



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

ESTIMACIÓN DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE
A TRAVÉS DE LOS MÉTODOS DE ESPECTROSCOPIA
FTIR Y GPS EN EL CENTRO DE MÉXICO

TESIS
PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
ALAIN JAIR GARCÍA ZUBER

TUTOR PRINCIPAL
DR. WOLFGANG STREMME
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

COMITÉ TUTOR
DR. MICHEL GRUTTER DE LA MORA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

DR. DAVID K. ADAMS
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, JULIO DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Miche Grutter de la Mora

Secretario: Dr. Wolfgang Stremme

Vocal: Dr. David Adams

1er. Suplente: Dra. Caludia Rivera

2o. Suplente: Dr. Robin André Campion

La tesis se realizó en Centro de Ciencias de la Atmósfera.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Wolfgang Stremme
Centro de Ciencias de la Atmósfera

*They say I got ta learn, but nobody's here to teach me.
Coolio.*

Reconocimientos

Deseo agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para realizar este trabajo.

Al Dr. Michel Grutter, al Dr. Alejandro Bezanilla y en especial al Dr. Wolfgang Stremme por su tutela, apoyo y paciencia durante estos dos años.

Al Dr. David Adams por su aportación de los datos de H₂O obtenidos por el método GPS y por su disposición al momento de aclarar dudas.

Al Dr. Cesar Guarín por su aportación de los datos de H₂O en el región MIR1 y la ayuda con los scripts para su interpretación.

Al Dr. Jorge Baylón por su paciencia al enseñarme la programación en Python y por su contribución con los valores de H₂O obtenidos en la región NIR.

A la Dra. Claudia Rivera por sus correcciones y observaciones.

Al Dr. Robin André Campion por sus correcciones y observaciones.

A mis compañero de grupo por su paciencia y apoyo en el laboratorio.

Al Ing. Alfredo Rodríguez y al Ing. Miguel Robles por su esfuerzo y apoyo técnico en el laboratorio.

A mis compañero del posgrado por su ayuda, apoyo y paciencia.

A mis profesores de la Universidad de Colima por motivarme a buscar nuevas oportunidades.

A mis amigos de Manzanillo, que los he extrañado durante estos años.

A mis padres y hermanos.

Al compita Joel por su ayuda con las matemáticas y apoyo en una ciudad completamente desconocida.

A Cooper.

A Jocelyn por su apoyo durante todos estos años.

Y gracias a ti lector, por tomar tu tiempo para leer este trabajo.

A TODOS USTEDES, MUCHAS GRACIAS.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Alain Jair García Zuber. Ciudad Universitaria, CDMX, Julio de 2018

Resumen

El ciclo hidrológicos y el vapor de agua precipitable (PWV por sus siglas en inglés) juegan un papel importante en el balance radiativo. En el presente estudio se describen dos métodos a través de los cuales se puede estimar la concentración de PWV en la atmósfera: Espectroscopia Infrarroja por la Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés). Se realiza una descripción de los trabajos más relevantes en la estimación de PWV a través de ambos métodos, incluyendo trabajos internacionales y estudio llevado a cabo en el país y en la Ciudad de México. Además, se describen los instrumentos y métodos de recuperación por parte de ambos equipos. El objetivo de este trabajo fue recuperar series temporales de vapor de agua para describir las variaciones anuales y mensuales (estacionales) en el observatorio de gran altitud Alzomoni (4 000 m.s.n.m.). Se obtuvieron valores de PWV en tres productos espectrales de FTIR (NIR, MIR1 y MIR2) con dos opciones de perfil “a priori”: WACMM (NIR, MIR1 y MIR2) y radiosondeo (NIRR, MIR1R y MIR2R). Los valores obtenidos se correlacionaron con los valores de PWV por el método GPS con el fin de encontrar consistencias en entre ambas series, en escalas temporales de días y horas. Los resultados muestran que los mejores ajustes temporales entre ambas técnicas ocurrieron en las coincidencias en promedios por hora. Las recuperaciones utilizando WACCM como a priori mostraron el mejor ajuste en la correlación NIR-GPS ($R^2=0.963$), aunque la menor diferencia se registró en la relación MIR1-GPS (3.17%), mientras que la correlación MIR2-NIR mostró el mejor ajuste ($R^2=0.987$) y la menor diferencia (-4.07%) entre las regiones espectrales. Los resultados obtenidos en las recuperaciones con radiosondeo como a priori muestran el mejor ajuste entre MIR2-GPS ($R^2=0.964$) con una diferencia de 6.95%, mientras que la relación NIR-MIR2 mostró el mejor ajuste ($R^2=0.973$) entre las regiones espectrales con una diferencia de -3.78%. Con respecto al uso del perfil a priori, los resultados de WACCM son más consistentes con los de GPS, mientras que los valores recuperados por radiosondeos son consistentes sólo con valores pequeños de PWV. Ambas técnicas parecen describir los ciclos anuales y estacionales del vapor de agua y ambas pueden ser un complemento para obtener series de tiempo completas.

Índice general

Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XXIII
1. Introducción	1
1.1. El ciclo hidrológico	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Motivación	3
1.4. Antecedentes	3
1.4.1. Medición de vapor de agua con percepción remota	3
1.4.1.1. FTIR	3
1.4.1.2. GPS	5
1.4.2. Percepción remota del vapor de agua en México	7
1.4.2.1. FTIR	7
1.4.2.2. GPS	9
1.5. Planteamiento del problema	9
1.6. Contribuciones	10
1.7. Estructura de la tesis	10
2. Marco teórico	11
2.1. Descripción de los métodos	11
2.1.1. Método: Espectroscopia FTIR	11
2.1.1.1. Arreglo instrumental	11
2.1.1.2. Espectrómetro Bruker 120/5HR	12
2.1.1.3. Modelo directo o ecuación de transferencia radiativa	14
2.1.1.4. Espectro sintético	16
2.1.1.5. Algoritmo de recuperación	16
2.1.1.6. Análisis del error	20
2.1.2. Método GPS	23
2.1.2.1. Estimación del atraso en la señal a través de la atmósfera	23
2.1.2.2. Fuentes de error en las estimaciones de PWV por GPS	28
2.1.2.3. Software de procesamiento: GIPSY	29

3. Diseño del experimento	31
3.1. Recuperación diferente a priori: WACCM y Radiosondeo	31
3.2. Correlaciones temporales	33
3.2.1. Tratamiento a los valores de PWV	34
3.2.2. Diferencias temporales	34
4. Resultados	37
4.1. Recuperación con WACCM: variación anual	37
4.1.1. Variación anual GPS	39
4.1.2. Variación anual NIR	39
4.1.3. Variación anual MIR1	39
4.1.4. Variación anual MIR2	41
4.2. Recuperación con WACCM: variación mensual	41
4.2.1. Variación mensual GPS	41
4.2.2. Variación mensual NIR	44
4.2.3. Variación mensual MIR1	49
4.2.4. Variación mensual MIR2	54
4.3. Correlaciones por día	57
4.3.1. Promedio diario	59
4.3.1.1. Correlación promedio diario NIR-GPS	60
4.3.1.2. Correlación promedio diario MIR1-GPS	60
4.3.1.3. Correlación promedio diario MIR2-GPS	62
4.3.1.4. Correlación promedio diario MIR2-NIR	62
4.3.1.5. Correlación promedio diario MIR2-MIR1	65
4.3.1.6. Correlación promedio diario NIR-MIR1	65
4.4. Correlaciones por hora	67
4.4.1. Promedio por hora	67
4.4.1.1. Correlación promedio por hora NIR-GPS	68
4.4.1.2. Correlación promedio por hora MIR1-GPS	68
4.4.1.3. Correlación promedios por hora MIR2-GPS	68
4.4.1.4. Correlación promedios por hora MIR2-NIR	72
4.4.1.5. Correlación promedios por hora MIR2-MIR1	72
4.4.1.6. Correlación promedios por hora NIR-MIR1	74
4.5. Recuperación con radiosondeo: variación anual	74
4.5.1. Variación anual NIRR	78
4.5.2. Variación anual MIR1R	78
4.5.3. Variación anual MIR2R	79
4.6. Recuperación con radiosondeo: variación mensual	79
4.6.1. Variación mensual NIRR	79
4.6.2. Variación mensual MIR1R	83
4.6.3. Variación mensual MIR2R	89
4.7. Correlaciones por día	91
4.7.1. Promedio diario	91

4.7.1.1.	Correlación promedio diario NIRR-GPS	93
4.7.1.2.	Correlación promedio diario MIR1R-GPS	93
4.7.1.3.	Correlación promedios diario MIR2R-GPS	96
4.7.1.4.	Correlación promedio diario NIRR-MIR1R	96
4.7.1.5.	Correlación promedio diario NIRR-MIR2R	96
4.7.1.6.	Correlación promedio diario MIR2R-MIR1R	98
4.8.	Correlaciones por hora	98
4.8.1.	Promedio por hora	101
4.8.1.1.	Correlación promedio por hora NIRR-GPS	101
4.8.1.2.	Correlación promedios por hora MIR1R-GPS	101
4.8.1.3.	Correlación promedio por hora MIR2R-GPS	103
4.8.1.4.	Correlación promedios por hora NIRR-MIR1R	103
4.8.1.5.	Correlación promedios por hora NIRR-MIR2R	106
4.8.1.6.	Correlación promedio por hora MIR2R-MIR1R	106
4.9.	Comparación entre regiones espectrales	109
4.10.	Comparación entre perfiles a priori	110
4.11.	Comparación entre técnicas	111
5.	Conclusiones	117
	Bibliografía	119

Índice de figuras

2.1.	a) Rastreador solar. b) Configuración de espejos (Gisi et al. (2011) citado por Baylon et al. (2017)). c) Interferómetro Michelson (Griffiths and De Haseth (2007) citado por Baylon et al. (2017)).	12
2.2.	a) Observatorio atmosférico Alzomoni. b) Espectroscopio Bruker 120/5 HR. c) Sistema de enfriamiento por nitrógeno líquido.	13
2.3.	Descripción gráfica la ecuación de transferencia radiativa aplicada en la atmósfera. Se puede observar la relación que existe entre la intensidad inicial y final a través del paso óptico, trayecto en el cual se encuentran las moléculas absorbentes.	15
2.4.	Esquema en el cual se muestra la recuperación de un perfil de vapor de agua (x) a partir de la ecuación de transferencia radiativa (F) y un perfil a priori, p representa parámetros atmosféricos, por ejemplo la temperatura.	16
2.5.	Averaging kernel utilizado en la recuperación de vapor de agua, utilizando la razón de mezcla (VMR) valores de WACCM. Los valores de la paleta indican la sensibilidad en el perfil verdadero, mientras mayor sea el valor mayor es la sensibilidad para detectar una molécula de H ₂ O a cierta altura.	19
2.6.	Averaging kernel utilizado en la recuperación de vapor de agua, utilizando la razón de mezcla (VMR) valores de radiosondeo. Los valores de la paleta indican la sensibilidad en el perfil verdadero, mientras mayor sea el valor mayor es la sensibilidad para detectar una molécula de H ₂ O a cierta altura.	19
2.7.	Representación gráfica del atraso en la señal electromagnética al entrar en contacto en la atmósfera.	24
2.8.	Esquema que resumen la estimación del vapor de agua precipitable a través del método GPS.	27
2.9.	Esquema que resume la derivación de la cantidad de PWV a través del método GPS. Modificado de Wang et al. (2013).	27
3.1.	a) Estrategia de recuperación con perfil de razón de mezcla de H ₂ O derivado de WACMM. b) Estrategia de recuperación con perfil de razón de mezcla de H ₂ O derivado de radiosondeos.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

4.1. Series temporales registradas por el método GPS y las tres regiones espectrales NIR, MIR1 Y MIR2.	38
4.2. Series temporales registradas por el método GPS. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.	40
4.3. Series temporales registradas por el método FTIR región espectral NIR. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.	40
4.4. Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR1. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.	41
4.5. Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR2. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.	42
4.6. Promedios mensuales de PWV registrados por el método GPS durante agosto 2014 hasta diciembre 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	43
4.7. Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2014. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	43
4.8. Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2015. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	44
4.9. Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2016. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	45
4.10. Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	45
4.11. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante mayo 2012 hasta diciembre de 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	46
4.12. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	47
4.13. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	47
4.14. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	48

4.15. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	48
4.16. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	49
4.17. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	50
4.18. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante marzo 2012 hasta diciembre de 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	50
4.19. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	51
4.20. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	51
4.21. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	52
4.22. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	53
4.23. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	53
4.24. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	54
4.25. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante octubre de 2012 hasta diciembre de 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	55
4.26. Promedio mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	55
4.27. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	56
4.28. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

4.29. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	57
4.30. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	58
4.31. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	58
4.32. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIR y GPS.	60
4.33. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIR y GPS.	61
4.34. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR1 y GPS.	61
4.35. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR1 y GPS.	62
4.36. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2 y GPS.	63
4.37. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2 y GPS.	63
4.38. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2 y NIR.	64
4.39. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2 y NIR.	64
4.40. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2 y MIR1.	65
4.41. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2 y MIR1.	66
4.42. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIR y MIR1.	66
4.43. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIR y MIR1.	67
4.44. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por NIR y GPS.	69
4.45. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por NIR y GPS.	69
4.46. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR1 y GPS.	70
4.47. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR1 y GPS.	70
4.48. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2 y GPS.	71

4.49. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2 y GPS.	71
4.50. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2 y NIR.	72
4.51. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2 y NIR.	73
4.52. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2 y MIR1.	73
4.53. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2 y MIR1.	74
4.54. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por NIR y MIR1.	75
4.55. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por NIR y MIR1.	75
4.56. Series temporales registradas por el método GPS y las tres regiones espectrales NIR, MIR1 Y MIR2, utilizando valores de radiosondeo como a priori en el caso de FTIR	76
4.57. Series temporales registradas por el método FTIR región espectral NIRR. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.	78
4.58. Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR1. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.	79
4.59. Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR2. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.	80
4.60. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante mayo 2012 a diciembre 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	81
4.61. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	81
4.62. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	82
4.63. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	82
4.64. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

4.65. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y al error estándar.	84
4.66. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	84
4.67. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante abrir 2012 a diciembre 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	85
4.68. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	85
4.69. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	86
4.70. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	87
4.71. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	87
4.72. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	88
4.73. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	88
4.74. Promedio mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2R durante enero 2013 a diciembre 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	89
4.75. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	90
4.76. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	90
4.77. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	91

4.78. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.	92
4.79. Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2017. La línea discontinua y las barras hacen referencia a el promedio y error estándar.	92
4.80. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y GPS.	94
4.81. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y GPS.	94
4.82. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR1R y GPS.	95
4.83. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR1R y GPS.	95
4.84. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2R y GPS.	96
4.85. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2R y GPS.	97
4.86. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.	97
4.87. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.	98
4.88. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.	99
4.89. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.	99
4.90. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.	100
4.91. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.	100
4.92. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por NIRR y GPS.	102
4.93. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por NIRR y GPS.	102
4.94. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR1R y GPS.	103
4.95. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR1R y GPS.	104
4.96. Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2R y GPS.	104
4.97. Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2R y GPS.	105

ÍNDICE DE FIGURAS

4.98. Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.	105
4.99. Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.	106
4.100 Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.	107
4.101 Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.	107
4.102 Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.	108
4.103 Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.	108
4.104 Promedio de todos los perfiles a priori en la región MIR2.	110
4.105 Promedio de todos los perfiles recuperados en la región MIR2.	111
4.106 Promedio de todos los perfiles a priori en la región MIR2 antes de las 10 horas.	112
4.107 Promedio de todos los perfiles recuperados en la región MIR2 antes de las 10 horas.	112
4.108 Diferencia de todos los perfiles a priori y recuperados en la región MIR2.	113
4.109 Diferencia de todos los perfiles a priori y recuperados en la región MIR2 antes de las 10 horas.	113

Índice de tablas

3.1. Diseño experimental. Muestra las regiones espectrales, gases de inter-ferencia, las bases de datos y parámetros atmosféricos de los perfiles a priori.	32
4.1. Valores de los estadísticos aplicados sobre las series temporales. Los valores de GPS aquí registrados incluyen los días con nubosidad.	38
4.2. Resultados anules del sesgo de cielo claro a partir de $B = 1 - \frac{PWV_{FTIR}}{PWV_{GPS}}$	39
4.3. Resultado de las correlaciones de los promedios por día entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.	59
4.4. Resultado de las correlaciones de los promedios por hora entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.	68
4.5. Valores de los estadísticos aplicados sobre las series temporales. Los valores de GPS aquí registrados incluyen los días con nubosidad.	77
4.6. Resultados estimados del sesgo de cielo claro a través de $B = 1 - \frac{PWV_{FTIR}}{PWV_{GPS}}$	77
4.7. Resultado de las correlaciones de los promedios por día entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.	93
4.8. Resultado de las correlaciones de los promedios por hora entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.	101

Introducción

1.1. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico juega un papel muy importante en la vida de la Tierra, debido a que el agua se encuentra en continuo movimiento entre las diferentes esferas: hidrosfera, atmósfera, geosfera y biosfera. Se tiene estimado que el 97 % del total de agua disponible se encuentra en los océanos, cerca del 2 % en los casquetes polares y el 1 % se divide entre los lagos, aguas subterráneas y la atmósfera (Tarbuck et al., 2013).

Los intercambios de calor entre las diferentes esferas es un proceso muy importante, debido a que el vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante y más eficiente en el calentamiento. Su presencia provoca cambios importantes en el estado del tiempo y el clima, debido a las alteraciones en el efecto invernadero (Ayllón, 2003; Cess, 2005; Soden et al., 2005).

La cantidad de vapor de agua en la atmósfera es muy variable en espacio y tiempo, además da lugar a numerosos fenómenos atmosféricos (Ayllón, 2003). Sus mayores concentraciones se ubican en las zonas tropicales marítimas y decrece exponencialmente con la altura, debido a que la presión de vapor de saturación depende fuertemente de la temperatura. Las pocas moléculas en la altura tienen un papel importante al interactuar con la radiación (Hu et al., 2000; Soden et al., 2005).

En la actualidad existe la incertidumbre acerca de la posible alteración en el ciclo hidrológico debido al aumento de la temperatura y al cambio climático. Soden et al. (2005) reportan la importancia del vapor de agua atmosférico en el cambio climático, debido a que una atmósfera más caliente tiene la capacidad de contener una cantidad mayor de vapor de agua y así amplificar el calentamiento a través del efecto invernadero (Ayllón, 2003; Cess, 2005). Debido a que el vapor de agua no se distribuye de forma homogénea en la Tierra y la falta de mediciones a largo plazo, hacen aún más difícil medir empíricamente su posible evolución (Uriarte et al., 2009), además encontrar una

1. INTRODUCCIÓN

señal humana que indique un cambio es aún una tarea difícil de resolver (Hulme, 1995). Oki and Kanae (2006) señalan la importancia de considerar los impactos de la intervención humana en el ciclo hidrológico a escala global.

Tomando en cuenta la relación Clasius-Clapeyron, un aumento en la temperatura atmosférica en el sistema vapor de agua-gota de nube-aire seco, ocasionaría un aumento exponencial en la presión de vapor de agua, debido al aumento de la temperatura. Por cada grado K de aumento en la temperatura global, resultará en un aumento del 7% en la presión de vapor de saturación (Romps, 2014).

Los primeros registros acerca de las mediciones de vapor de agua a escala global fueron llevados a cabo por el sensor Special Sensor Microwavw Imager (SSM/I), obteniendo así los primeros datos de la columna vertical integrada del vapor de agua en 1987 (Wentz, 1997; Wentz and Schabel, 2000). Las observaciones indican un aumento del vapor de agua estratosférico de 20-50% entre 1960 y 1990 (Joshi et al., 2006), teniendo un incremento del 1% anual (Kley, 2000; Oltmans and Hofmann, 1995). En otros estudios, se ha tomado en cuenta el aporte de la evapotranspiración por parte de la tierra de cultivo y la tierra de pastoreo permanente, cuyo aporte es de un tercio de la evaporación terrestre (cerca de 7 600 km³/año y 14 400 km³/año, respectivamente)(Oki and Kanae, 2006).

A pesar que la información derivada de satélites posee una alta precisión estadística (Wentz and Schabel, 2000), la interrelación entre los productos obtenidos de diferentes sensores puede llevar a una mayor comprensión de la variabilidad y fiabilidad de los parámetros a determinar.

Lo anterior ha llevado a los investigadores a desarrollar nuevos métodos para estudiar la variabilidad del vapor de agua presente en la atmósfera. Una forma de hacerlo es a través de la estimación del vapor de agua precipitable (Precipitable Water Vapor: PWV), el cual se define como la cantidad total de agua líquida resultante al condensar todo el vapor de agua en una columna desde la superficie hasta la parte superior de la atmósfera (Coster et al., 1997).

Como se ha mencionado anteriormente el vapor de agua tiene un papel importante en la vida de la Tierra, por lo tanto en el presente estudio se describen y relacionan los valores de vapor de agua presente en la atmósfera a través de los métodos de espectroscopia FTIR de absorción solar y GPS, como una propuesta al estudio de la variabilidad de este gas en el centro de México.

1.2. Objetivo

El presente estudio tiene por objetivos:

- * Obtener series temporales de las estimaciones de vapor de agua por el método FTIR y GPS.
- * Interrelacionar los promedios obtenidos y entre ambos métodos y productos espectrales.
- * Describir la variabilidad anual, estacional y diurno del PWV a través de promedios mensuales, diarios y horario.

1.3. Motivación

El presente estudio pretende aportar una mayor comprensión en la variabilidad espacio-temporal del vapor de agua en la atmósfera. La información obtenida del vapor de agua precipitable a través de las mediciones realizadas por ambos instrumentos puede ser utilizada en el pronóstico del tiempo y contribuir al estudio del clima, ya que los valores estimados se caracterizan por poseer una buena precisión y calidad.

1.4. Antecedentes

A continuación se describen los trabajos que motivaron a realizar el presente estudio. Se describen los trabajos internacionales, seguido de los estudios nacionales por parte de ambos métodos. Se exponen los estudios más recientes con el objetivo de tener una visión más amplia acerca de estos.

1.4.1. Medición de vapor de agua con percepción remota

1.4.1.1. FTIR

Entre los trabajos internacionales se encuentra:

[Schneider et al. \(2006\)](#) presentan el nuevo método logarítmico para la recuperación de vapor de agua, al mismo tiempo es comparado con el método lineal. Se comparan las estimaciones obtenidas por FTIR con las de otros sensores, describiendo sus deficiencias

1. INTRODUCCIÓN

en tres alturas diferentes: 6-8 km (radiosondeos), 8-10 km (LIDAR, por sus siglas en inglés) y 15 km (MWR, por sus siglas en inglés). Encontrando que el método logarítmico produce errores debido a parámetros atmosféricos como la temperatura y que puede corregirse recuperando y ajustando su perfil. Además, las deficiencias en radiosondeos se deben a la falta de caracterización de los errores en este método, mientras que en el caso de LIDAR a la rápida extinción del pulso en una atmósfera con precipitación y nubosidad. En MWR el error es atribuido al tipo de calibración.

Schneider et al. (2010) interrelacionan los valores de PWV en una serie temporal de cuatro años a través de cinco técnicas diferentes: FTIR, Cimel, MFRSR, GPS y radiosondeos (Vaisala RS92). El objetivo fue el de evaluar la calidad de los datos obtenidos por medio de estos sensores, obteniendo que la técnica más precisa fue FTIR con un error del 1 %, además de no mostrar relación con la geometría de observación. En el GPS se encontró un límite de detección de PVW ≈ 3.5 mm, estimando un error de aproximadamente 10 %, por debajo del límite de detección el error es del 20 %. Por parte de cimel y MFRSR los cambios abruptos en los ciclos anuales son resultado de una fuerte sensibilidad debido a los procesos de calibración. Además, al comparar los radiosondeos y FTIR se obtuvo un error del 15 % debido a que ambas técnicas detectan diferentes masas de aire.

Vogelmann et al. (2011) correlacionan una serie de tres años de PWV en la región del infrarrojo medio (MIR, por sus siglas en inglés), a través de FTIR y DIAL (por sus sigla en inglés), resaltando las estimaciones por parte de DIAL en la troposfera libre con el objetivo de validar los datos a través de los valores obtenidos por FTIR. Obteniendo un buen resultado en la interrelación entre los dos instrumentos tomando en cuenta que ambos poseen diferencias en la región espectral (microventanas), parámetros de línea espectroscópica y algoritmo de recuperación, concluyendo que FTIR es una buena herramienta en la validación de la precisión de DIAL y en la calidad de los valores estimados del mismo.

Buehler et al. (2012) comparan los valores de PWV obtenidos por cinco sensores diferentes y métodos de recuperación: radiosondeos, GPS, FTIR, MWR KIMRA y radiómetros satelital AMSU-B, además se compara el reanálisis del modelo ERA-Interim, con el objetivo de caracterizar las diferencias sistemáticas y aleatorias, estudiar el impacto de la integración del PWV de los límites de altitudes más bajas y el error de representatividad. Obteniendo que los conjuntos de datos registraron una estimación razonable entre los diferentes sensores, con una diferencia sistemática de $\pm 1 \text{ kg m}^{-2}$. Además, la integración del PWV en bajas altitudes puede introducir un sesgo importante que puede ser corregido a través de un factor que depende linealmente de la altitud y es determinado a través de los datos obtenidos por radiosondeos.

Vogelmann et al. (2015) describen la variabilidad del vapor de agua en la troposfera libre (3000 m.s.n.m) a través de los métodos FTIR y DIAL tomando en cuenta diversos

criterios en la coincidencia espacial y temporal, resaltar la importancia de la obtención de perfiles por parte de DIAL. Se obtuvo que en un intervalo de tiempo de 20 minutos la variabilidad espacial se vuelve significativa para una distancia de más de 2 km en la temporada seca y no es sensible en la temporada de invierno. En la variabilidad temporal, al tomar un intervalo de coincidencia de 5 minutos se obtiene una variabilidad de 0.05 mm y esta aumenta a 0.5 mm en un intervalo de 15 horas. Con respecto a los perfiles verticales obtenidos en un día, estos lograron registrar la dinámica donde el transporte a larga distancia y la advección pueden exceder al impacto de la convención local en una altura entre 3 y 5 km.

Tsidu et al. (2015) evalúan la calidad de los datos obtenidos por cuatro sensores: FTIR, GPS, radiosondeos y el reanálisis ERA-Interim sobre Etiopia a una altura de 2443 m.s.n.m. Obteniendo que los valores más altos de PWV fueron registrados por el GPS, seguido de FTIR, radiosondeos y en último lugar el reanálisis ERA-Interim. Las observaciones de FTIR registraron una incertidumbre de 0.5 mm a partir de los errores estadísticos y sistemáticos. El GPS registró un error de 4 mm contribuido al atraso total cenital (TZD, por sus siglas en inglés), este error es atribuido a una incertidumbre de 1.3 K en la temperatura y 1.65 hPa en la presión. Los radiosondeos un error de 0.51 ± 0.18 mm atribuido al sesgo seco debido a la falta de sensibilidad por parte del sensor de humedad relativa al entrar en contacto directo con la radiación solar. Con respecto al reanálisis ERA-Interim se encontraron diferencias en magnitud y en la señal del sesgo con respecto a los otros métodos, los anterior es el resultado de la habilidad del modelo para estimar la cantidad de PWV, ya que sufre variaciones en regiones, estaciones y hora del día.

Semenov et al. (2015) comparan dos series de tiempo de cuatro años de PWV, a través del método FTIR y radiosondeos en St. Petersburg State University (Peterhof), sitio que se caracteriza por su baja altura (36 m.s.n.m.) con respecto al nivel medio del mar. Obteniendo una buena correlación en intervalos temporales de 1 y 0.5 horas, pero con una diferencia en los valores de alrededor del 20 %. Resultado similar se obtuvo al comparar los promedio mensuales, sólo que el número de coincidencias es menor. Se concluye que pequeños intervalos temporales no es significado de una buena agregación o número mayor de coincidencias, resultado de la variabilidad espacio-temporal natural del vapor de agua.

1.4.1.2. GPS

Koulali et al. (2012) describen la variabilidad de PWV, el transporte de humedad y la precipitación en Islas Canarias, al mismo tiempo comparan estos valores con los obtenidos por radiosondeos, el producto satelital GPCP (Global Precipitation Climatology Project) y el reanálisis II de NCEP (National Center for Environmental Prediction). Encontrando que los valores de precipitación tiene una correlación negativa con los

1. INTRODUCCIÓN

valores de PWV derivados del GPS (Global Positioning System), pero una correlación positiva con promedios mensuales, obteniendo un resultado similar para el caso de los radiosondeos.

Chen and Li (2013) relacionan los datos del ZTD (Zenith Total Delay) derivados del método GPS con la radiación incidente sobre la superficie y la temperatura superficial, obteniendo que el valor de PWV es más alto en días con poca radiación y bajo en días de alta radiación. Además de obtener una relación negativa con la temperatura, en la cual al alcanzar el máximo en la temperatura, el PWV es mínimo.

Kumar et al. (2013) comparan los datos de PWV obtenidos por el método GPS con los registrados por AERONET (Aerosol Robotic NeTwork) y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), además de relacionar estos datos con valores de temperatura superficial y precipitación, obteniendo una buena correlación en promedios por hora entre GPS y AERONET, una mala correlación entre promedios diarios de PWV y temperatura superficial, y una buena correlación de los promedios mensuales entre PWV y precipitación.

Wang et al. (2013) utilizan los valores de PWV y la transformada rápida de Fourier para identificar los picos máximos durante dos otoños diferentes, encontrando que un ciclo estacional y un ciclo de 22.5 días.

Akilan et al. (2015) describen la variabilidad del atraso total cenital ZTD y su relación con eventos de precipitación en una zona tropical en el Sur de la India, validando los datos obtenidos a través de un modelo numérico climatológico (NWM, por sus siglas en inglés) y obteniendo una buena correlación entre ambas series de datos.

Liang et al. (2015) comparan los valores de PWV obtenidos por GPS con los registrados por radiosondeos, radiómetros de vapor de agua WVR (Water Vapor Radiometers) y el modelo de predicción GRAPES-RAFS. Obteniendo un error de 2 y 1.8 mm entre GPS-radiosondeos y GPS-WRS, respectivamente, además de registrar problemas de heterogeneidad y humedad relativa en el caso del modelo de predicción GRAPES-RAFS.

Ningombam et al. (2016) correlacionaron los valores de PWV obtenido por GPS y MODIS-MIR, tomando en cuenta la temperatura y presión superficial en un área de estudio ubicada a 4500 m.s.n.m. Mostrando que los valores de MODIS se ajustan en 85 % a los de GPS, la correlación muestra que el sesgo y el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) son grandes durante el verano y MODIS-NIR suele registrar valores subestimados durante el verano, además los valores de PWV están bien correlacionados con la precipitación total y la temperatura del aire.

Suparta and Rahman (2016) describen la variabilidad espacio temporal de los valores de PWV y su relación con variables meteorológicas (temperatura superficial, hu-

medad relativa y precipitaciones), enfocando su estudio hacia eventos de inundación y generando mapas a través de dos métodos de interpolación, de estos últimos se obtuvo que la interpolación plate spline es mejor al interpolar los valores de PWV y humedad relativa, mientras que la interpolación Kriging es mejor interpolando la temperatura.

[Gui et al. \(2017\)](#) comparan los valores de PWV obtenido por GPS, radiosondeos, MODIS-MIR-clear y AERONET, en una serie temporal de cuatro años. Obteniendo que al comparar GPS con radiosondeos, estos últimos muestran una sobrestimación en los valores de PWV, un resultado similar se obtuvo para el caso de MODIS-NIR-Clear y una subestimación por parte de AERONET.

[Adams et al. \(2015\)](#) quienes demuestran que los datos obtenidos a través de GPS para determinar el contenido de vapor de agua precipitable (PWV), es una buena herramienta para el estudio de los procesos que dan origen a la convección profunda en los trópicos.

En un estudio consecutivo [Adams et al. \(2017\)](#) describen la formación de eventos convectivos en estación seca y lluviosa en el Amazonas, a partir de datos obtenidos de la red Amazon Dense GNSS Meteorological Network.

1.4.2. Percepción remota del vapor de agua en México

1.4.2.1. FTIR

[Flores \(2003\)](#) lleva a cabo mediciones de las concentraciones de gases contaminantes en la atmósfera en la ciudad de México, durante los años 2002 y 2003, con el fin de operar la técnica FTIR y DOAS (espectroscopia óptica de absorción diferencial; Differential Optical Absorption System). Obteniendo la variabilidad en las concentraciones de O₃, CO, CH₄, SO₂, HCHO, N₂O y NO₂.

[Grutter \(2003\)](#) realiza mediciones de la concentración de vapor de agua en Ciudad de México, estos resultados obtenidos fueron comparados con los obtenidos de un sensor de humedad relativa. Además de obtener concentraciones de otros gases de efecto invernadero de importancia como el CO, CO₂, CH₄ y N₂O.

[Grutter et al. \(2003\)](#) realiza mediciones de los ciclos diurnos de gases traza, este es el primer paso para la obtención de series de tiempo.

[Grutter and Basaldud \(2006\)](#) utilizan la técnica de espectroscopia FTIR para medir las concentraciones de algunos hidrocarburos tales como el etanol, propanol, etileno y acetileno en la Ciudad de México.

1. INTRODUCCIÓN

Ortega (2009) calculó las concentraciones de CO a partir de la absorción solar y lunar de este compuesto en la Ciudad de México (19.33°N, 99.18°O, 2260 m.s.n.m), describiendo los ciclos diurnos, semanales y anuales, además de comparar estos datos con los obtenidos en el sitio Altzomoni (19.12°N, 98.65°O, 4010 m.s.n.m) para describir la evolución de la capa de mezcla.

Stremme et al. (2009) describen las concentraciones diurnas de CO en la Ciudad de México, a través de columnas recuperadas mediante el código de SFIT2. A través de método FTIR de absorción solar y lunar, contribuyendo con mayor información del ciclo diurno de este gas.

Aldana (2011) registra mediciones de SO₂ con el objetivo de identificar masas de aire. Identificando el número total de eventos en tres zonas importantes que fungen como fuente de SO₂: 13 atribuidos al volcán Popocatepetl, 23 a la zona industrial del Valle de México, 4 debidos a la acción local desarrollada cerca de CCA-UNAM y 22 que no pudieron ser atribuidos a una posible fuente.

Stremme et al. (2013) presentan una metodología en la cual se pueden estimar emisiones de monóxido de carbono (CO) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, realizando mediciones “abajo y arriba” mediante FTIR y IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) con el objetivo de reconstruir la distribución espacial de este gas tomando en cuenta factores como la ventilación y poder aplicar este método en otras ciudades altamente contaminadas.

En estudios más recientes **Bezanilla et al. (2014)** hacen uso de un espectroscopio FTIR (Bruker Optik GmbH, model Vertex 80) con una mayor resolución (0.05 cm⁻¹) con respecto a sus antecesores, para determinar las concentraciones de CH₄ en la Ciudad de México.

Herrera (2016) obtiene series temporales de NH₃ en la Ciudad de México y su relación con los vientos registrados durante el 2012 y 2015, con el objetivo de establecer un relación y así poder determinar el origen de las emisiones de NH₃. Obteniendo que las concentraciones tienen su origen en la zona este y noreste de la Ciudad de México, alcanzando su máximo en primavera.

Plaza-Medina et al. (2017) compara la primera serie temporal de O₃ de alta resolución con una serie de O₃ de mediana resolución, ambas registradas en el centro de México, y sus respectivos errores en diferentes alturas (4, 17, 28 y 42 km) obteniendo un error de aproximadamente del 10 % en la estimación de los perfiles obtenidos a dichas alturas.

Para finalizar **Baylon (2017)** registra la primer serie temporal de CO₂ de alta resolución en el Centro de México. Analizando la influencia de dos divisores (KBr y CaF₂)

de los errores y la precisión al momento de estimar columnas de CO₂, O₂ y fracción X_{CO₂}. Obteniendo un error similar entre ambos divisores en ángulos mayores a 30°, mientras que el haz KBr en términos de precisión puede generar datos de calidad para el estudio de CO₂.

Como se ha demostrado anteriormente, la mayoría de los estudios realizados en el centro de México utilizando la espectroscopia FTIR de absorción solar se han basado en la estimación y monitoreo de los gases de origen antropogénico más populares, dejando a un lado el vapor de agua. Cabe resaltar que las estimaciones existentes de este último gas se han realizado en segundo plano (como gas de interferencia) o con baja resolución. Por lo tanto este es un buena motivo para generar la primera serie temporal de alta resolución en el centro de México.

1.4.2.2. GPS

Adams et al. (2009) describen la variabilidad del vapor de agua en el Noroeste del país mediante el a técnica GPS en el proyecto NAME (North American Monsoon Experiment), con el objetivo de ampliar la red de monitoreo y cubrir las deficiencias en las series espaciales y temporales.

Adams et al. (2011) realizan un experimento para determinar la confiabilidad de los datos obtenidos mediante esta técnica en sitio no aptos (por ejemplo, vistas limitadas del cielo y la proximidad a las antenas emisoras), obteniendo que los datos resultantes poseen una incertidumbre del 1 % (1-2 mm).

Retomando los resultados del Experimento del Monzón de Norteamérica (NAME por sus siglas en inglés) Serra et al. (2016) caracterizaron el ciclo diurnos de la precipitación, los procesos microfísicos de la formación de nubes y la organización de los eventos convectivos de mesoescala.

1.5. Planteamiento del problema

En este trabajo se planea comparar dos métodos de percepción remota FTIR y GPS para obtener observaciones validadas, caracterizar las diferencias sistemáticas (sesgo) de los diferentes métodos y así poder estimar con mayor precisión el contenido total de vapor de agua precipitable presente en la atmósfera. Se interrelacionarán las dos series de tiempo con diferentes criterios de coincidencia para determinar las diferencias sistemáticas. Además se usarán tres productos en diferentes regiones espectrales de la medición con espectroscopia FTIR (NIR, MIR1 y MIR2), las cuales serán comparadas con los valores obtenidos por parte del método GPS.

1.6. Contribuciones

La principal contribución es la interrelación entre las series de datos por parte de FTIR y GPS brinda una idea acerca de la diferencia sistemática entre ambos instrumentos y métodos de recuperación, por lo tanto se espera que mediante la interrelación entre ambas series de datos, estos sean congruentes entre sí, sin la necesidad de un factor de corrección. Lo anterior se debe a que la técnica GPS tiene la habilidad de medir en días despejados, nublados e incluso durante la noche, mientras que FTIR se limita a mediciones durante días soleados y despejados.

1.7. Estructura de la tesis

El presente trabajo la sección 1 hace referencia a la importancia del vapor de agua como gas de efecto invernadero, trabajos relacionados a la estimación y variabilidad de este gas. En la sección 2 se describen los aspectos teóricos de la espectroscopia FTIR desde la espectroscopia, descripción del espectrómetro utilizado y aspectos teóricos en las recuperaciones de columnas y sus errores asociados, además se describe el método GPS desde aspectos teóricos en el atraso de la señal, software de procesamiento y errores asociados en la estimación del atraso en la señal. La sección 3 plasma los dos experimentos realizados con dos diferentes a priori: WACCM y radiosondeo, las pruebas estadísticas aplicadas y los intervalos de coincidencia temporal en las correlaciones de ambas series de datos. La sección 4 describe la variabilidad del vapor de agua y las correlaciones obtenidas por ambos métodos en los dos experimentos, así como la discusión con trabajos similares. La sección 5 hace referencia a las conclusiones obtenidas en este trabajo.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Descripción de los métodos

A continuación se realiza una breve descripción de ambas técnicas de percepción remota, sus limitantes, sus ventajas y métodos de recuperación de PWV.

Primero se describirá el método de espectroscopia FTIR, del cual se tiene un mayor conocimiento desde el punto de vista operacional y recuperación de los valores de PWV. Posteriormente se describirá el método GPS cuyos valores estimados serán comparados con los obtenidos por FTIR.

2.1.1. Método: Espectroscopia FTIR

En esta sección se describe el método de espectroscopia FTIR. Primero se describe la configuración del sistema de medición, las especificaciones del espectrofotómetro FTIR con el que se trabaja, pasando por la ecuación de transferencia radiativa, espectros de referencia (espectro sintético), el algoritmo de recuperación (PROFFIT) y sus respectivos errores en la estimación de los gases objetivo.

