Salida

- popt : valores optimos para los cuales la suma de los errores de f(xdata,*popt)
 ydata estan minimizados.
- pcov : Es la estimación de la covariancia de popt. Las diagonales poveen la variancia de la estimación de los parametros. Para calcular los erroes en los parametros usamos perr=np.sqrt(np.diag(pcov))

Modulo de python scipy.stats.linregress

Función: scipy.stats.linregress(x, y=None)[source]

Calcula una linea de regresión usando cuadrados mínimos para un conjunto de medidas. Utiliza los siguientes parámetros

• x,y: arreglo de dos medidas sobre los cuales se realizará la regresión lineal.

Salida:

- pendiente: (flotante) pendiente de la regresión lineal.
- punto de corte: (flotante) punto de corte con el eje y de la regresión lineal.
- valor-r: (flotante) coeficiente de correlación.
- stderr: (flotante) error standard de la estimación.

Apéndice D

Coeficiente de Correlación de Pearson

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. De manera menos formal, podemos definir este coeficiente como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables.

El valor del índice de correlación se encuentra dentro del intervalo [-1,1] y dependiendo del valor que este coeficiente tenga será la interpretación (ver figura D.1):

- r=1, existe una correlación positiva perfecta, indicando una dependencia total entre las dos variables denominada relacin directa. Este comportamiento indica que cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace de forma constante.
- 0 < r < 1, existe una correlación positiva.
- r = 0, no existe relación lineal. Esto no implica que las variables son independientes, pudiendo existir relaciones no lineales entre las variables.
- -1 < r < 0, existe una correlación negativa.
- r = -1, existe una correlación negativa perfecta, indicando una dependencia total entre las dos variables pero de manera inversa, cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye de forma constante.

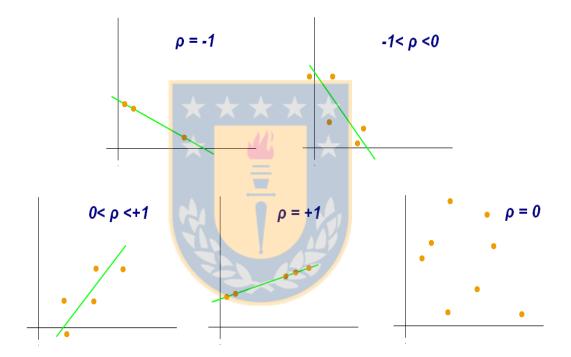


Figura D.1: Esquema que representa las distintas situaciones que se pueden dar en relación al coeficiente de correlación.

Apéndice E

Características CoolerMaster WaterCooling Seidon 120V

Sistema de refrigeración que permite extraer hasta $50^{\circ}C$ desde la superficie en contacto. Esta diseñado para computadores o sistemas de juego que tienden a calentarse y necesitan disipar este calor de forma eficiente.

Las especificaciones técnicas son:

- Modelo: RL-S12V-24PK-R1
- Socket CPU: Intel LGA 2011/1366/1150/1155/1156/775; AMD FM2+/FM2/FM1/ AM3+/AM3/AM2
- Material Radiador: Aluminum
- Dimensión Radiador: 154 x 119 x 27 mm
- Ventilador: 120 x 120 x 25 mm (4.7 x 4.7 x 1 in)
- Velocidad del Ventilador: $600 \sim 2400 \text{ RPM (PWM)} \pm 10\%$
- Flujo de Aire: $19.17 \sim 86.15 \text{ CFM} \pm 10\%$
- \bullet Presión de Aire: 0.31 ~ 4.16 mm H2O $\pm~10\,\%$
- Expectativa de Vida Ventilador: 40,000 hrs
- Nivel de Ruido: $19 \sim 40 \text{ dBA}$

■ Tipo de Rodamiento: Rifle bearing

■ Connector: 4-Pin

■ Voltaje: 12 VDC

■ Corriente: 0.3A

■ Consumo: 3.6W

Ruido de Bombeo:

■ Dimensiones: 62 x 62 x 36.4 mm



Apéndice F

Información adicional radiómetro UdeC-2

En este apéndice se da cuenta de detalles relacionados con el trabajo con el radiómetro UdeC-2 y que fueron retirados del texto para no desviar la atención del lector. Seguirá el orden del escrito pero se dará enfasís a los detalles arriba no mencionados.