2.1.1.1. Arreglo instrumental

Como su nombre lo indica, el método de espectroscopia de absorción solar FTIR, utiliza la luz del Sol como fuente de radiación. Por lo tanto es necesario seguir al Sol durante el transcurso del día y así poder realizar las mediciones. Esto se logra con la ayuda de un rastreador solar. Este consiste en un mecanismo de dos motores y dos espejos. El rastreador se ubica en la parte superior del contenedor. La función de los motores es mover los espejos en dirección horizontal (azimutal) y vertical (cenital). La luz del Sol incide en el disco inferior, es reflejada al disco superior y este la envía hacia dentro del contenedor. La luz es dirigida hasta el espectrométero a través de una serie

2. MARCO TEÓRICO

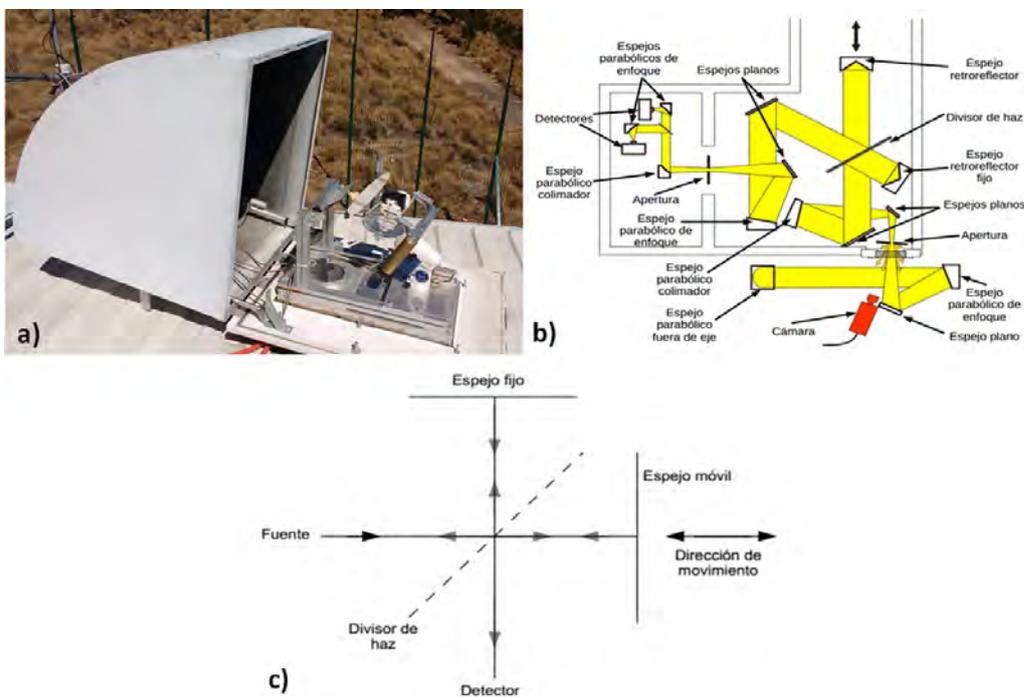


Figura 2.1: a) Rastreador solar. b) Configuración de espejos (Gisi et al. (2011) citado por Baylon et al. (2017)). c) Interferómetro Michelson (Griffiths and De Haseth (2007) citado por Baylon et al. (2017)).

de espejos parabólicos, planos y reflectores.

Posteriormente la luz entra en el espectrómetro Bruker 120/5HR. Dentro de este se dirige hacia el interferómetro Michelson. El interferómetro está compuesto de un detector, un divisor de haz y una configuración de dos espejos: uno móvil y otro fijo. La luz incidente es dividida por el divisor de haz en dos haces de misma intensidad, uno dirigido hacia el espejo fijo y en dirección del espejo móvil. Ambos haces son dirigidos nuevamente al divisor de haz y recombinados para incidir en el detector, creando interferencias constructivas y destructivas, estas dependerán de la distancia del paso óptico o camino recorrido. Constructiva cuando la diferencia entre el espejo fijo y móvil sea igual a cero o un número entero. Destructiva cuando la diferencia sea un múltiplo impar de media longitud de onda (Baylon et al., 2017).

2.1.1.2. Espectrómetro Bruker 120/5HR

Las mediciones se realizaron con un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de alta resolución. Se trata de un equipo Bruker 120/5 HR, modelo 120HR que ha sido actualizado con los componentes electrónicos de un IFS 125HR (fi-



Figura 2.2: a) Observatorio atmosférico Altzomoni. b) Espectroscopio Bruker 120/5 HR. c) Sistema de enfriamiento por nitrógeno líquido.

gura 2.2. Este instrumento comenzó su funcionamiento en el año 2012 en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto de Tecnología de Karlsruhe. Además, el observatorio atmosférico Altzomoni ha sido considerado en la red Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) desde el año 2015 (Baylon et al., 2017).

El modo de operación rutinaria es con una resolución de 0.005 cm^{-1} , recordemos que se trata de un equipo de alta resolución, con un paso óptico diferencial máximo de 257 cm. El instrumento cuenta con un haz divisor de bromuro de potasio (KBr) que consta de tres detectores: mercurio telururo de cadmio (MCT), antimonio de indio (InSb) y arseniuro de indio y galio (InGaAs). Los dos primeros son enfriados con nitrógeno líquido, mientras que el tercero funciona a temperatura ambiente. Los detectores MCT y InSb cubren un rango espectral de $700\text{-}4200 \text{ cm}^{-1}$, región correspondiente al MIR, mientras que InGaAs cubre la región de los $4000\text{-}12800 \text{ cm}^{-1}$ correspondientes a la región NIR. Cabe resaltar que el instrumento también cuenta con otro divisor de haz, fluoruro de calcio CaF_2 , el cual se usa ocasionalmente (Baylon et al., 2017; Plaza-Medina et al., 2017).

2.1.1.3. Modelo directo o ecuación de transferencia radiativa

Esta ecuación describe la conexión describe el estado actual de la atmósfera y el espectro obtenido al momento de realizar la medición, ver más en (Ortega, 2009; Plaza-Medina et al., 2017). Este modelo describe el cambio de la intensidad de la radiación I , la cual es dependiente de la altura z (comúnmente conocida como paso óptico) y del número de onda ν :

$$\frac{\partial I(\nu, z)}{\partial z} = E(\nu, z) - I(\nu, z)\alpha(\nu, z) \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.2), E es la emisión térmica y ν el coeficiente de absorción. Ambos términos son proporcionales al número de moléculas absorbentes en un volumen dado. Debido a que existe una contribución a la emisión térmica por parte del sistema atmósfera-tierra, esta puede tomarse como despreciable debido a que es muy pequeña, por lo tanto la ecuación (2.1) puede escribirse como:

$$\frac{\partial I(\nu, z)}{\partial z} = -I(\nu, z)\alpha(\nu, z) \quad (2.2)$$

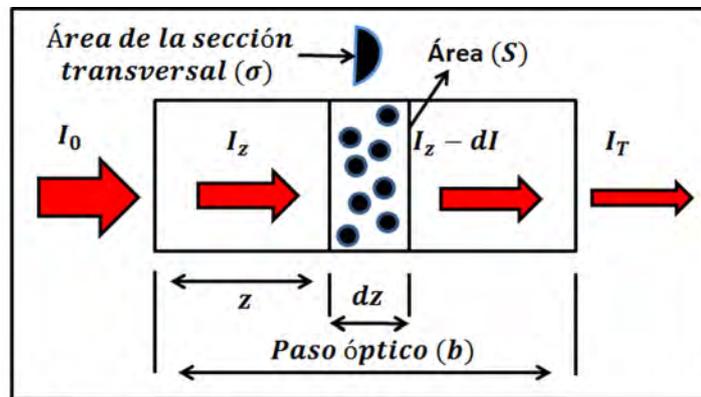
Integrando la intensidad inicial y el coeficiente de absorción en la columna, se obtiene la ecuación de Beer-Lambert. Para una intensidad inicial de una fuente monocromática, la radiación inicial disminuye de manera exponencial según:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha\Delta z) \quad (2.3)$$

La intensidad se ve afectada por factores como el ángulo cenital, el factor de la masa de aire, los aerosoles y la cobertura nubosa. La intensidad en la sección del infrarrojo medido desde tierra puede expresarse como:

$$I(\nu, z, \theta) = I_{Sol}(\nu) \exp\left(-\int_0^\infty \alpha(\nu, z) \frac{1}{\cos(\theta)} dz\right) \quad (2.4)$$

En resumen, la ecuación Beer-Lambert en el modelo directo de transferencia radiativa aplicado en el estudio de la atmósfera puede resumirse a través de la figura 2.3.



I_0 : intensidad entrante (Sol)
 I_z : intensidad a través de una distancia.
 I_T : intensidad en superficie terrestre.
 dI : cambio de la intensidad.
 σ : relaciona el número de moléculas y su coeficiente de absorción.

Figura 2.3: Descripción gráfica de la ecuación de transferencia radiativa aplicada en la atmósfera. Se puede observar la relación que existe entre la intensidad inicial y final a través del paso óptico, trayecto en el cual se encuentran las moléculas absorbentes.

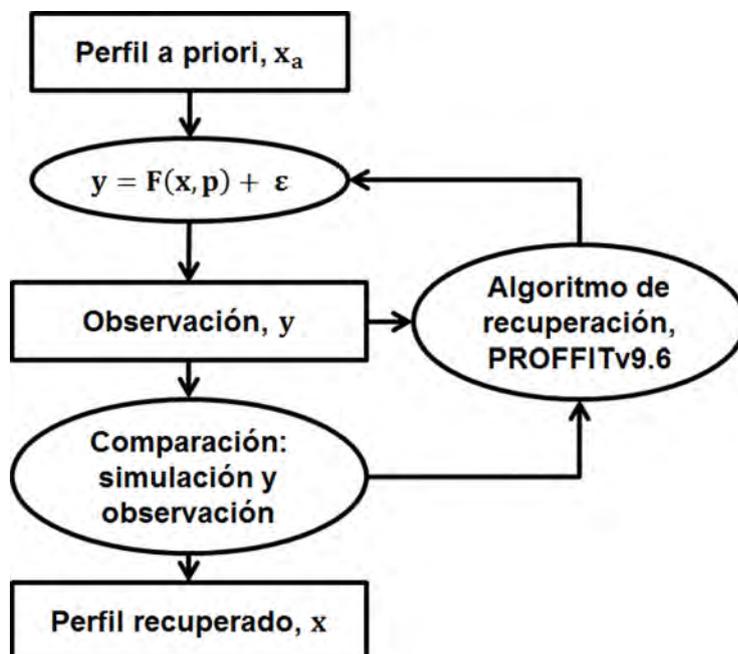


Figura 2.4: Esquema en el cual se muestra la recuperación de un perfil de vapor de agua (x) a partir de la ecuación de transferencia radiativa (F) y un perfil a priori, p representa parámetros atmosféricos, por ejemplo la temperatura.

2.1.1.4. Espectro sintético

El espectro sintético es elaborado a partir de la base de datos HITRAN (high-resolution transmission), la cual contiene las líneas de absorción de los gases absorbentes en la región infrarrojo. Además contiene los parámetros de la mecánica cuántica de los estados permitidos y las correcciones debido a los efectos de la presión (línea de Lorentz) y el efecto Doppler (Paton-Walsh, 2011).

2.1.1.5. Algoritmo de recuperación

La recuperación de los perfiles reales se hace en base al algoritmo de recuperación PROFFITv9.6 desarrollado por (Hase et al., 2004). Este código calcula un espectro sintético usando un modelo directo (ecuación de transferencia radiativa), modelado en 41 capas. Cada capa se encuentra asociada a una temperatura, presión y concentración inicial del gas a recuperar.

Una vez obtenido el espectro sintético, es comparado con la medición real de la atmósfera, al mismo tiempo que el modelo directo realiza el mejor ajuste posible entre los dos espectros (sintético y medición).

El código de recuperación PROFFITv9.6 tiene como objetivo realizar la recuperación del perfil del gas deseado mediante una técnica inversa, la cual basa su cálculo mediante el método de mínimos cuadrados. La razón de mezcla (volume mixing ratio: VMR) en cada capa modelada son las variables a conocer del vector de interés x , el cual contiene n elementos. La relación del estado que se conoce y (medición) y el estado que se desea conocer x , está descrita por el modelo directo F (ecuación de transferencia radiativa):

$$y = F(x, b) + \varepsilon \quad (2.5)$$

Donde b es un vector que incluye todas las variables que no serán ajustadas durante la recuperación, comúnmente son llamadas parámetros del modelo. ε es el vector de errores y explica la diferencia entre la medición y la recuperación.

En el modelo de estimación óptima para obtener el valor de x , se necesita de un conocimiento del estado a priori x_a , que es la estimación del perfil promedio x_a :

$$x_a = x + \varepsilon_a \quad (2.6)$$

La sensibilidad de la observación y el estado de las variables que lo conforman, pueden ser determinados a partir del modelo directo (ecuación de transferencia radiativa) y la matriz Jacobia, según la siguiente expresión:

$$K = \nabla_x F = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (2.7)$$

Una vez estimado el valor de x_a se puede calcular K , para la primera iteración. Esta iteración puede ser descrita de la siguiente forma:

$$J = (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) + (Kx - y)^T S_\varepsilon^{-1} (Kx - y) \quad (2.8)$$

Al minimizar:

$$\nabla_x J(x) = 2S_a^{-1}(x - x_a) + 2K^T S_\varepsilon^{-1}(Kx - y) = 0 \quad (2.9)$$

S_a y S_ε representan las matrices de covarianza de la solución a priori y el ruido, respectivamente. La solución a la ecuación 1.8 es conocida como estimación óptima o recuperación:

2. MARCO TEÓRICO

$$\hat{x} = x_a + G(y - Kx_a) \quad (2.10)$$

G representa la matriz de ganancia y describe la sensibilidad que existe entre la recuperación y la observación:

$$G = (K^T S_\epsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_\epsilon^{-1} \quad (2.11)$$

El averaging kernel describe la sensibilidad de la recuperación \hat{x} y el verdadero estado x_{ver} :

$$A = \left(\frac{\partial \hat{x}}{\partial x} \right) \quad (2.12)$$

El averaging kernel A está conformado por la matriz de ganancia $G = \left(\frac{\partial \hat{x}}{\partial y} \right)$ y la matriz Jacobian $\frac{\partial y}{\partial x}$:

$$A = GK \quad (2.13)$$

El averaging kernel se utiliza para estimar la sensibilidad entre el estado real y el recuperado en la atmósfera a una cierta altura. En él se documenta por cuantos ppmv la resolución de la recuperación cambia debido a la variabilidad de 1ppmv en la atmósfera real. Debido a la alta variabilidad del vapor de agua, entre 3 y 4 órdenes de magnitud desde la superficie hasta la tropopausa, la interpretación del averaging kernel se ve limitada en los primeros 10 km. El averaging kernel utilizado aquí para la recuperación del vapor de agua utiliza un método de inversión logarítmico (Figura 2.5 y 2.6). Este ha sido utilizado anteriormente por el IMK-ASF, mostrando buenos resultados. Los kernels son están formados por el logaritmo de las razones de mezcla (VMR), esto se debe a que la variabilidad de \ln (VMR) es similar en toda la troposfera, por lo tanto su interpretación puede ser directa ((Schneider et al., 2006, 2010)).

La información contenida en esta matriz puede ser interpretada como una señal de grados de libertad, representado por la diagonal del averaging kernel. Esta es la suma de los elementos diagonales de la matriz averaging kernel.

La expresión de la recuperación óptima o recuperación \hat{x} puede ser representado como:

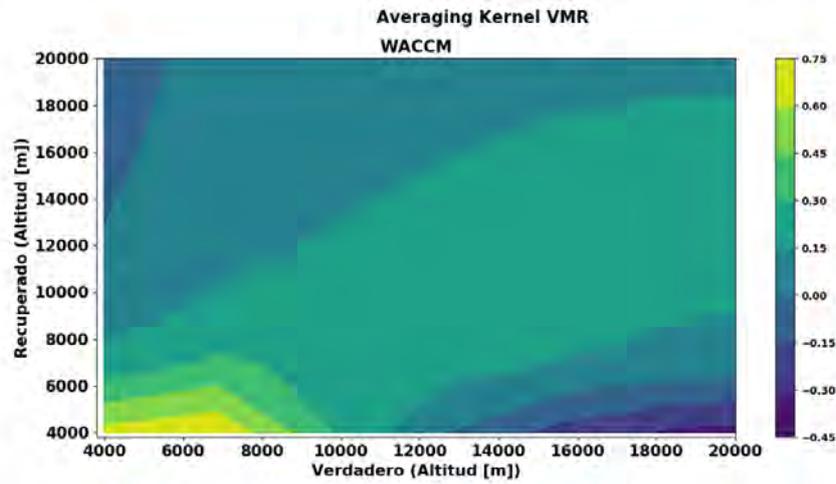


Figura 2.5: Averaging kernel utilizado en la recuperación de vapor de agua, utilizando la razón de mezcla (VMR) valores de WACCM. Los valores de la paleta indican la sensibilidad en el perfil verdadero, mientras mayor sea el valor mayor es la sensibilidad para detectar una molécula de H_2O a cierta altura.

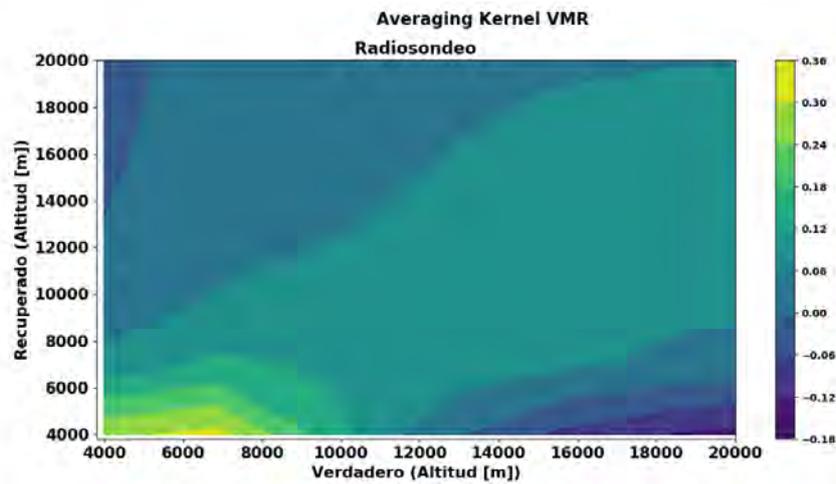


Figura 2.6: Averaging kernel utilizado en la recuperación de vapor de agua, utilizando la razón de mezcla (VMR) valores de radiosondeo. Los valores de la paleta indican la sensibilidad en el perfil verdadero, mientras mayor sea el valor mayor es la sensibilidad para detectar una molécula de H_2O a cierta altura.

$$\hat{x} = Ax_{ver} + (I_n - A)x_a + G_\varepsilon \quad (2.14)$$

Donde I_n es la matriz de identidad.

El primer término de la ecuación (2.15) representa la contribución del estado verdadero x_a en la solución. El segundo término $(I_n - A)x_a$ hace referencia al estado a priori. El tercer término es la contribución del error.

2.1.1.6. Análisis del error

La descripción de las diferentes fuentes de errores se hace en base a la descrita en (Rodgers, 2000). En su descripción, el error \hat{x} puede ser descrito a través de la siguiente ecuación:

$$x - \hat{x} = (A - I_n)(x - x_a) + G_y K_b (b - \hat{b}) + G_y \Delta f(x, b, b') + G_y \varepsilon \quad (2.15)$$

El término de la izquierda hace referencia al error. Por parte de los términos de la derecha, el primero describe el error de suavizado, el segundo al error de los parámetros del modelo, seguido del error en el modelo directo y para finalizar el ruido en la recuperación.

A continuación se describen brevemente las contribuciones de cada error al error total.

Error de suavizado: su origen se debe a la estimación, recordemos que esta técnica estima un estado verdadero en la atmósfera. En otras palabras puede considerarse como un estado suavizado, descrito por el averaging kernel, de un estado verdadero. Debido a que estado verdadero de la atmósfera es desconocido, la descripción estadística de este error puede ser descrito a través del promedio y la covarianza, que pueden ser descrita o no por x_a y S_a . El promedio $(A - I)(\bar{x} - x_a)$, pueden ser ceros si se toma en cuenta $\bar{x} = x$.

La matriz de covarianza en el promedio para el error de suavizado está definida por:

$$S_s = \varepsilon \{ (A - I_n)(x - \bar{x}) * (x - \bar{x})^T (A - I_n)^T \} \quad (2.16)$$

$$S_s = (A - I_n) \varepsilon \{ (x - \bar{x})(x - \bar{x})^T \} (A - I_n)^T \quad (2.17)$$

$$S_s = (A - I_n) S_\varepsilon (A - I_n)^T \quad (2.18)$$

En la ecuación (2.16), S_ε es la covarianza con el conjunto de estados sobre los estados promedio. Para estimar el error de suavizado debe conocerse la matriz de covarianza de los estados reales.

Se debe tomar en cuenta que los sistemas de percepción remota no pueden ver estructuras espaciales de alta resolución. Por lo tanto el fenómeno anterior es el responsable del error de suavizado. En la estimación de este error se debe conocer la estadística de la estructura de alta resolución real, ya que una matriz tipo ad hoc con restricción razonable en el estado a priori dentro de la recuperación no es suficiente. En caso de no tener conocimiento acerca de la covarianza de la alta resolución real, se puede abandonar la estimación del error de suavizado y considerar la recuperación como una estimación de una versión suavizada del estado, en lugar de una estimación del estado completo.

En algunos métodos de recuperación, el error de suavizado es equivalente al error de espacio nulo. Este último término, describe la contribución al presupuesto de error de los componentes que no son considerados o vistos por la recuperación.

En resumen, el método puede estimar componentes de espacio nulo gracias a las correlaciones proporcionadas por la varianza a priori, reduciendo la contribución de error de esa fuente, mientras tanto los componentes no estimados aparecen en la recuperación con una amplitud reducida que contribuye al error de suavizado.

Error en los parámetros del modelo directo: es descrito por $G_y K_b (b - \bar{b})$. En un principio este término es sencillo de evaluar, siempre y cuando los parámetros del modelo directo hayan sido estimados apropiadamente y el modelo sea lineal con respecto a ellos. Como consecuencia los errores individuales tienen la propiedad de no tener sesgo, por lo tanto el error esperado será cero.

Las sensibilidades de G_y y K_b son sencillas de evaluar, ya sea por la evaluación de los derivados algebraicos o por perturbaciones a través del modelo inverso y directo. En caso de que b tome valores demasiado grandes para su precisión, existen tres posibilidades:

- i)* hacer una mejor medición (por ejemplo, de laboratorio) de ese elemento
- ii)* considerar si debe ser un elemento del vector de estado y recuperarse de la medición y
- iii)* rediseñar el sistema de observación para que no sea sensible a ese elemento.

2. MARCO TEÓRICO

La posibilidad ii) no ayuda en la recuperación individual si el error en el parámetro se ha tenido en cuenta dentro de la covarianza del error de medición, pero se puede estimar a partir de múltiples mediciones. La covarianza del error de estas contribuciones se expresa como:

$$S_f = G_y K_b S_b K_b^T G_y^T \quad (2.19)$$

Donde $S_b = \varepsilon \left\{ (b - \hat{b})(b - \hat{b})^T \right\}$ representa la matriz de covarianza del error en b . Se debe tener en cuenta que b contiene elementos aleatorios y sistemáticos que difieren en escala espacio-tiempo, por lo tanto deben ser evaluados por separado.

Error del modelo directo: su modelado está representado por $G_y \Delta f = G_y [f(x, b, b') - F(x, b)]$. Se debe tener en cuenta que lo anterior es evaluado en el estado verdadero, con el verdadero valor de b en lugar de \bar{x} y \bar{b} . El error de modelado requiere de un modelo para f que contenga la física correcta, sí esta puede ser modelada con precisión y F es una aproximación numérica por eficiencia, el error por modelado puede ser evaluado. Por otra parte, si f es desconocido o tan complejo que el modelo no es viable, es probable que el error de modelado sea sistemático.

Ruido en la recuperación: el ruido en la medición es el componente más fácil de evaluar y está representado por $G_y \varepsilon$. Por lo general se trata como un componente aleatorio, libre de sesgo y no correlacionado entre los canales, además de poseer una matriz de covarianza conocida:

$$S_m = G_y S_\varepsilon G_y^T \quad (2.20)$$

Error aleatorio y sistemático: ambos errores por ser valores constantes entre un intervalo de mediciones continuas o al azar. Los términos más utilizados son precisión y exactitud. El primero mide la variabilidad entre las mediciones repetidas de un mismo estado, mientras el segundo mide la diferencia que existe entre la medición y el estado verdadero, incluyendo los errores aleatorios y sistemáticos.

Se debe considerar que estas fuentes de error pueden contener variabilidad temporal en un rango de escalas y una fuente que puede ser aleatoria en una escala y sistemática en otra. El ruido en la recuperación es normalmente considerado como una cantidad aleatoria y no está correlacionada con el tiempo.

Algunos ejemplos de errores dentro de los parámetros del modelo son datos espectrales y los parámetros de calibración. El primero se caracteriza por tratarse de un error sistemático sin cambios en el tiempo, mientras el segundo es un error que sufre variaciones de un día a otro, pero estas pueden ser constantes en intervalos de minutos a horas. El efecto de una fuente de error dentro de una recuperación, incluso si esta es constante, puede variar debido a la no linealidad. Existe otra fuente de error que sufre de variaciones con el estado, se describe como error de ganancia. El error de suavizado está relacionado con el estado y sufre variaciones en la misma escala de tiempo que en los estados.

2.1.2. Método GPS

La descripción de esta metodología se hará en base a la descrita por [Bevis et al. \(1992\)](#).

Esta técnica puede estimar la cantidad de PWV a través de parámetros como la temperatura superficial y las presiones ejercidas sobre el receptor del GPS. El concepto en el cual se trabaja es relativamente sencillo, el retraso que existe en la señal entre el satélite y el receptor GPS es proporcional a la cantidad de agua en la atmósfera ([Hogg et al., 1981](#); [Resch, 1984](#)).

El software de procesamiento del GPS geodésico juega un papel importante al corregir los intervalos entre el receptor y los satélites que emiten la señal, eliminando los efectos de la atmósfera.

Un factor primordial que se debe tomar en cuenta, son los efectos producidos en la señal debido por su paso a través de ionosfera, es por esta razón que el GPS geodésico trabaja en dos frecuencias L1 (1575.42 MHz, 19.02 cm^{-1}) y L2 (1227.60 Mhz, 24.42 cm^{-1}), para eliminar estos efectos ([Blewitt, 1997](#)).

La atmósfera está compuesta de una mezcla de gases “secos” y vapor de agua. Debido a que la señal electromagnética se ve afectada por ambas clases de gases (figura 2.7). Ambos atrasos se han denominado como hidrostático (erróneamente conocido como atraso seco) y húmedo, respectivamente. El atraso húmedo es siempre menor al hidrostático ([Elgered et al., 1991](#)).

2.1.2.1. Estimación del atraso en la señal a través de la atmósfera

Las microondas de la señal electromagnética se ven afectadas en su paso a través de la atmósfera debido a que: i) su viaje es más lento con respecto al vacío y ii) se propagas a través de una trayectoria curva. El atraso en el tiempo debido a la distancia recorrida puede ser expresado por:

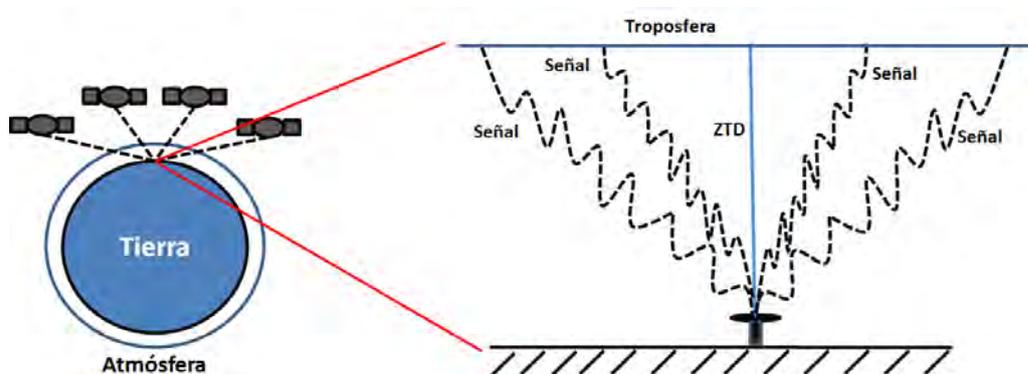


Figura 2.7: Representación gráfica del atraso en la señal electromagnética al entrar en contacto en la atmósfera.

$$\Delta L = \int_L n(s) ds - G \quad (2.21)$$

n representa el índice de refracción en función de una posición s a lo largo de camino curvo L , G es hace referencia a lo que ocurriría si la atmósfera fuera sustituida por un vacío):

$$\Delta L = \int_L [n(s) - 1] + [S - G] \quad (2.22)$$

Donde S es la longitud de la trayectoria a lo largo de L .

El primer término de la ecuación (2.22) se debe al efecto en la disminución de la aceleración, y el segundo término hace referencia al efecto de la flexión. Las señales provenientes de la dirección cenit en ausencia de gradientes horizontales, el término de flexión desaparece. Además, esta ecuación puede ser expresada en término de refractividad atmosférica N , la cual es función de temperatura, presión y presión del vapor de agua (Thayer, 1974):

$$N = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} + k_3 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} \quad (2.23)$$

Donde $k_1 = (77.604 \pm 0.014) \text{K} \cdot \text{mbar}^{-1}$, $k_2 = (64.79 \pm 0.08) \text{mbar}^{-1}$ y $k_3 = (3.776 \pm 0.004) \times 10^5 \text{K}^2 \cdot \text{mbar}^{-1}$ son constantes empíricas, P_d es la presión parcial del aire seco expresada en milibares, Z_d y Z_v son los factores de compresibilidad

inversa para el aire seco y húmedo, respectivamente.

El atraso en la señal depende de la presión superficial por lo tanto puede ser expresado en atraso “húmedo” (Zenith Wet Delay: ZWD) y “seco” (Zenith Hydrostatic Delay: ZHD), siendo el húmedo el de menor contribución (Saastamoinen, 1972). Se debe tomar en cuenta que el atraso hidrostático tiene una contribución significativa por parte del vapor de agua, debido al componente no dipolo de la refractividad del vapor de agua. Por otra parte el atraso húmedo hace referencia exclusivamente al vapor de agua atmosférico.

El atraso hidrostático cenital (ZHD) puede ser expresado en mm por:

$$\Delta L_h^0 = ZHD(2.2779 \pm 0.0042)P_s/f(\lambda, H) \quad (2.24)$$

Donde P_s es la presión total expresada en milibares sobre la superficie terrestre $f(\lambda, H)$:

$$f(\lambda, H) = (1 - 0.00266 \cos 2\lambda - 0.00028H) \quad (2.25)$$

Por otra parte el atraso húmedo cenital (ZWD) está expresado por:

$$\Delta L_W^0 = ZWD = 10^{-6} \left[k'_2 \int \left(\frac{P_v}{T} \right) dz + k_3 \int \left(\frac{P_v}{T^2} \right) dz \right] \quad (2.26)$$

$k'_2 = (17 \pm 10) \text{K mbar}^{-1}$, debido a que la línea está integrada a lo largo del cenit, el atraso puede ser expresado en unidades de altura z (Davis et al., 1985). La ecuación (2.26) suele ser expresada a través de la siguiente aproximación:

$$\Delta L_0^W = (0.382 \pm 0.004) K^2 \text{mbar}^{-1} \int \left(\frac{P_v}{T^2} \right) dz \quad (2.27)$$

Los valores de P_v y T^2 en la ecuación (2.27) pueden ser obtenidos a través de radiosondeos.

Cabe resaltar que también se han elaborado aproximaciones para calcular el atraso total (contribución del atraso húmedo e hidrostático), en ángulos de elevación de cero grados:

$$\Delta L = \Delta L_h^0 M_h(\theta) + \Delta L_w^0 M_w(\theta) \quad (2.28)$$

Donde $M(\theta)$ son las funciones de mapeo húmedo e hidrostático, respectivamente. Debido a que existe una relación entre la cantidad de vapor de agua en la atmósfera y el atraso húmedo cenital, es posible derivar una relación. [Davis et al. \(1985\)](#) introduce el término de temperatura media ponderada en la atmósfera.

$$T_m = \frac{\int \left(\frac{P_v}{T}\right) dz}{\int \left(\frac{P_v}{T^2}\right) dz} \quad (2.29)$$

Combinando las ecuaciones (2.26), (2.29) y la ecuación de estado del vapor de agua, se puede obtener el vapor de agua precipitable (PWV):

$$PWV = \int \rho_v dz \approx K \Delta L_W^0 \quad (2.30)$$

L_W representa el atraso húmedo cenital y K puede ser obtenida a través:

$$\Pi = \frac{1}{K} = 10^{-6} \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2' \right) R_v \quad (2.31)$$

R_v la constante específica del vapor de agua. Debido a que el vapor de agua precipitable (PWV) es el producto de la densidad y el agua precipitable (PW):

$$\frac{PW}{ZWD} = \frac{PW}{\Delta L_W^0} = \frac{K}{\rho} \quad (2.32)$$

La relación en (2.32) es una cantidad adimensional debido a que ambas cantidades poseen una unidad de longitud.

La mejor recuperación de PWV y PW se puede obtenerse a partir de la ecuación (2.30) y (2.32), la contante K puede estimarse utilizando la temperatura promedio T_m , y al mismo tiempo esta puede ser obtenida con la ayuda de un número largo de radiosondeos provenientes de la zona de interés.

La estimación de la cantidad de PWV en la atmósfera a través del método GPS se resume en la figura 2.8.

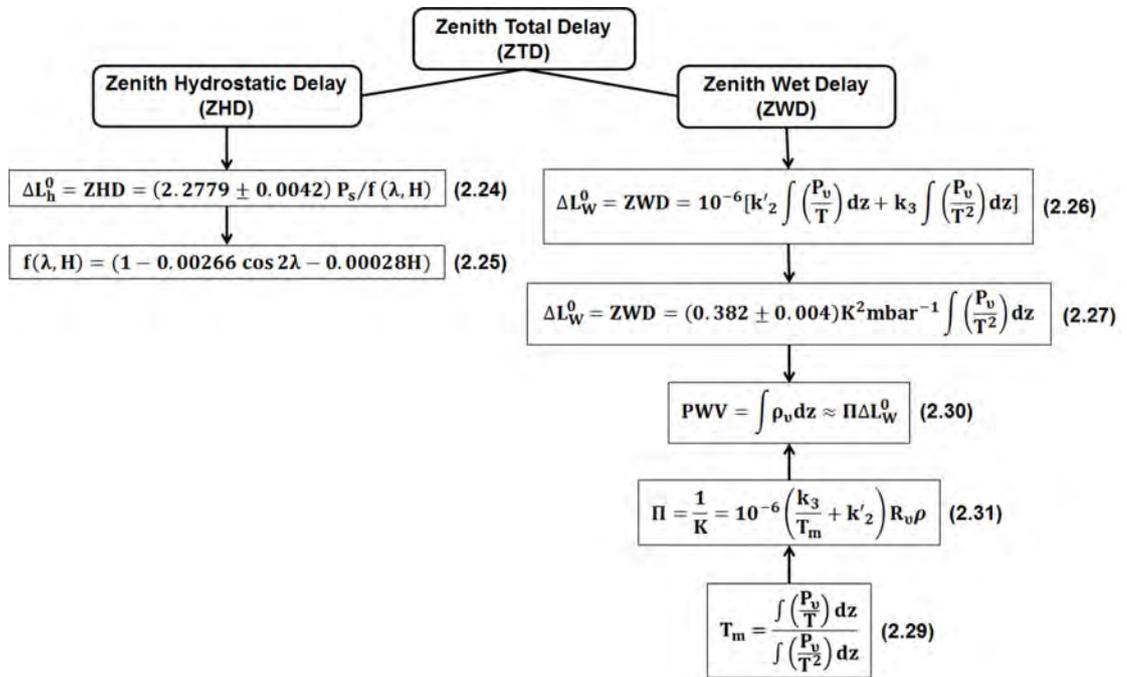


Figura 2.8: Esquema que resumen la estimación del vapor de agua precipitable a través del método GPS.

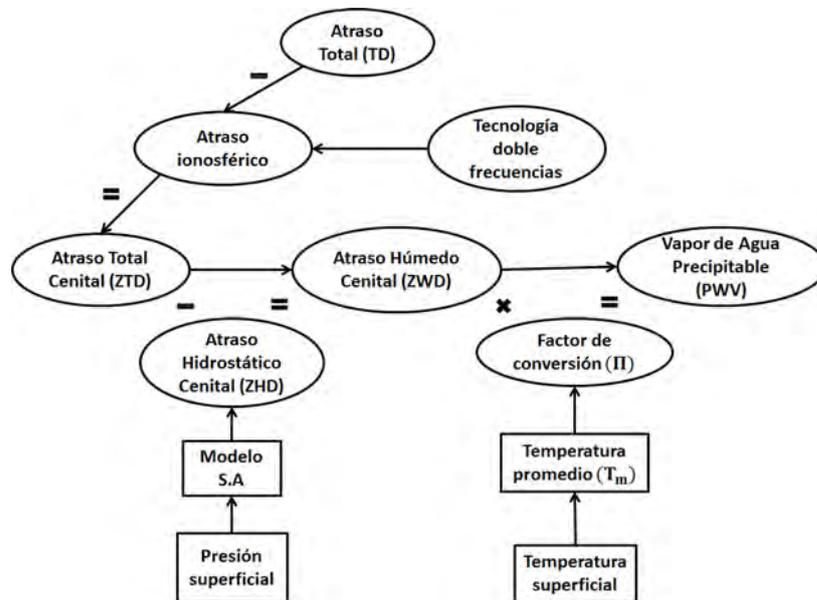


Figura 2.9: Esquema que resume la derivación de la cantidad de PWV a través del método GPS. Modificado de Wang et al. (2013).

2.1.2.2. Fuentes de error en las estimaciones de PWV por GPS

La descripción de los errores se hará en base a los trabajos de [Puviarasan et al. \(2015\)](#) y [Ningombam et al. \(2016\)](#).

De manera general, los errores asociados en las estimaciones de PWV dependen de i) la incertidumbre asociada al atraso total cenital (ZTD), ii) la precisión de los valores observados de presión y temperatura por parte de los sensores meteorológicos y iii) el error la temperatura promedio. En estudios previos se ha estimado un error de alrededor de 2-3 mm en diferentes localidades (ver más en [Li et al. \(2003\)](#); [Liang et al. \(2015\)](#); [Ningombam et al. \(2016\)](#); [Prasad and Singh \(2009\)](#)). Se debe considerar que en sitios secos el valor de ZTD es casi similar al ZHD, por lo tanto pequeños errores en ZTD y ZHD contribuyen a grandes errores en las estimaciones de ZWD.

A continuación se describen las fuentes de error con mayor detalle.

Error en el balance hidrostático: En esta fuente de error se hace la suposición de que la atmósfera se encuentra que equilibrio hidrostático, fenómeno que no sucede en la realidad, debido a los cambio de presión influenciados por gradientes de temperatura. Se ha estimado que bajo condiciones de tormentas extremas la magnitud del error en PW puede llegar a ser de 3 mm.

Erro debido a la presión dinámica: El efecto de la presión dinámica puede pe-recerse a los del balance hidrostático, ya que ambos tienen un efecto sobre el sensor de presión. En procesos de precipitación, la lluvia crea corrientes descendientes, ocasionando un aumento en la temporal presión superficial, generando un descenso en las estimaciones de PW de 0.35 mm por cada hPa.

Error en el parámetro T_m : Esta contribución de error es de gran importancia, ya que la precisión del GPS para estimar el agua precipitable (PW) se encuentra íntimamente ligada con el parámetro T_m , además este último está en función del perfil vertical de temperatura y humedad (2.29).

El erro relativo en los valores PWV debido al erro en el parámetro T_m puede ser calculado a través de [Wang et al. \(2005\)](#).

$$\frac{\Delta PW}{PW} = \frac{\Delta \Pi}{\Pi} = \frac{1}{1 + \left(\frac{k'_2}{k_3}\right) T_m} * \frac{\Delta T_m}{T_m} \quad (2.33)$$

Por otra parte, debe considerarse la relación entre las constantes empíricas $\frac{k'_2}{k'_3}$. Cuando la relación $\frac{k'_2}{k'_3}$ es pequeña, el error en PW es igual al error en T_m . En errores del 1 al 2%, se requiere un error en T_m menor a 2.74 K y 5.48 K, respectivamente.

Error Isotrópico: En este error se considera una atmósfera homogénea. Se toma en cuenta que la señal recibida posee un ángulo de elevación, por lo tanto los atrasos acimutales pueden ser extrapolados a través de una función de mapeo en el cenit (function mapping), en pocas palabras el atraso en la señal con un ángulo de elevación es correlacionado con un atraso en la dirección cenit conocido (ver ecuación (2.28)). Cada componente (ZHD y ZWD) posee una función de mapeo. Además, se asume que una asimetría acimutal puede generar un rms de 7 mm en el atraso de la señal por debajo de un ángulo de elevación de 15 °C.

2.1.2.3. Software de procesamiento: GIPSY

A continuación se describe el software utilizado en las estimaciones del PWV por el método GPS. La descripción es breve debido a que el objetivo principal de este estudio es la obtención de la serie de H₂O por el método de espectroscopia FTIR de absorción solar. Los valores de PWV por el método GPS fueron proporcionados por el Dr. David K. Adams. La descripción se hará en base a la propuesta por [Lichten and Border \(1987\)](#) y [Kaniuth and Völksen \(2003\)](#) (para ver más consultar la bibliografía correspondiente a los autores).

El software GPS Inferred Positioning SYstem – Orbit Analysis and Simulation Software (GIPSY-OASIS) ha sido desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) en el Instituto de Tecnología de California, EE. UU. ([Webb and Zumberge, 1997](#)). Su principal característica es el procesamiento de las observaciones GPS en modo no diferenciado. Por lo tanto requiere la estimación de los sesgos en el reloj del satélite y el receptor, estos son considerados como ruido blanco.

Otra característica de este software es el tratamiento de los sesgos en el reloj y receptor como variables estocásticas, lo que imposibilita la utilización de algoritmos estándar. El tratamiento estocástico es aplicado a la variable húmeda y seca del atraso. Los parámetros desconocidos son filtrados mediante un filtro de información de raíz cuadrada (SRIF: Square Root Information Filter), estos parámetros también son tratados por procesamientos estocásticos en el proceso secuencial.

La ventaja de este método es que los errores formales se pueden propagar correctamente, incluidas las contribuciones de errores de efemérides. Los relojes son modelados como polinomios, diferenciación simple y doble explícita y comportamiento del reloj es modelado como ruido de proceso.

Diseño del experimento

Como se ha mencionado anteriormente, se utilizó el algoritmo de recuperación PROFFITv9.6. Este algoritmo utiliza el código de transferencia radiativa PROFFWD elaborado por Hase et al. (2004). El modelado se hace a través de una atmósfera teórica compuesta por 41 niveles. Recordemos que este algoritmo de recuperación necesita de ciertos parámetros de entrada. Estos parámetros son el perfil a priori x_a de la razón de mezcla del gas a recuperar, en nuestro caso la razón de mezcla del H_2O y perfiles climatológicos de los gases de interferencia en la región espectral a evaluar (Tabla 3.1). Además se agregan otros parámetros de la atmósfera como son los perfiles de presión y temperatura.

3.1. Recuperación diferente a priori: WACCM y Radiosondeo

Para comprender la importancia del perfil a priori en las recuperaciones de vapor de agua, se desarrollaron dos experimentos para estimar su contenido en la atmósfera: parámetros de entrada derivados de un modelo (WACCM) y parámetros in situ medidos en la atmósfera (radiosondeos).

Los radiosondeos utilizados para calcular el perfil de razón de mezcla fueron obtenidos del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) y se encuentran disponibles en la página <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> de la Universidad de Wyoming. El AICM se encuentra a una altura de 2231.0 m.s.n.m., en las coordenadas 19.40°N - 99.20°O y número de estación 76679.

Los parámetros atmosféricos de entrada, perfiles de presión y temperatura, fueron obtenidos del mismo radiosondeo. Estos pueden llegar a una altura de entre 20 y 25 km, debido a esta limitante, el resto de altura (hasta 120 km) fue completada con los

3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Tabla 3.1: Diseño experimental. Muestra las regiones espectrales, gases de interferencia, las bases de datos y parámetros atmosféricos de los perfiles a priori.

Región espectral	NIR*	MIR1**	MIR2***
Gases de interferencia	H ₂ O, HDO, CO ₂ , CH ₄	H ₂ O, O ₃ , CH ₄	H ₂ O, HDO, CO ₂ , O ₃ , N ₂ O, CH ₄
Microventanas	6074.975, 6078.825, 6098.875, 6099.825, 6125.125, 6126.575, 6176.885, 6177.715, 6254.150, 6257.750, 6297.400, 6305.300, 6390.900, 6394.000, 6400.575, 6401.725, 6467.850, 6471.350	2925.20, 2925.30, 2941.60, 2941.90	1110.00, 1113.00, 1117.30, 1117.90, 1120.10, 1122.00, 1196.00, 1200.40, 1220.50, 1221.50, 1251.75, 1253.00
Algoritmo de recuperación	PROFFIT [^]	PROFFIT [^]	PROFFIT [^]
Perfil razón de mezcla a priori	WACCM ^{^^} Radiosondeo ^{^^^}	WACCM ^{^^} Radiosondeo ^{^^^}	WACCM ^{^^} Radiosondeo ^{^^^}
Espectro a priori	HITRAN08 ⁺	HITRAN08 ⁺	HITRAN08 ⁺
Temperatura y presión a priori	- NCEP ⁺⁺ - Radiosondeo ^{^^^}	- NCEP ⁺⁺ - Radiosondeo ^{^^^}	- NCEP ⁺⁺ - Radiosondeo ^{^^^}

* tomado de [Deutscher \(2009\)](#).

** tomado de [Vigouroux et al. \(2009\)](#).

*** tomado de [Semenov et al. \(2015\)](#).

[^] desarrollado por [Hase et al. \(2004\)](#).

^{^^} Whole Atmosphere Community Climate Model.

^{^^^} Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM),

disponible en <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

⁺ Base de datos high-resolution transmission molecular absorption.

⁺⁺ National Centers for Environmental Prediction.

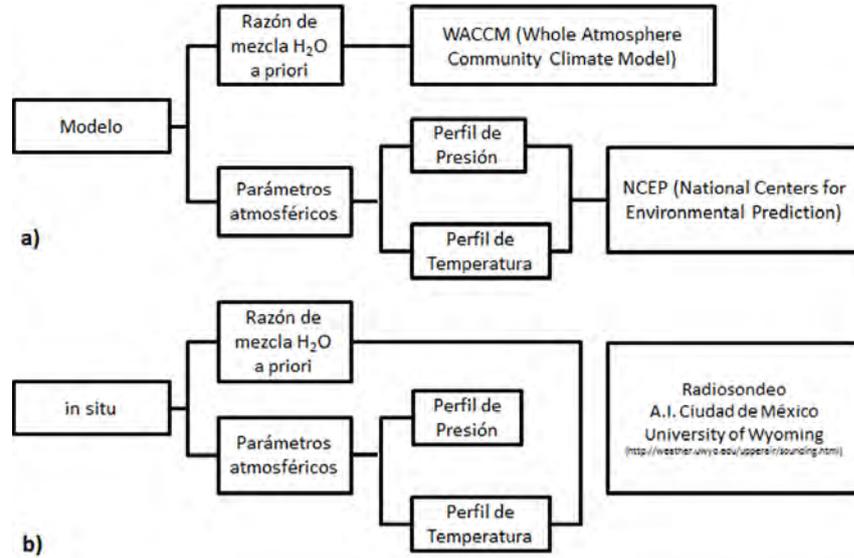


Figura 3.1: a) Estrategia de recuperación con perfil de razón de mezcla de H₂O derivado de WACMM. b) Estrategia de recuperación con perfil de razón de mezcla de H₂O derivado de radiosondeos.

de NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Recordemos que la mayor cantidad de vapor de agua se encuentra entre los primeros 10-15 km, por lo tanto se considera que no los valores >15 km no influyen en gran medida en las recuperaciones de vapor de agua. Para calcular la razón de mezcla (VMR) de vapor de agua se utilizó el perfil de razón de mezcla del mismo radiosondeo con algunas correcciones:

$$VMR_R = MIX_R \left[\frac{M_d P_R}{T R} \right] \quad (3.1)$$

MIX_R es la razón de mezcla de vapor de agua proveniente del radiosondeo expresado en $\frac{g}{kg}$. M_d es la masa del aire seco ($0.029 \frac{kg}{mol}$). R la constante universal de los gases ($R=8,314472 \frac{J}{K \cdot mol}$).

3.2. Correlaciones temporales

Debido a que los dos instrumentos trabajan a diferente frecuencia, 15 minutos para que FTIR realice un escaneo y 5 minutos para que el GPS registre un valor, sin dejar a un lado que el GPS tiene la habilidad de poder hacer mediciones durante el día, días nublados y durante la noche. Se utilizaron promedios por mes, día y hora, con el objetivo de estandarizar los valores al momento de realizar las comparaciones y correlaciones

3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

temporales, tratando de encontrar el mejor ajuste en ambas series de datos.

Las correlaciones por día y hora se hicieron tomando los valores de FTIR como referencia temporal. Esto quiere decir que se buscaron los valores de PWV por FTIR en coincidencia temporal dentro de la serie registrada por GPS. Por lo tanto así obtenemos sólo coincidencias en días despejados. Cabe resaltar que las condiciones en días nublados también son importantes pero éstas se discutirán más adelante.

3.2.1. Tratamiento a los valores de PWV

Valores PWV GPS: Como se mencionó anteriormente, este método tiene la habilidad de realizar mediciones durante días despejados, nublado y durante la noche. Por lo tanto sólo se tomaron los valores registrados entre las 07:00 y 19:00 horas, horas de luz solar en las que el espectrometro FTIR suele trabajar, además en este intervalo de tiempo se tiene en cuenta el cambio de horario. Todo esto con el objetivo de obtener una mejor comparación estadística de los valores entre ambas series de datos.

Valores PWV FTIR: Debido a que los valores de FTIR sólo pueden ser obtenidos durante el día y en días sin cobertura nubosa, la comparación con los valores obtenidos por GPS puede ser sesgada, por lo tanto se procede a realizar una prueba del sesgo por cielo despejado (clear-sky bias), mostrando la dispersión entre ambas series de datos (Schneider et al., 2010).

$$B = 1 - \frac{PW\bar{V}_{FTIR}}{PW\bar{V}_{GPS}} \quad (3.2)$$

B es definido como el sesgo seco. $PW\bar{V}_{FTIR}$ son los valores de PWV obtenidos durante el cielo despejado correspondientes a los de FTIR. $PW\bar{V}_{GPS}$ hace referencia a los valores registrados durante cielo nublado y despejado, para esta variable se toman los registrados por GPS.

La prueba se aplicó a los valores en toda la serie temporal, por día y por hora. Esto con el fin de obtener una idea en la dispersión de los valores en cada intervalo de medición, tanto como en días y horas con nubosidad.

3.2.2. Diferencias temporales

Se tiene en cuenta que los valores obtenidos por ambos métodos poseen errores sistemáticos, por esta razón, en el presente estudio se aplica la metodología propuesta por Schneider et al. (2010) para obtener las diferencias en las series temporales entre

ambos métodos. Estas se estimaron a partir a través de:

$$Dif = \frac{2 * (X - FTIR_y)}{X + FTIR_y} \quad (3.3)$$

X son los valores de PWV pertenecientes al método GPS, mientras que $FTIR_y$ son los valores de las tres regiones espectrales del método FTIR: NIR, MIR1 y MIR2.

La prueba se aplicó a las correlaciones temporales, por día y hora. Esto con el fin de obtener una idea en la diferencia de los valores medidos por ambos métodos en un mismo intervalo de tiempo.

Resultados

En esta sección se describen los resultados obtenidos en las recuperaciones de PWV por WACCM y radiosondeo. Se describe la variación anual y mensual, seguido de las correlaciones de los promedios por día y hora entre las tres regiones espectrales de FTIR y GPS. Además de las diferencias entre los valores en las series.

4.1. Recuperación con WACCM: variación anual

La Figura 4.1 muestra la serie temporal de PWV registrada por el método FTIR (NIR, MIR1 y MIR2) y GPS. Se puede observar que los valores de PWV registrados por GPS son más altos que los de FTIR. Se debe tomar en cuenta que este método tiene la habilidad de registrar mediciones durante días nublados. Estas series serán descritas con detalle más adelante.

En la Tabla 4.1 se pueden observar los valores de los estadísticos utilizados. Los resultados muestran que el método GPS registró el máximo, el promedio más alto y la mayor dispersión en toda la serie temporal en comparación con los valores registrados por las tres regiones espectrales de FTIR. Con respecto a estas últimas, la región NIR presentó el mayor máximo y menor promedio, mientras que en la región MIR1 se observó la mayor dispersión.

La Tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos del sesgo de cielo claro. Los valores fueron calculado a partir de agosto de 2014, ya que son los valores de PWV disponibles por el método GPS. Se puede apreciar que la región espectral MIR2 registró el menor sesgo en los años 2014, 2016 y 2017, resaltando el menor valor en toda la serie durante el 2016 en esta región. La región espectral MIR1 presentó el menor sesgo en 2015 y en toda serie temporal.

4. RESULTADOS

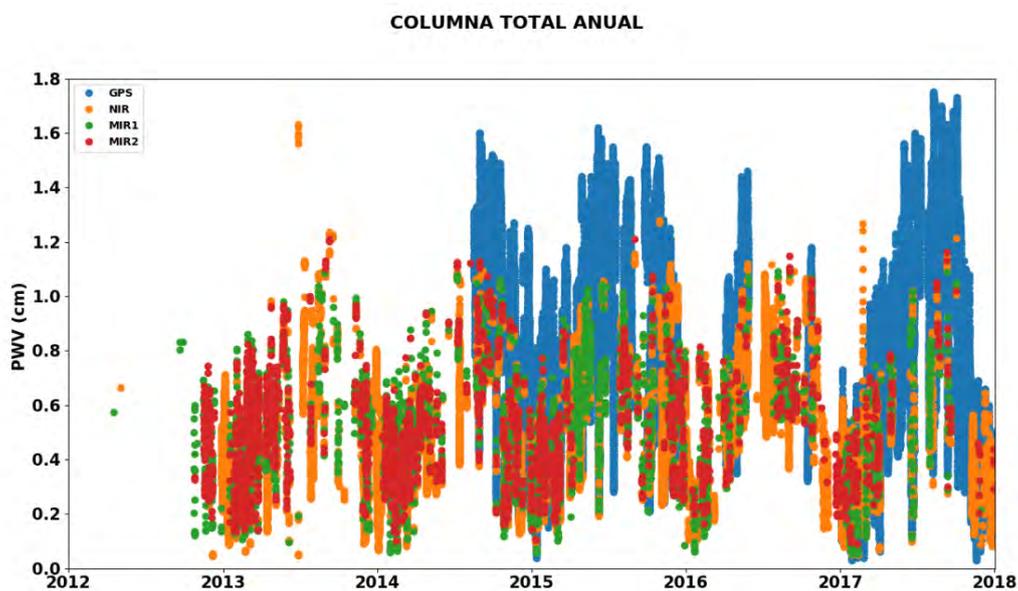


Figura 4.1: Series temporales registradas por el método GPS y las tres regiones espectrales NIR, MIR1 Y MIR2.

Tabla 4.1: Valores de los estadísticos aplicados sobre las series temporales. Los valores de GPS aquí registrados incluyen los días con nubosidad.

	GPS	NIR	MIR1	MIR2
No. datos	116295	46411	3665	3160
Máximo	1.75 cm	1.6305 cm	1.0963 cm	1.2115 cm
Mínimo	0.03 cm	0.0455 cm	0.0520 cm	0.0903 cm
Promedio	0.7609 cm	0.4350 cm	0.4928 cm	0.4927 cm
S ²	0.1385 cm ²	0.0410 cm ²	0.0501 cm ²	0.0408 cm ²
S	0.3722 cm	0.2024 cm	0.2240 cm	0.2022 cm

Tabla 4.2: Resultados anuales del sesgo de cielo claro a partir de $B = 1 - \frac{PWV_{FTIR}}{PWV_{GPS}}$

Método/ Año	NIR	MIR1	MIR2
2014	+54.21 %	+45.21 %	+40.87 %
2015	+31.28 %	+29.18 %	+39.80 %
2016	+27.07 %	+33.13 %	+23.46 %
2017	+52.93 %	+36.92 %	+30.62 %
Todos Años	+39.38 %	+30.32 %	+32.46 %

4.1.1. Variación anual GPS

Se observa que en la serie temporal de GPS se disponen datos desde agosto de 2013 hasta enero de 2018, con huecos a inicios, mediados y finales de 2016 atribuidos a fallas eléctricas en la estación.

Se contabilizó un total de 116 295 valores cuyo mínimo y máximo oscilaron entre 0.03 cm y 1.75 cm respectivamente, y un promedio de 0.7609 cm (figura 4.2). Además se aprecian dos ciclos anuales bien definidos durante los años 2015 y 2017, con los mínimos a principio y finales de año, mientras que el máximo se observa en a mediados del año.

4.1.2. Variación anual NIR

En la región NIR se registraron un total de 46 411 mediciones en esta región, con una escala temporal que abarca desde mayo de 2012 hasta diciembre de 2017. El valor máximo y mínimo fueron 1.6305 cm y 0.0455 cm respectivamente, con un promedio en toda la serie de 0.4356 cm. La línea roja representa los ciclos anuales, se puede apreciar que los mínimos ocurren a principio y finales de año, mientras que los máximos se alcanzan a mediados (figura 4.3).

4.1.3. Variación anual MIR1

Por otra parte la región MIR1 registró un total de 3 665 mediciones durante octubre de 2012 hasta diciembre de 2017. La serie temporal se observó un máximo de 1.0963

4. RESULTADOS

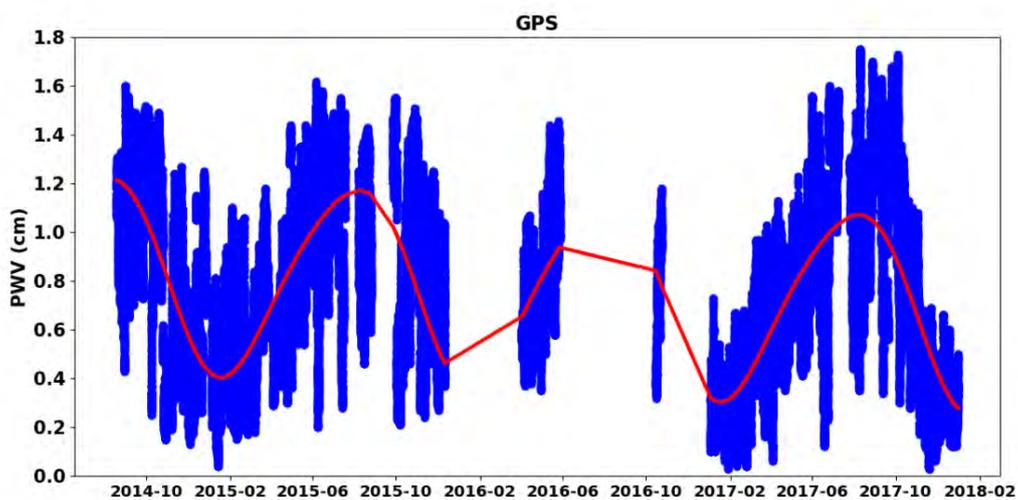


Figura 4.2: Series temporales registradas por el método GPS. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.

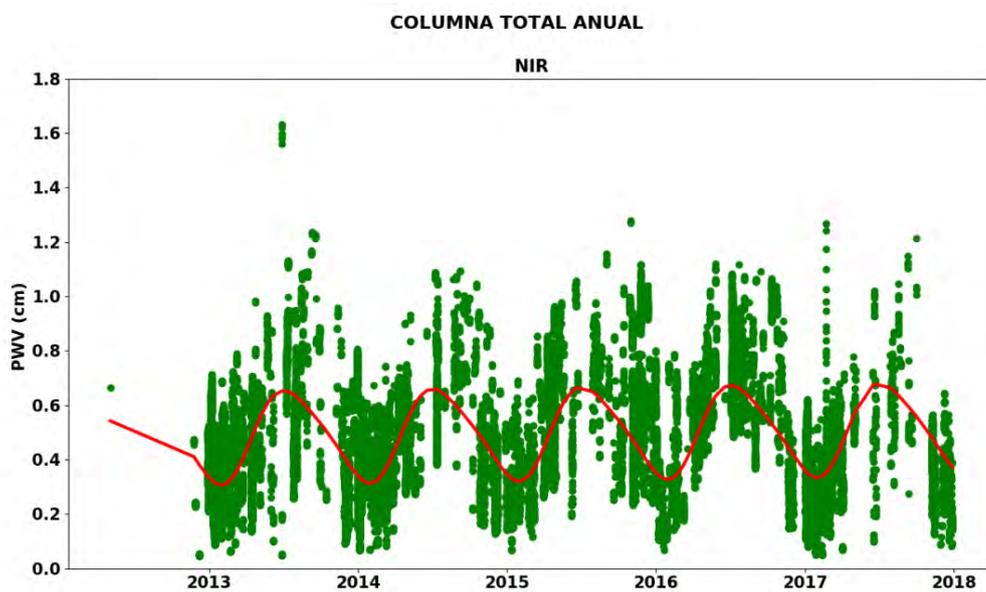


Figura 4.3: Series temporales registradas por el método FTIR región espectral NIR. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.

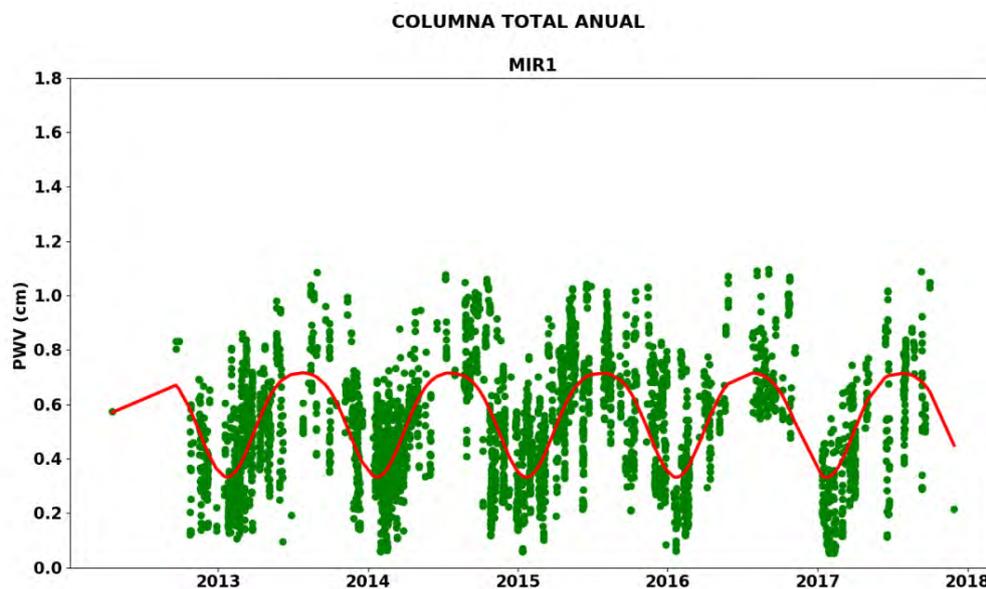


Figura 4.4: Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR1. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.

cm, promedio de 0.4928 cm y un mínimo de 0.0520 cm. Se aprecian ciclos bien definidos (línea roja) con su máximo a mitad del año (figura 4.4).

4.1.4. Variación anual MIR2

En la región espectral MIR2 se recuperaron 3 160 valores desde octubre de 2012 hasta diciembre de 2017. Los valores máximo osciló entre 1.2115 cm y un promedio en toda la serie de 0.4927 cm. A pesar de la dispersión de los valores en la serie temporal se pueden observar los ciclos anuales (línea roja) con el máximo a mediados del año y los mínimos a principios y finales (figura 4.5).

4.2. Recuperación con WACCM: variación mensual

4.2.1. Variación mensual GPS

Los promedios mensuales en toda la serie temporal registrada por parte del GPS, muestra promedios mínimos durante los meses de enero y febrero, octubre, noviembre

4. RESULTADOS

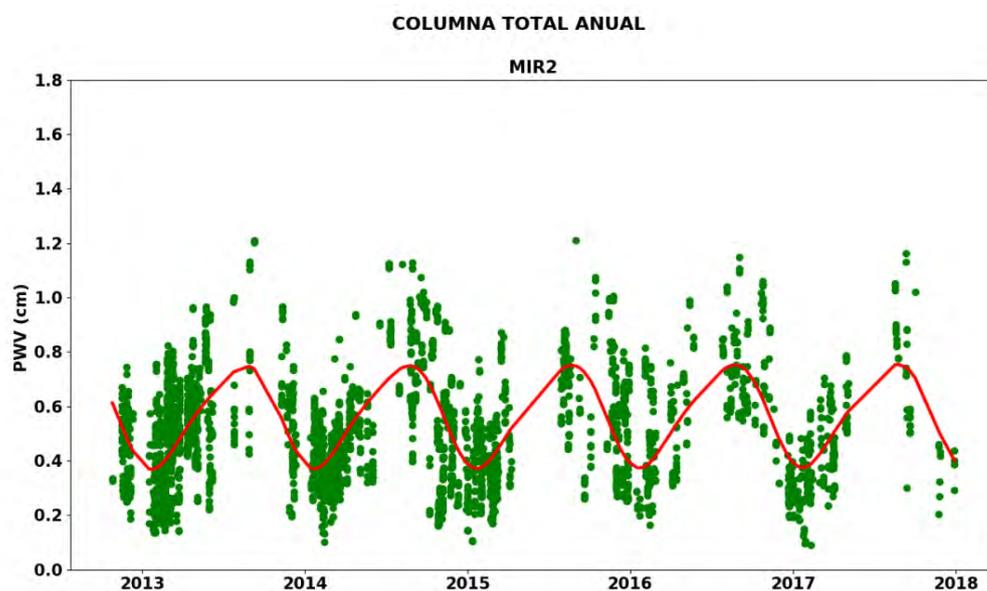


Figura 4.5: Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR2. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.

y diciembre, correspondientes a las estaciones de invierno y otoño, respectivamente. Además, puede observarse que los valores comienzan a incrementar a partir de los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, mes en el cual se alcanza el promedio máximo durante la serie. Estos meses que corresponden a las estaciones de primavera y verano (figura 4.6).

Al analizar los promedios mensuales por año se puede observar que durante el año 2014 se cuenta con valores desde agosto a diciembre, tendremos que recordar que el instrumento se instaló a finales del 2014. Su valor máximo se alcanzó durante el mes de septiembre (1.1 cm), además se observa su disminución en los meses posteriores, correspondientes a la temporada de otoño de 0.4 cm. La mayor dispersión se observa en el mes de diciembre (figura 4.7).

En la figura 4.8 correspondiente al año 2015 se puede observar una serie temporal completa. El mínimo se observa de 0.40 cm durante los meses de enero y febrero (invierno), en los meses posteriores (primavera y verano) se observa un incremento alcanzando el máximo durante el mes de septiembre de 1.37 cm, y su descenso durante octubre, noviembre y diciembre (otoño). En septiembre se aprecian los mayores valores y dispersión durante este año.

Durante el 2016 sólo se pudieron documentar los meses de abril, mayo y octubre,

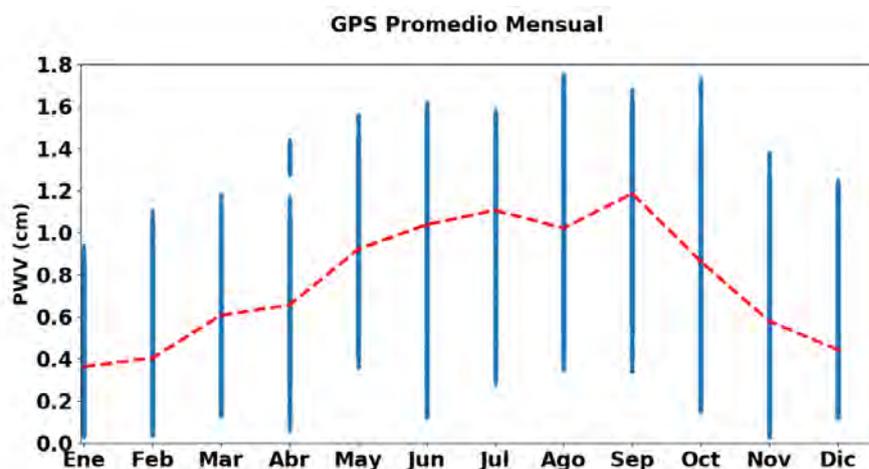


Figura 4.6: Promedios mensuales de PWV registrados por el método GPS durante agosto 2014 hasta diciembre 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

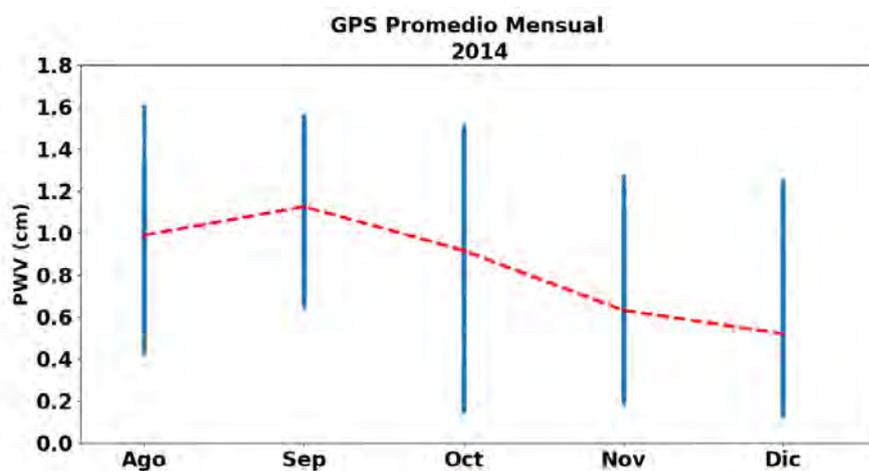


Figura 4.7: Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2014. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4. RESULTADOS

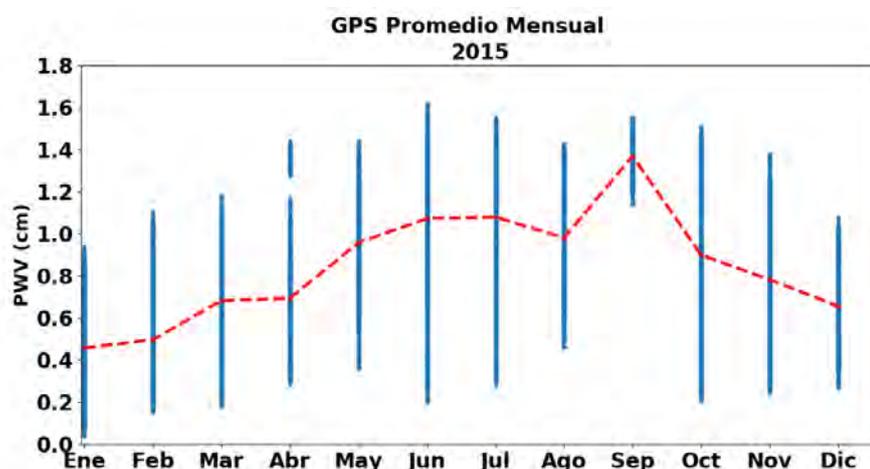


Figura 4.8: Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2015. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

debido a fallas técnicas en la estación, pero se puede observar que el promedio durante esos meses fue de 0.57, 0.92 y 0.85 cm respectivamente, valores muy similares a los registrados en estos meses durante el año 2015 y octubre de 2014 (figura 4.9).

Para finalizar, en el año 2017 nuevamente pueden observarse los valores mínimos durante enero y febrero (invierno) de 0.22 cm y 0.26 cm, un incremento en los meses posteriores y dos valores máximos de 1.16 y 1.21 cm durante julio y septiembre respectivamente, para finalizar con valores mínimos de 0.25 y 0.26 cm en noviembre y diciembre (figura 4.10).

4.2.2. Variación mensual NIR

En la figura 4.11 se muestran los promedios mensuales en toda serie de FTIR producto NIR, se puede observar que los valores máximo alcanzados se registraron durante el mes de septiembre, con un valor máximo de 0.711 cm, seguido de los meses mayo (0.6189 cm) y agosto (0.6863 cm). Nuevamente vuelven a observarse los mínimos durante enero (0.3250 cm) y febrero (0.3211 cm), un incremento durante los meses posteriores, un promedio máximo en septiembre y una disminución durante octubre, noviembre y diciembre (otoño).

Durante el año 2012 se adquirió el espectrometro FTIR HR 120/5, por lo cual sólo se cuenta con una serie temporal de pocos meses. Alcanzado el promedio máxima (0.6641

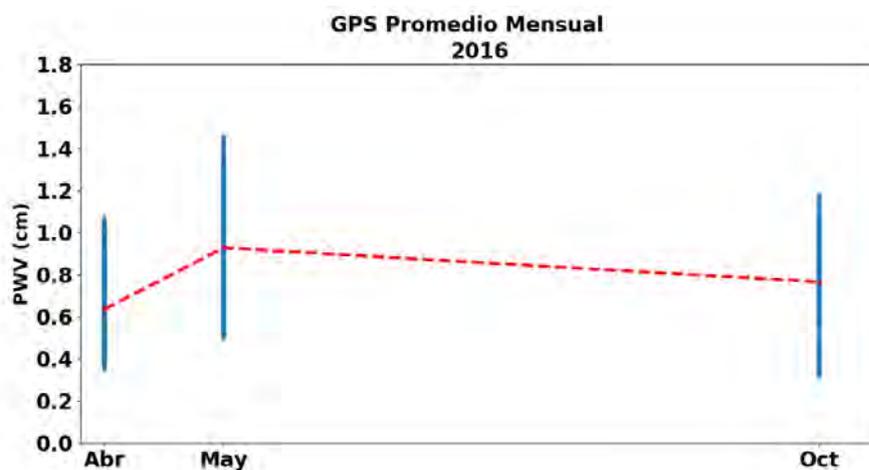


Figura 4.9: Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2016. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

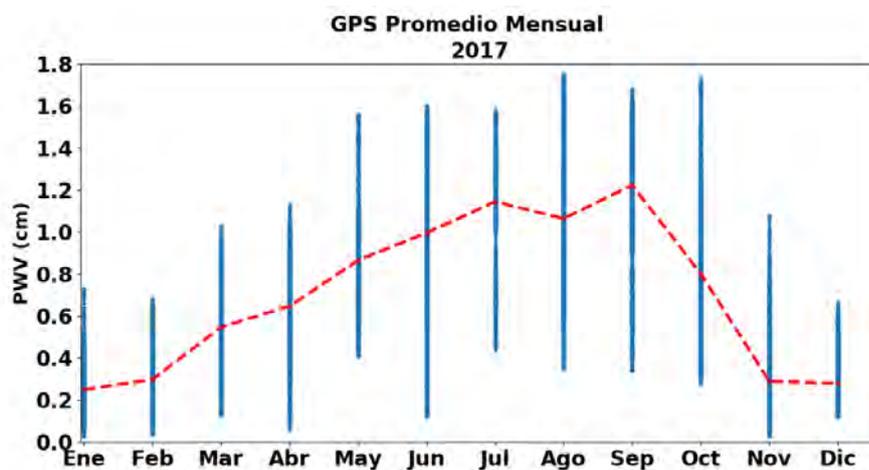


Figura 4.10: Promedios mensuales de PWV registrados durante el año 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4. RESULTADOS

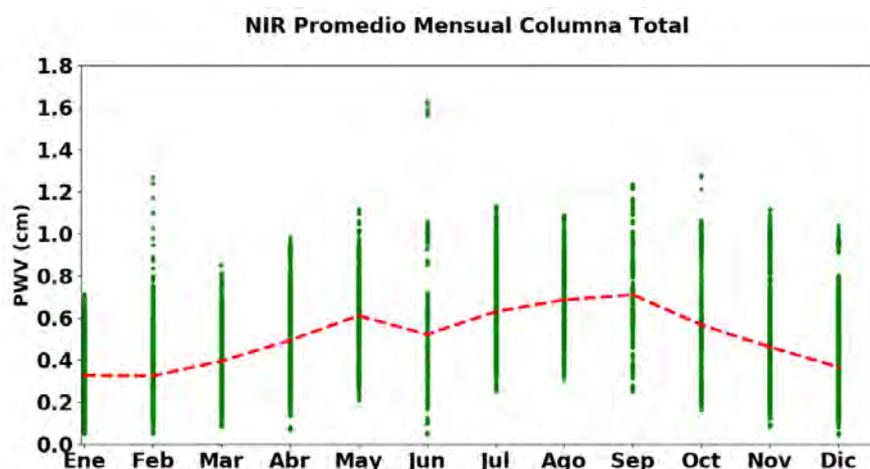


Figura 4.11: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante mayo 2012 hasta diciembre de 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

cm)(figura 4.12).

Analizando los promedios mensuales durante el año 2013 se puede observar una serie completa. Los valores mínimos se registraron durante enero, febrero, marzo y abril (0.37 cm), correspondientes a los periodos de invierno e inicio de la primavera. El valor máximo se registró en junio (1.63 cm) mientras que el promedio mensual más alto en septiembre (0.75 cm) seguido de un descenso en los meses de octubre, noviembre y diciembre (0.35 cm), correspondientes a la estación de otoño (figura 4.13).

Durante el año 2014 se vuelve a observar el mismo patrón, promedios mínimos en febrero y diciembre. El máximo durante el verano (septiembre) de 0.8033 cm, con una disminución a principios del otoño (octubre) de 0.2735 cm (figura 4.14).

La figura 4.15 muestra la variabilidad mensual durante el año 2015 de PWV producto espectral NIR. Se puede apreciar que la serie registra dos promedios máximos en los meses de mayo (0.7344 cm) y agosto (0.7507 cm). Con los mínimos durante los meses de enero (0.3655 cm) y febrero (0.3154 cm).

En el año 2016 se puede observar el promedio mínima en enero, con un aumento en los meses posteriores, un máximo en julio (0.7573 cm) y otro en octubre (0.7843 cm), y un descenso entre ellos(figura4.16).

La figura 4.17 exhibe los promedios mensuales durante el año 2017. Los promedios mínimos se registraron en enero (0.2976 cm) y febrero (0.2886 cm), con un aumen-

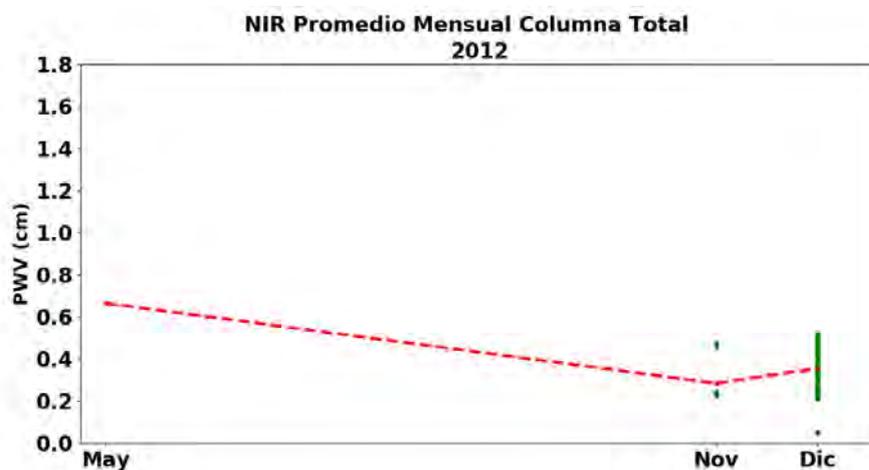


Figura 4.12: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

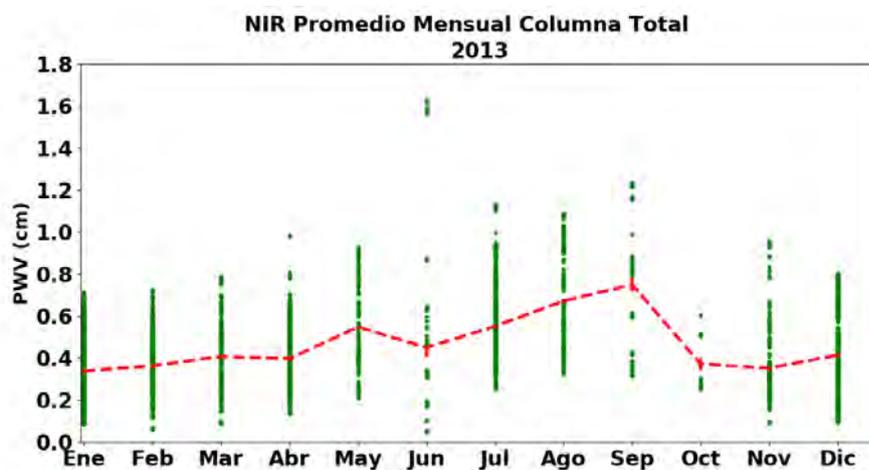


Figura 4.13: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4. RESULTADOS

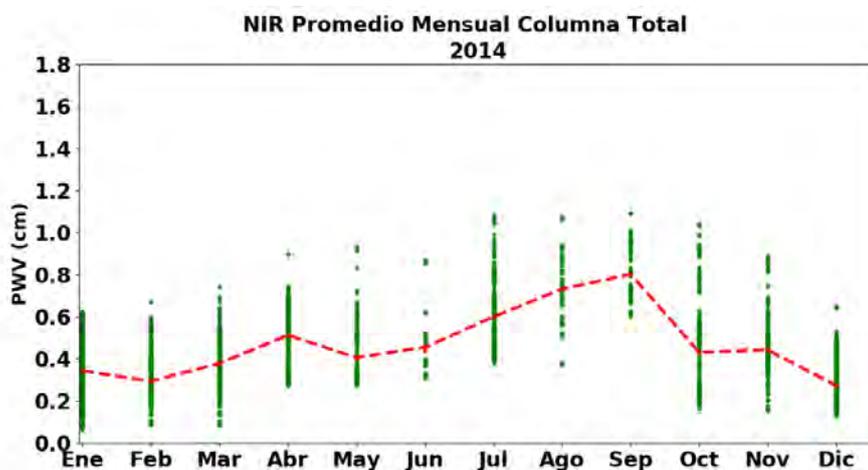


Figura 4.14: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

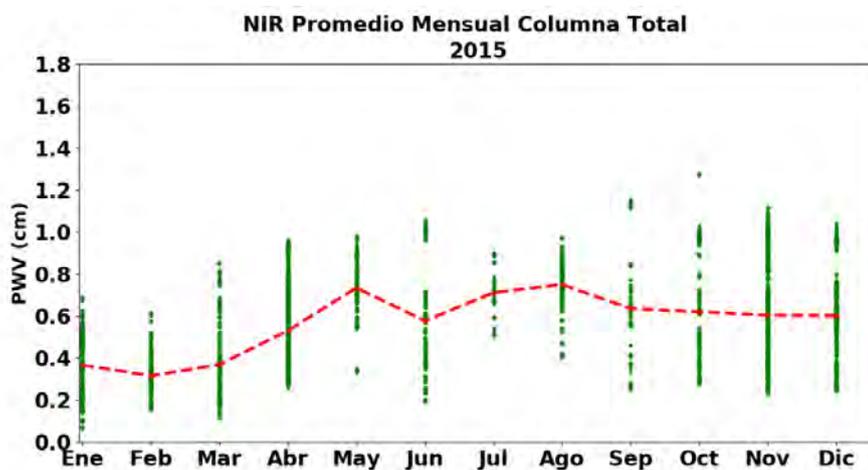


Figura 4.15: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

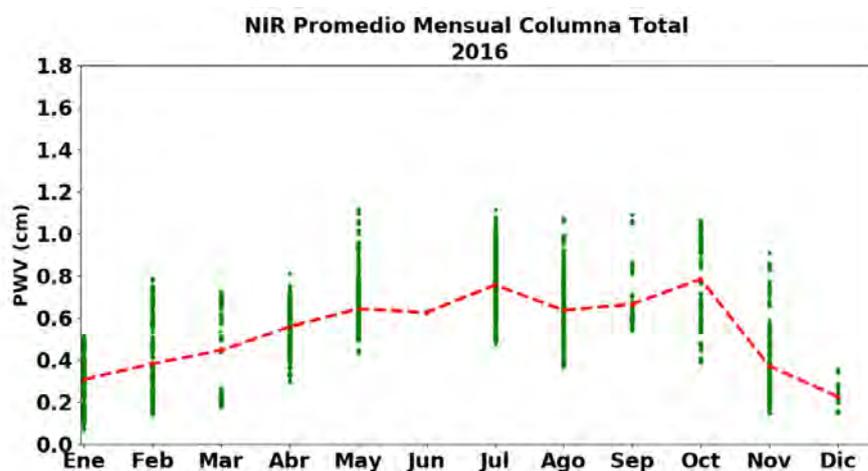


Figura 4.16: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

to gradual hasta alcanza dos máximos, uno en agosto (0.7275 cm) y otro en octubre (1.0699 cm). Además, un descenso abrupto en noviembre de 0.30 cm. Resalta la falta de datos en octubre.