F.1. Radiómetro UdeC-2: primera visita.

Las primeras pruebas realizadas al radiómetro correspondieron a pruebas de encendido y ver la respuesta del instrumento al paso de la corriente. El radiómetro responde al paso de la corriente y todos los componentes reaccionan, hasta ese momento de forma adecuada. Una vez encendido verificamos si era posible accesar desde afuera (sin desmontar las tapas del instrumento) al computador interno del radiómetro, lo cual igual fue verificado. Teniendo entonces acceso a los datos vimos los últimos archivos de datos para ver en que estado se encontraba midiendo antes de que se produjera la falla. Solo la banda 3 estaba activa, mientras que las bandas 1 y 2 estimaban valores de temperatura de brillo del cielo de manera errónea. Por lo tanto solo la banda 3 estaba activa y permitía medir de una manera pobre la temperatura de brillo del cielo y por lo tanto estimar la cantidad de PWV.

Para verificar si el funcionamiento de los componentes internos que son los encargados de estimar la cantidad de PWV, funcionan correctamente, es necesario recrear

condiciones de vapor de agua dentro del taller donde estaba el instrumento. Para simular vapor de agua dentro del taller utilizamos un hervidor como emisor de vapor de agua, lo que genera una columna de vapor sobre el espejo del radiómetro lo que aseguraría que podemos tener mediciones a partir de esta columna. A pesar de tener una alta concentración de PWV en suspención de forma directa sobre el espejo del radiómetro el instrumento no mostraba ningún tipo de respuesta frente a este estimulo. Una vez limpio el espejo la medición de la señal proveniente de la columna de vapor de agua sigue sin ser detectada. El instrumento no era sensible a la columna de vapor de agua que le presentábamos; puesto esta columna era muy densa para el instrumento por que lo que rápidamente entraba en saturación e impedía entregar datos de forma significativa, por último podemos decir que el vapor de agua producido por medio de un hervidor no necesariamente esta en una forma de vibración que permita ser detectada por nuestro instrumento.

Por otra parte, pudimos observar que las mediciones que obtenia el radiómetro eran sensibles a movimientos, golpes, etc. afectando las mediciones de forma considerable, haciendo variar el nivel base de la banda dos de manera notoria. Este comportamiento poco usual para un instrumento diseñado para trabajar en condiciones extremas, motiva el hecho de indagar en el funcionamiento interno del radiómetro, ya que es un indicador de algún problema de conexión o interacción entre elementos que no deberían estar en contacto.

Después de varias pruebas infructuosas, se decide abrir el radiómetro, quitándole sus tapas laterales y exponiendo sus componentes internos.

Con el fin de poder abrir la caja del radiómetro y en vista de los delicados componentes que se encuentran en el interior se pide autorización a los encargados de de los laboratorios de front end de ALMA para poder utilizar sus herramientas y equipos de monitoreo electrónico para poder entender y confirmar el funcionamiento interno de los distintos componentes, sobre todo la parte IF donde detectamos el problema con la banda 2.

Una vez abierta la caja del radiómetro, pudimos ver sus componentes y el estado en el que se encontraban (figura 7.4), detectando de forma casi automática que uno

de los cables metálicos de la banda 2 no estaba conectado de forma adecuada, prácticamente estaba suelto y al momento de golpear al instrumento este cable oscilaba en su posición provocando que se transmitiera la señal de manera intermitente para luego quedar en una posición de contacto pero alcanzando un nivel de señal base diferente al original.