4.2.3. Variación mensual MIR1

Al analizar los promedios mensuales registradas por FTIR producto espectral MIR1, la cual contiene valores de marzo de 2012 hasta octubre de 2017. En la serie se puede observar los mínimos en enero y febrero correspondientes a la estación de invierno, con aumentos graduales y un máximo en agosto de 0.7519 cm (verano) y una disminución en los meses posteriores (otoño)(figura 4.18).

La serie temporal registrada por la región espectral MIR1 tiene inicio en el 2012, año es que se adquirió el espectrometro HR 120/5, por lo tanto esta serie cuenta con pocos valores. Tomando en cuenta los valores a partir del mes de octubre, se puede observar el promedio máximo (4.19).

Los valores mensuales durante el años 2013 muestran el promedio mínimo en enero (0.2809 cm), un aumento gradual en los meses posteriores, una disminución en el mes de junio y un máximo de 0.7989 cm durante agosto, una disminución paulatina en los meses posteriores correspondientes a la estaciones de final del verano y otoño. (figura 24 4.20).

4. RESULTADOS

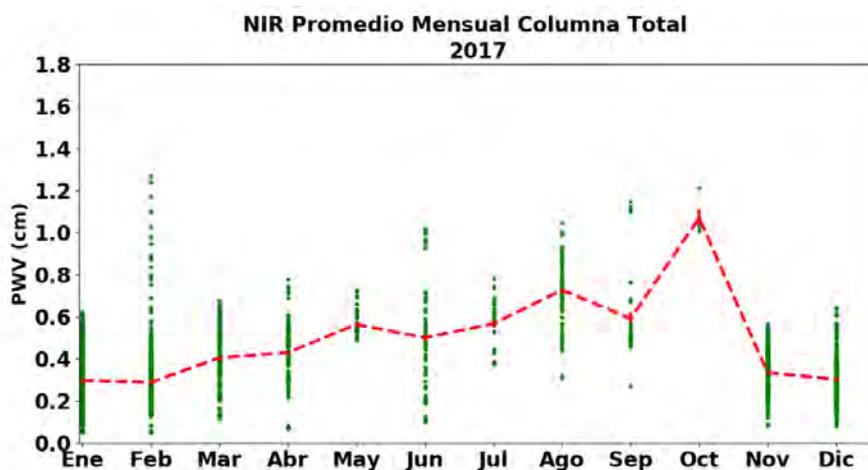


Figura 4.17: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

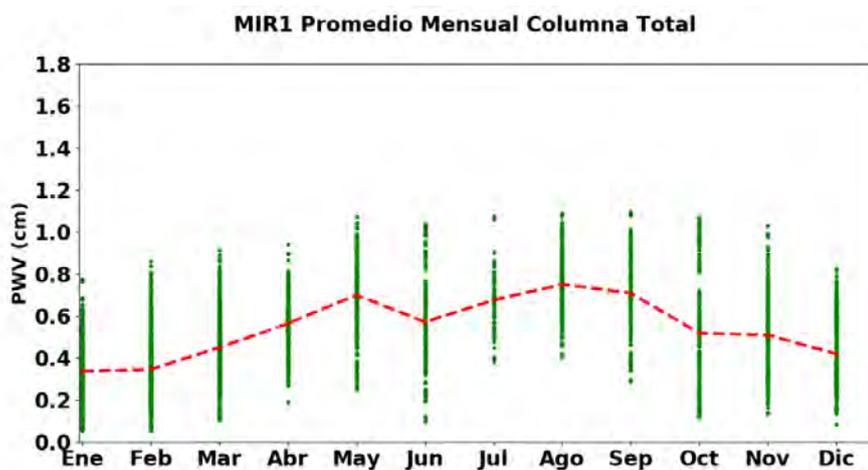


Figura 4.18: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante marzo 2012 hasta diciembre de 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

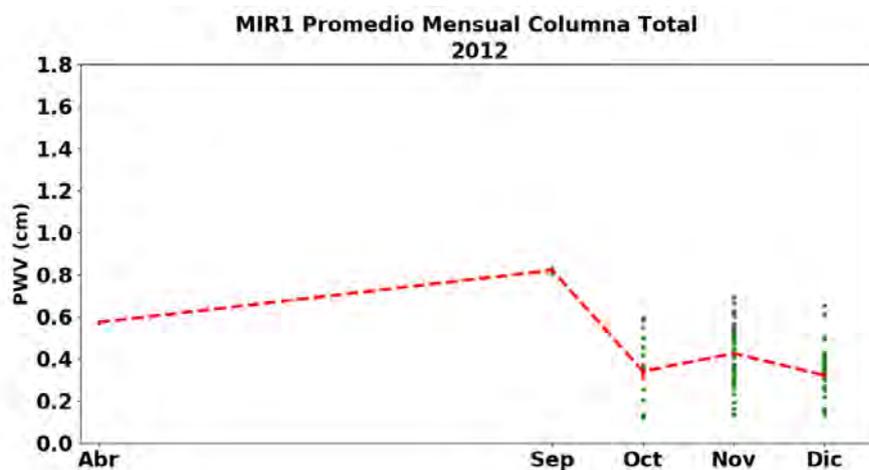


Figura 4.19: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

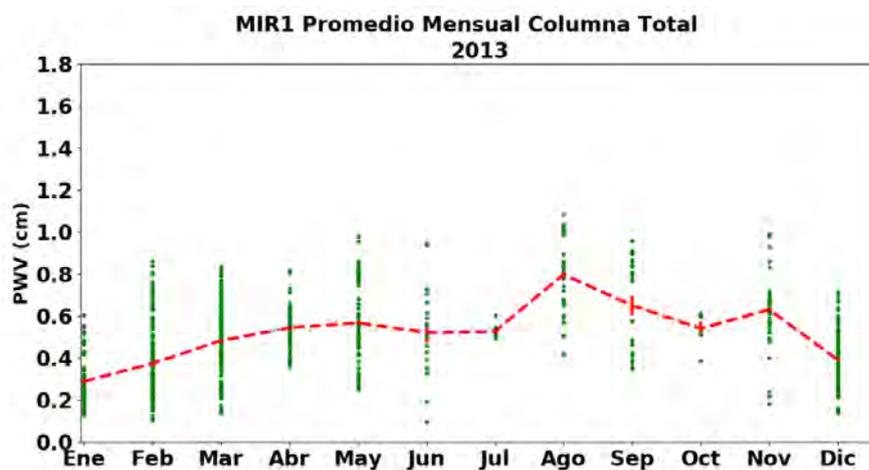


Figura 4.20: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4. RESULTADOS

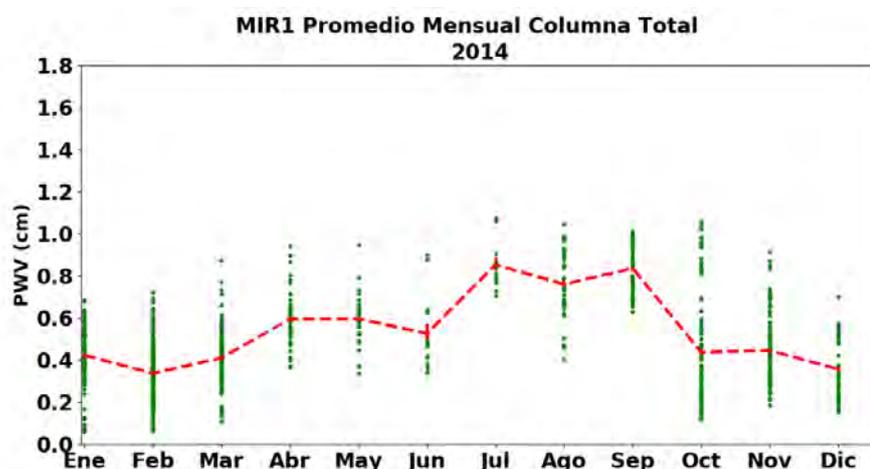


Figura 4.21: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

La figura 4.21 muestra los valores de PWV obtenidos durante el año 2014, con un promedio mínimo en febrero y dos máximos similares, uno en julio y otro en septiembre de 0.8545 cm y 0.8374 cm, respectivamente. Además se puede apreciar una disminución abrupta entre septiembre y octubre de 0.4372 cm.

La serie registrada durante el 2015 muestra el menor promedio en invierno (0.3742 cm) y principios de la primavera (enero, febrero y marzo) y máximos en mayo (0.805 cm) y agosto (0.7481 cm), correspondientes a la temporada de verano. Además de una posterior disminución a finales del verano y principios de otoño (figura 4.22).

En la serie temporal del año 2016 se pueden observar huecos en los meses de junio y diciembre, y un error estándar mayor para mayo, julio, septiembre y octubre, este último registró el mayor promedio de 0.7941 cm en la serie. Además, resalta el mínimo de 0.1895 cm durante enero (figura 4.23).

Los promedios mensuales durante el 2017 muestran nuevamente mínimo en enero, seguido de un aumento gradual en los valores de PWV y un promedio máximo de 1.0406 cm en octubre, hay que resaltar la poca cantidad de mediciones durante este mes (círculos verdes) (figura 4.24).

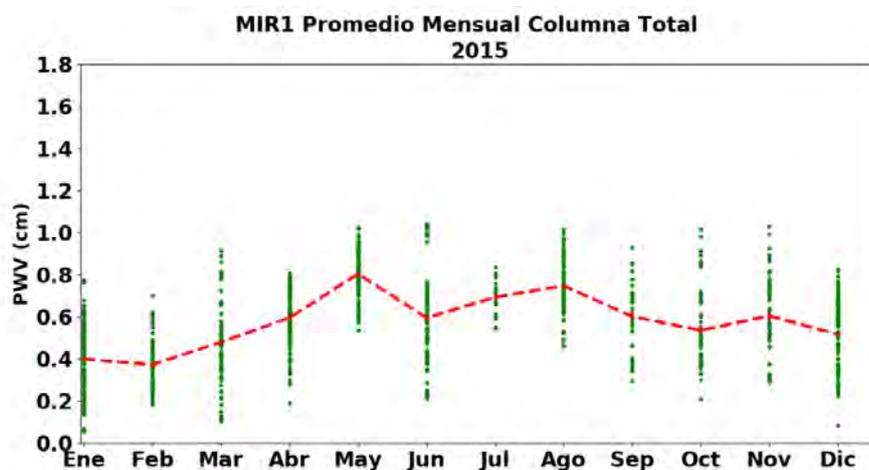


Figura 4.22: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

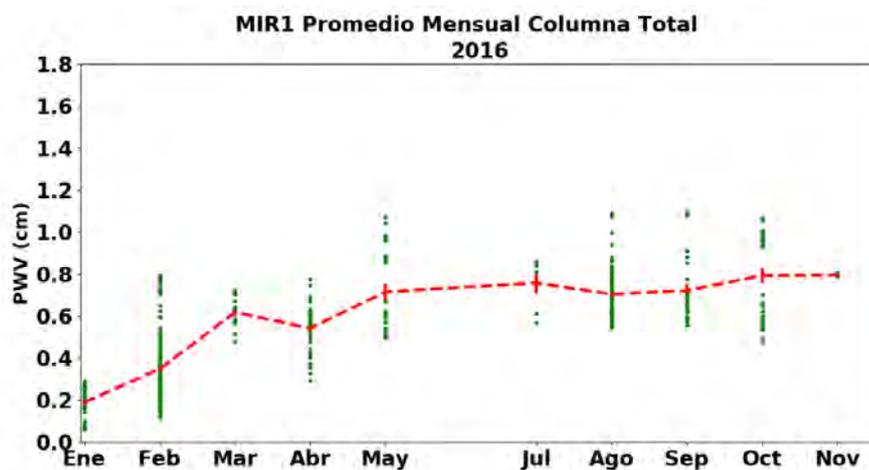


Figura 4.23: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

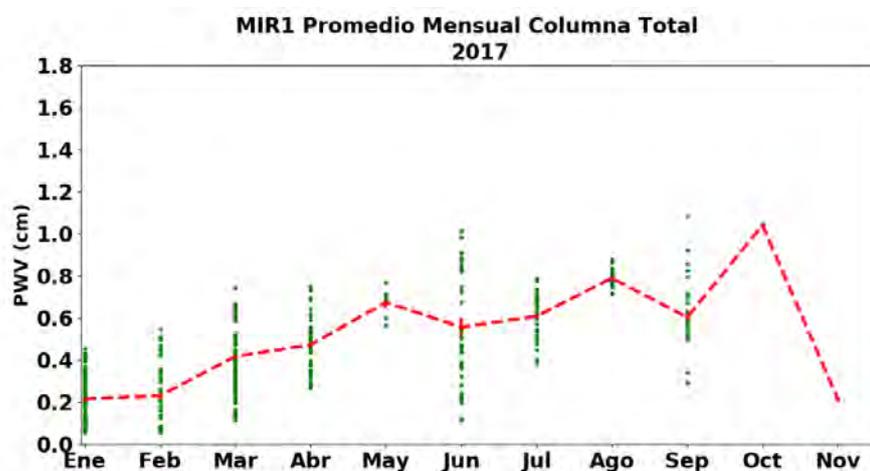


Figura 4.24: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1 durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4.2.4. Variación mensual MIR2

La figura 4.25 muestra los promedios mensuales obtenidas por FTIR producto espectral MIR2. La serie contiene valores de octubre de 2012 hasta diciembre de 2017. Se observan los valores mínimos en enero y febrero, seguidos de un posterior aumento en mayo de 0.5968 cm, un descenso en junio y máximo en julio de 0.7672 cm, seguido de una disminución a partir de octubre.

La serie temporal tiene inicio durante el años 2012. La figura 4.26 muestra los últimos tres meses del año. Los meses registrados octubre, noviembre y diciembre, resaltando que el mes de noviembre registró el promedio relativamente más alta de este año.

En el año 2013 los mayores valores mensuales se observan entre los meses agosto, septiembre y noviembre, resaltando el mes de septiembre cuyo valor osciló en 1.2062 cm. Nuevamente los mínimos se presentan en enero y diciembre de 0.3224 cm y 0.4562 cm, respectivamente.

Durante el 2014 se presentaron dos máximos, julio (0.8844 cm) y septiembre (0.8365 cm), resalta el cambio abrupto entre junio y julio. El mínimo se exhibe en febrero (0.3574 cm), mes correspondiente a la estación de invierno (figura 4.28).

La serie observada durante el 2015 muestra huecos en los meses de mayo y junio, además de registrar una poca cantidad de datos en los meses de abril, julio, septiembre

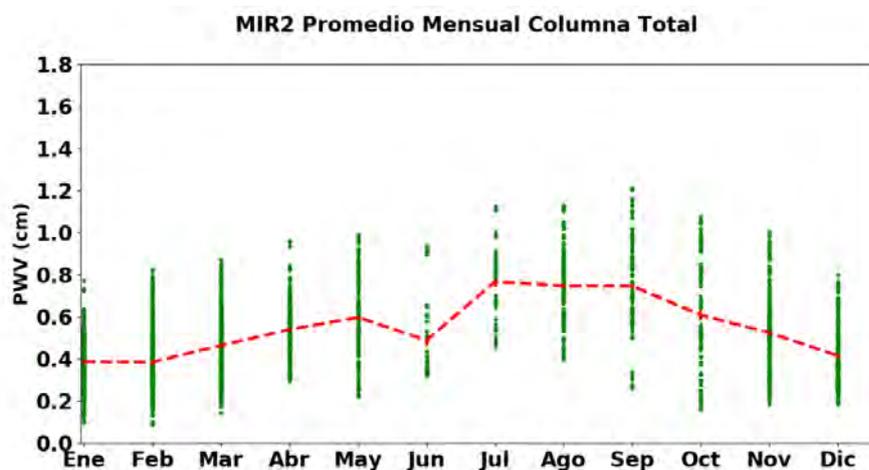


Figura 4.25: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante octubre de 2012 hasta diciembre de 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

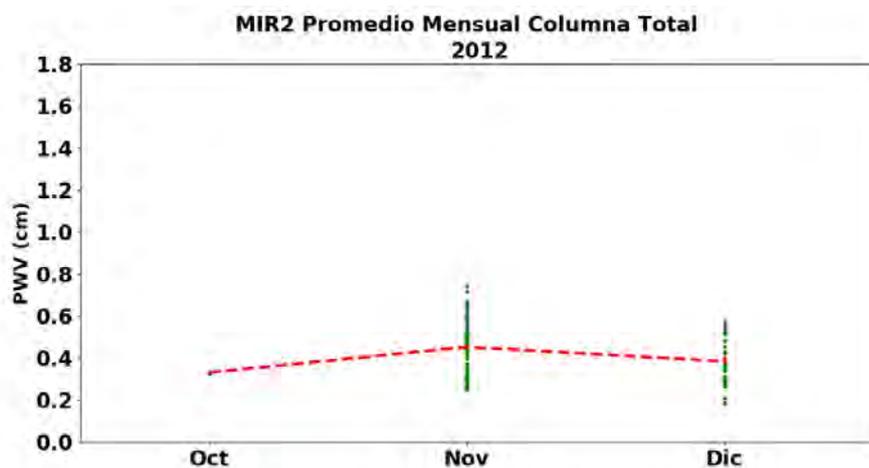


Figura 4.26: Promedio mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar..

4. RESULTADOS

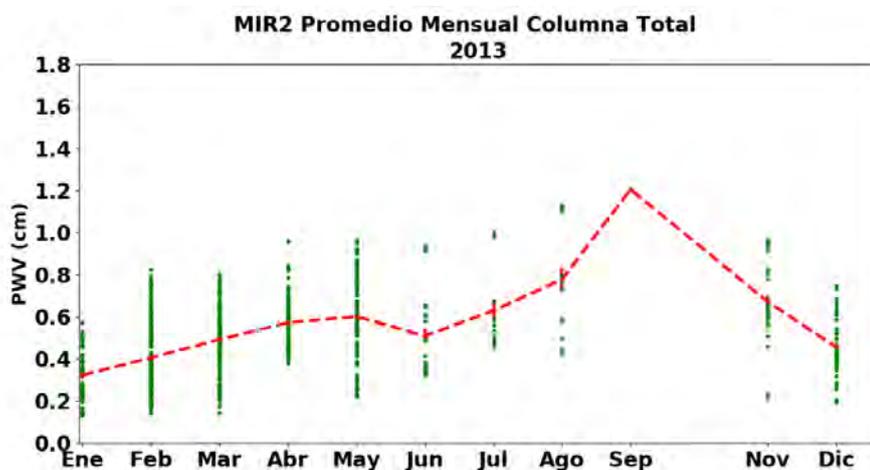


Figura 4.27: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

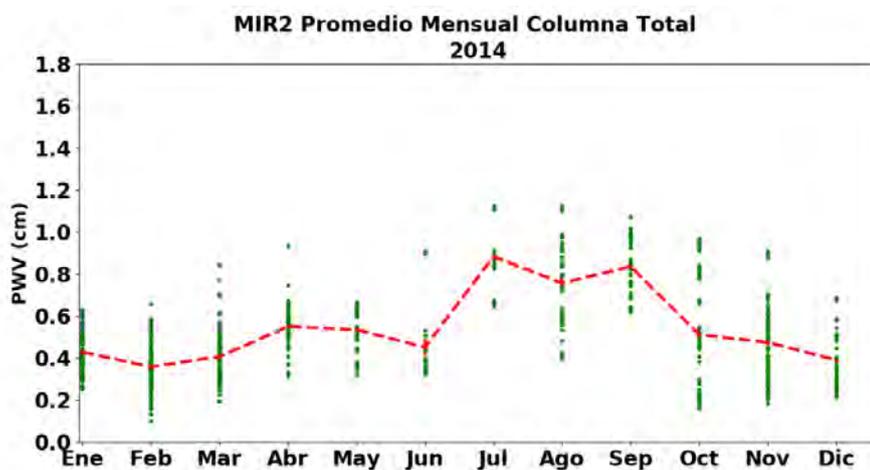


Figura 4.28: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

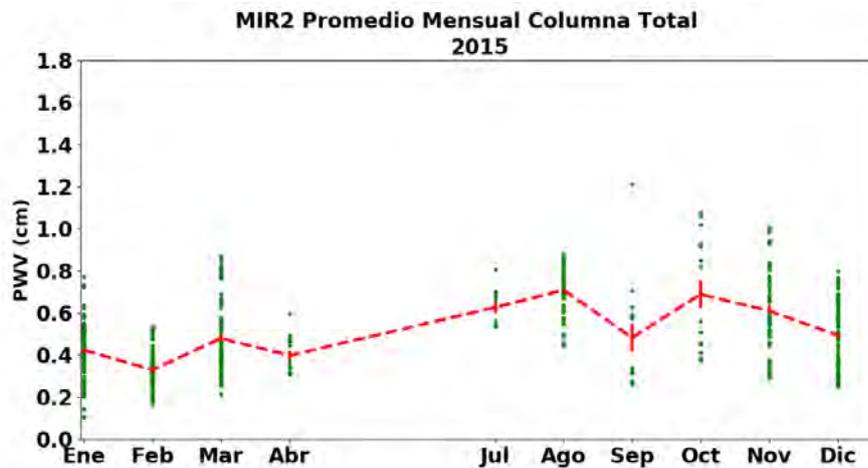


Figura 4.29: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

y octubre. El promedio máximo mensual se registró en agosto (0.7086 cm), mientras que el mínimo vuelve a presentarse en febrero (0.3289 cm) y en esta ocasión durante septiembre (0.4228 cm) (4.29).

En la Figura 4.30, correspondiente al año 2016, se aprecian cuatro picos máximos en la serie durante marzo (0.61 cm), mayo (0.7471 cm), julio (0.8181 cm) y octubre (0.7875 cm). Los mínimos en enero (0.2441 cm) y diciembre (0.2948 cm), correspondientes al final del otoño e inicios del invierno. Resalta la falta de observaciones durante el mes de junio y la poca información en julio.

La serie final, perteneciente al año 2017, muestra el promedio mínimo en enero (0.28 cm), seguido de un incremento hasta el mes de mayo, una falta de valores en los meses de junio y julio, además de exhibir el máximo durante agosto (0.9025 cm). Se puede apreciar otro máximo durante octubre (1.0199 cm), pero puede ser atribuido al resultado de pocas mediciones durante ese mes (figura 4.31). En ambos meses se presentó el mayor error estándar en los valores de PWV.

4.3. Correlaciones por día

En esta sección se describen las correlaciones de los promedios obtenidos por día entre ambos métodos. Por lo tanto el número de promedios registrados hace referen-

4. RESULTADOS

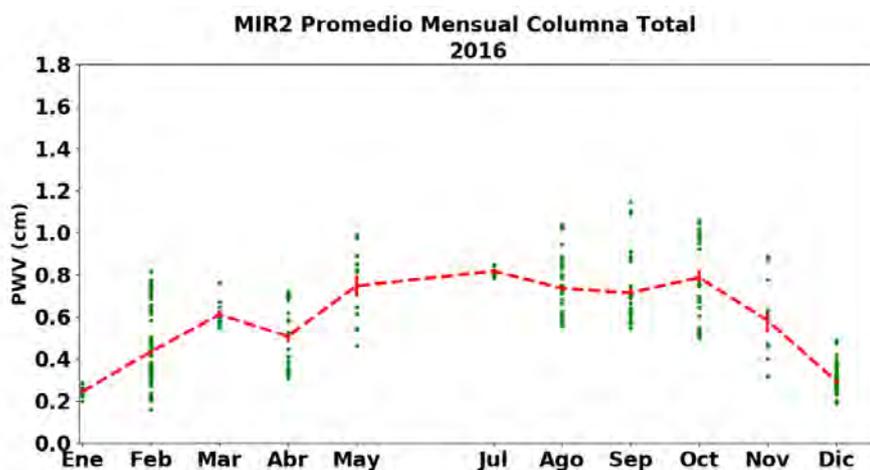


Figura 4.30: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

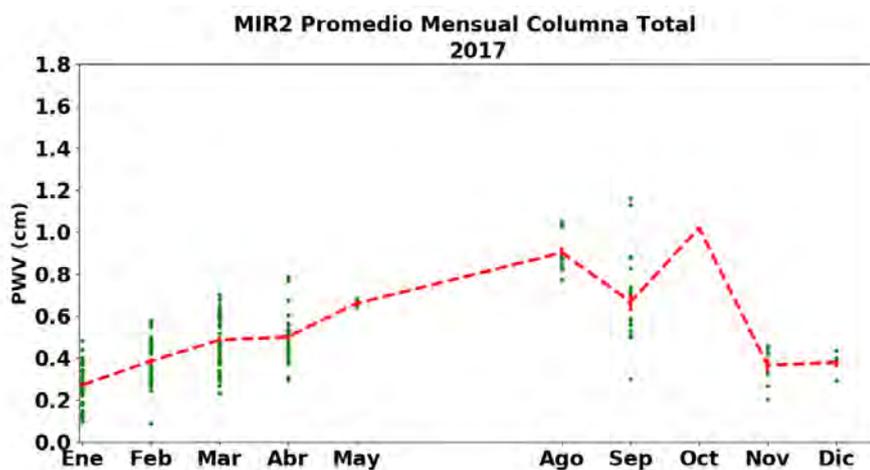


Figura 4.31: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2 durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

Tabla 4.3: Resultado de las correlaciones de los promedios por día entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.

Correlación	Coincidencias	R ²	Pendiente (m)	Diferencia%	SCC %
NIR-GPS	360	0.902	1.1369±0.0389	13.64	12.77
MIR1-GPS	225	0.901	1.0792±0.0443	8.43	8.09
MIR2-GPS	181	0.879	1.0536±0.0576	7.84	7.54
MIR2-NIR	423	0.949	0.9678±0.0213	-6.88	+ + +
MIR2-MIR1	429	0.938	0.9741±0.0213	-3.7	+ + +
NIR-MIR1	549	0.927	0.9790±0.0231	6.65	+ + +

cia a los días de medición de FTIR y GPS. Hay que hacer énfasis en que los valores registrados en esta sección aún poseen el sesgo de cielo despejado (clear-sky dry bias). Además se describen las diferencias calculadas a partir de la ecuación 3.3 en las series temporales.

Para obtener una mejor correlación entre los pares de datos por parte de ambos instrumentos, se realizaron los promedios por día. Posteriormente se correlacionaron realizando el criterio de coincidencia temporal para encontrar los valores de PWV medidos por GPS que coincidan en temporalidad con los medidos por FTIR.

La dispersión tienen una gran importancia al momento de comparar ambas series, ya que la correlación tipo I asume que los valores en el eje x no poseen dispersión alguna, por lo tanto se ha decidido tomar los valores con menor desviación estándar para este eje.

4.3.1. Promedio diario

Se correlacionan los promedios de los tres productos de FTIR (NIR, MIR1 y MIR2) contra los valores de GPS. Por lo tanto su representación es la siguiente: NIR-GPS, MIR1-GPS y MIR2-GPS. Además, se correlacionan los productos FTIR entre ellos mismos, con el objetivo de encontrar discrepancias entre las distintas ventanas espectrales (Tabla 4.3). Su presentación es la siguiente: MIR2-NIR, MIR2-MIR1 y NIR-MIR1, recordando que los valores de MIR2 presentaron los menores valores de dispersión.

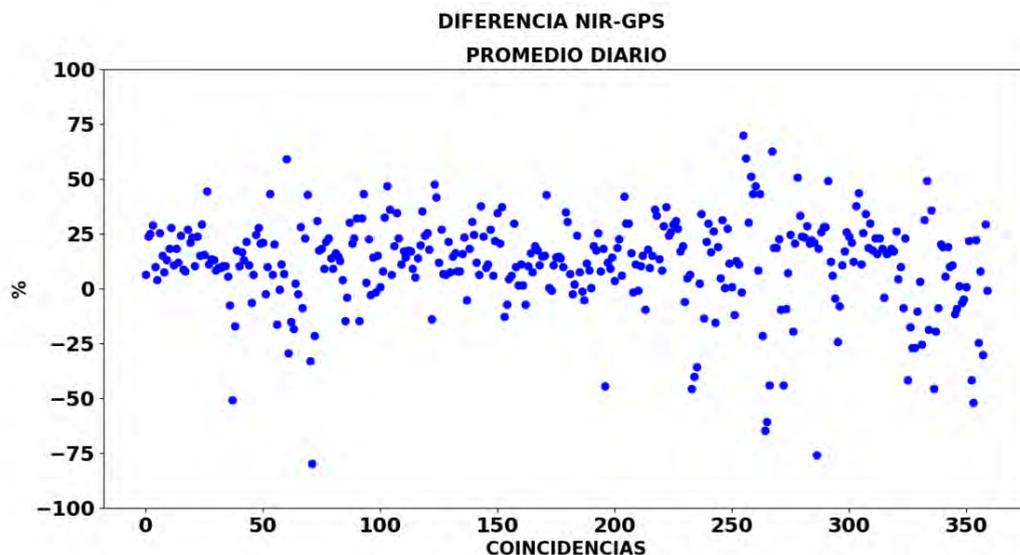


Figura 4.32: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIR y GPS.

4.3.1.1. Correlación promedio diario NIR-GPS

Al correlacionar los promedios por día obtenidos por GPS y FITR producto espectral NIR, se encontró un total de 360 coincidencias y un R^2 de 0.9025, además de registrar una discrepancia total de 13.64 % en los valores (Tabla 4.3). Lo anterior puede observarse en la Figura 4.32, con una diferencia hacia los valores positivos a principio de la serie temporal y una diferencia en ambos sentidos al final. Además se aprecia que valores pequeños de PWV en NIR, los valores de GPS resultan relativamente más secos y viceversa. (Figura 4.33).

4.3.1.2. Correlación promedio diario MIR1-GPS

La Figura 4.35 muestra la correlación entre GPS y MIR1, con un total de 225 coincidencias en toda la serie temporal, una R^2 de 0.901, pendiente de 1.0792 ± 0.0443 y una diferencia total entre los valores del 8.43 %. Se observa que valores >0.6 cm medidos por GPS son más secos. En general se puede observar una dispersión en toda la series entre ± 50 %, con pocos valores tendiendo hacia los negativos (Figura 4.34).

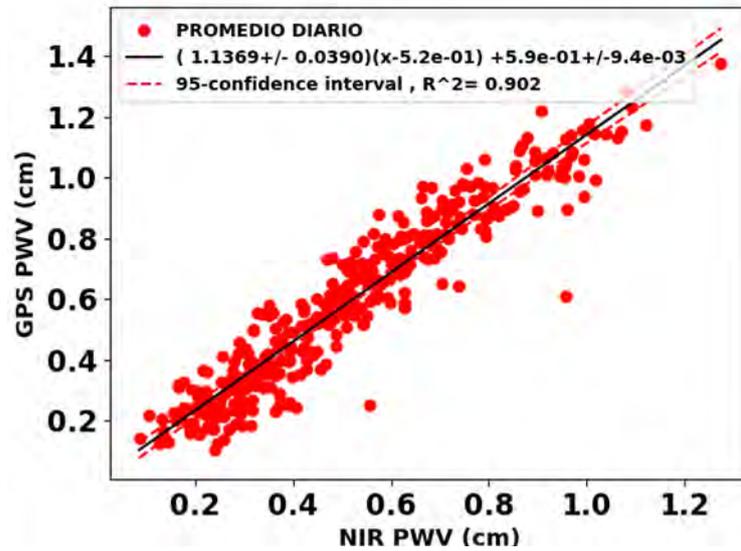


Figura 4.33: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIR y GPS.

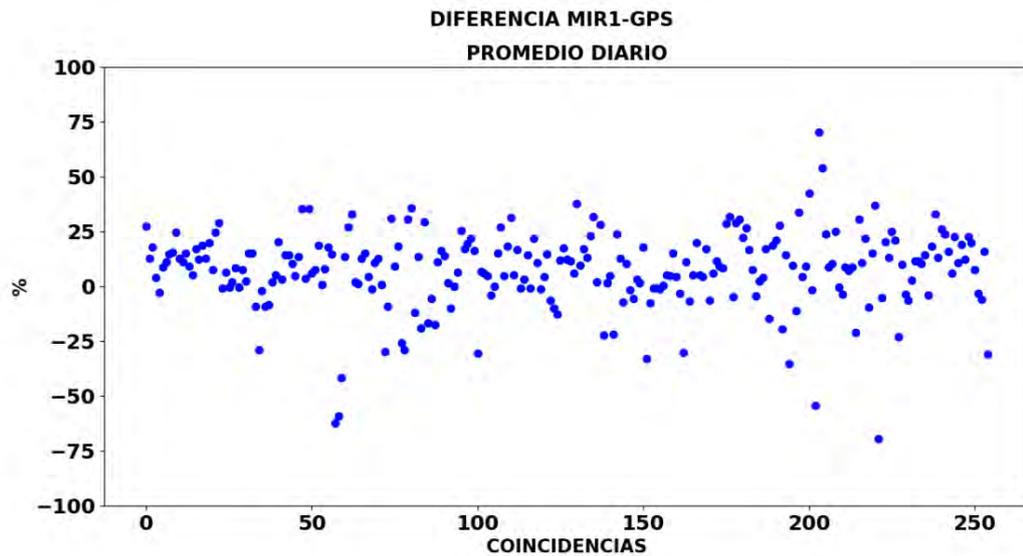


Figura 4.34: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR1 y GPS.

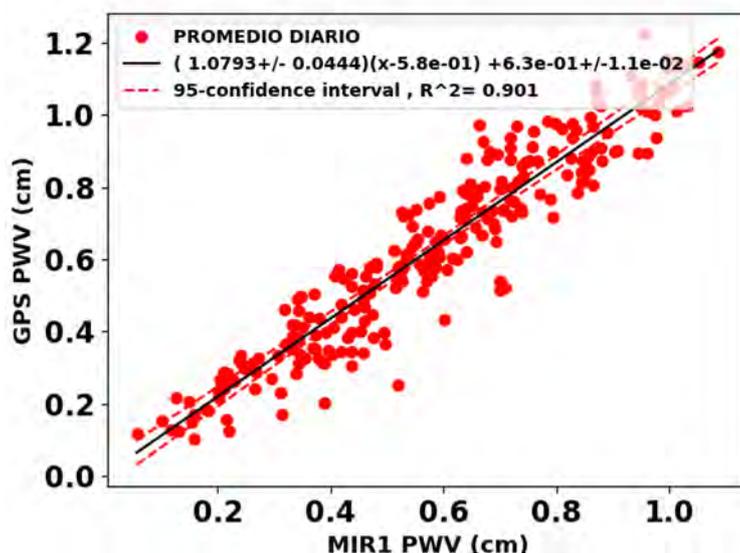


Figura 4.35: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR1 y GPS.

4.3.1.3. Correlación promedio diario MIR2-GPS

La correlación entre los datos de GPS y MIR2 arrojó una R^2 de 0.879 con 181 coincidencias y una discrepancia total de 7.84% entre los valores (Tabla 4.3). Se puede observar que valores pequeños de PWV en el producto espectral MIR2, los valores obtenidos por GPS son relativamente más secos (Figura 4.37). En la Figura 4.36 la mayor dispersión en la serie temporal se observa hacia los negativos al final de la serie.

4.3.1.4. Correlación promedio diario MIR2-NIR

En la correlación MIR2-NIR es de esperarse un valor R^2 elevado (0.949), ya que son recuperaciones realizadas por el mismo instrumento (Tabla 4.3), además de una pequeña diferencia en los promedios, con excepción de algunos valores de PWV registrados por MIR2 que son relativamente más húmedos que los registrados por NIR (Figura ??). La Figura ?? muestra un número mayor de valores centrados y un número menor de valores con tendencia hacia los negativos.

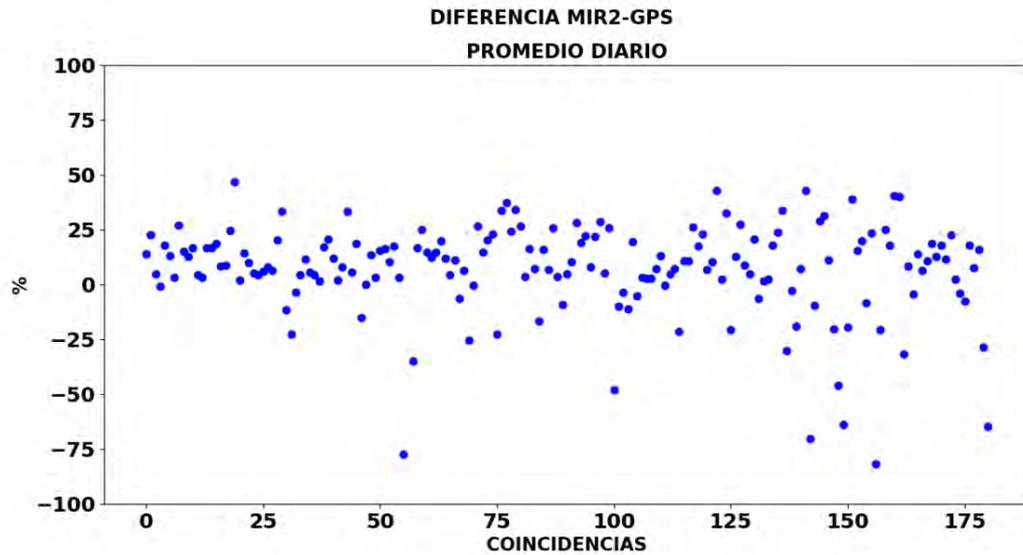


Figura 4.36: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2 y GPS.

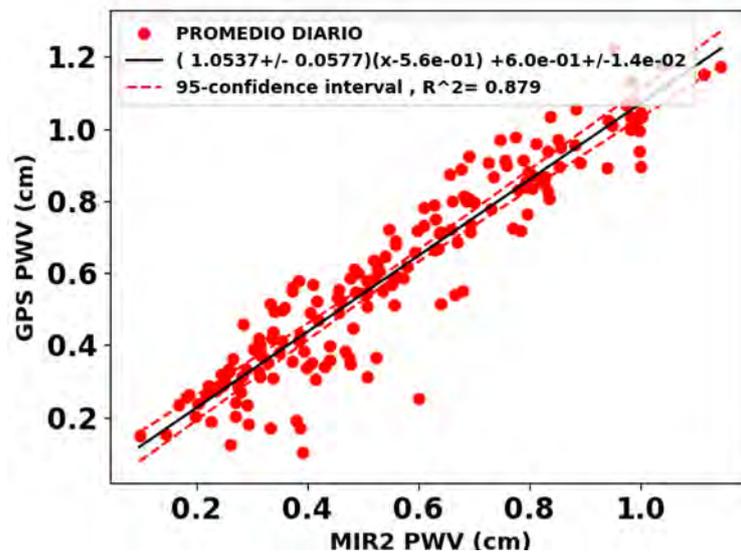


Figura 4.37: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2 y GPS.

4. RESULTADOS

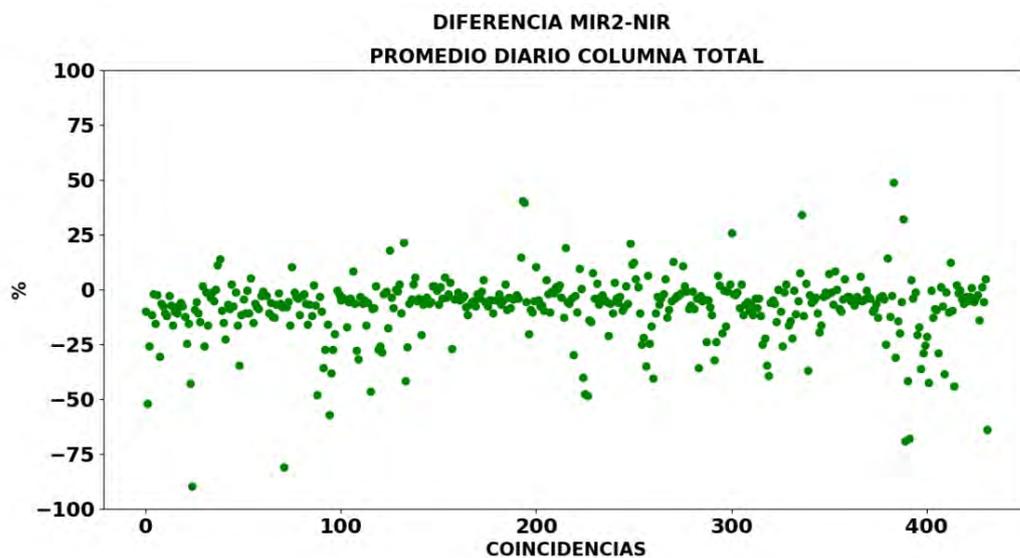


Figura 4.38: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2 y NIR.

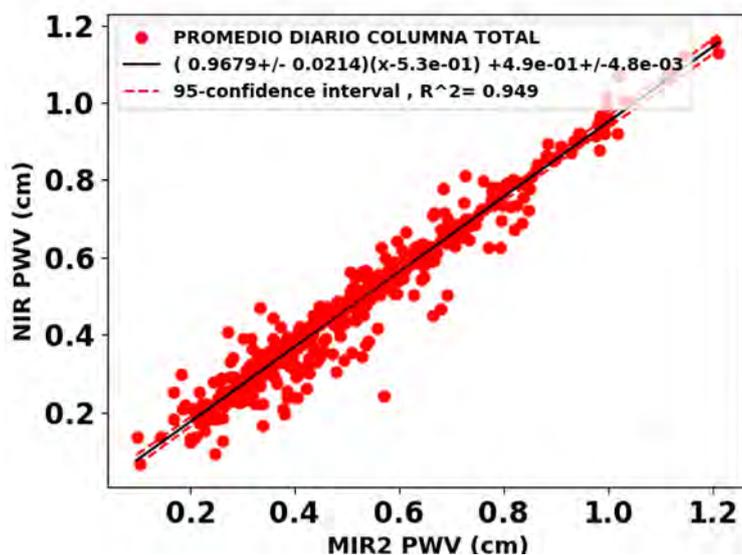


Figura 4.39: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2 y NIR.

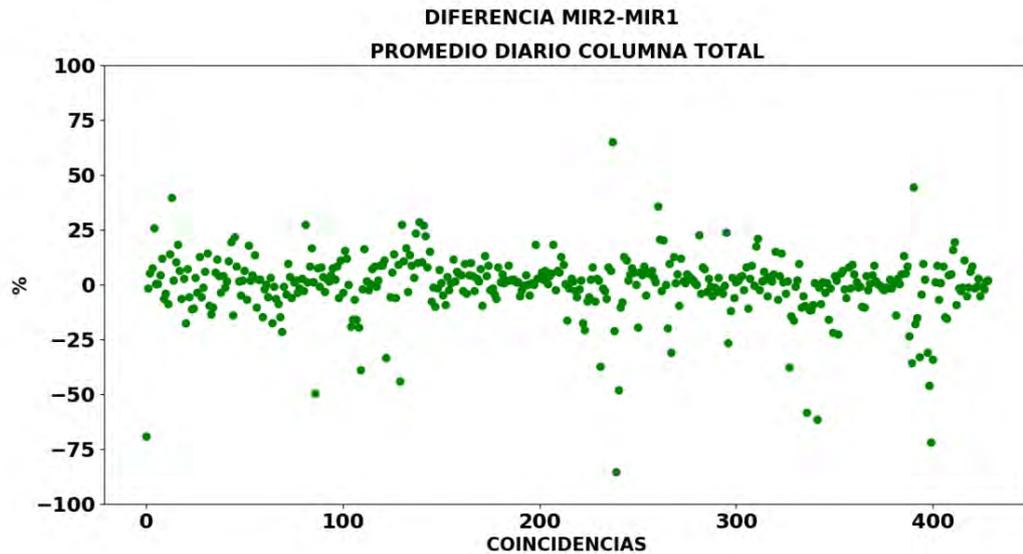


Figura 4.40: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2 y MIR1.

4.3.1.5. Correlación promedio diario MIR2-MIR1

Al correlacionar los valores de MIR2 y MIR1, recordando que se trata de la misma región espectral pero diferentes microventanas, se esperaba obtener una R^2 mayor al momento de compararse con la otra región espectral (NIR), esto no sucedió así ya que se obtuvo una R^2 de 0.938, con una pendiente de 0.9741 ± 0.0237 . Además puede observarse que en valores >0.6 cm obtenidos por MIR2 son relativamente más húmedos que los de MIR1 (Figura 4.41). Aunque se trata de la misma región espectral, en la Figura 4.40 se observan algunos valores con diferencias positivas en toda la serie.

4.3.1.6. Correlación promedio diario NIR-MIR1

Con respecto a la correlación entre NIR y MIR1, la Figura 4.43 muestra un buen ajuste entre los promedios de ambas regiones espectrales. Se puede apreciar algunos valores pequeños de PWV en la región MIR1 son relativamente más húmedos que la región NIR. La R^2 fue de 0.927, pendiente (m) de 0.97 ± 0.0231 y una diferencia total de 6.65% en los valores. En la Figura 4.42 la mayoría de las diferencias se aprecia por encima de cero con algunos valores dirección de los negativos en casi toda la serie.

En resumen, la correlación entre los valores de los promedios diarios obtenidos por GPS y FTIR mostró el mayor ajuste en la relación MIR1-GPS ($R^2=902$), la menor diferencia entre valores en la relación MIR2-GPS (7.84%), y mayor pendiente en la

4. RESULTADOS

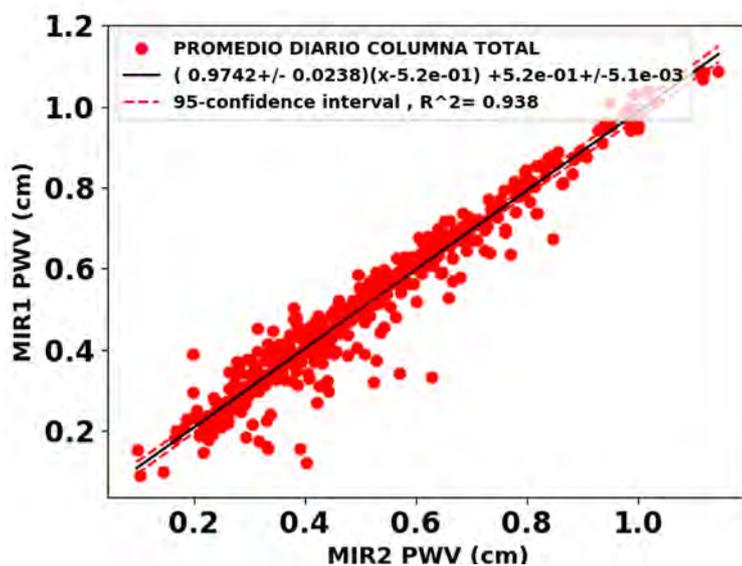


Figura 4.41: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2 y MIR1.

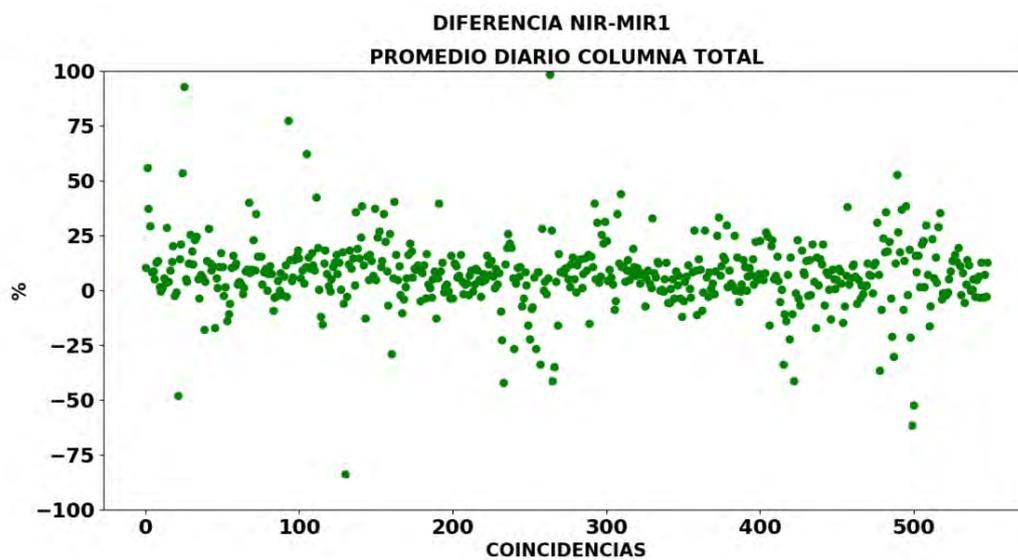


Figura 4.42: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIR y MIR1.

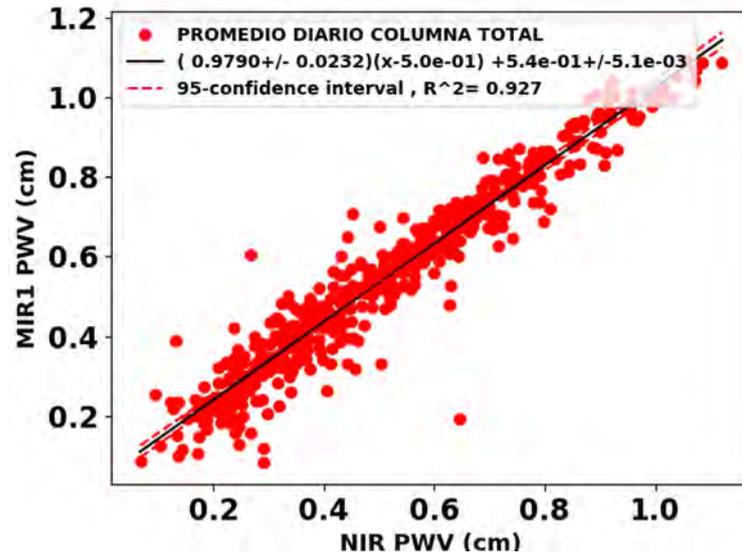


Figura 4.43: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIR y MIR1.

relación NIR-GPS (1.1369 ± 0.0389). Por otra parte las comparaciones entre los productos espectrales mostraron un mayor ajuste en la relación MIR2-NIR ($R^2=0.949$), la menor diferencia entre los valores la relación MIR1-MIR2 (-3.7%) y la mayor pendiente en MIR1-NIR (0.9790 ± 0.0231). Cabe resaltar que el producto espectral NIR registró el mayor número de coincidencias al compararse con GPS y el resto de los productos espectrales.

4.4. Correlaciones por hora

4.4.1. Promedio por hora

Tomando nuevamente los valores de la desviación estándar en la Tabla 4.1, la correlaciones de los promedios por hora entre los productos espectrales de FTIR y el GPS son las siguientes: NIR-GPS, MIR1-GPS y MIR2-GPS. Por otra parte las correlaciones entre los productos espectrales son: MIR2-NIR, MIR2-MIR1 y NIR-MIR1.

4. RESULTADOS

Tabla 4.4: Resultado de las correlaciones de los promedios por hora entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.

Correlación	Coincidencias	R ²	Pendiente (m)	Diferencia %	SCC %
NIR-GPS	1 164	0.963	1.0604±0.0119	9.71	9.26
MIR1-GPS	817	0.953	0.9927±0.0152	3.17	3.12
MIR2-GPS	420	0.962	0.9938±0.0190	5.47	5.32
MIR2-NIR	980	0.987	0.9544±0.0068	-4.07	+ + +
MIR2-MIR1	1 080	0.968	0.9774±0.0106	2.92	+ + +
NIR-MIR1	1 259	0.957	1.0182±0.0120	6.58	+ + +

4.4.1.1. Correlación promedio por hora NIR-GPS

En la correlación entre GPS y NIR se puede apreciar un buen ajuste de los datos por parte de ambos métodos, con un número total de 1 164 coincidencias y una R² de 0.963. La tendencia en las diferencias se aprecia en sentido positivo, resaltando que los valores pocos valores negativos poseen la mayor diferencia (Figura 4.44).

4.4.1.2. Correlación promedio por hora MIR1-GPS

En la figura 4.47 se observa una correlación con valores más dispersos (círculos rojos), 817 coincidencias entre ambos grupos de valores, R² de 0.953 y una pendiente de 0.9927±0.0152 en los valores de ambas series. En general se puede observar una agregación de los valores por ambos métodos. La Figura 4.46 remarca las diferencias entre los valores de ambos métodos. Estas se observan en ambos sentidos al inicio y final de la serie, oscilando entre ±75 %.

4.4.1.3. Correlación promedios por hora MIR2-GPS

A pesar de haber obtenido una R² de 0.962, la correlación entre los valores de GPS y MIR2 sólo obtuvieron un total de 420 coincidencias y una diferencia total de 4.8705 % (Figura 4.49). Estos valores poseen una menor diferencia, ya que se ubican dentro de los límites ±75 %25 %, resaltando que existen pocos valores que pueden alcanzar +50 %.

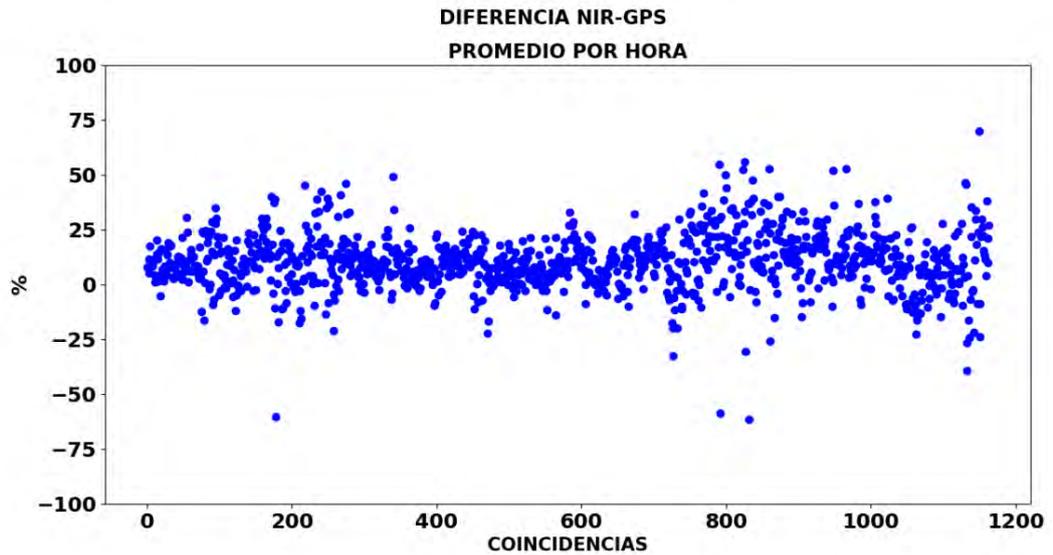


Figura 4.44: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por NIR y GPS.

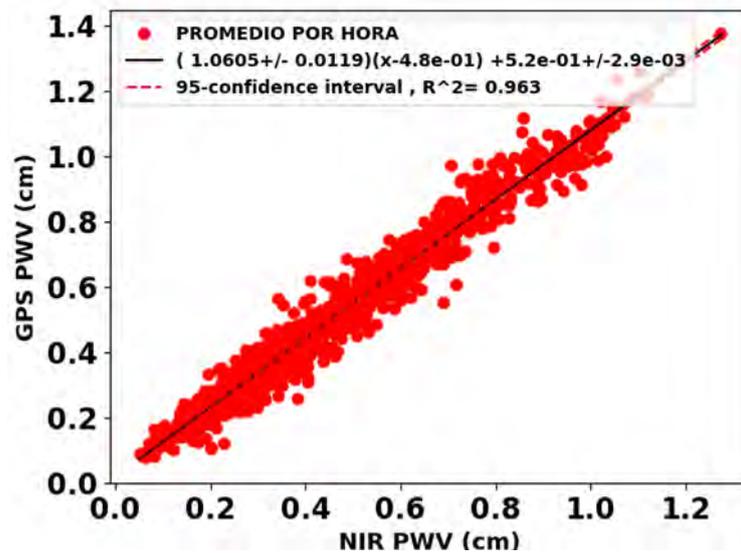


Figura 4.45: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por NIR y GPS.

4. RESULTADOS

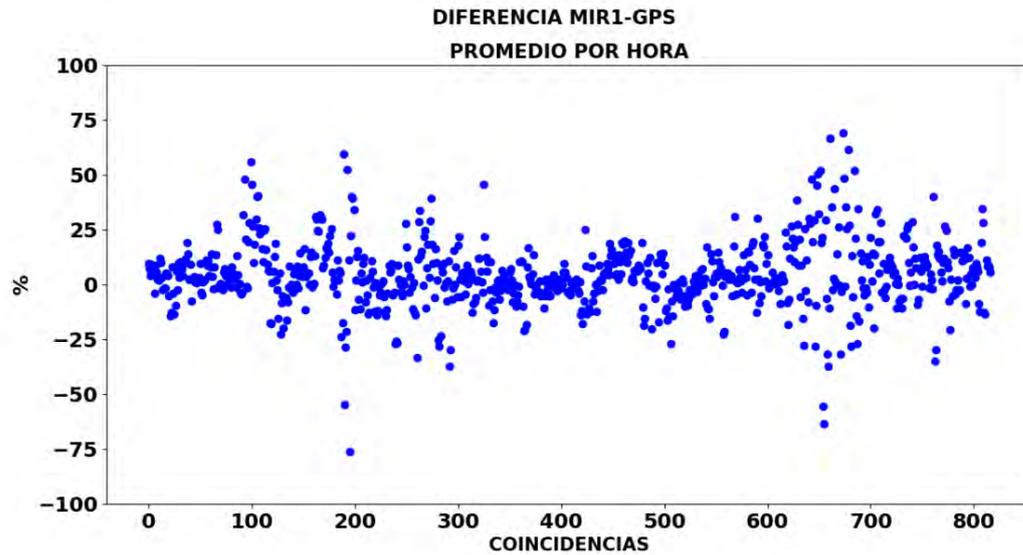


Figura 4.46: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR1 y GPS.

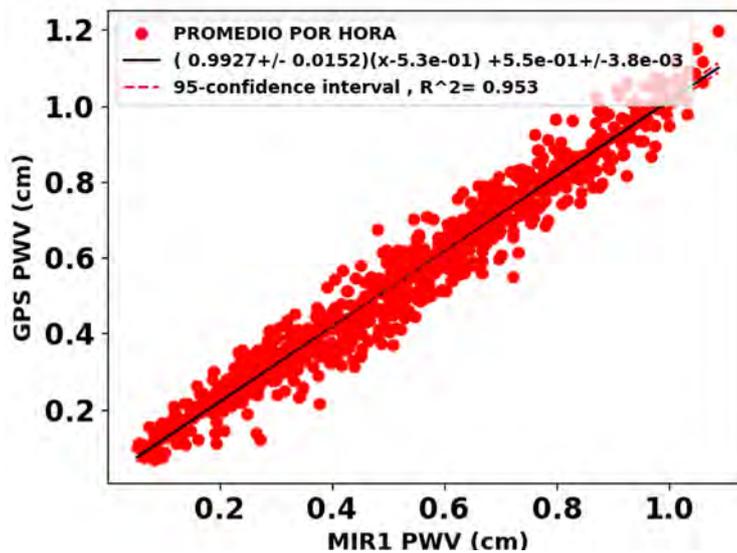


Figura 4.47: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR1 y GPS.

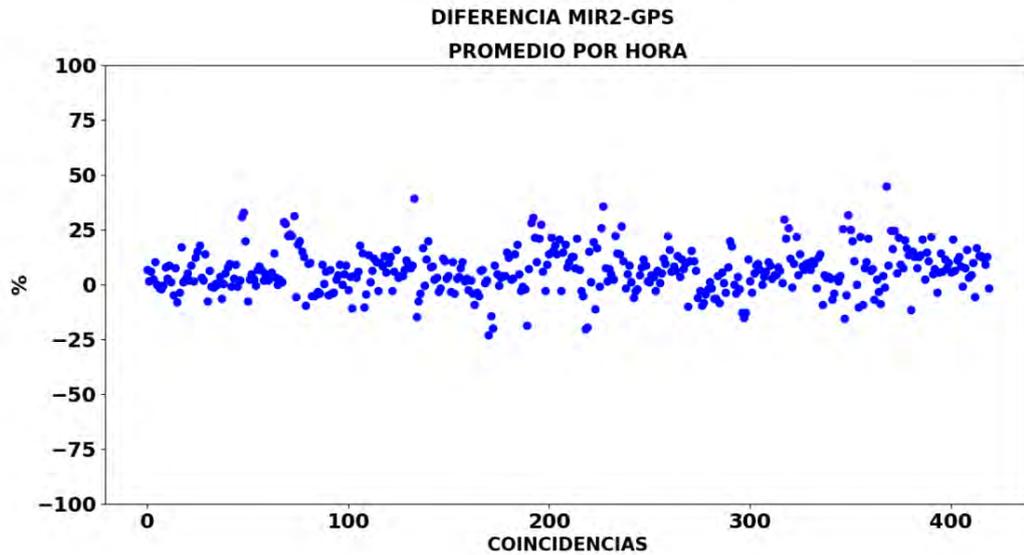


Figura 4.48: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2 y GPS.

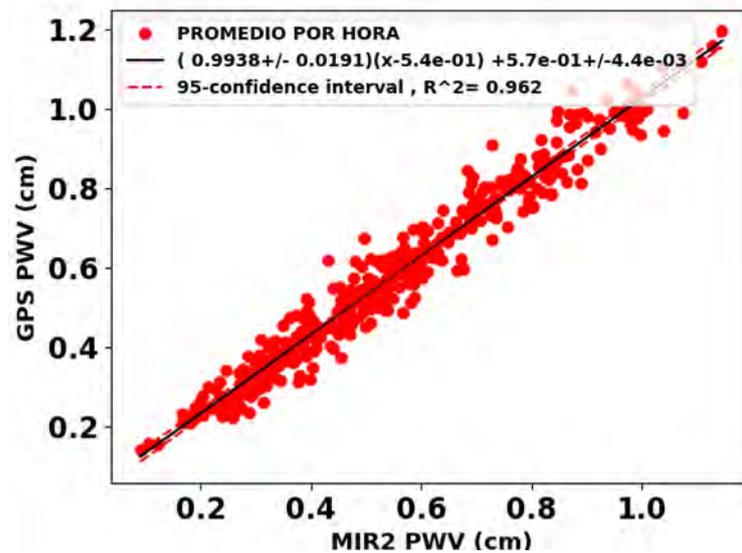


Figura 4.49: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2 y GPS.

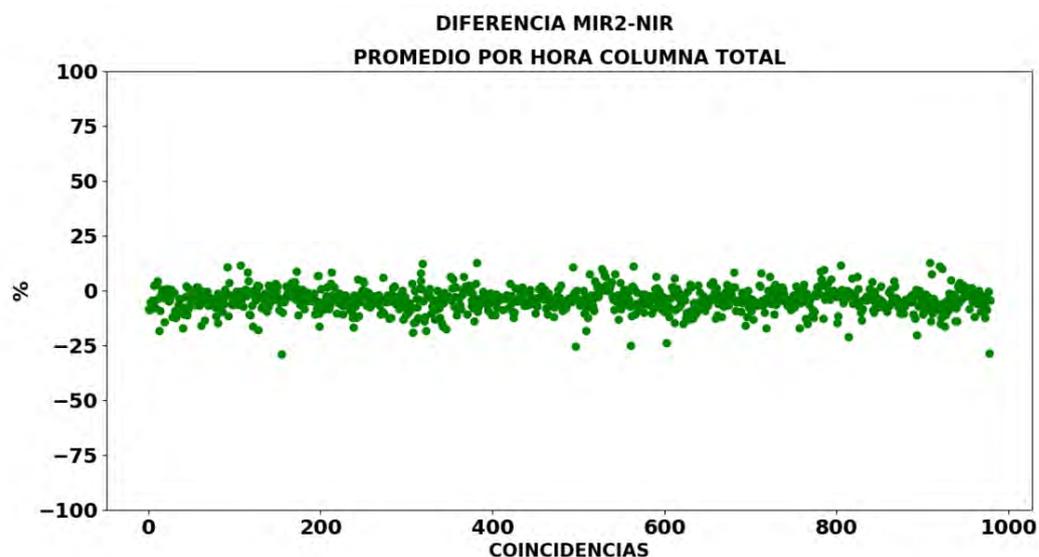


Figura 4.50: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2 y NIR.

4.4.1.4. Correlación promedios por hora MIR2-NIR

La comparación entre los mismos productos espectrales arrojó un total de 980 coincidencias, el mayor valor de R^2 (0.987) entre los productos espectrales, con una pendiente de 0.9544 ± 0.0068 y una diferencia de -4.07% tomando como referencia los valores de MIR2. De manera general, en la Figura 4.50 los valores se encuentra bien centrados dentro de la serie, oscilando entre $\pm 25\%$, cabe resaltar que se pueden observar algunos valores que sobrepasan este rango en sentido positivo. además, se aprecia que los valores de MIR2 son más húmedos que los de NIR (Figura 4.51).

4.4.1.5. Correlación promedios por hora MIR2-MIR1

La Figura 4.53 muestra los resultado obtenidos entre las microventanas de la misma región espectral. Registró un valor de R^2 de 0.968 entre los producto espectrales FTIR, una pendiente de 0.9774 ± 0.0106 y una diferencia de 2.92% . Además, en ambas series se observan valores relativamente húmedos y secos en ambas regiones espectrales. En la Figura 4.52 la mayoría de la mayor parte de las diferencias están centradas en el rango $\pm 25\%$, aunque existen algunos que sobrepasan este limite en ambas direcciones.

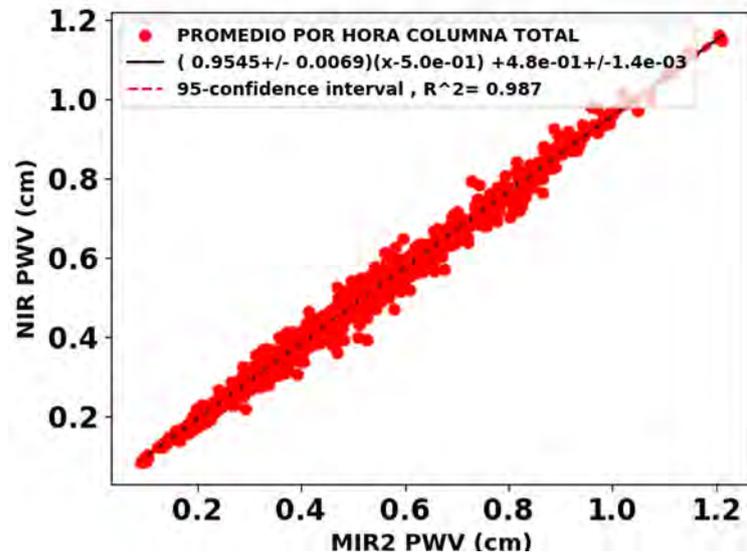


Figura 4.51: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2 y NIR.

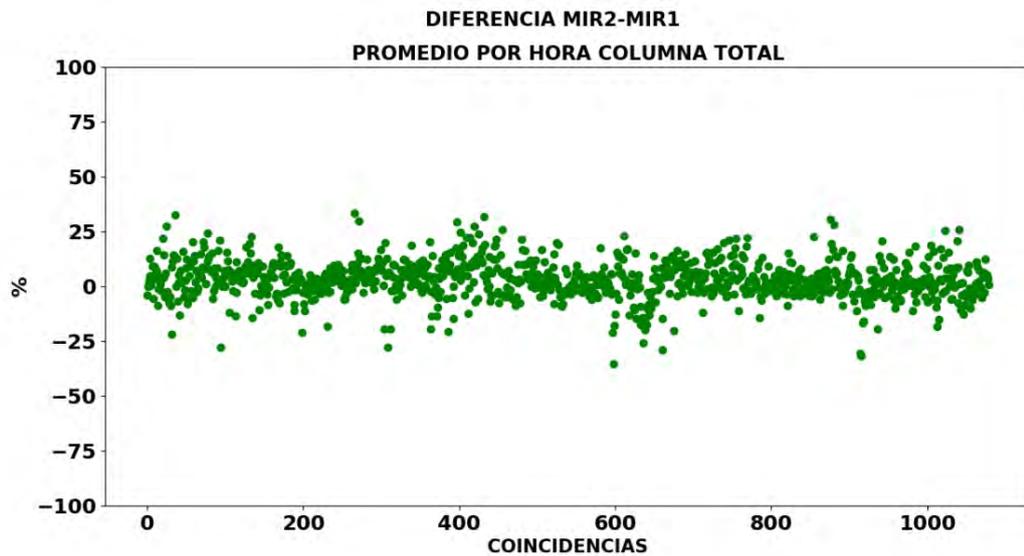


Figura 4.52: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2 y MIR1.

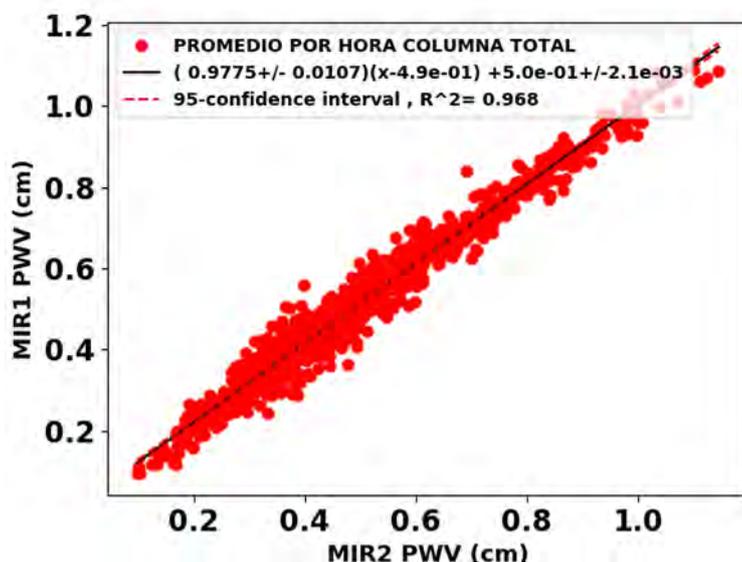


Figura 4.53: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2 y MIR1.

4.4.1.6. Correlación promedios por hora NIR-MIR1

Se observa una mayor agregación de los promedios por hora en valores >0.6 cm, además de una menor cantidad de datos en valores <0.6 cm. Se registraron un total de 1 259 coincidencias, una R^2 de 0.957, pendiente de 1.0182 ± 0.0120 y una diferencia de 6.58% tomando los valores de NIR como referencia (Figura 4.55). En la Figura 4.54 las diferencias oscilan entre el rango 50% aunque existen algunos que sobrepasan estos rangos en la dirección positiva.

4.5. Recuperación con radiosondeo: variación anual

En esta sección se describen los resultados obtenidos de las recuperaciones de PWV utilizando la razón de mezcla por radiosondeo. Se describen las variaciones temporales de los ciclos anuales, mensuales, correlaciones y diferencias entre estas últimas.

La Figura 4.56 muestra la serie temporal de PWV registrada por el método FTIR (NIR, MIR1 y MIR2) y GPS. La letra R en las etiquetas de las regiones espectrales hace referencia a la recuperación con radiosondeo. La cantidad de datos por parte de GPS es mayor, alcanzando valores de hasta 1.75 cm, mientras que los productos de

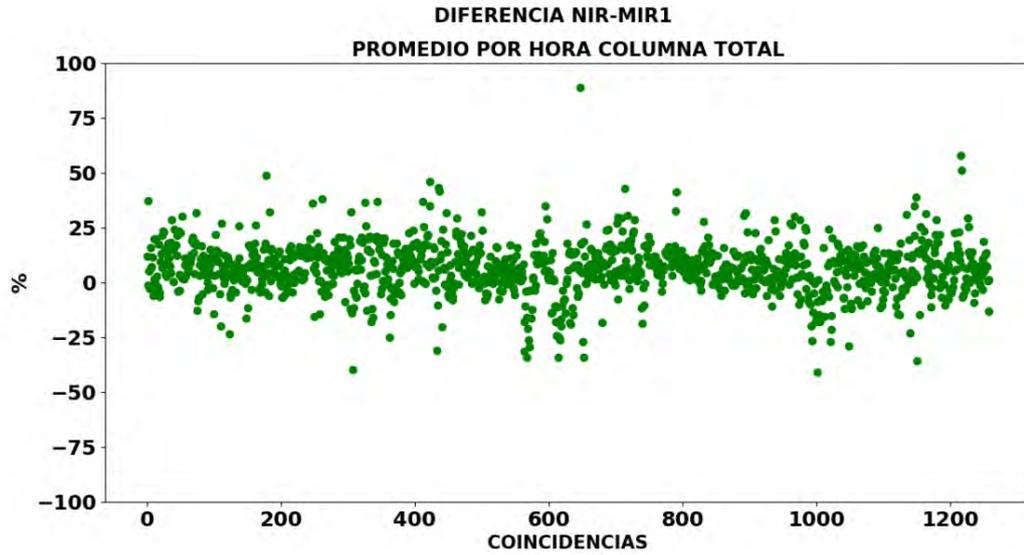


Figura 4.54: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por NIR y MIR1.

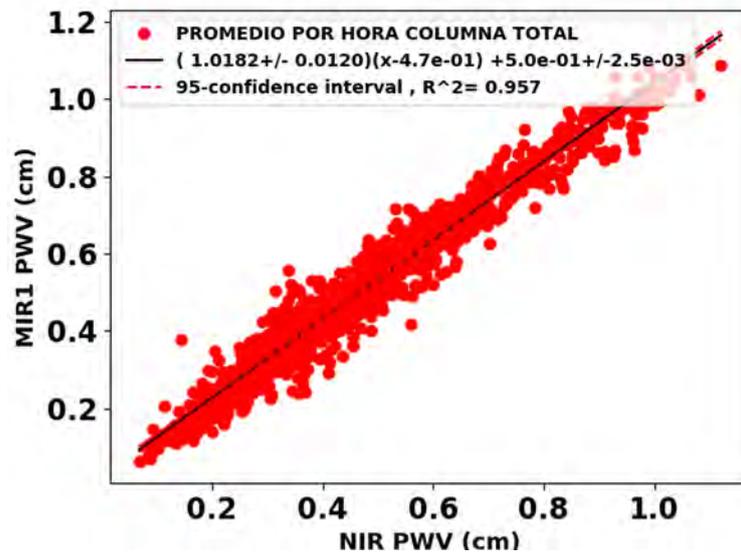


Figura 4.55: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por NIR y MIR1.

4. RESULTADOS

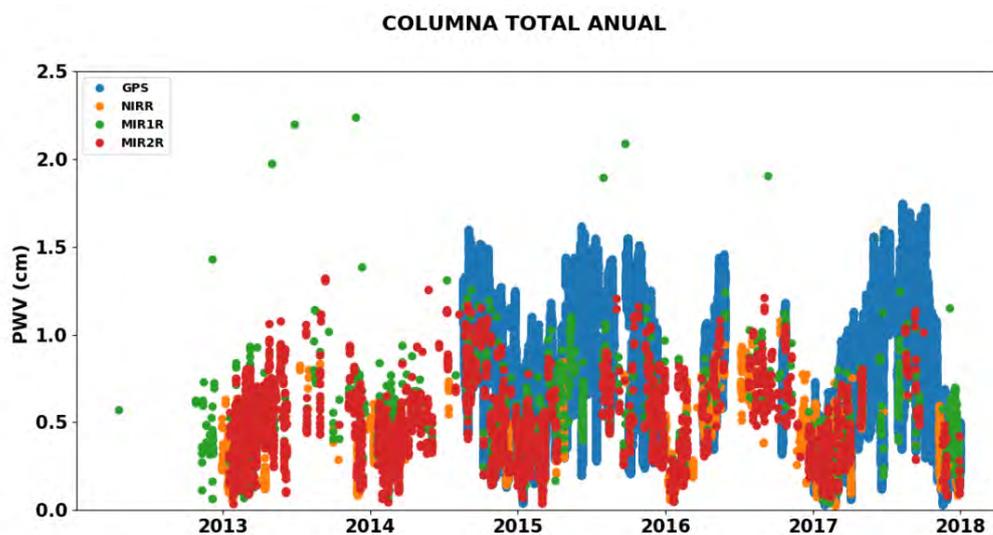


Figura 4.56: Series temporales registradas por el método GPS y las tres regiones espectrales NIR, MIR1 Y MIR2, utilizando valores de radiosondeo como a priori en el caso de FTIR

FTIR registraron una cantidad menor de datos, algunos valores de la región MIR1R alcanzan una magnitud entre 2.0 y 2.2 cm. Además se debe considerar que los datos de GPS presentes en esta serie temporal aún contiene valores en días nublados.

De manera general, los valores en las series temporales muestra que el valor máximo de PWV se registró en la región MIR1R, seguido del GPS, MIR2R y NIRR, aunque el promedio refleja que el GPS sigue siendo el método dominante seguido del MIR1R. El mínimo de PWV y la menor dispersión se registró en la región NIRR, mientras que la mayor dispersión se observa en los valores de GPS (4.5).

La Tabla 4.6 muestra los resultados obtenidos del sesgo de cielo claro. Los valores fueron calculado a partir de agosto de 2014, ya que son los valores de PWV disponibles por el método GPS. Se puede apreciar que la región espectral MIR2 registró el menor sesgo en los años 2014, 2016 y 2017, resaltando el menor valor en toda la serie durante el 2016 en esta región. La región espectral MIR1 presentó el menor sesgo en 2015 y en toda serie temporal.

Debido a que la variación anual de las recuperaciones de GPS se realizó en la sección 4.1.1, no tiene sentido realizarla nuevamente, por lo tanto, la siguiente sección sólo se enfocará en las descripciones anuales y mensuales de las tres regiones espectrales. Los valores de GPS se retomarán en las correlaciones diarias y horarias.

Tabla 4.5: Valores de los estadísticos aplicados sobre las series temporales. Los valores de GPS aquí registrados incluyen los días con nubosidad.

	GPS	NIRR	MIR1R	MIR2R
No. datos	116 295	3 069	1 593	3 799
Máximo	1.75 cm	1.0769 cm	2.2415 cm	1.3230 cm
Mínimo	0.03 cm	0.0269 cm	0.0446 cm	0.0355 cm
Promedio	0.75 cm	0.3336 cm	0.4674 cm	0.4280 cm
S ²	0.1386 cm ²	0.0339 cm ²	0.0652 cm ²	0.0537 cm ²
S	0.3724 cm	0.1842 cm	0.2554 cm	0.2317 cm

Tabla 4.6: Resultados estimados del sesgo de cielo claro a través de $B = 1 - \frac{PWV_{FTIR}}{PWV_{GPS}}$

Método/ Año	NIRR	MIR1R	MIR2R
2014	+58.93 %	+46.36 %	+47.98 %
2015	+52.08 %	+28.06 %	+46.51 %
2016	+28.51 %	+21.57 %	+36.07 %
2017	+54.45 %	+37.82 %	+44.74 %
Todos Años	+51.51 %	+34.15 %	+42.16 %

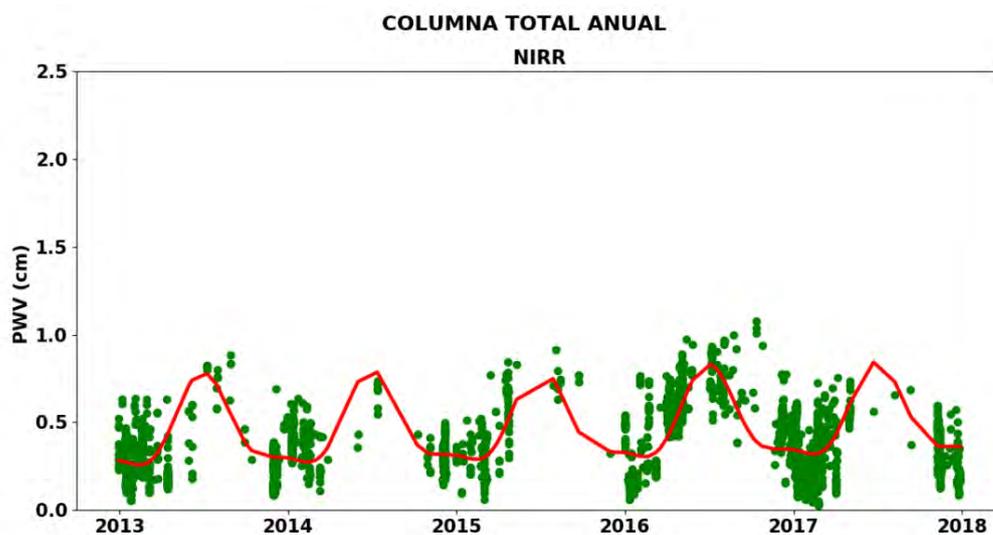


Figura 4.57: Series temporales registradas por el método FTIR región espectral NIRR. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.