Utilizando las llaves de torque adecuadas se procedió a conectar de forma correcta el cable y verificar las conexiones de los demás cables y conectores que podrían estar afectos al mismo problema. El cable de la banda 2 además de no estar bien conectado presenta una soldadura defectuosa entre el cable y el conector, lo que afecta de manera considerable las perdidas de retorno y como se transmite la señal por este cable. Se aplica soldadura a esta sección con el fin de poder solucionar el problema de transmisión. Se verifica en este punto el funcionamiento de las bandas.

El cable finalmente a pesar de varias reparaciones no fue posible utilizarlo puesto que las perdidas son demasiado altas y hay problemas en cuanto a la transmisión de la señal por medio de ese cable. Se pudo conseguir un cable de reemplazo que cumplía con las especificaciones necesarias para ser instalado en el radiómetro. Con este nuevo cable el instrumento se encontraba listo para ser instalado.

Ya solucionado este problema volvemos a montar la caja del radiómetro y comprobamos como efectúa nuevamente la medición. La señal de las bandas se elevo de manera clara y pareciera que se encuentran las 3 bandas en funcionamiento, aunque aun no podemos estimar de manera clara si esta o no midiendo temperatura de brillo. Para hacer la comprobación real de como efectúa la medición fue necesario poner el radiómetro fuera del taller midiendo directamente al cielo. Con el único fin de poder tener acceso rápido y controlar voltajes o temperaturas el radiómetro esta completamente abierto sin ninguna de sus tapas laterales. Por fortuna esa tarde estaba parcialmente nublado y el viento movía las nubes de forma rápida por lo que el instrumento media zonas de cielo y zonas de nubes de manera alternada, y en vista que las nubes son solo vapor de agua podíamos ver la reacción del instrumento frente a condiciones climáticas locales. En pocas palabras el radiómetro estaba en funcionamiento.

Al día siguiente probamos el radiómetro cerrandolo completamente, colocamos

el material aislante y ubicamos las placas de acero en sus lugar, con todo esto el radiómetro quedo completamente aislado térmicamente del exterior. El radiómetro en esta condición siguió en funcionamiento de forma normal, pero presento una falla a los ~ 15 min dejando de funcionar. Quitamos las tapas del radiómetro y volvemos a encenderlo y funciona sin problemas por un largo periodo de tiempo. En esta configuración donde no tiene sus tapas laterales probamos si efectivamente esta midiendo temperatura de brillo del cielo, para estudiar esto conseguimos material absorvedor de microondas (RAM= radiation absorbent material) para fabricar un cono con este material; cuando presentamos este cono frente a la zona de entrada de radiación nos aseguramos que el instrumento esta mirando hacia un elemento con una temperatura ambiente y no entra radiación externa; de esta manera podemos caracterizar el ruido y la medida base de nuestro instrumento, en ese mismo sentido cuando sacamos el cono vemos la reacción del instrumento frente a una fuente de radiación considerable como la atmósfera. Al momento de hacer la diferencia entre mirar hacia un material que no deja el paso de la radiación y el cielo, significa que el instrumento es sensible a estas diferencias y esta midiendo.

A pesar de saber que el radiómetro estaba en funcionamiento y media la temperatura de brillo, este funcionamiento se daba solo cuando las tapas del radiómetro estaban retiradas. Al momento de colocar las tapas el radiómetro seguía en funcionamiento por un periodo de tiempo breve ($\sim 15-25$ min) para luego apagase de forma inesperada. Una de las posibilidades de este desperfecto apunta a condiciones térmicas al momento que el radiómetro queda aislado adentro la temperatura puede comenzar a subir y producir un corte en algún componente. Volvimos a desarmar el radiómetro y se detectó que una de las fuentes de poder que estaban dentro del radiómetro se calentaba demasiado y al aumentar la temperatura producía un corte de energía por seguridad. La fuente de poder estaba diseñada para funcionar a temperatura ambiente y en las condiciones que se dan dentro del radiómetro era evidente que esta fuente de poder no soportara y simplemente hiciera el corte de energía por seguridad. La solución implementada fue dar la mayor posibilidad de disipación térmica a esta fuente con el fin de no sufrir un nuevo corte de energía. Entonces se retiro la cubierta de la fuente de poder con tal de que soportara a condiciones de temperatura mayores y además el disipador de temperatura fue conectado a una placa de aluminio de mayor tamaño con el fin de que pudiera liberar energía de forma