4.5.1. Variación anual NIRR

En la región NIRR se registraron un total de 3 069 espectros viables, con una escala temporal que abarca desde diciembre de 2012 hasta diciembre de 2017. El valor máximo y mínimo fue de 1.0769 cm y 0.0269 cm respectivamente, con un promedio en toda la serie de 0.3336 cm. En la Figura 4.57 en los ciclos anuales representados por la línea roja se puede apreciar que los mínimos ocurren a principio y finales de año, mientras que los máximos se alcanzan a mediados del año, aunque en estos máximos puede observarse la falta de datos en la mayoría de los años con excepción del 2016.

4.5.2. Variación anual MIR1R

En la región MIR1R se registró un total de 1 593 mediciones durante octubre de 2012 hasta diciembre de 2017. En la serie temporal se observó un máximo de 2.2415 cm, promedio de 0.4674 cm y un mínimo de 0.0446 cm (Figura 4.58). Se observan ciclos bien definidos con valores relativamente altos en 2013, 2015 y 2016.

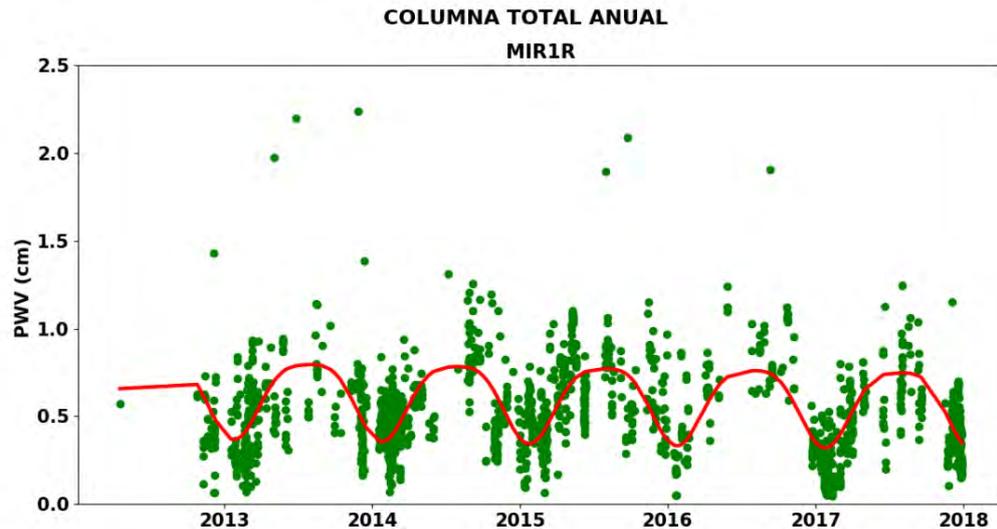


Figura 4.58: Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR1. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.

4.5.3. Variación anual MIR2R

En la región espectral MIR2 se recuperaron 3 799 valores desde enero de 2013 hasta diciembre de 2017. El valor máximo observado fue de 1.3230 cm y un promedio en toda la serie de 0.4280 cm. En la Figura 4.59 se aprecian ciclos anuales (línea roja) bien definidos con el máximo a mediados del año y los mínimos a principios y finales.

4.6. Recuperación con radiosondeo: variación mensual

En esta sección se describen las variaciones mensuales de las regiones espectrales de FTIR. Se omiten los resultados de GPS, ya que fueron descritos en la sección 4.2.1. Estos serán retomados más adelante en las correlaciones diarias y horarias, así como su diferencia entre las regiones espectrales de FTIR.

4.6.1. Variación mensual NIRR

La Figura 4.60 muestra los promedios mensuales en toda serie de FTIR producto NIRR, se observa que los promedios máximos se registraron durante el mes de julio (0.7725 cm), agosto (0.6535 cm) y septiembre (0.5285 cm). Las mínimas mensuales entre enero y marzo (0.30 cm), noviembre y diciembre (0.2825 cm). Resalta la poca

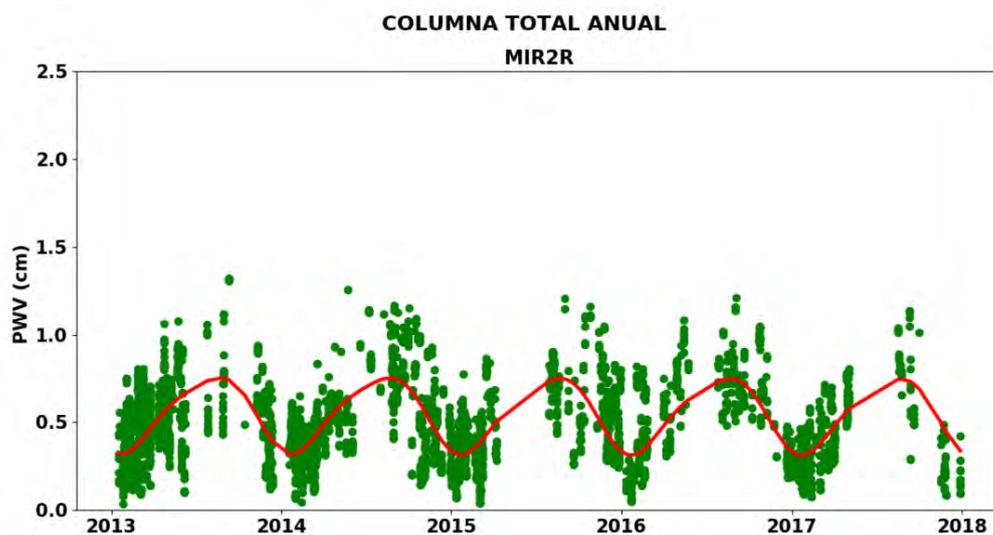


Figura 4.59: Series temporales registradas por el método FTIR región espectral MIR2. La línea roja representa los ciclos anuales calculados a partir de la transformada de Fourier.

disponibilidad de datos en los meses con promedios máximos.

Durante el año 2012 únicamente se registraron diciembre, un total de 17 mediciones. Estas presentaron un máximo 0.63 cm y un promedio de 0.3106 cm (figura 4.61).

En los promedios mensuales durante el año 2013 se puede observar una serie completa (Figura 4.62). Los valores máximos se registran entre los meses de mayo a septiembre, resaltando los meses de julio (0.7427 cm) y agosto (0.7957 cm). El mínimo se presentó en abril (0.1989 cm).

En el año 2014 la mayoría de los valores se registran en enero, febrero y diciembre. El promedio máximo se alcanza en julio (0.6715 cm), junto con la mayor desviación estándar. El máximo también se hace visible en este mes, mientras que el mínimo se observó en marzo (figura 4.63).

La Figura 4.64 muestra la variabilidad mensual durante el año 2015 de PWV producto espectral NIR. Los menores valores y mayor cantidad de datos se observaron entre enero y marzo, seguidos de un incremento entre mayo (0.8272 cm) y septiembre (0.7535 cm) con una disminución en el número de datos.

En el año 2016 los promedios mínimos mensuales se presentaron en enero y marzo, la máxima en septiembre (0.8864 cm), junto con la mayor desviación estándar. Resaltan los meses de mayo, julio, septiembre y octubre por la falta de datos (Figura 4.65).

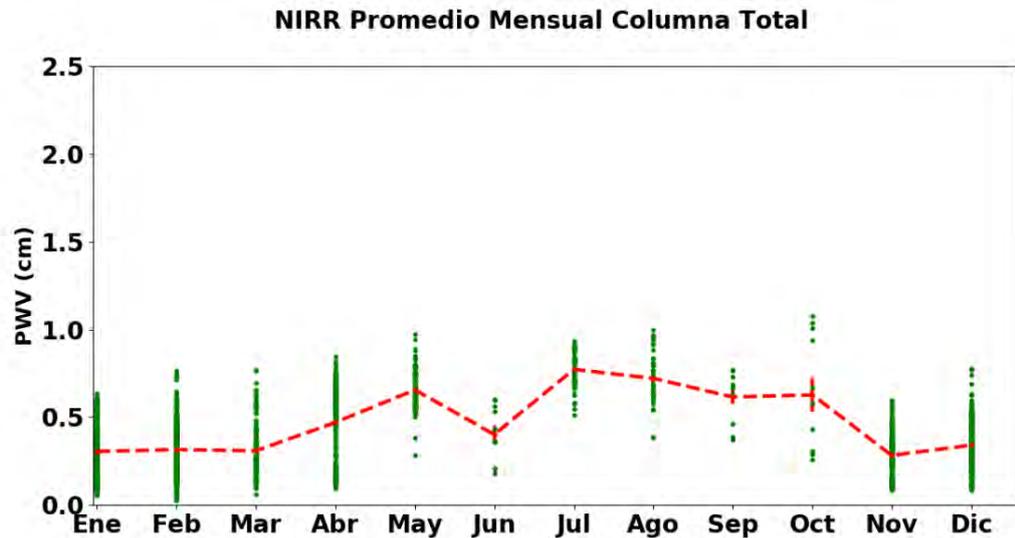


Figura 4.60: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante mayo 2012 a diciembre 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

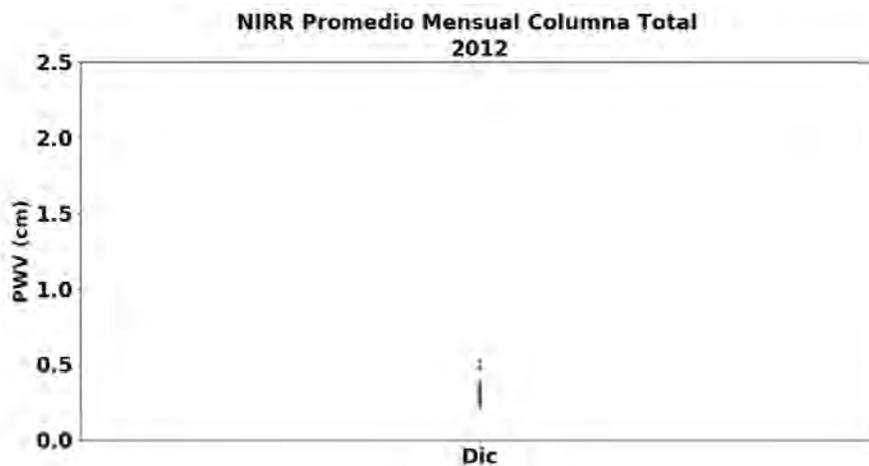


Figura 4.61: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4. RESULTADOS

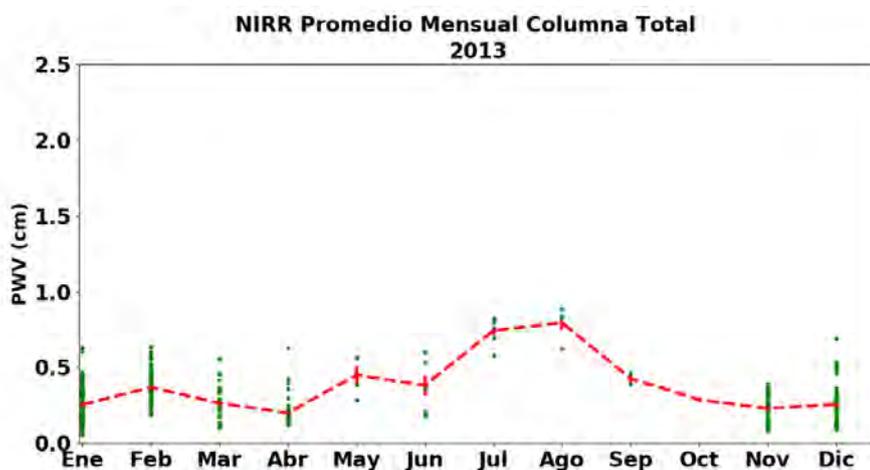


Figura 4.62: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

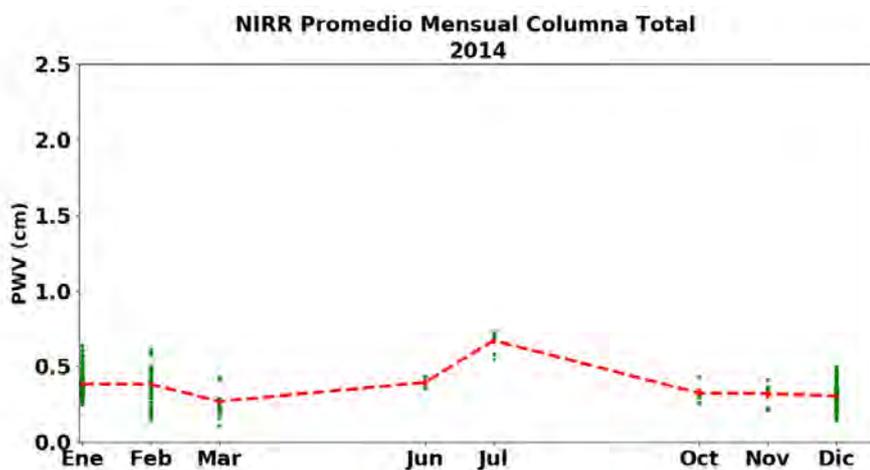


Figura 4.63: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIR durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

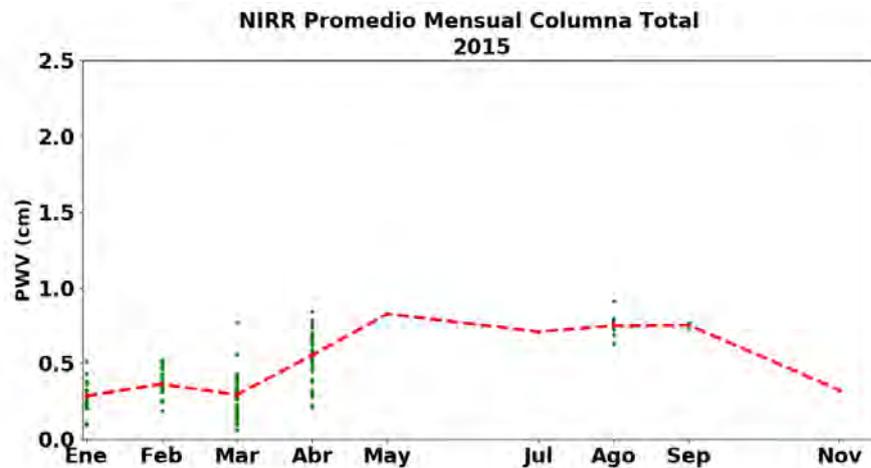


Figura 4.64: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

En el 2017 vuelve a observarse esta tendencia de mayor cantidad de datos en los meses primeros meses del año, incluso a finales. Los promedios máximos se exhiben entre mayo (0.5899 cm) y septiembre (0.5285 cm), resaltando agosto (0.6535 cm)(Figura 4.66).

4.6.2. Variación mensual MIR1R

En la serie temporal recuperada en la región MIR1R muestra los mayores promedios en los meses de mayo (0.8006 cm) y agosto (0.8337 cm). Las mínimas mensuales en enero (0.3465 cm) y diciembre (0.4229 cm). La menor cantidad de valores y la mayor dispersión entre los meses de mayo y octubre. Además se aprecian valores relativamente altos de PWV a partir del mes de mayo (Figura 4.67).

En el año 2012 la mayor cantidad de datos se registró en noviembre y diciembre, alcanzando el promedio máximo de 0.5106 cm durante este último. También existen mediciones entre octubre y abril, lamentablemente sólo se cuenta con un valor (Figura 4.68)

En la serie temporal del año 2013 resaltan tres meses donde el promedio alcanzó su máximo, junio (0.7483 cm), agosto (0.8498 cm) y noviembre (0.8271 cm). En esto también resalta la poca disponibilidad de datos. El mínimo se presentó en enero (0.3160 cm). El mayor error estándar en mayo, julio, agosto y noviembre. Además, resaltan valo-

4. RESULTADOS

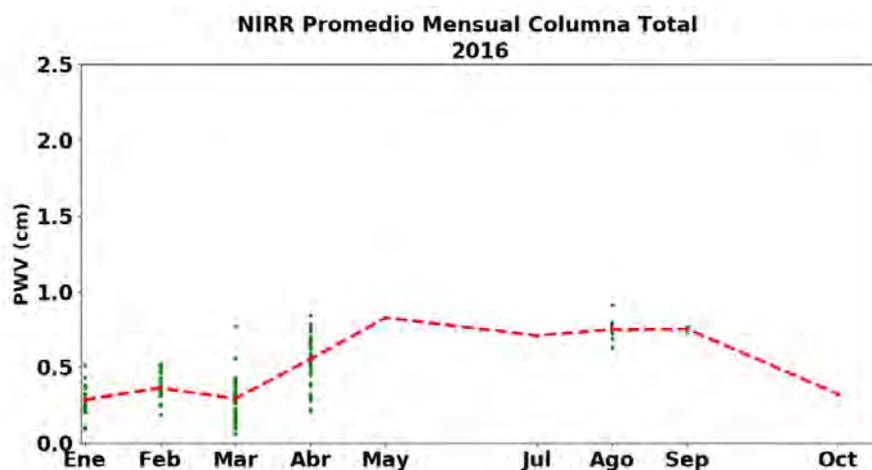


Figura 4.65: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y al error estándar.

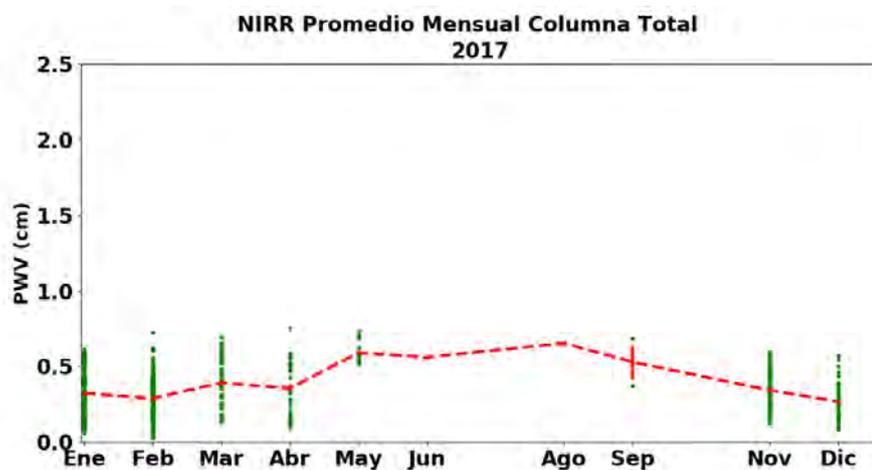


Figura 4.66: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral NIRR durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

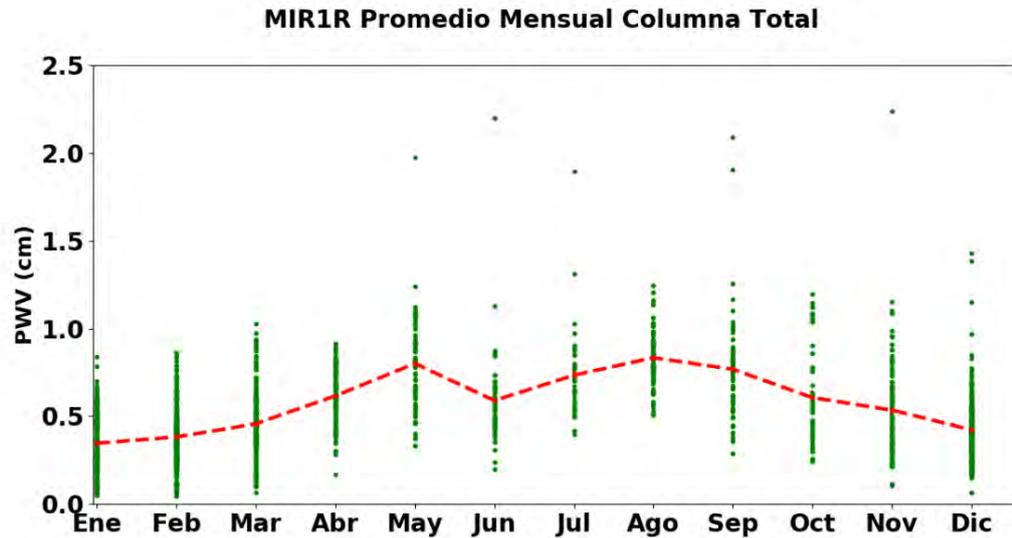


Figura 4.67: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante abril 2012 a diciembre 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

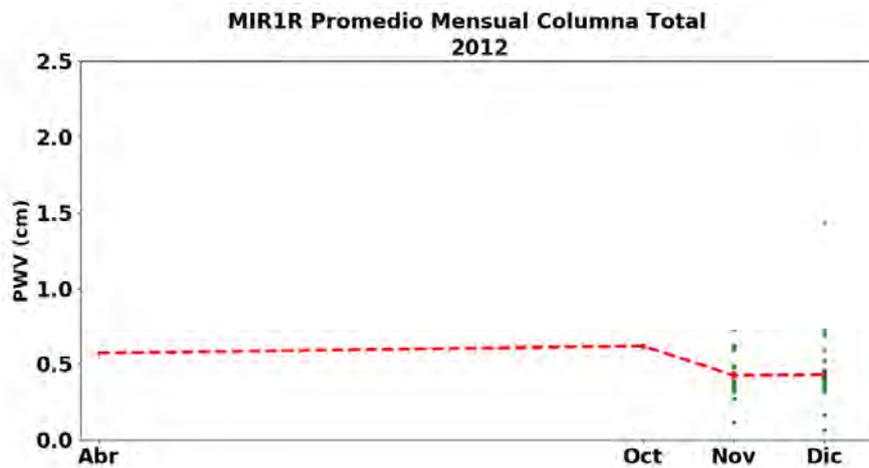


Figura 4.68: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2012. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4. RESULTADOS

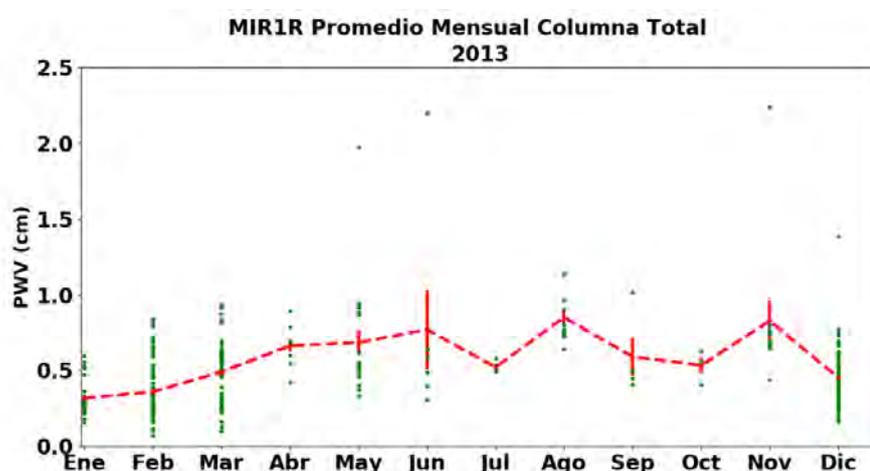


Figura 4.69: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

res altos de PWV en los meses de mayo, junio, septiembre, noviembre y diciembre (4.69)

En la Figura 4.70 correspondiente al año 2014, los promedios máximos se observan entre los meses de julio (1.0429 cm) y septiembre (0.9114 cm), junto con el mayor error estándar y la poca disponibilidad de datos. El promedio mínimo se presentó en febrero y octubre con un valor de 0.34 cm

Los promedios mínimos mensuales en el año 2015 se observaron a inicios del año, seguido de un pico máximo en mayo (0.8992 cm), una disminución en junio y otro aumento entre julio (0.9380 cm) y agosto (0.7965 cm), seguido de otra disminución en octubre para finalizar con un aumento más en noviembre (0.7815 cm). Resalta la gran dispersión en los meses con promedios mayores y poca disponibilidad de datos. Además se observaron dos valores altos de PWV en julio y septiembre (Figura 4.71).

En el año 2016 se registró la menor cantidad de datos, con huecos en la serie durante marzo y junio. Los máximos mensuales en se exhiben en mayo y octubre, junto con la mayor desviación estándar junto con el mes de septiembre (Figura 4.72)

La Figura 4.73 muestra un promedio máximo y la mayor dispersión en agosto de 2017. Además de la ausencia de datos en octubre y la poca disponibilidad de los mismos entre mayo y septiembre.

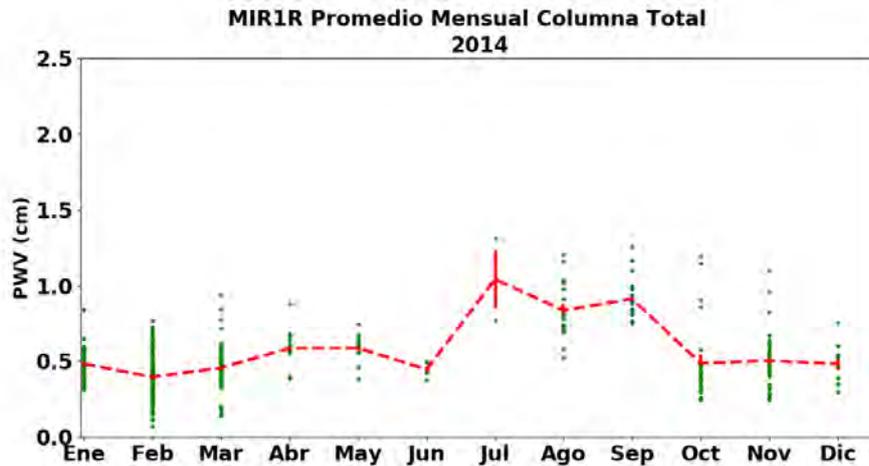


Figura 4.70: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

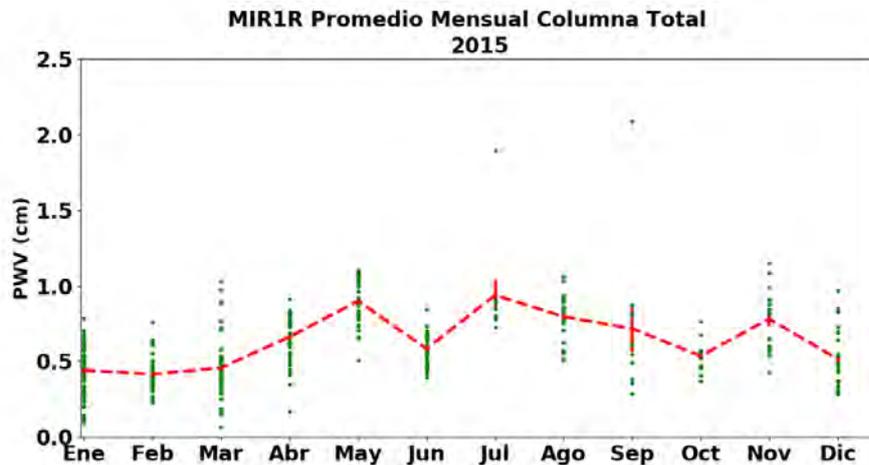


Figura 4.71: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4. RESULTADOS

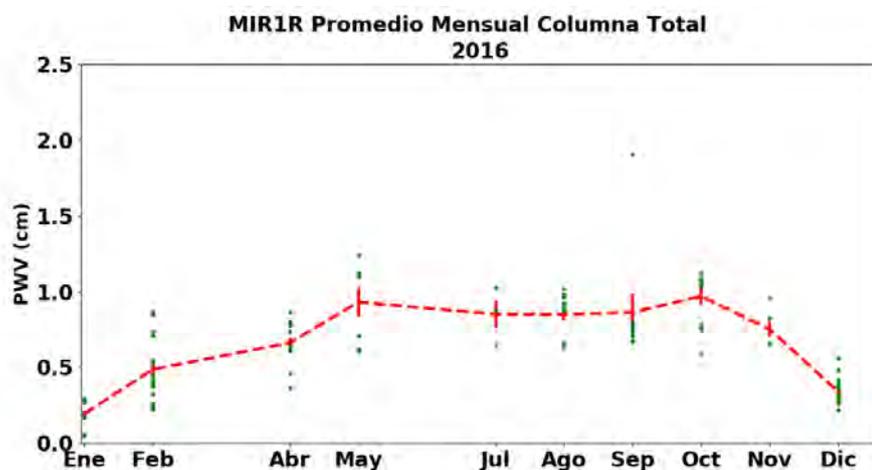


Figura 4.72: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

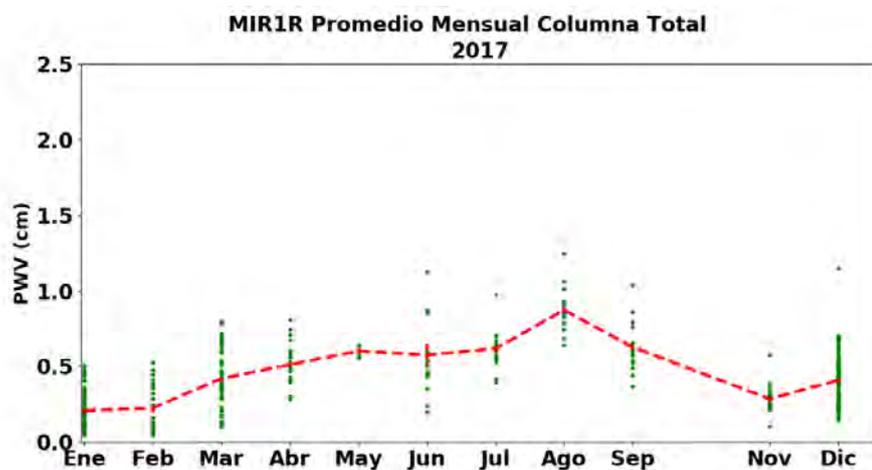
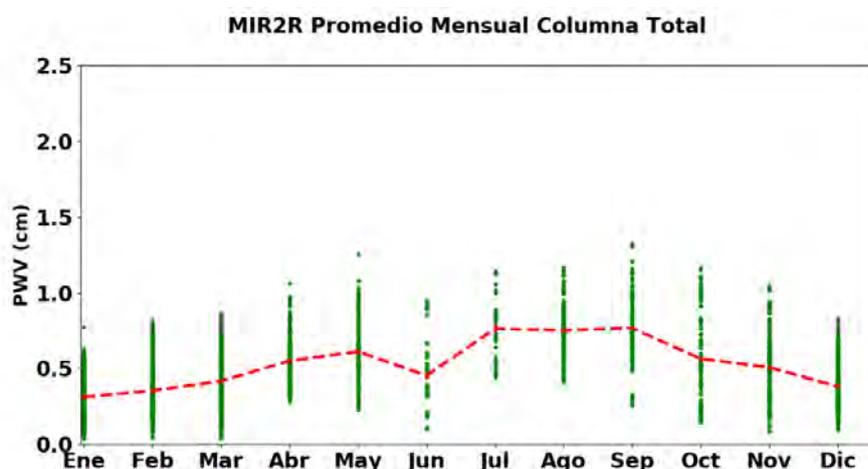


Figura 4.73: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2017. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.



Ruta completa de la imagen, porque se compila desde el archivo tesis.tex

Figura 4.74: Promedio mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR2R durante enero 2013 a diciembre 2017. Los círculos azules indican el número total de mediciones durante el mes. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

4.6.3. Variación mensual MIR2R

En la serie temporal recuperada en la región MIR2R se observan los mínimos a principio y finales del año. El primer máximo se presenta en mayo (cm), seguido de una disminución en junio y un aumento abrupto durante julio (cm). Este aumento permanece casi constante hasta el mes de octubre cuando comienza a descender (Figura 4.74).

En 2013, el mes de septiembre registró el promedio mensual más alto. Entre los meses de enero y mayo se observó la mayor cantidad de datos dentro de la serie. Resaltan los promedios mínimos en los meses de junio y octubre antes de los máximos (Figura 4.75).

La serie temporal en el 2014 (4.76) muestra un periodo estable de promedios máximos entre los meses de julio y septiembre. El valor de PWV osciló entre 0.8823 cm y 0.7781 cm. En estos meses también se observó la mayor variabilidad.

En la Figura 4.77 correspondiente al año 2015 se observa la ausencia de datos en los meses de mayo y junio. El mayor error estándar entre los meses de julio y octubre. En septiembre se presentó el mayor valor de PWV (círculos verdes), mientras que en agosto el mayor promedio (0.7262 cm).

4. RESULTADOS

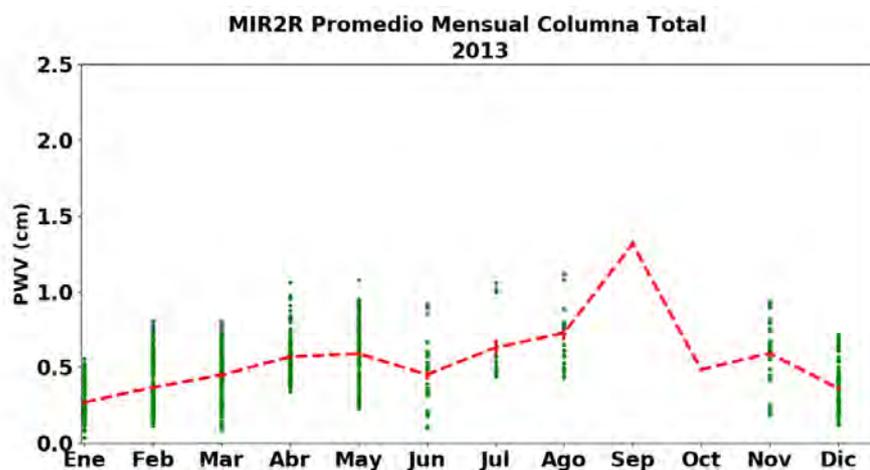


Figura 4.75: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2013. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

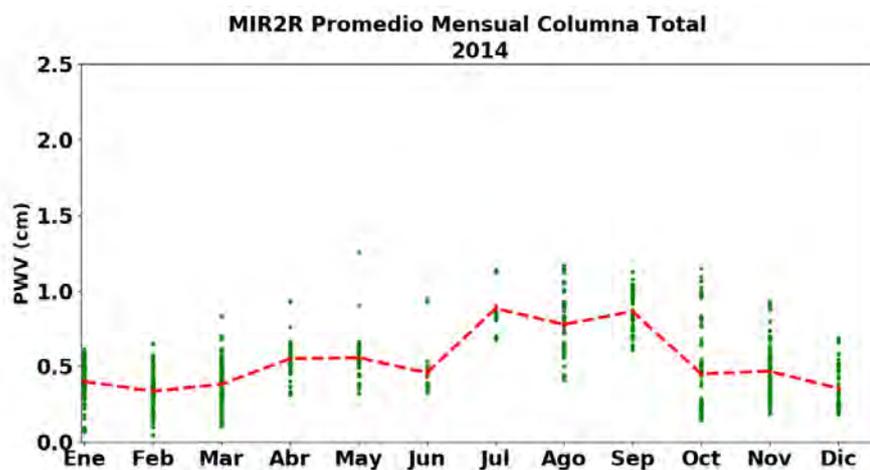


Figura 4.76: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2014. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

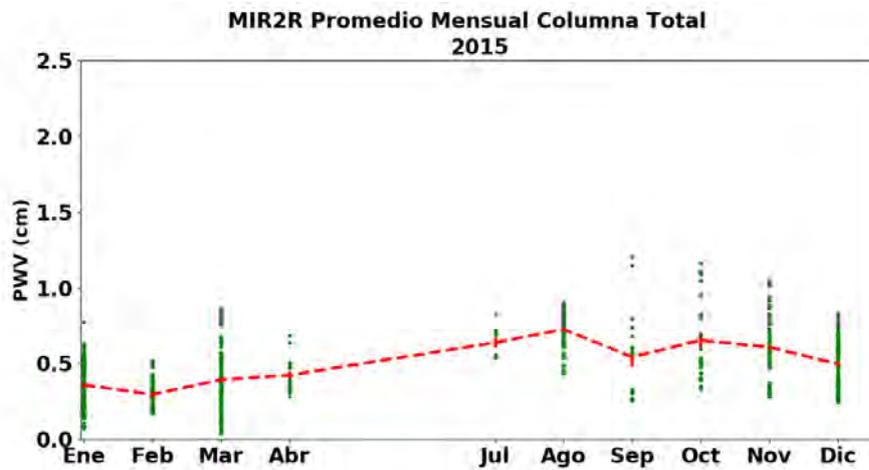


Figura 4.77: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2015. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

De manera general, en el año 2016 el valor máximo permaneció casi constante entre los meses de mayo y octubre, sin dejar a un lado la falta de valores en el mes de junio, y la poca disponibilidad de estos en los meses con los promedios más altos (4.78).

En el 2017 los meses con promedios máximos fueron agosto y octubre, con falta de valores durante junio y julio. Por otra parte los meses con valores y promedios mínimos presentaron mayor cantidad de datos (4.79).

4.7. Correlaciones por día

En esta sección se describen las correlaciones de los promedios obtenidos por día entre ambos métodos. Hay que resaltar que los valores registrados en esta sección aún poseen el sesgo de cielo despejado (clear-sky dry bias). Además se describen las diferencias en las series temporales calculadas a partir de la ecuación 3.3.

4.7.1. Promedio diario

En esta sección se describen las correlaciones de los promedios por día entre ambos métodos (Tabla 4.7). Se correlacionan los promedios de los tres productos de FTIR (NIR, MIR1 y MIR2) contra los valores de GPS, en la la relación: NIR-GPS, MIR1R-

4. RESULTADOS

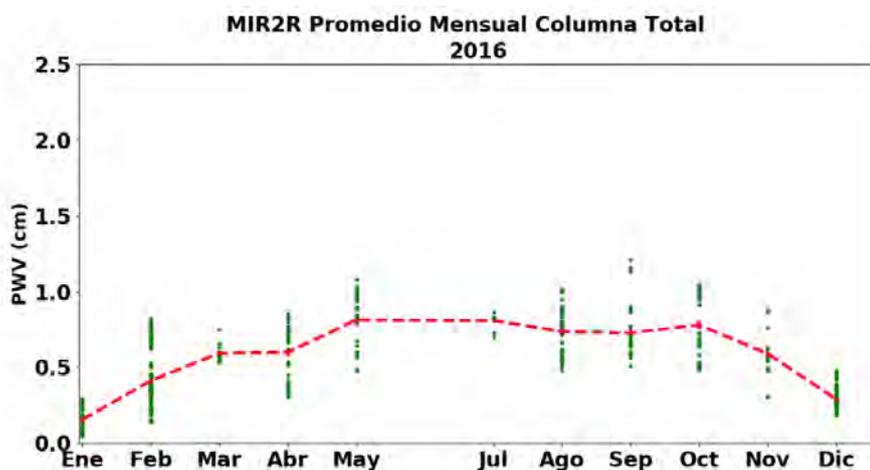


Figura 4.78: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2016. La línea roja discontinua y las barras hace referencia al promedio y error estándar.

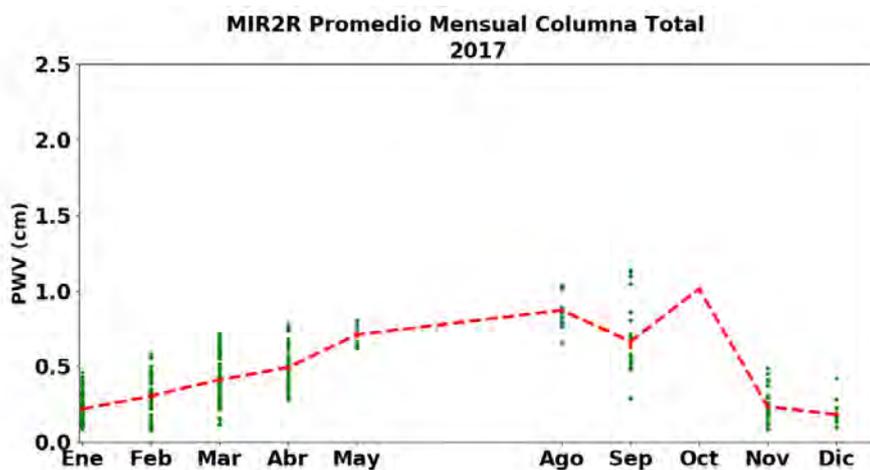


Figura 4.79: Promedios mensuales de PWV registrados por el método FTIR región espectral MIR1R durante el año 2017. La línea discontinua y las barras hacen referencia a el promedio y error estándar.

Tabla 4.7: Resultado de las correlaciones de los promedios por día entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.

Correlación	Coincidencias	R ²	Pendiente (m)	Diferencia %	SCC %
NIRR-GPS	145	0.794	1.0307±0.0173	0.88	0.87
MIR1R-GPS	195	0.784	0.8849±0.0639	-4.89	-5.02
MIR2R-GPS	205	0.904	1.0300±0.0420	10.34	9.83
NIRR-MIR1R	166	0.662	1.0195±0.1122	9.92	+ + +
NIRR-MIR2R	167	0.830	0.9374±0.0652	-5.64	+ + +
MIR2-MIR1	315	0.749	1.1024±0.0708	16.77	+ + +

GPS y MIR2R-GPS, mientras que las correlaciones entre las tres regiones espectrales: NIRR-MIR1R, NIRR-MIR2R, MIR2R-MIR1R. Recordando que el criterio de selección de la región espectral de referencia se baso en la menor dispersión.

4.7.1.1. Correlación promedio diario NIRR-GPS

En la relación NIRR-GPS registró una diferencia total de 0.88 % (Tabla 4.7). Esto indica que los valores de GPS medidos son relativamente iguales a los de esta región espectral. En la Figura 4.80 la diferencia en la serie oscilo entre $\pm 75\%$, aunque algunos valores sobrepasan este limite. En la Figura 4.81 la menor diferencia y mayor agregación de los datos se observa en valor menores >0.4 cm. Además, Se obtuvo una R² de 767 y pendiente de 1.0370 ± 0.0874 (4.81).

4.7.1.2. Correlación promedio diario MIR1R-GPS

Dentro de esta relación los valores de GPS presentaron una diferencia total del -4.89 % en toda la serie. Las 195 coincidencias temporales oscilaron en una diferencia de $\pm 50\%$, aunque al final de la serie los valores de GPS parecen ser más secos, con una diferencia de casi $\pm 100\%$. La Figura (4.83) muestra que valores >0.6 cm los datos de GPS son más secos, mientras que valores mayores a este limite los daos de GPS son más húmedos que FTIR.

4. RESULTADOS

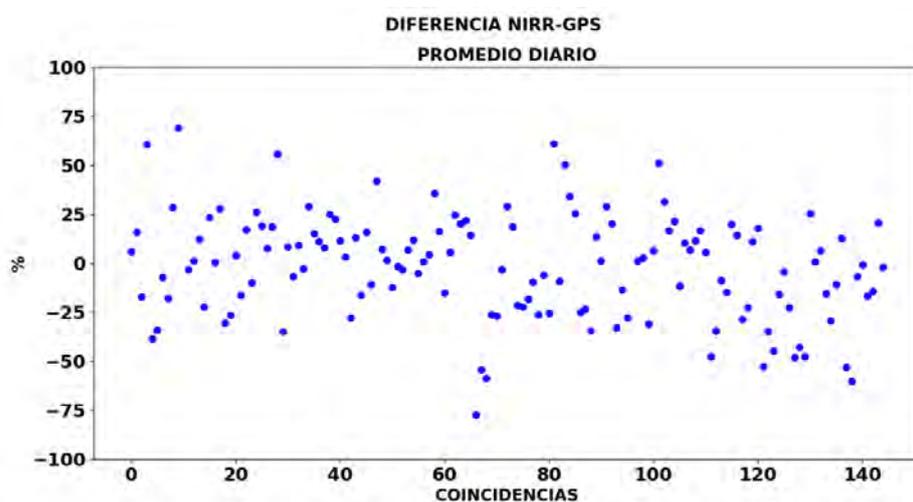


Figura 4.80: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y GPS.

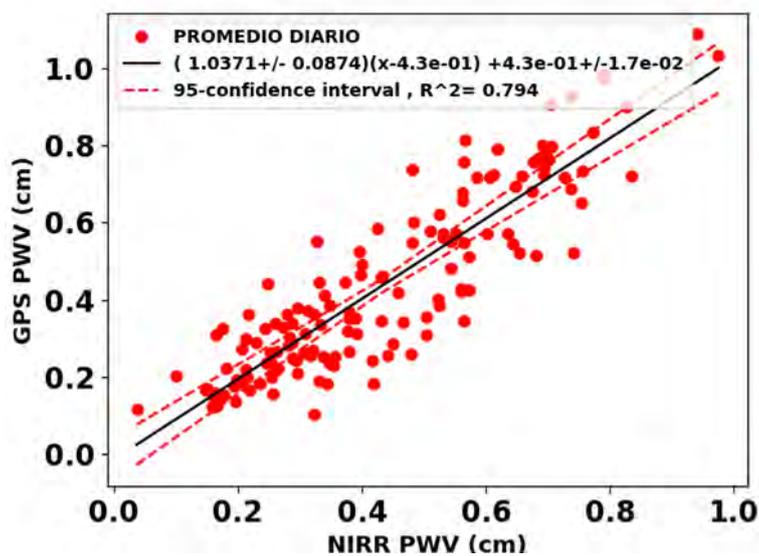


Figura 4.81: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y GPS.

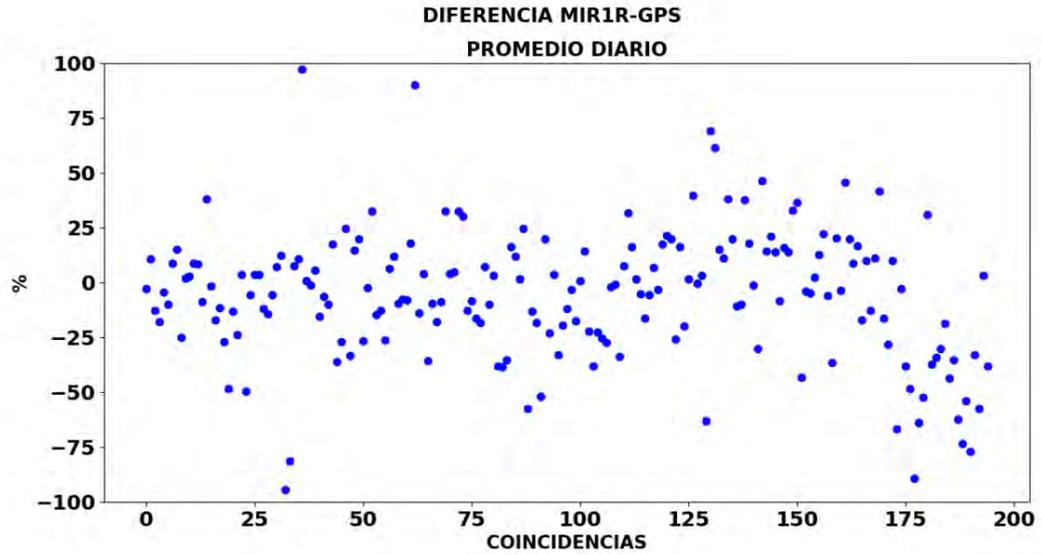


Figura 4.82: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR1R y GPS.

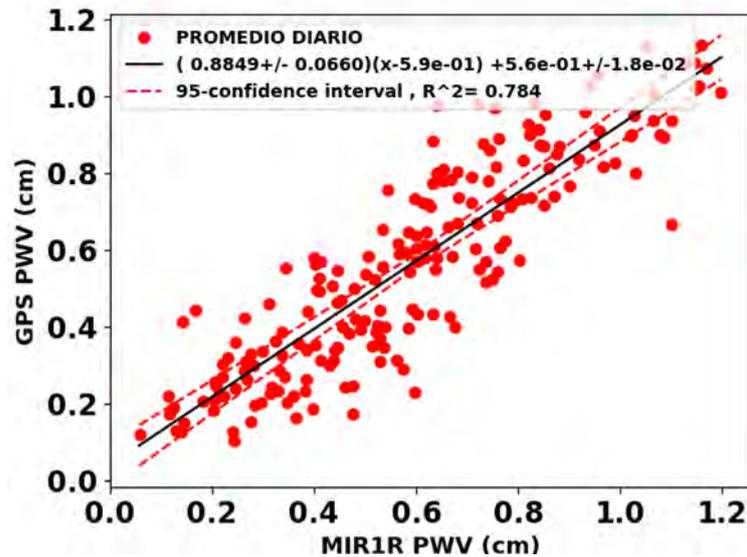


Figura 4.83: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR1R y GPS.

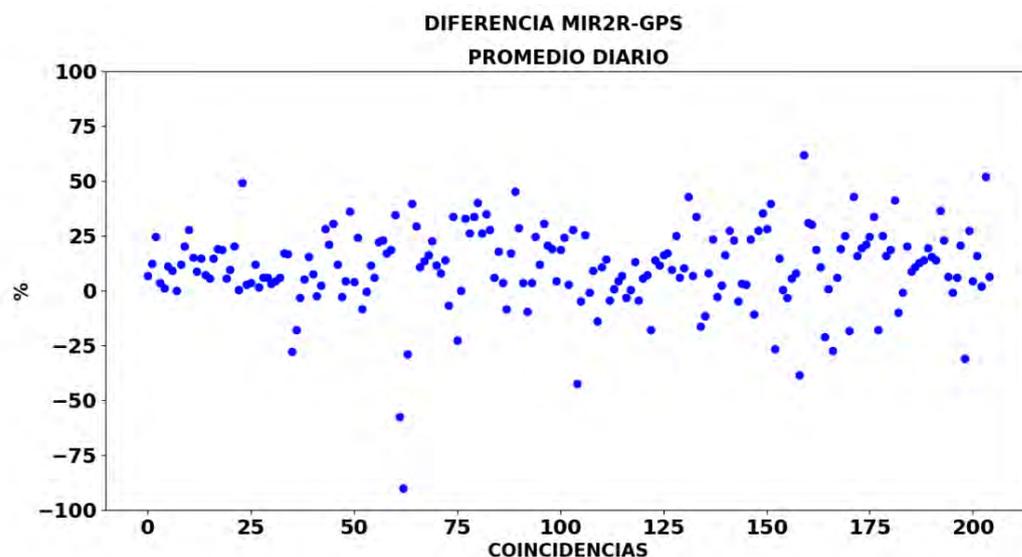


Figura 4.84: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2R y GPS.

4.7.1.3. Correlación promedios diario MIR2R-GPS

La diferencia total fue de 10.34% en toda la serie, esto indica que los valores de esta región espectral fueron relativamente más húmedos. En la Figura (4.84) las diferencias temporales oscilaron entre $\pm 25\%$ con mayor tendencia hacia los positivos, por lo tanto más húmedos. Se obtuvo la mayor R^2 de las tres regiones, mayor valor de la pendiente y el mayor número de coincidencias. Además, los valores >0.6 cm presentaron mayor agregación, mientras que valores superiores registraron mayor diferencia (Figura 4.85).

4.7.1.4. Correlación promedio diario NIRR-MIR1R

Esta relación registró una diferencia total de 9.92%, con un total de 166 coincidencias que oscilaron entre $\pm 50\%$, con una tendencia hacia valores más secos en la región NIRR-MIR1R a finales de la serie. El valor de RR^2 obtenido fue de 0.662 con una mayor agregación de los datos en valores >0.7 cm.

4.7.1.5. Correlación promedio diario NIRR-MIR2R

Los valores registrados en esta relación presentaron una diferencia total de -5.64%, lo que indica una subestimación en los valores de PWV por parte de MIR2R. Analizan-

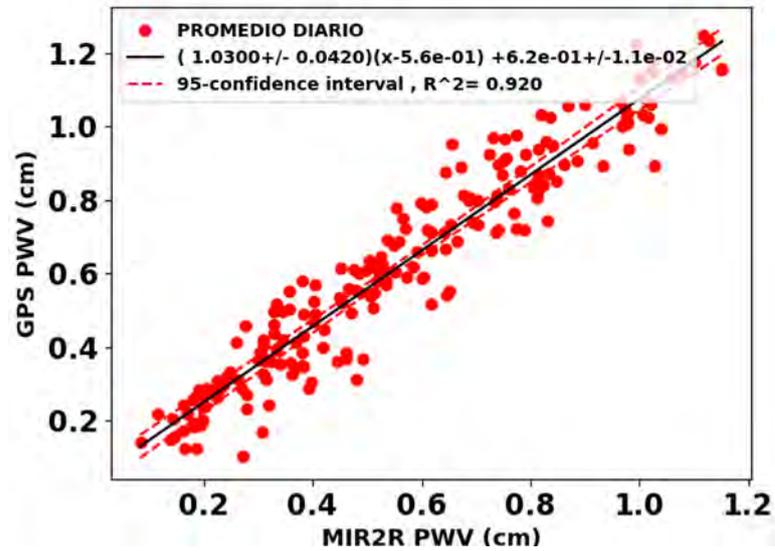


Figura 4.85: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2R y GPS.

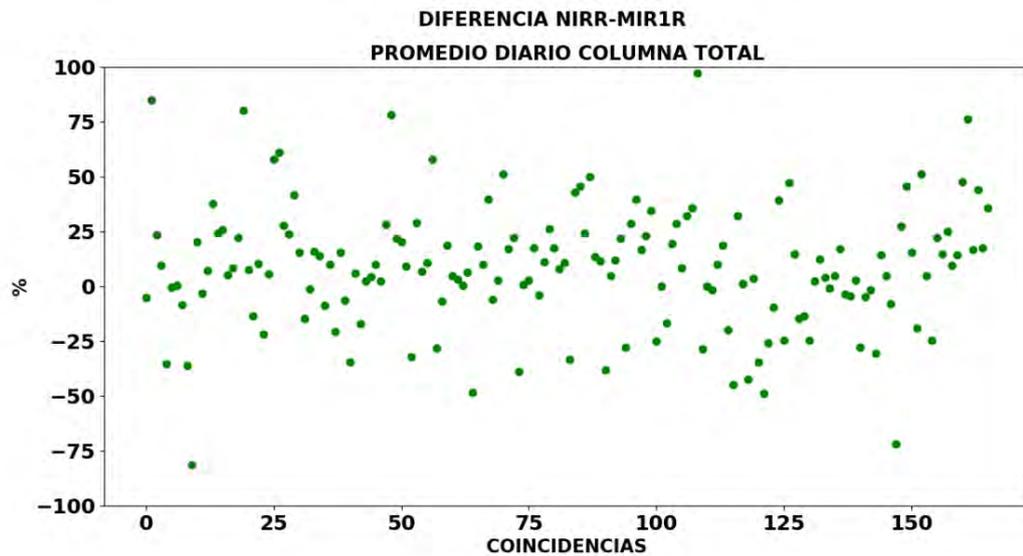


Figura 4.86: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.

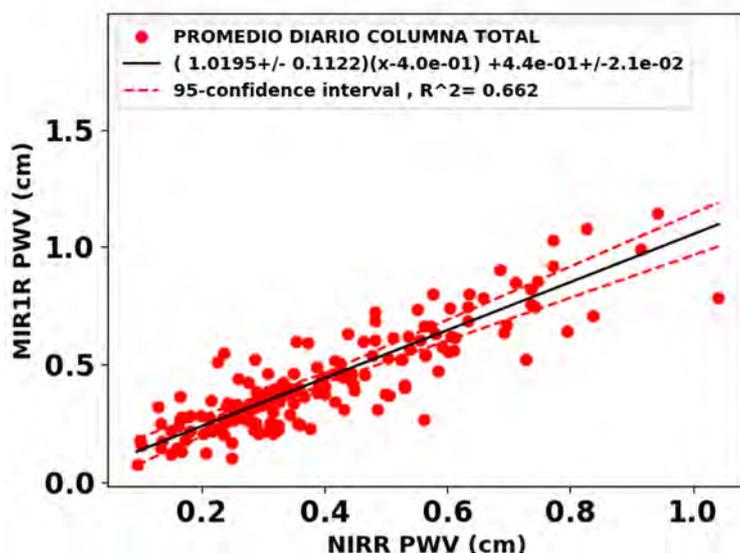


Figura 4.87: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.

do la serie temporal en la Figura 4.88 la diferencia en los valores tuvo una variabilidad de $\pm 75\%$ sin observarse una tendencia hacia húmedos o secos. En la Figura 4.89 se observa que valores < 0.5 cm la diferencia se vuelve más notoria. El valor de R^2 fue de 0.830 y pendiente (m) de 0.9379 ± 0.0652 .

4.7.1.6. Correlación promedio diario MIR2R-MIR1R

La diferencia de la misma región espectral diferente microventena mostró una diferencia total de 16.77%. En la serie temporal de la Figura 4.90 los valores de PWV mostraron una tendencia hacia valores positivos, por lo tanto más húmedos por parte de MIR2R. En la correlación se obtuvo un R^2 de 0.749 con algunos valores de MIR1R que resultaron más húmedos que MIR2R (4.91).

4.8. Correlaciones por hora

Al analizar los promedios por hora se obtuvo un mayor número de elementos en la serie temporal de GPS, seguido de NIR, MIR1 y MIR2. El promedio por hora máxima fue registrado por GPS, seguido del MIR1R, MIR2 y NIR (Tabla 4.8).

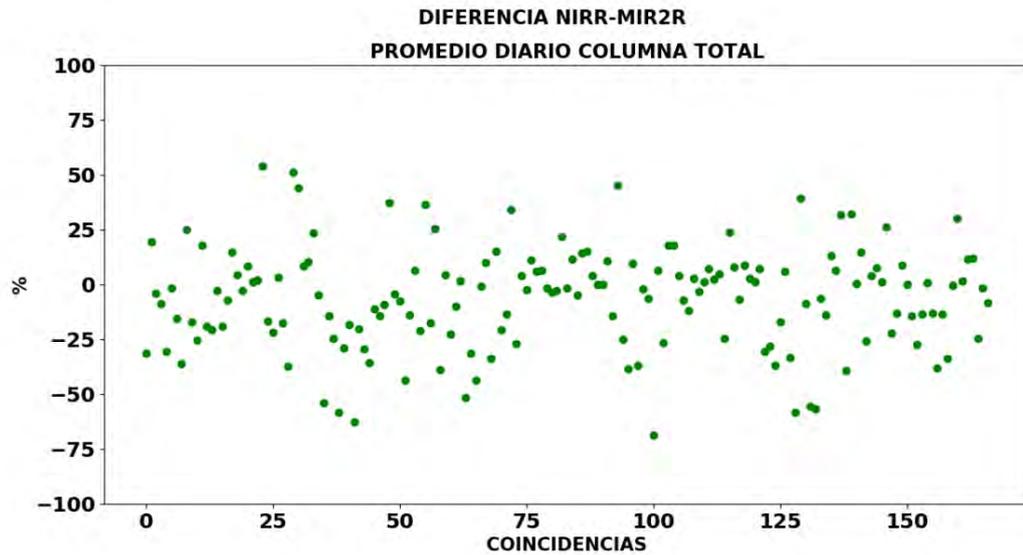


Figura 4.88: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.

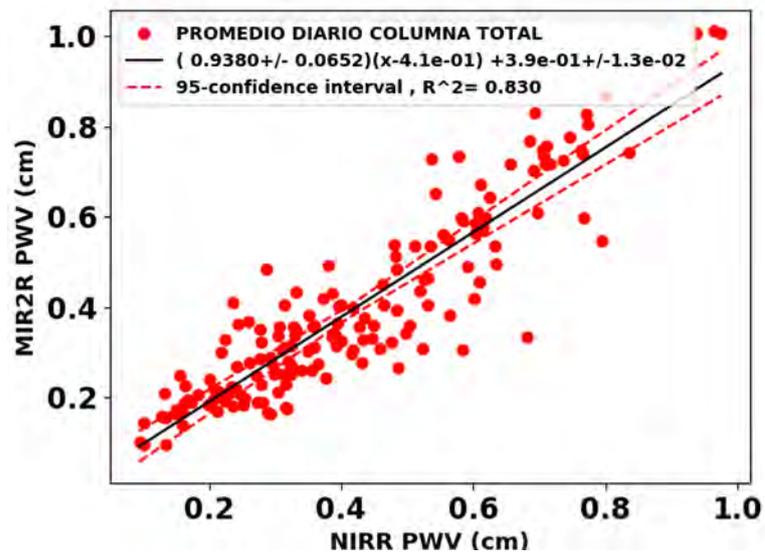


Figura 4.89: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.

4. RESULTADOS

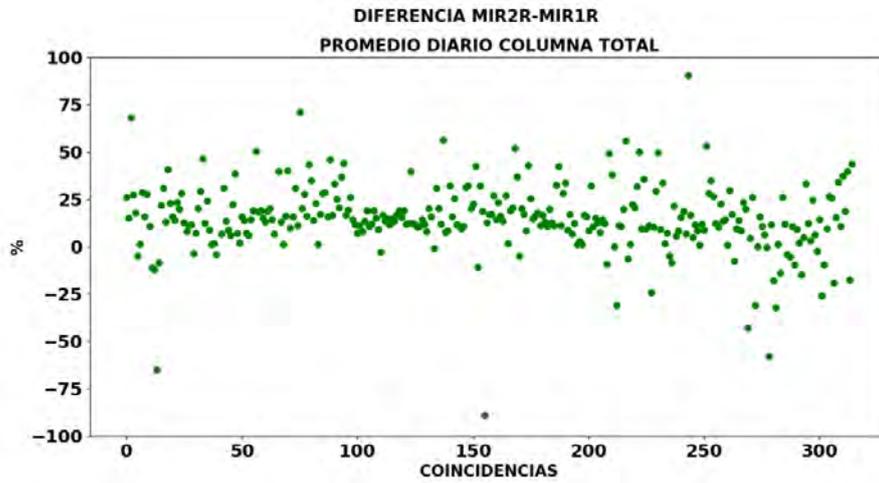


Figura 4.90: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.

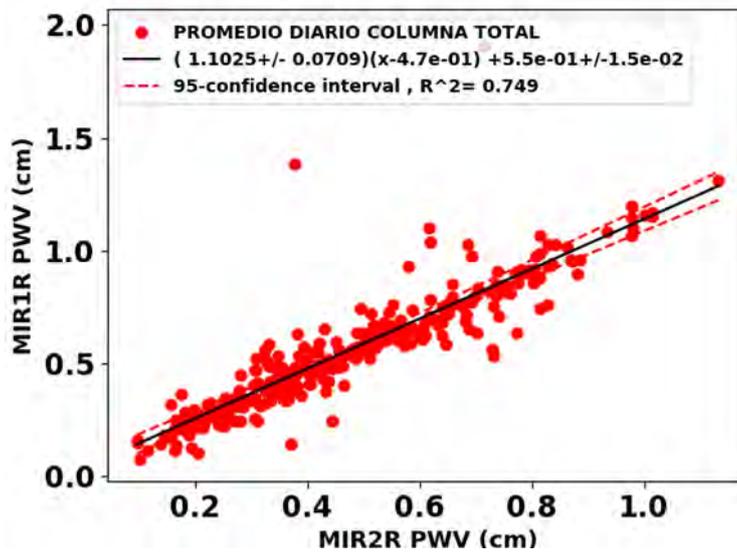


Figura 4.91: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.

Tabla 4.8: Resultado de las correlaciones de los promedios por hora entre los valores de PWV estimados por GPS y los productos espectrales FTIR. La leyenda + + + hace referencia a valores no calculados.

Correlación	Coincidencias	R ²	Pendiente (m)	Diferencia %	SCC %
NIRR-GPS	304	0.944	1.0552±0.0292	7.18	6.93
MIR1R-GPS	415	0.911	0.8580±0.0258	-7.65	-7.95
MIR2R-GPS	555	0.964	0.9981±0.0161	6.95	6.72
NIRR-MIR1R	169	0.782	1.2235±0.0985	13.51	+ + +
NIRR-MIR2R	237	0.973	1.0123±0.0216	-3.78	+ + +
MIR2-MIR1	592	0.816	1.1198±0.0429	16.19	+ + +

4.8.1. Promedio por hora

La correlaciones entre el método GPS y FTIR de los promedios por hora según el criterio de la menor desviación estándar: NIRR-GPS, MIR1R-GPS, MIR2R-GPS. Por otra parte en las regiones espectrales: NIRR-MIR1R, NIRR-MIR2R Y MIR2R-MIR1R.

4.8.1.1. Correlación promedio por hora NIRR-GPS

La diferencia total en la correlación NIRR-GPS en los promedios por hora fue de 7.18 %. Los valores en la serie temporal muestran una variación entre $\pm 25\%$. Resalta una tendencia hacia valores mayores al $+50\%$ entre el intervalo de las 150 y 200 coincidencias, posteriormente se invierte una tendencia a los negativos al final de la serie. La Figura 4.93 muestra una buena correlación entre los valores de ambos métodos con un R² de 0.941 y pendiente de 1.0552±0.0292

4.8.1.2. Correlación promedios por hora MIR1R-GPS

La serie mostró una diferencia total de -7.65 %. Esto indica que los valores de FTIR son más secos que los de GPS. En la serie temporal de la Figura 4.94 la mayoría de los valores se encuentran entre el intervalos de $\pm 25\%$, a partir de las 250 coincidencias los valores presentan una mayor diferencia en ambas direcciones. La R² fue 0.911 y

4. RESULTADOS

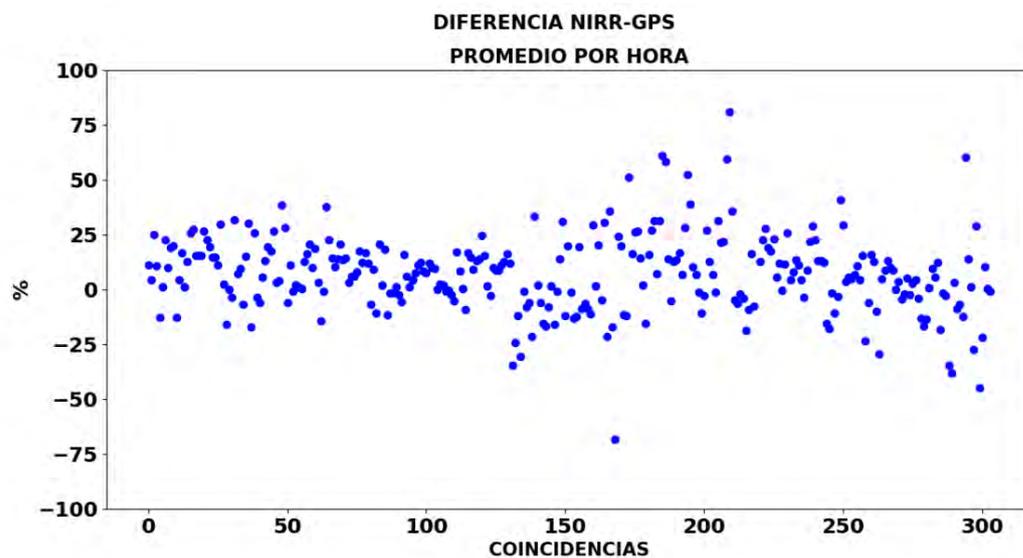


Figura 4.92: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por NIRR y GPS.

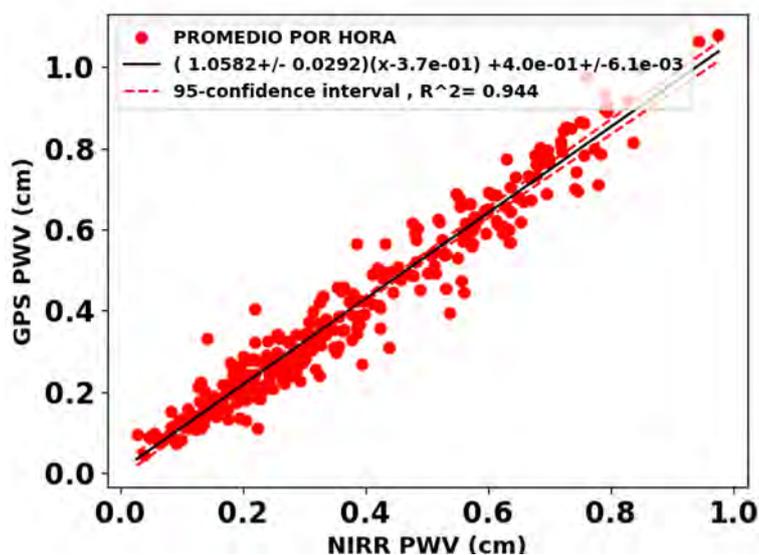


Figura 4.93: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por NIRR y GPS.

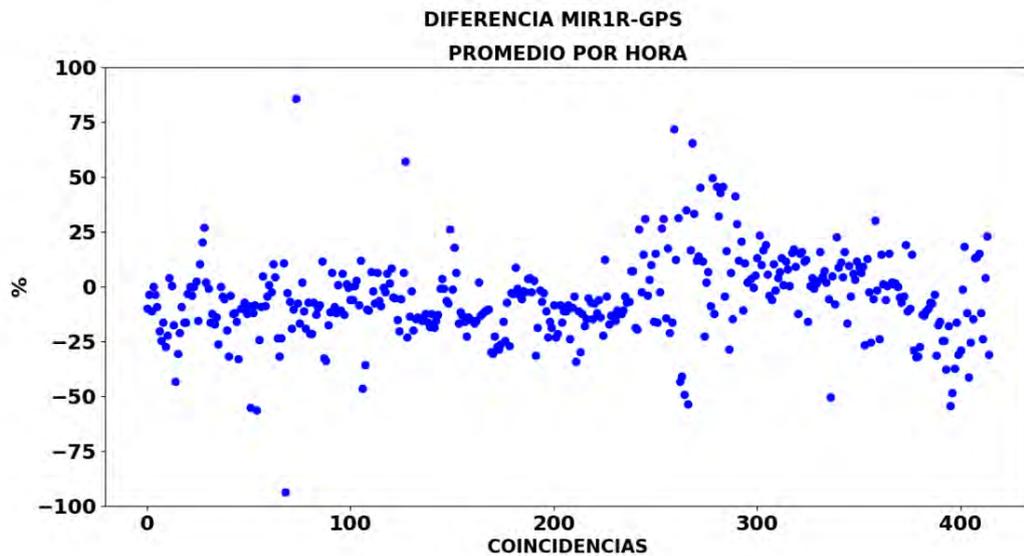


Figura 4.94: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR1R y GPS.

pendiente 0.8580 ± 0.0258 . En la Figura 4.97 resaltan valores FTIR relativamente más húmedos que los de GPS.

4.8.1.3. Correlación promedio por hora MIR2R-GPS

La relación MIR2R-GPS arrojó una diferencia total de 6.95%. La serie temporal muestra una tendencia hacia diferencias positivas, aunque la mayoría de los datos se encuentra centrados en el límite +25%. Además, resaltan los valores que sobrepasan este límite en el intervalo de las 400-500 coincidencias. El valor de R^2 obtenido fue 0.964.

4.8.1.4. Correlación promedios por hora NIRR-MIR1R

La diferencia total entre los productos espectrales NIRR-MIR1R fue de 13.51%, por lo tanto la mayor parte de los valores de FTIR resultaron ser más húmedos que los de GPS. La mayoría de las diferencias se encuentran centradas y tienen como el límite el intervalo +25%. También puede observarse una tendencia a las diferencias negativas en el intervalo de las 100-125 coincidencias. Además de valores en la dirección positiva. El valor de R^2 resultante fue de 0.782. Los valores < 0.6 cm registran una mayor diferencia (Figura 4.99).

4. RESULTADOS

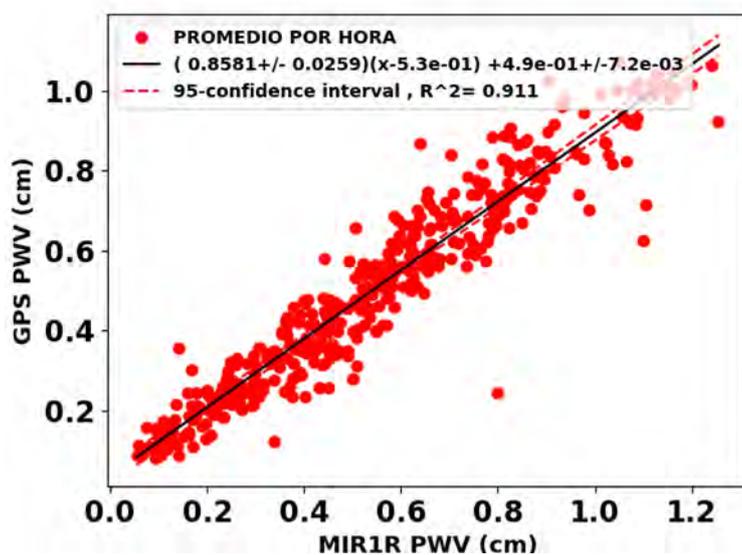


Figura 4.95: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR1R y GPS.

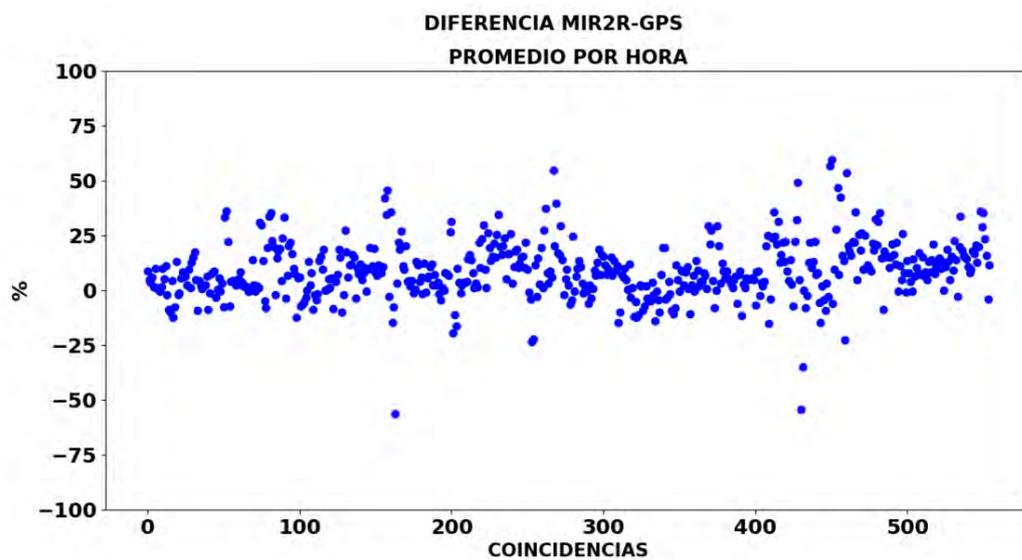


Figura 4.96: Diferencias entre las series temporales de los promedios por hora de PWV obtenidas por MIR2R y GPS.

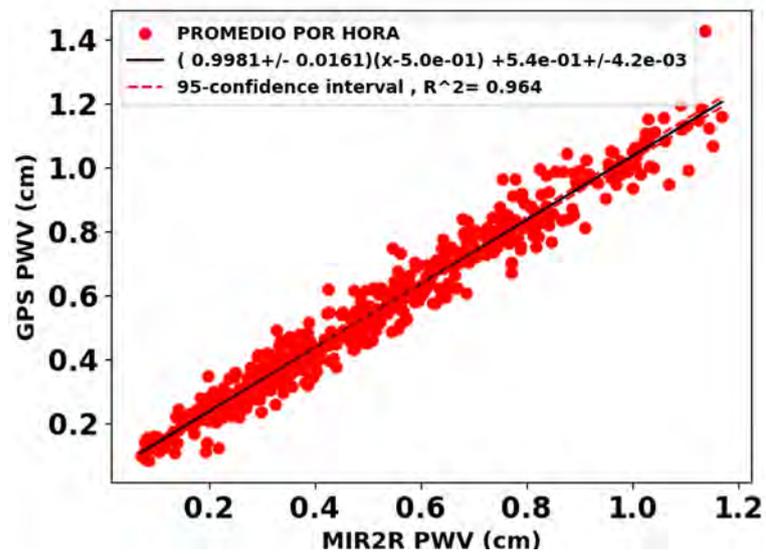


Figura 4.97: Correlación de los promedios por hora entre los valores de PWV obtenidos por MIR2R y GPS.

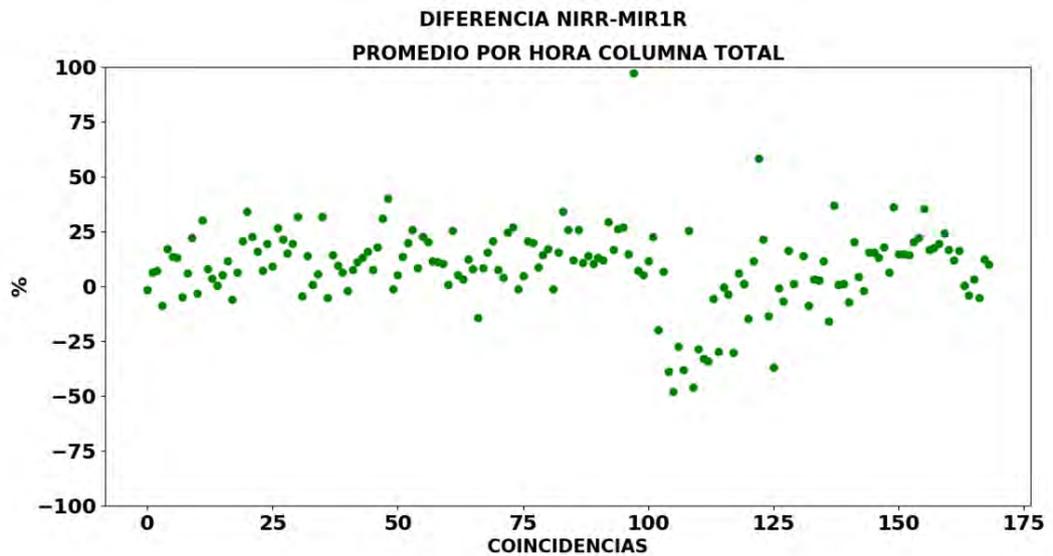


Figura 4.98: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.

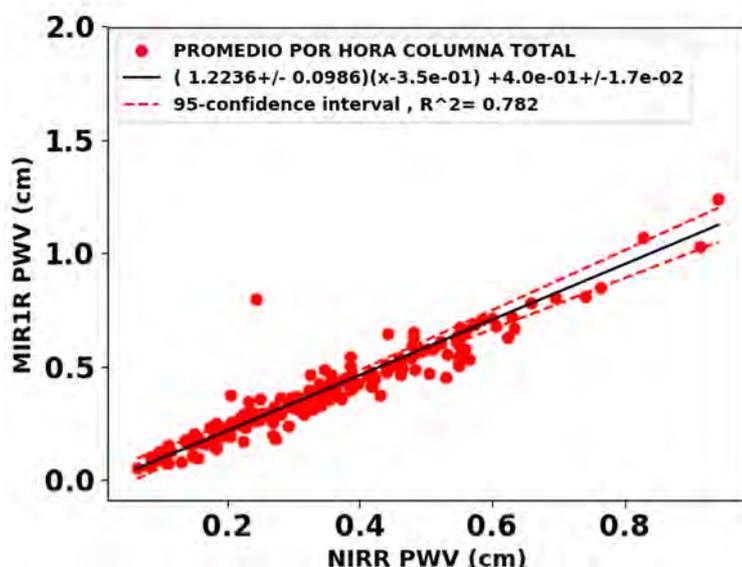


Figura 4.99: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR1R.

4.8.1.5. Correlación promedios por hora NIRR-MIR2R

La relación NIRR con la segunda región espectral MIR mostró una mejor relación. La diferencia total fue de -3.78 %, lo que indica que los valores de NIRR resultaron ser más secos que los de MIR2R. En la Figura 4.100 se aprecia una diferencia con tendencia negativa en el intervalo de 100-150 coincidencias. El coeficiente de correlación R^2 fue de 0.973. En general la mayoría de los valores en la Figura 4.101 muestran buena correlación.

4.8.1.6. Correlación promedio por hora MIR2R-MIR1R

Los valores en esta relación mostraron una diferencia total del 16.6588 %, mostrando que los valores de MIR2R resultaron ser más húmedos que los de MIR1R. La serie temporal muestra una mayor concentración de los datos en la sección +25 %, aunque en el intervalo de las 500 coincidencias los valores de MIR2R son más secos de los de MIR1R (Figura 4.102). El fenómeno anterior puede observarse en la Figura 4.103. En general, la relación muestra la mayor cantidad de datos concentrados en la pendiente.

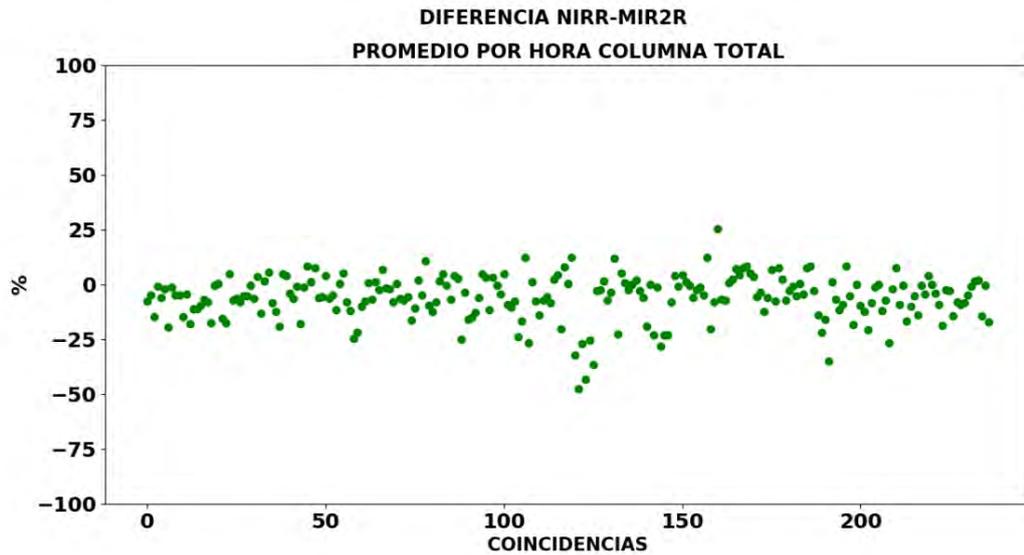


Figura 4.100: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.