eficiente. Bajo esta configuración se cerro el radiómetro y se dejo funcionando por un periodo ininterrumpido de aproximadamente 2 horas en las cuales no tuvo problema alguno y efectúo las mediciones sin ningún tipo de sobresalto.

Con el radiómetro funcionando lo único que restaba era subirlo al Llano de Chajnantor, en específico al sitio de operaciones de APEX. La elección de este sitio corresponde a poder dejar el radiómetro UdeC-2 conectado a la corriente de forma directa, acceso a internet y lo principal es que se encuentre cerca de un instrumento que sirva de calibrador como es el radiómetro de APEX; esta cercania es importante para poder estandarizar las mediciones al radiómetro de APEX.

El radiómetro UdeC-2 se dejo entonces midiendo en el sitio de APEX a 5105 msnm. a un costado de uno de los container de operaciones del observatorio, conectado a la corriente y a internet. La conección a internet fue hecha de tal manera que pudiéramos tener acceso al computador interno del radiómetro desde cualquier lugar. Por lo que fue posible seguir el comportamiento de la medición desde San Pedro de Atacama y obviamente desde Concepción. Al día siguiente fuimos a revisar el instrumento y verificar el funcionamiento. Se verificó la toma de datos, la conexión a internet, la temperatura interna, y si la fuente de poder que originaba el corte se encontraba en buen funcionamiento. Se modificó la forma en que guarda la coordenada temporal estableciendo el tiempo en unidades de UT. Sin ningún problema detectado se dejo el radiómetro midiendo.

F.2. Radiómetro UdeC-2: segunda visita.

Algún tiempo después, se accedió a los datos del radiómetro desde Concepción. Estos presentaban altas temperaturas de receptor (sobre 10000 K), lo que hace pensar que el radiómetro si bien esta funcionando hay algún factor que pueda estar influenciando estos valores. La temperatura interna del radiómetro varía de forma grosera en el transcurso del día, oscilando desde $\sim 30^{\circ}$ C hasta $\sim 100^{\circ}$ C. Estas temperaturas no son acordes a un buen funcionamiento de un instrumento que se encarga de medir temperaturas de brillo del cielo las cuales se encuentran muy por debajo de estas temperaturas.

Dentro de la caja del radiómetro hay elementos activos que al pasar corriente

por ellos se calientan para liberar energía, estos elementos son los amplificadores de bajo ruido (LNA), oscilador local (LO); todos estos elementos liberan energía calentándose y transfiriéndola a la placa de aluminio sobre la cual se encuentran anclados. El traspaso continuo de temperatura hace que la placa se caliente a $\sim 100^{\circ}C$ lo que lleva a ruido dentro del instrumento y además puede ocasionar problemas con el funcionamiento de los componentes por la alta temperatura a la cual están funcionando. La solución práctica para este problema es ver como poder extraer esta temperatura desde el interior de radiómetro o directamente desde la placa para que los componentes principales no sufran fallas. El desafío es encontrar la manera de enfriar el interior del radiómetro sin intervenir los componentes en el interior de la caja al mismo tiempo que la energía se pueda obtener desde el radiómetro mismo sin producir un gran consumo.