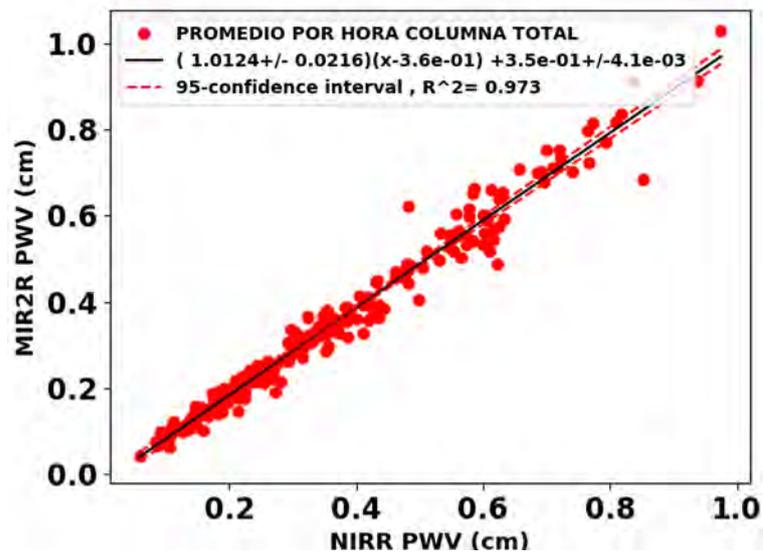


Figura 4.101: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos NIRR y MIR2R.

4. RESULTADOS

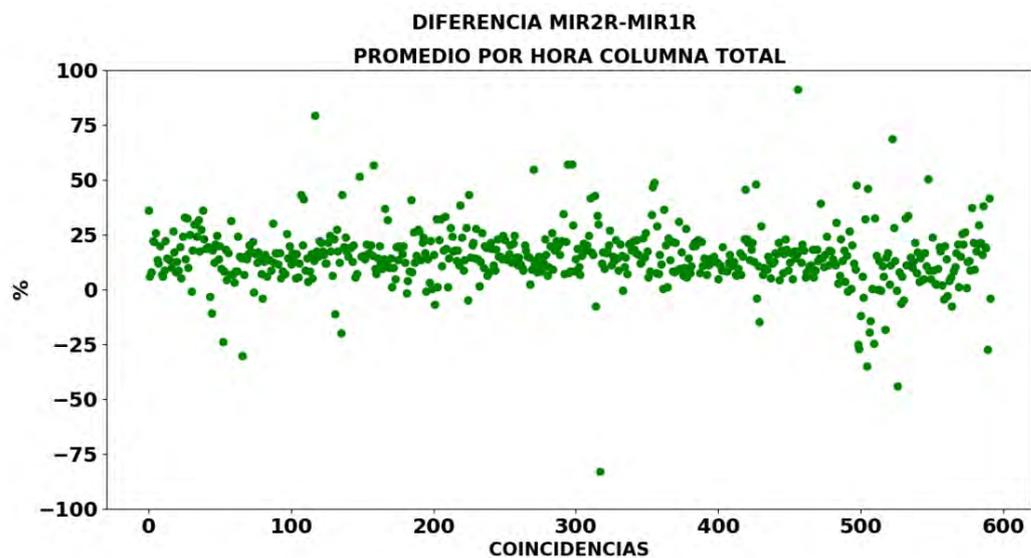


Figura 4.102: Diferencias entre las series temporales de los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.

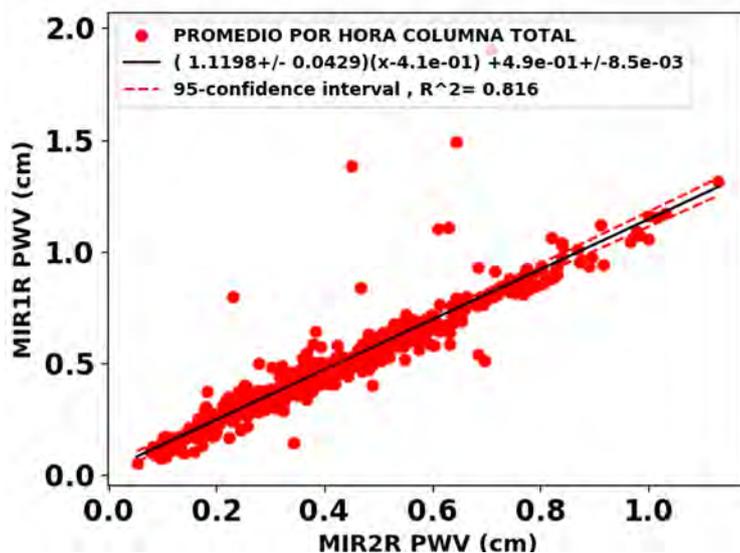


Figura 4.103: Correlación de los promedios por día entre los valores de PWV obtenidos MIR2R y MIR1R.

4.9. Comparación entre regiones espectrales

Al realizar la comparación entre los valores de PWV de las tres regiones espectrales de FTIR y dos opciones de perfil a priori (WACCM o radiosondeos), se debe tomar en cuenta que los valores fueron recuperados con diferentes grados de libertad. En el presente estudio, de una manera práctica, se toma en cuenta la menor diferencia entre las series de datos al comparar con GPS. Aunque el factor de correlación es importante, hay que resaltar que este es alto ($0.9 >$) en las tres correlaciones en promedios por hora (Tabla 4.4).

De los anterior se puede resumir, la región espectral MIR1 (WACCM como a priori) mostró la mejor congruencia con los valores de GPS, con una diferencia de total de 3.17 % y un coeficiente de correlación R^2 de 0.953. No se descartan las otras dos regiones espectrales ya que también mostraron un alto ajuste con los valores de GPS. Las microventanas de esta región espectral se han utilizado para recuperar perfiles de vapor de agua que sirven como perfil a priori en la recuperación de otros gases, por ejemplo CH_4 y HCOH , mostrando que los valores de HCOH poseen buena consistencia estacional con valores de otras técnicas (Vigouroux et al., 2009).

Aunque la región NIR utilizando WACCM como a priori registró valores altos de R^2 en la mayoría de las correlaciones, sus diferencias fueron las mayores. Se debe ser consciente que esta región está conformada por número mayor de microventanas, en estas se absorben diferentes isótopos estables de vapor de agua que han sido recuperados y comparados con mediciones satelitales, mostrando congruencia estacional (Deutscher, 2009).

Considerando las recuperaciones utilizando el radiosondeo como a priori. La región espectral MIR2R registró la mejor congruencia con los valores GPS al obtener el mayor coeficiente de correlación ($R^2=0.964$) y la menor diferencia (6.95 %). Por otro lado, esta misma región espectral obtuvo el mejor ajuste con la región espectral NIRR ($R^2=0.973$ y diferencia de -3.78 %), aunque se observa que los valores registrados por NIRR son relativamente más secos que los de MIR2R. Resultados similares fueron obtenidos por Semenov et al. (2015) al utilizar las microventanas correspondientes a la región MIR2R, comparando los valores obtenidos por FTIR con los obtenidos por radiosondeos, encontrando un alto coeficiente de correlación en las mediciones diarias pero una diferencia relativa de 20 %. Lo anterior demuestra la alta consistencia y calidad en los datos de FTIR y GPS, ya que su coeficiente de correlación es alto y una diferencia de 10.34 % (ver Tabla 4.7).

En general, las tres regiones espectrales y sus dos opciones de recuperación (WACCM o a radiosondeo) mostraron un buen ajuste con los valores obtenidos con GPS. Cabe resaltar que el número de coincidencias es mayor en las recuperaciones utilizando WACCM, mientras que gran parte de las coincidencias entre GPS y las recuperaciones

4. RESULTADOS

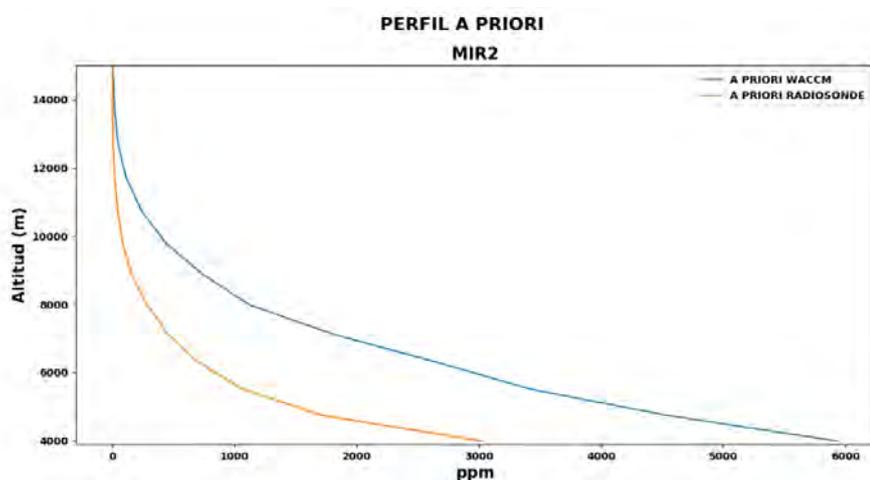


Figura 4.104: Promedio de todos los perfiles a priori en la región MIR2.

usando radiosondeo hacen referencia a valores pequeños de PWV. Lo anterior puede observarse en las figuras de promedios mensuales, la mayor cantidad de recuperaciones tiene lugar entre los meses de enero-febrero y noviembre-diciembre, meses con menor contenidos de vapor de agua en la atmósfera, mientras que la menor cantidad de valores se presenta en los meses de verano cuando el contenido de vapor de agua es mayor.

4.10. Comparación entre perfiles a priori

En esta sección se describe las ventajas y desventajas de utilizar uno de los dos perfiles a priori. Esto se basa en un experimento realizado con los perfiles a priori y de FTIR en la región MIR2.

La Figura 4.104 muestra un promedio de todos los perfiles a priori en la región MIR2. Se observa que el perfil a priori obtenido de radiosondeos es más seco que el perfil de WACCM. Por otra parte, el promedio de los perfiles recuperados a partir de radiosondeos resulta ser más húmedo que el perfil recuperado con WACCM a una altura de 4 000 m., mientras que WACCM continua siendo más húmedo alrededor de los 6 000 m.(Figura 4.105). Esto parece indicar que PROFFIT tiene la capacidad de restringir valores altos de razón de mezcla, el caso de WACCM, y otorga menor restricciones a valores más pequeño, el caso de radiosondeos.

Para obtener una mejor idea acerca del impacto del perfil a priori en las recuperaciones cuando existe poca cantidad de vapor de agua en la atmósfera, se promediaron todos los perfiles a priori y perfiles recuperados antes de las 10 horas.

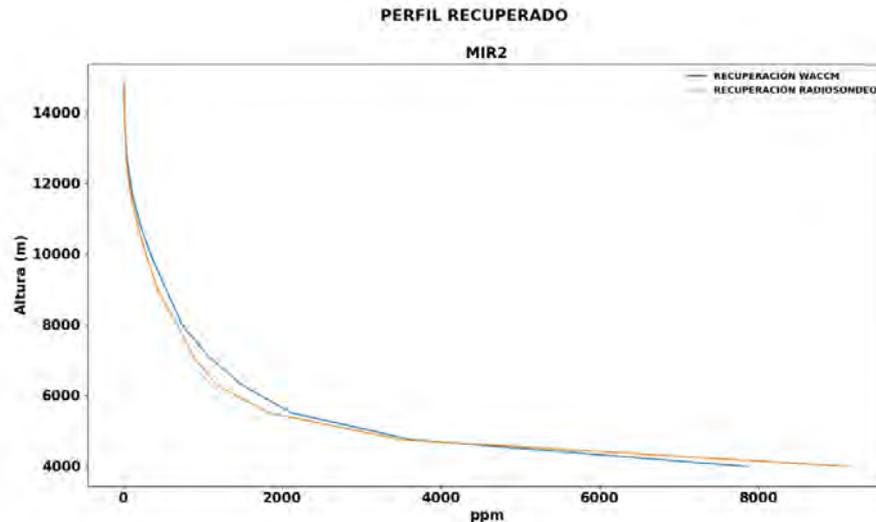


Figura 4.105: Promedio de todos los perfiles recuperados en la región MIR2.

Los resultados muestran que el perfil a priori a partir de radiosondeo continua siendo más seco que el obtenido por WACCM (Figura 4.106), mientras que los perfiles recuperados con radiosondeos son más húmedos que WACCM, aunque este último sigue siendo más húmedo a los 6 000 m. (Figura 4.107).

Al observar las diferencias entre los perfiles a priori y recuperados (Figura 4.108), suavizados por el promedio del averaging kernel de ambas recuperaciones, la recuperación es más húmeda que el a priori en el nivel superior a los 8 000 m, mientras que las recuperaciones a 6 000 m resultan más secas que el a priori, esto también puede observarse a los 4 000 m.

Las diferencias entre los perfiles a priori y recuperados considerando sólo las mediciones antes de las 10 horas muestran un resultado similar. En la Figura 4.109 el perfil recuperado es más seco que el perfil a priori, incluso cuando el contenido de vapor de agua en la atmósfera es poco durante la mañana.

4.11. Comparación entre técnicas

Los valores de PWV medidos por FTIR han resultado ser consistentes con los obtenidos por GPS al comparar la diferencia total con el sesgo de cielo despejado. Se ha estimado que el error total puede ser del 5 % (Semenov et al., 2015) mientras que el error sistemático y aleatorio puede ser de 1-2 % y 3-5 %, respectivamente. Por otra parte, los valores de GPS analizados por GIPSY pueden tener un error de aproximadamente 1-2

4. RESULTADOS

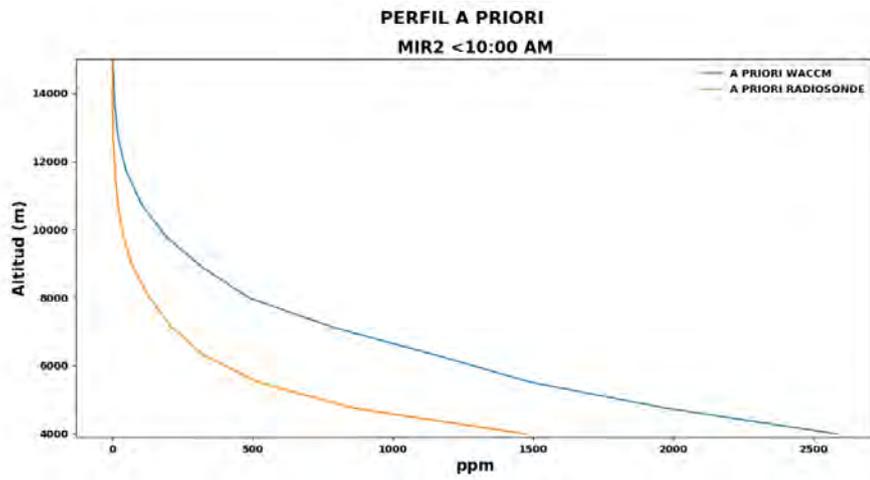


Figura 4.106: Promedio de todos los perfiles a priori en la región MIR2 antes de las 10 horas.

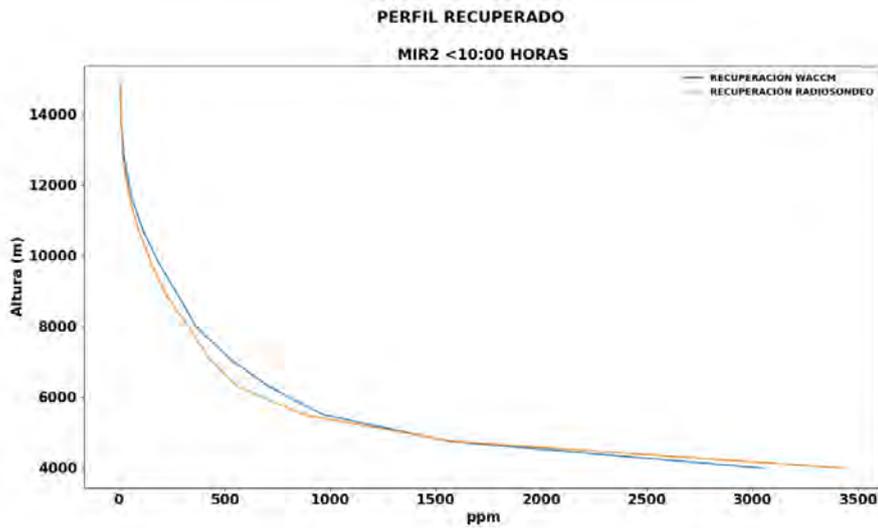


Figura 4.107: Promedio de todos los perfiles recuperados en la región MIR2 antes de las 10 horas.

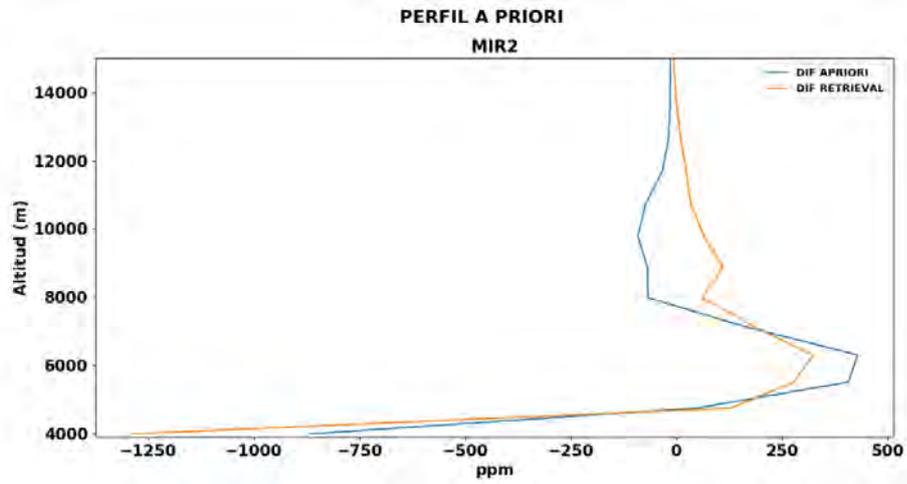


Figura 4.108: Diferencia de todos los perfiles a priori y recuperados en la región MIR2.

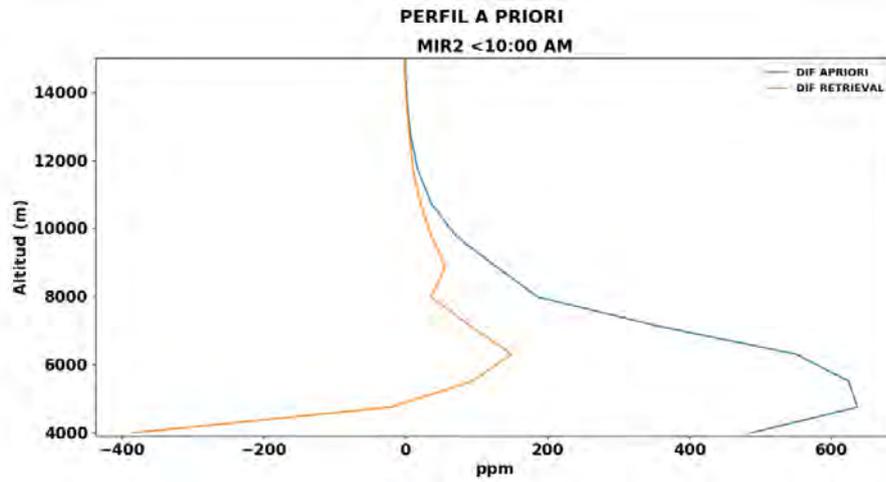


Figura 4.109: Diferencia de todos los perfiles a priori y recuperados en la región MIR2 antes de las 10 horas.

4. RESULTADOS

mm (Serra et al., 2016) en el atraso de la señal. Schneider et al. (2010) registran una diferencia del 10 % entre los valores de FTIR y GPS, con un error que puede llegar al 20 % en condiciones muy secas <3.5 mm.

Existen otros estudio con resultados similares (Buehler et al., 2012; Schneider et al., 2010; Semenov et al., 2015; Tsidu et al., 2015), donde comparan los valores calculados a través de radiosondeos con valores de FTIR, obteniendo una diferencia de 15-20 % debido a la diferencia temporal en las mediciones y a que ambos instrumentos detectan diferentes masas de aire. Buehler et al. (2012) ha registrado una diferencia de aproximadamente 12 % al comparar datos de GPS y radiosondeos, ambos muestran una buena consistencia, aunque existen otros estudio donde las diferencias puede variar en 10-50 % (Schneider et al., 2010). Las recuperaciones usando radiosondeos muestran un buen ajuste ($R^2=0.964$) y una diferencia relativa pequeña (6.95 %) con los valores bajos de PWV por GPS, sólo que el número de coincidencias es menor al obtenido con WACCM. Además tomando en cuenta la restricción de valores altos de PWV por parte de PROFFIT cuando se compara una medición de alto PWV con un a priori de bajo PWV, puede ser la causa de la poca disponibilidad de datos durante el verano y la alta en invierno.

Aunque en el presente estudio no se muestra, valores de FTIR y GPS han sido comparados con valores obtenidos por modelos. Los valores reportado por Tsidu et al. (2015) para FTIR y el reanálisis ERA-Interim muestran sesgo de 0.16 cm entre ambas técnicas. Los valores reportados por Buehler et al. (2012) describen un alto factor de correlación ($R^2=0.979$) y una diferencia de 33.2 % entre los valores de GPS y el reanálisis de ERA-Interim, mostrando que los valores de ERA-Interim son más secos que los registrados por GPS para valores bajos de PWV, y ligeramente más húmedos para valores altos, mientras que Tsidu et al. (2015) registra que este sesgo húmedo puede tomar valores de hasta 0.46 cm con respecto a los valores de GPS.

Por otra parte mediciones obtenidas por sensores satelitales muestra que un sesgo húmedo y seco en los datos obtenidos por AMSU-A y AMSU-B al compararse con GPS, mientras que la comparación con FTIR muestra un gran error aleatorio atribuido a la presencia de nubes (Buehler et al., 2012).

Otros factores importantes son el sesgo de cielo despejado (ecu. 3.2) y la diferencia total (ecu. 3.3). Al comparar ambos valores se observa que son muy similares y que gran parte del error total en ambas técnicas es debido al sesgo que existe entre las mediciones entre días nublados y despejados (Tabla 4.4). Por lo tanto las diferencias entre las regiones espectrales y GPS es $> 1\%$.

La comparaciones de FTIR y radiómetros (Cimel y MFRSR) han registrado diferencias totales de 12.7 % y 17.2 %, respectivamente, mientras que la diferencia con GPS pueden alcanzar hasta 33.9 % y 22.9 % (Schneider et al., 2010). Buehler et al. (2012)

describen gran sesgo entre los valores del radiómetro KIMRA y GPS, argumentando que el radiómetro no la capacidad de distinguir entre vapor y agua líquida. Los trabajos anteriores son un claro ejemplo del sesgo que introduce las mediciones entre días nublados y despejados por parte de ambas técnicas.

Los valores obtenidos por ambas técnicas han resultado ser consistentes con otras, tomando en cuenta que estas poseen métodos de recuperación diferentes, así como ventajas y desventajas. Ya sea midiendo de día o de noche, días despejados o nublados, desde tierra o desde el espacio, todas las técnicas parecen complementarse y pueden llenar huecos en las series de tiempo.

En este estudio se obtuvieron series de tiempo de vapor de agua que fueron comparadas con una serie de otra técnica. Ambas resultaron ser consistentes. Aunque GPS tiene la habilidad de medir durante días nublados, despejados y durante la noche, FTIR tiene la habilidad de obtener estructuras verticales, por lo tanto ambas técnicas pueden ser utilizadas para obtener series de tiempo completas, siempre y cuando se tomen en cuenta los sesgos descritos anteriormente.

Capítulo 5

Conclusiones

Ambos métodos tienen la capacidad de representar los ciclos anuales del vapor de agua. Al parecer los promedios mensuales de FTIR (NIR, MIR1 y MIR2) recuperados por WACCM no parecen mostrar una diferencia. Los altos valores de PWV registrados por GPS son atribuidos a las mediciones en días nublados y prueba la alta variabilidad temporal del vapor de agua. El mejor ajuste de los valores de PWV entre ambas técnicas se observó en los promedios por hora, otra prueba de la alta variabilidad en días con cielo despejado. Los valores de PWV de la región MIR1 recuperados con WACCM mostraron el mejor ajuste con los valores de GPS, pero la menor diferencia por lo tanto se considera como la mejor región espectral para recuperar datos de vapor de agua. No se descartan las otras dos regiones espectrales ya que su ajuste con los valores registrados por GPS fue alto. Los valores de FTIR recuperados con WACCM y GPS mostraron un buen ajuste y que gran parte de la diferencia entre ambas series es atribuida al sesgo que existe entre las mediciones de día despejado y día nublado. Aunque el método GPS posee la gran ventaja de obtener mediciones en días nublados, despejados e incluso durante la noche, el método FTIR permite la recuperación de estructuras verticales, perfiles, factor limitante en el GPS.

Los perfiles verticales de vapor de agua recuperados en la región MIR2 pueden servir como perfil a priori en las recuperaciones de otros gases, ya que el vapor de agua es un gas interferente en la mayor parte de la región espectral infrarroja y porque posee la alta resolución de FTIR, además de ser consistente con valores registrados por otro instrumento. Las series de vapor de agua recuperadas a partir de radiosondeos tienen la capacidad de representar los ciclos anuales a partir de valores que subestiman a los medidos por GPS. Los promedios por mes de las tres regiones espectrales a partir de radiosondeos parecen consistentes, mostrando que no existen diferencias estacionales entre las regiones. Los valores de PWV de la región MIR2R recuperados con radiosondeo mostraron el mejor ajuste y la menor diferencia con los valores de GPS y NIRR. Las recuperaciones utilizando radiosondeos tienen problemas para recuperar valores altos de vapor de agua, esto se ve reflejado en el gran número de datos medidos a principio y fin de año, y su poca disponibilidad a mitad del año. La diferencia entre el mejor

5. CONCLUSIONES

apriori, WACCM o radiosondeo, esta condicionado por el averaging kernel o matriz de sensibilidad, y esta al mismo tiempo por el estado a priori. Lo anterior resulta en una subestimación en los valores recuperados cuando se utiliza el radiosondeo como a priori.

La comparación de dos estrategias de recuperación permite dos conclusiones: 1.) El uso de la última medición (radiosondeo) no mejora la estrategia, porque el ciclo diurno es dominante para el vapor de agua, por lo cual un promedio de un modelo climático es mejor que una medición del mismo día pero de otra hora. 2) Se puede explicar las diferencias entre los resultados de ambas recuperaciones con ayuda de las herramientas de diagnóstico que se conozcan y posteriormente se podría cambiar la estrategia, esto significa pronosticar los resultados de la otra estrategia sin repetir la recuperación. Esto significa que el resultado está mayormente determinado por la atmósfera y contiene una gran parte de objetividad, depende en menor forma de la estrategia de recuperación, podría ser llamado parcialmente subjetivo.

Bibliografía

- Adams, D. K., Barbosa, H. M. J., and Gaitán De Los Ríos, K. P. (2017). A spatio-temporal water vapor–deep convection correlation metric derived from the amazon dense gnss meteorological network. *Monthly Weather Review*, 145(1):279–288. [7](#)
- Adams, D. K., Fernandes, R. M. S., Holub, K. L., Gutman, S. I., Barbosa, H. M. J., Machado, L. A. T., Calheiros, A. J. P., Bennett, R. A., Kursinski, E. R., Sapucci, L. F., et al. (2015). The amazon dense gnss meteorological network: a new approach for examining water vapor and deep convection interactions in the tropics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12):2151–2165. [7](#)
- Adams, D. K., Fernandes, R. M. S., and Maia, J. M. F. (2011). Gnss precipitable water vapor from an amazonian rain forest flux tower. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(10):1192–1198. [9](#)
- Adams, D. K., Kursinski, E. R., and Bennett, R. A. (2009). Gps observations of precipitable water vapor in deep convective tropical regimes. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1100, pages 207–210. AIP. [9](#)
- Akilan, A., Azeez, K. K. A., Balaji, S., Schuh, H., and Srinivas, Y. (2015). Gps derived zenith total delay (ztd) observed at tropical locations in south india during atmospheric storms and depressions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 125:1–7. [6](#)
- Aldana, A. (2011). *Mediciones de la columna de SO₂ con espectroscopia FTIR en la Ciudad de México*. PhD thesis, Tesis Maestría, Ciudad Universitaria, México DF. [8](#)
- Ayllón, T. (2003). Elementos de meteorología y climatología, 2da. Edición, ed. Trillas. [1](#)
- Baylon, J. (2017). *CO₂ en el Centro de México por Espectroscopía Infrarroja de Absorción Solar*. PhD thesis, Ciudad Universitaria, México DF. [8](#)
- Baylon, J. L., Stremme, W., Grutter, M., Hase, F., and Blumenstock, T. (2017). Background co₂ levels and error analysis from ground-based solar absorption ir measure-

BIBLIOGRAFÍA

- ments in central mexico. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(7):2425. [xv](#), [xv](#), [12](#), [13](#)
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., and Ware, R. H. (1992). Gps meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14):15787–15801. [23](#)
- Bezanilla, A., Krüger, A., Stremme, W., and Grutter, M. (2014). Solar absorption infrared spectroscopic measurements over mexico city: Methane enhancements. *Atmósfera*, 27(2):173–183. [8](#)
- Blewitt, G. (1997). Basics of the gps technique: observation equations. *Geodetic applications of GPS*, pages 10–54. [23](#)
- Buehler, S. A., Östman, S., Melsheimer, C., Holl, G., Eliasson, S., John, V. O., Blumenstock, T., Hase, F., Elgered, G., Raffalski, U., et al. (2012). A multi-instrument comparison of integrated water vapour measurements at a high latitude site. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(22):10925–10943. [4](#), [114](#)
- Cess, R. D. (2005). Water vapor feedback in climate models. *Science*, 310(5749):795–796. [1](#)
- Chen, J. and Li, G. (2013). Diurnal variations of ground-based gps-pwv under different solar radiation intensity in the chengdu plain. *Journal of Geodynamics*, 72:81–85. [6](#)
- Coster, A. J., Niell, A. E., Burke, H.-h. K., and Czerwinski, M. G. (1997). The westford water vapor experiment: Use of gps to determine total precipitable water vapor. Technical report, MASSACHUSETTS INST OF TECH LEXINGTON LINCOLN LAB. [2](#)
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., and Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio science*, 20(6):1593–1607. [25](#), [26](#)
- Deutscher, N. M. (2009). Investigating greenhouse gases in australia using atmospheric measurements with fourier transform spectrometry and atmospheric modeling. [32](#), [109](#)
- Elgered, G., Davis, J. L., Herring, T. A., and Shapiro, I. I. (1991). Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B4):6541–6555. [23](#)
- Flores, E. (2003). *Percepción remota de contaminantes atmosféricos mediante dos métodos espectroscópicos en la zona centro de la Ciudad de México: FTIR y DOAS*. PhD thesis, Ciudad Universitaria, México DF. [7](#)

-
- Gisi, M., Hase, F., Dohe, S., and Blumenstock, T. (2011). Camtracker: a new camera controlled high precision solar tracker system for ftir-spectrometers. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(1):47. [xv](#), [12](#)
- Griffiths, P. R. and De Haseth, J. A. (2007). *Fourier transform infrared spectrometry*, volume 171. John Wiley & Sons. [xv](#), [12](#)
- Grutter, M. (2003). Multi-gas analysis of ambient air using ftir spectroscopy over mexico city. *Atmosfera*, 16(1):1–13. [7](#)
- Grutter, M. and Basaldud, M. G. (2006). Técnicas ópticas de percepción remota para la caracterización de gases atmosféricos. *Contaminación atmosférica V*, page 91. [7](#)
- Grutter, M., Flores, E., Basaldud, R., and Ruiz-Suárez, L. G. (2003). Open-path ftir spectroscopic studies of the trace gases over mexico city. *ATMOSPHERIC AND OCEANIC OPTICS C/C OF OPTIKA ATMOSFERA I OKEANA*, 16(3):232–236. [7](#)
- Gui, K., Che, H., Chen, Q., Zeng, Z., Liu, H., Wang, Y., Zheng, Y., Sun, T., Liao, T., Wang, H., et al. (2017). Evaluation of radiosonde, modis-nir-clear, and aernet precipitable water vapor using igs ground-based gps measurements over china. *Atmospheric Research*, 197:461–473. [7](#)
- Hase, F., Hannigan, J. W., Coffey, M. T., Goldman, A., Höpfner, M., Jones, N. B., Rinsland, C. P., and Wood, S. W. (2004). Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based ftir measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 87(1):25–52. [16](#), [31](#), [32](#)
- Herrera, B. (2016). Determinación de columnas totales de amoníaco sobre la ciudad de méxico a partir de espectroscopia ftir de absorción solar. [8](#)
- Hogg, D. C., Guiraud, F. O., and Decker, M. T. (1981). Measurement of excess radio transmission length on earth-space paths. *Astronomy and Astrophysics*, 95:304–307. [23](#)
- Hu, H., Oglesby, R. J., and Saltzman, B. (2000). The relationship between atmospheric water vapor and temperature in simulations of climate change. *Geophysical research letters*, 27(21):3513–3516. [1](#)
- Hulme, M. (1995). Estimating global changes in precipitation. *Weather*, 50(2):34–42. [2](#)
- Joshi, M. M., Charlton, A. J., and Scaife, A. A. (2006). On the influence of stratospheric water vapor changes on the tropospheric circulation. *Geophysical research letters*, 33(9). [2](#)
- Kaniuth, K. and Völksen, C. (2003). Comparison of the bernese and gipsy/oasis ii software systems using euref data. *J Mitt Bundesamtes Kartographie Geodasie*, 29:314–319. [29](#)
-

BIBLIOGRAFÍA

- Kley, D. (2000). Sparc assessment of upper tropospheric and stratospheric water vapor. *WCRP-113, WMO/TD*, 1043. [2](#)
- Koulali, A., Ouazar, D., Bock, O., and Fadil, A. (2012). Study of seasonal-scale atmospheric water cycle with ground-based gps receivers, radiosondes and nwp models over morocco. *Atmospheric research*, 104:273–291. [5](#)
- Kumar, S., Singh, A. K., Prasad, A. K., and Singh, R. P. (2013). Variability of gps derived water vapor and comparison with modis data over the indo-gangetic plains. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 55:11–18. [6](#)
- Li, Z., Muller, J. P., and Cross, P. (2003). Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, gps, and moderate-resolution imaging spectroradiometer measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D20). [28](#)
- Liang, H., Cao, Y., Wan, X., Xu, Z., Wang, H., and Hu, H. (2015). Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national gnss network of china. *Geodesy and Geodynamics*, 6(2):135–142. [6](#), [28](#)
- Lichten, S. M. and Border, J. S. (1987). Strategies for high-precision global positioning system orbit determination. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B12):12751–12762. [29](#)
- Ningombam, S. S., Jade, S., Shrungheshwara, T. S., and Song, H. J. (2016). Validation of water vapor retrieval from moderate resolution imaging spectro-radiometer (modis) in near infrared channels using gps data over iao-hanle, in the trans-himalayan region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 137:76–85. [6](#), [28](#)
- Oki, T. and Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *science*, 313(5790):1068–1072. [2](#)
- Oltmans, S. J. and Hofmann, D. J. (1995). Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude northern hemisphere site from 1981 to 1994. *Nature*, 374(6518):146. [2](#)
- Ortega, I. (2009). *Espectroscopia FTIR de absorción solar y lunar para la determinación en columna de CO en la capa de mezcla de la Ciudad de México*. PhD thesis, Ciudad Universitaria, México DF. [7](#), [14](#)
- Paton-Walsh, C. (2011). Remote sensing of atmospheric trace gases by ground-based solar fourier transform infrared spectroscopy. [16](#)
- Plaza-Medina, E. F., Stremme, W., Bezanilla, A., Grutter, M., Schneider, M., Hase, F., and Blumenstock, T. (2017). Ground-based remote sensing of o₃ by high-and medium-resolution ftir spectrometers over the mexico city basin. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(7):2703. [8](#), [13](#), [14](#)

- Prasad, A. K. and Singh, R. P. (2009). Validation of modis terra, airs, ncep/doe amip-ii reanalysis-2, and aeronet sun photometer derived integrated precipitable water vapor using ground-based gps receivers over india. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D5). [28](#)
- Puviarasan, N., Sharma, A. K., Ranalkar, M., and Giri, R. K. (2015). Onset, advance and withdrawal of southwest monsoon over indian subcontinent: a study from precipitable water measurement using ground based gps receivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 122:45–57. [28](#)
- Resch, G. M. (1984). Water vapor radiometry in geodetic applications. In *Geodetic refraction*, pages 53–84. Springer. [23](#)
- Rodgers, C. D. (2000). *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice*, volume 2. World scientific. [20](#)
- Romps, D. M. (2014). An analytical model for tropical relative humidity. *Journal of Climate*, 27(19):7432–7449. [2](#)
- Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy*, pages 247–251. [25](#)
- Schneider, M., Hase, F., and Blumenstock, T. (2006). Water vapour profiles by ground-based ftir spectroscopy: study for an optimised retrieval and its validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(3):811–830. [3](#), [18](#)
- Schneider, M., Romero, P. M., Hase, F., Blumenstock, T., Cuevas, E., and Ramos, R. (2010). Continuous quality assessment of atmospheric water vapour measurement techniques: Ftir, cimel, mfrsr, gps, and vaisala rs92. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(2):323–338. [4](#), [18](#), [34](#), [114](#)
- Semenov, A. O., Virolainen, Y. A., Timofeyev, Y. M., and Poberovskii, A. V. (2015). Comparison of ground-based ftir and radio sounding measurements of water vapor total content. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 28(2):121–125. [5](#), [32](#), [109](#), [111](#), [114](#)
- Serra, Y. L., Adams, D. K., Minjarez-Sosa, C., Moker Jr, J. M., Arellano, A. F., Castro, C. L., Quintanar, A. I., Alatorre, L., Granados, A., Vazquez, G. E., et al. (2016). The north american monsoon gps transect experiment 2013. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11):2103–2115. [9](#), [114](#)
- Soden, B. J., Jackson, D. L., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., and Huang, X. (2005). The radiative signature of upper tropospheric moistening. *Science*, 310(5749):841–844. [1](#)
- Stremme, W., Grutter, M., Rivera, C., Bezanilla, A., Garcia, A. R., Ortega, I., George, M., Clerbaux, C., Coheur, P., Hurtmans, D., et al. (2013). Top-down estimation of

BIBLIOGRAFÍA

- carbon monoxide emissions from the mexico megacity based on ftir measurements from ground and space. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3):1357–1376. [8](#)
- Stremme, W., Ortega, I., and Grutter, M. (2009). Using ground-based solar and lunar infrared spectroscopy to study the diurnal trend of carbon monoxide in the mexico city boundary layer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(20):8061–8078. [8](#)
- Suparta, W. and Rahman, R. (2016). Spatial interpolation of gps pwv and meteorological variables over the west coast of peninsular malaysia during 2013 klang valley flash flood. *Atmospheric Research*, 168:205–219. [6](#)
- Tarback, E., Lutgens, F., and Tasa, D. (2013). *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. Fuera de colección Out of series. Pearson Educación. [1](#)
- Thayer, G. D. (1974). An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science*, 9(10):803–807. [24](#)
- Tsidu, G. M., Blumenstock, T., and Hase, F. (2015). Observations of precipitable water vapour over complex topography of ethiopia from ground-based gps, ftir, radiosonde and era-interim reanalysis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(8):3277. [5](#), [114](#)
- Uriarte, C. A., de Publicaciones, P. V. G. S. C., and de Meteorología y Climatología, P. V. D. (2009). *Historia del clima de la tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. [1](#)
- Vigouroux, C., Hendrick, F., Stavrakou, T., Dils, B., Smedt, I. D., Hermans, C., Merlaud, A., Scolas, F., Senten, C., Vanhaelewyn, G., et al. (2009). Ground-based ftir and max-doas observations of formaldehyde at réunion island and comparisons with satellite and model data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(24):9523–9544. [32](#), [109](#)
- Vogelmann, H., Sussmann, R., Trickl, T., and Borsdorff, T. (2011). Intercomparison of atmospheric water vapor soundings from the differential absorption lidar (dial) and the solar ftir system on mt. zugspitze. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5):835–841. [4](#)
- Vogelmann, H., Sussmann, R., Trickl, T., and Reichert, A. (2015). Spatiotemporal variability of water vapor investigated using lidar and ftir vertical soundings above the zugspitze. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(6):3135–3148. [4](#)
- Wang, H., Wei, M., Li, G., Zhou, S., and Zeng, Q. (2013). Analysis of precipitable water vapor from gps measurements in chengdu region: Distribution and evolution characteristics in autumn. *Advances in Space Research*, 52(4):656–667. [xv](#), [6](#), [27](#)
- Wang, J., Zhang, L., and Dai, A. (2005). Global estimates of water-vapor-weighted mean temperature of the atmosphere for gps applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D21). [28](#)

- Webb, F. and Zumberge, J. (1997). An introduction to gipsy/oasis. jpl d-11088. *Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA*. [29](#)
- Wentz, F. J. (1997). A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C4):8703–8718. [2](#)
- Wentz, F. J. and Schabel, M. (2000). Precise climate monitoring using complementary satellite data sets. *Nature*, 403(6768):414. [2](#)