Una vez en San Pedro de Atacama, visitamos las oficinas de APEX en Sequitor, y fuimos informados de las continuas apariciones y desapariciones de nuestro radiómetro producto de la nieve, la cual en varias oportunidades logro cubrirlo. En algunas de estas nevazones el radiómetro se apago y no volvió a encenderse de manera automática, por lo que fue reiniciado de manera forzada por personal del observatorio. Por lo tanto tenemos dos problemas que habría que solucionar: las oscilaciones en temperatura y mejorar la capacidad de resistir a apagones o cortes de energía producto de la nieve. Las soluciones encontradas fueron:

• Comprar un mecanismo de enfriamiento que permitiera extraer temperatura desde la placa interna del radiómetro. El equipo de enfriamiento que se escogió fue CoolerMaster WaterCooling Seidon 120V (características técnicas del producto ver apéndice E) ver figura F.1. Este equipo permite extraer hasta 50°, su funcionamiento se basa en la extracción de temperatura por medio del bombeo continuo de agua a la placa disipadora (que esta en contacto con la placa del radiómetro donde los componentes que se calientan están adosados), desde donde el liquido se dirige a un ventilador (por medio de tubos de conexión) que por medio de un flujo de aire constante logra disminuir la temperatura del líquido para que este retorne a la placa a una temperatura menor y por medio de la repetición de este proceso se logre la liberación de temperatura desde la placa inferior del radiómetro. La otra parte positiva que tiene este mecanismo es que además de extraer el exceso de temperatura desde el

interior del radiómetro, el ventilador que posee hace que el aire al interior de la estructura mayor del radiómetro circule, lo que implica que hay un movimiento continuo de aire, desplazando excesos de temperaturas desde los componentes más calientes a zonas más frías o hacia los pilares del radiómetro desde donde se puede liberar este exceso hacia el exterior.



Figura F.1: Imagen del equipo de enfriamiento que fue comprado para funcionar al interior del radiómetro. Su funcionamiento se basa en la extracción de temperatura por medio del bombeo continuo de agua a la placa disipadora desde donde el líquido se dirige a un ventilador que por medio de un flujo de aire baja su temperatura, para retornar a la placa a una temperatura menor.

Para el problema del reinicio del radiómetro en caso de cortes de energía. La solución planteada fue la compra de un equipo UPS que pudiera mantener la energía del radiómetro en caso de cortes por un periodo de tiempo considerable para que vuelva la energía y seguir en funcionamiento y midiendo de manera estable a pesar de la falta de energía.

Se logro instalar de manera satisfactoria el equipo de enfriamiento, el cual estando en funcionamiento llego a su máxima capacidad de retiro de temperatura, logrando bajar las temperaturas medidas con anterioridad en $\sim 50^{\circ}C$. El radiómetro funciona ahora con oscilaciones de temperatura que van desde los $\sim 0^{\circ}$ a los $\sim 50^{\circ}$. Si bien

esto puede parecer excesivo de todas maneras, las temperaturas en las cuales se encuentra oscilando son adecuadas para el correcto funcionamiento del instrumento. La UPS no logro instalarse por problemas en cuanto al volumen que ocupa y hubieron problemas en cuanto a donde conectar los distintos cables sin intervenir los cables ni conexiones ya instalados.

El equipo se dejo midiendo, continua con las 3 bandas en funcionamiento y un sistema de enfriamiento que hace su trabajo a la perfección.

Los datos de este radiómetro no han sido procesados ni utilizados en este trabajo en vista de las intervenciones que hemos realizado y debido principalmente a que el periodo de calibración bajo el cual podemos tener seguridad que los datos extraídos desde el radiómetro son comparables con los datos del radiómetro de APEX, es de 6 meses por lo menos. Con estas consideraciones, aun quedan intervenciones que realizar y pruebas que hacer con el fin de garantizar la integridad de las mediciones y que el equipo quede en condiciones optimas para una estimación adecuada de la temperatura de brillo y su posterior transformación a PWV.